

Músculos artificiales: Motores sin termómetros, encóders o sensores de corriente pero capaces de sentir la temperatura, la corriente, la posición o el trabajo mecánico realizado

José G. Martínez, Toribio F. Otero

Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación. Área de Química-Física.
Universidad Politécnica de Cartagena. Aulario II. C/ Carlos III, S/N, 30203, Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968325591
E-mail: jgabriel.martinez@upct.es

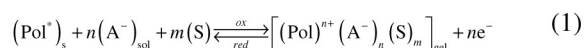
Resumen. *Un sistema de control en lazo cerrado está compuesto por un actuador, capaz de variar la variable que se desea controlar, un controlador, que comanda al actuador y un sensor, capaz de obtener información sobre la variable a controlar de forma que el controlador puede comandar al actuador de forma adecuada. En este trabajo se presentan una serie de materiales y dispositivos basados en la electroquímica de polímeros conductores en los que el actuador es capaz de sentir las variables de su entorno (concentración, temperatura, corriente eléctrica aplicada o trabajo mecánico que se encuentra realizando para mover un determinado objeto), sin la necesidad de un sensor adicional.*

1. Introducción

Cuando se pretende controlar un proceso, es necesario tener información acerca del mismo. En el caso de que exista la posibilidad de perturbaciones externas desconocidas tanto en momento como en forma, dicha información no puede ser totalmente conocida a priori, por lo que se hace necesaria la utilización de sensores, en lo que se conoce como un sistema de control en lazo cerrado [1].

Con el fin de controlar un motor es muy frecuente la utilización de elementos sensores como por ejemplo encóders capaces de determinar tanto la velocidad como la posición del mismo, así como sensores de corriente eléctrica o temperatura con el fin de conocer el régimen de actuación del motor en un momento dado.

Los músculos artificiales basados en la electroquímica de polímeros conductores son actuadores que originan un movimiento mecánico (o una fuerza) y que funcionan cuando una corriente eléctrica llega al músculo, dicha corriente origina una reacción química y ésta a su vez provoca cambios de volumen, de forma similar a como ocurre en los músculos de los seres vivos, en los que un impulso nervioso llega a través de los nervios, generando la reacción del ATP y ésta a su vez provocando cambios de volumen. La reacción electroquímica que da origen al cambio de volumen, puede ser descrita para polímeros conductores con intercambio de aniones como:



donde los subíndices indican s, sólido, sol, en disolución; Pol^+ indica los centros activos en el polímero, entendidos como aquellos puntos en los que se almacenará una carga positiva tras la oxidación, A^- indica los aniones intercambiados con el medio para mantener la electroneutralidad, S representan las m moléculas de disolvente que se intercambian para mantener el equilibrio osmótico en un gel (indicado por el subíndice gel) y n representa a ambos, el número de electrones que han sido extraídos de las cadenas poliméricas durante la oxidación y el número de aniones que se intercambian para mantener la electroneutralidad.

2. Principios de funcionamiento de músculos artificiales

Cuando se aplica una corriente eléctrica a un músculo artificial, la reacción (1) comienza a producirse, variando la composición del gel (variando el número de centros activos oxidados, el número de contraiones o moléculas de disolvente en el mismo), así como las propiedades del mismo. Una de las propiedades que varía es el volumen, permitiendo la fabricación de actuadores electro-químico-mecánicos (músculos artificiales).

A la vez que se aplica una corriente, es posible medir el potencial muscular (potencial entre los dos cables utilizados para cerrar el circuito), fig. 1.

Debido a que el origen de la actuación es la reacción electroquímica (1), cada una de las variables que afecten a dicha reacción, afectarán a la propia actuación, así como a la respuesta del potencial medido. De esta forma, dicho potencial ofrece información de todas las variables que tienen influencia en la reacción (1).

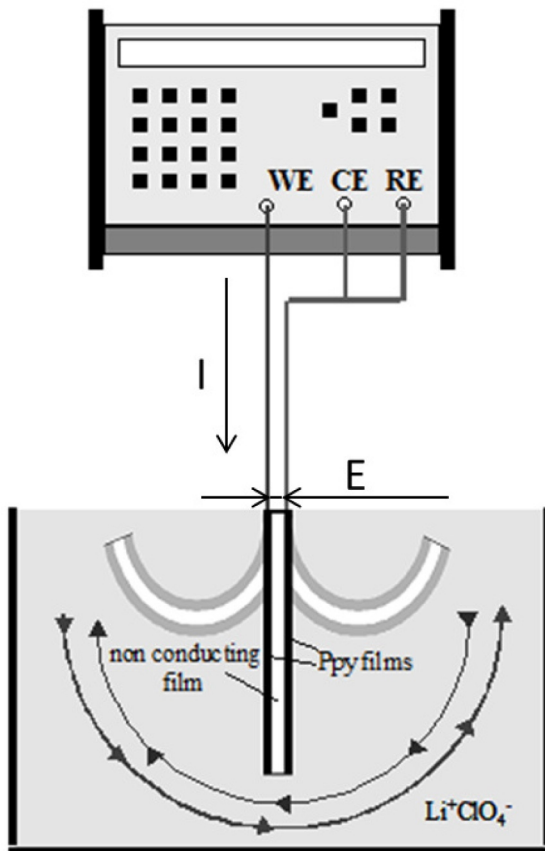


Fig. 1: Esquema de conexión para el estudio de los músculos artificiales.

Así, estudiando la reacción electroquímica (1), a partir de los principios de cinética química y electroquímica, así como de ciencia de los polímeros fue posible la obtención de la relación matemática entre cada una de