

Los músculos artificiales son motores eléctricos que sienten las condiciones de trabajo

Joaquín Arias-Pardilla, Laura Valero, José G. Martínez, Pablo Giménez, Beatriz Berruero Toribio F. Otero, Grupo de Electroquímica, Materiales y Dispositivos Inteligentes (GEMDI).
 Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), ETSII, Campus Alfonso XIII, Aulario II, 30203, Cartagena (Murcia), España.
 Teléfono: 968325591
 E-mail: toribio.fotero@upct.es

Resumen. Los actuadores de bicapa polipirrol-DBS- ClO_4^- /polímero no conductor se comportan como dispositivos electro-químico-mecánicos. Esto supone que al estar controlado su movimiento de flexión por una reacción electroquímica, cualquier magnitud física o química que afecte al equilibrio químico, modificará su comportamiento a través de la energía eléctrica consumida durante la actuación, como por ejemplo la corriente aplicada o la temperatura. Esta característica convierte a estos dispositivos en sensores de las condiciones ambientales y actuadores simultáneamente.

1 Introducción

En los últimos años se están realizando grandes esfuerzos para sintetizar motores moleculares y organizarlos en estructuras regulares para conseguir dispositivos nanoscópicos, microscópicos o macroscópicos [1]. Entre otras posibilidades para fabricar estos dispositivos se encuentran los polímeros conductores en los que el movimiento conformacional de sus cadenas se encuentra bajo control de reacciones electroquímicas, lo que les convierte en actuadores electro-químico-mecánicos [2, 3]. Al tratarse de un proceso electroquímico, cualquier estado de oxidación determina un equilibrio químico caracterizado por un potencial de equilibrio. Cualquier magnitud física (temperatura, presión, corriente aplicada) o química (concentración del electrolito) afecta al equilibrio modificando el potencial eléctrico, el cual, puede ser utilizado como sensor de esa magnitud [2, 4].

2 Experimental

2.1 Reactivos

El pirrol (Fluka) utilizado fue purificado por destilación a vacío utilizando una bomba de vacío de diafragma MZ 2C SCHOTT y guardado en atmósfera de nitrógeno a -10°C . El LiClO_4 anhidro (Fluka) y la solución de ácido dodecibencenosulfónico (70 % en peso en 2-propanol) (DBSA) (Aldrich) fueron utilizados como se recibieron. Se utilizó agua ultrapura obtenida de un equipo Millipore Milli-Q.

2.2 Preparación de las películas

Las películas de polipirrol fueron sintetizadas a temperatura ambiente ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) en una celda electroquímica de un único compartimento en ausencia de luz a partir de una disolución acuosa de 0,1 M LiClO_4 , 0,1 M DBSA y 0,1 M pirrol. El

electrodo de trabajo utilizado fue una placa de acero inoxidable AISI 316 con una superficie de 5 cm^2 . Como contraelectrodos se utilizaron dos placas de 10 cm^2 del mismo material, colocadas simétricamente a ambos lados del electrodo de trabajo para obtener una distribución uniforme del campo eléctrico. La película de polipirrol se generó aplicando una corriente constante de $2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ durante 2 horas, obteniendo una película completamente uniforme. Tras la generación y para eliminar el DBSA y el LiClO_4 de la superficie de la película se sumerge en agua desionizada durante 24 horas. En cada generación se obtienen dos películas de 5 cm^2 con una masa de $30 \pm 2 \text{ mg}$ cada una y un espesor de $70 \pm 10 \mu\text{m}$ [5]. La masa se obtuvo mediante una balanza de precisión Sartorius SC2 con una incertidumbre de $\pm 0.1 \mu\text{g}$ y el espesor mediante un micrómetro electrónico digital COMECTA con una precisión de $\pm 1 \mu\text{m}$. Todos los estudios electroquímicos se realizaron con un potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 100 controlado por ordenador mediante el programa GPES.

2.3 Construcción y caracterización de los actuadores

Los actuadores utilizados se construyeron uniendo una película de polipirrol/DBS/ ClO_4^- con una cinta adhesiva de doble cara no conductora 3M sensible a la presión.

La caracterización de los dispositivos se realizó en una celda electroquímica de un único compartimento con una disolución acuosa 0,1 M en LiClO_4 y utilizando un electrodo de referencia de Ag/AgCl , para seguir el potencial de dispositivo durante el movimiento aplicando distintas corrientes constantes. La energía eléctrica (E_e) consumida durante la oxidación/reducción se calcula como $E_e = i \int E \cdot dt$,

siendo i la densidad de corriente constante, E el potencial y t el tiempo.

En los experimentos en los que se estudia el efecto de la temperatura del electrolito, se utilizó un criostato Julabo T25 para controlar la temperatura.

3 Resultados y discusión

3.1 Movimiento de los actuadores

La figura 1 muestra el movimiento de flexión que presenta el dispositivo de bicapa fabricado uniendo la película de polímero conductor a la cinta no conductora. Partiendo de la posición vertical al aplicar una corriente anódica, se produce la flexión del dispositivo en el sentido de las agujas del reloj, este movimiento es inverso si se cambia el signo de la corriente aplicada.

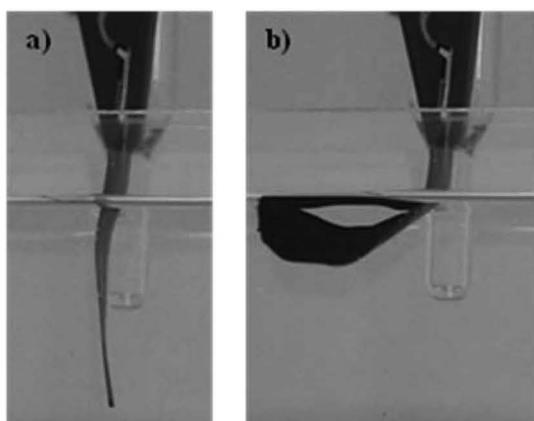
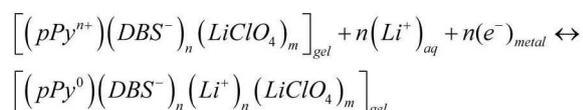


Figura 1: Movimiento de flexión de 90 grados de la bicapa (cinta adhesiva en la parte derecha y polipirrol en la izquierda) en disolución acuosa de 0,1 M LiClO_4 al aplicar una corriente anódica.

El movimiento de estos dispositivos se origina en la entrada y salida de especies durante los procesos de oxidación/reducción que va acompañado de un aumento y disminución de su volumen. Concretamente en este caso se produce la entrada de cationes de la disolución electrolítica durante la reducción y su expulsión durante la oxidación, según la siguiente reacción:



donde los subíndices “gel” y “aq” significan medio gel y acuoso, respectivamente.

3.2 Sensores de la corriente aplicada

La figura 2 muestra los cronopotenciogramas obtenidos tras aplicar distintas corrientes anódicas/catódicas en el intervalo ± 1.5 a ± 15 mA, durante el tiempo necesario para que el dispositivo realice un movimiento angular de 30 grados ($\pi/6$).

Por ejemplo, aplicando 1.5 mA el tiempo necesario es 180 segundos mientras que aplicando 15 mA sólo son necesarios 18 segundos. Como ocurre en los motores eléctricos tradicionales, donde aumentando la corriente se observa un aumento de la velocidad.

Las medidas obtenidas indican que las corrientes mayores provocan mayores saltos iniciales de potencial. Este salto inicial está relacionado con las distintas resistencias presentes en el sistema: resistencia de la película, resistencia interfacial debido al intercambio de iones o resistencia de la disolución. Tras este cambio inicial, el potencial aumenta o disminuye al aplicar corrientes anódicas o catódicas, respectivamente, siguiendo el proceso electroquímico.

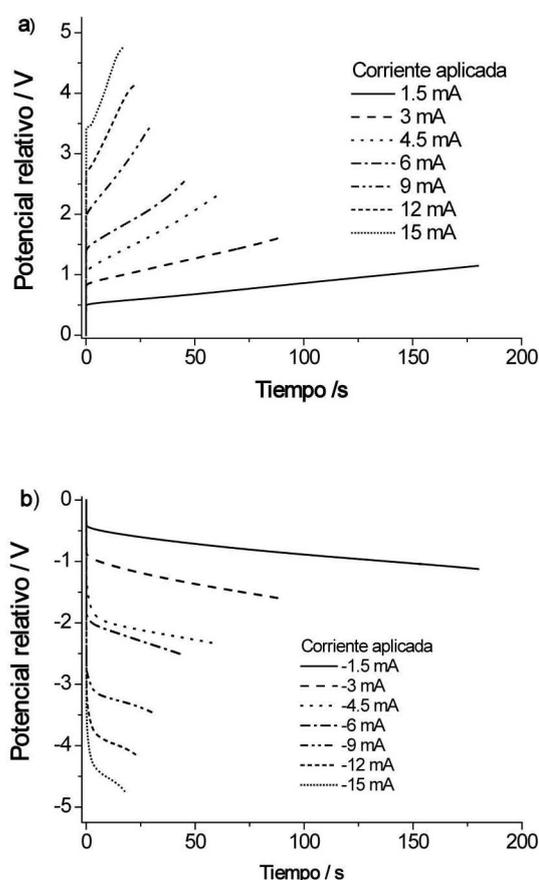


Figura 2: Cronopotenciogramas obtenidos al aplicar las corrientes indicadas al dispositivo bicapa, para describir un movimiento angular de 30 grados ($\pi/6$ radianes) en una disolución 0,1 M LiClO_4 .

La figura 3 muestra la variación de la energía eléctrica en función de la corriente aplicada. Como se puede observar se obtiene un buen ajuste lineal tanto en el caso de las corrientes anódicas como catódicas. Además los valores de energía específica (por g de polímero conductor) obtenidos para un mismo valor (valor absoluto) de corriente anódica y catódica es muy similar (en valor absoluto), lo que indica la gran reversibilidad de los procesos de oxidación/reducción en estos materiales.

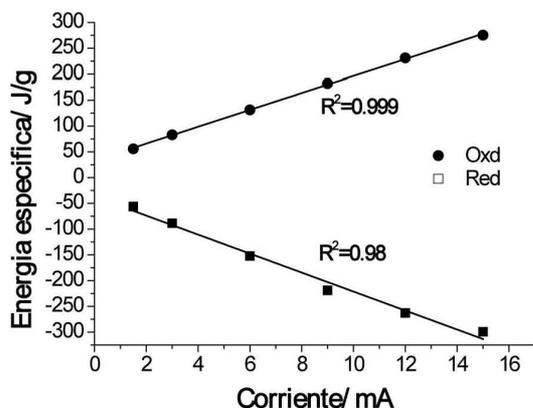


Figura 3: Carga eléctrica consumida por el actuador de bicapa para realizar un movimiento de 30 grados ($\pi/6$ radianes) al aplicar distintas corrientes anódicas y catódicas.

3.2 Sensores de la temperatura

La velocidad de reacción de cualquier proceso electroquímico como es la oxidación/reducción de los polímeros conductores debe aumentar al utilizar temperaturas mayores, debido a la dependencia del valor del coeficiente de velocidad con la temperatura en la ecuación de Arrhenius. Esto es equivalente a decir que trabajando a una velocidad de reacción constante (aplicando una corriente constante) es de esperar que la reacción ocurra a menores potenciales (menor resistencia) al aumentar la temperatura. Para comprobar este aspecto, se estudió la energía consumida por el dispositivo para realizar un mismo desplazamiento angular (30 grados), aplicando una misma corriente (1.5 mA) a distintas temperaturas de la disolución del electrolito.

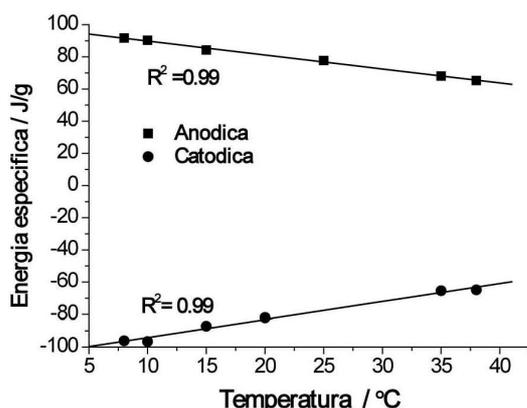


Figura 4: Evolución de la energía eléctrica consumida en un movimiento de 30 grados para distintas temperaturas desde 8 a 38°C.

Como puede observarse en la figura 4, el valor de energía específica (en valor absoluto) necesaria para realizar el mismo desplazamiento disminuye conforme aumenta la temperatura de forma lineal. Como ya se observó anteriormente en el caso de las corrientes aplicadas, la energía consumida durante la

oxidación y reducción a una misma temperatura consume la misma energía en valor absoluto.

4 Conclusiones

Las bicapas polipirrol-DBS- ClO_4^- /cinta no conductora son máquinas eléctricas, en las que el movimiento angular macroscópico está controlado por reacciones electroquímicas. En estos dispositivos, la velocidad angular está bajo control de la corriente aplicada, por lo que puede ser acelerado o disminuido variando su valor. Estos dispositivos son tanto sensores como actuadores de forma simultánea, es decir, al aplicar una corriente, el dispositivo se mueve y ofrece un valor de potencial en función de las condiciones ambientales. La variación de cualquier magnitud física o química que afecte al valor del potencial del dispositivo, es susceptible de ser determinada a partir de la energía consumida para realizar un determinado movimiento. En este trabajo se ha demostrado esta capacidad sensora para la corriente aplicada o la temperatura de la disolución eléctrica, pero también se puede determinar la concentración del electrolito, o el peso arrastrado por el músculo, entre otras.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida del Gobierno de España (MICINN) Proyecto MAT2008-06702, Fundación Séneca Proyecto 08684/PI/08, Consejería de Educación de Murcia, Plan Regional de Ciencia y Tecnología 2007-2010. Beatriz Berruero agradece a la Fundación Séneca por una beca asociada a la realización de Proyectos de I+D, innovación y Transferencia de Tecnología. J. Arias-Pardilla agradece al MICINN una beca Juan de la Cierva JCI-2008-02022.

Referencias

- [1] E.R. Kay, D.A. Leigh, F. Zerbetto. "Synthetic molecular motors and mechanical machines". *Angew. Chem. Int. Edit.*, 46 72-191 (2007).
- [2] T.F. Otero. "Soft, wet, and reactive polymers. Sensing artificial muscles and conformational energy". *J. Mater. Chem.*, 19 681-689 (2009).
- [3] M.T. Cortes, J.C. Moreno. "Artificial muscles based on conducting polymers". *E-Polymers*, 41 1-42 (2003).
- [4] T.F. Otero, Artificial Muscles, Sensing and Multifunctionality, in: M. Shahinpoor, H.-J. Schenider (Eds.) *Intelligent Materials*, Royal Society of Chemistry, Cambridge (U.K.), pp. 142-190, 2008.
- [5] L. Valero, J. Arias-Pardilla, M. Smit, J. Cauich-Rodríguez, T.F. Otero. "Polypyrrole Free-Standing electrodes sense temperature or current during reaction". *Polym. Int.*, 59 337-342 (2009).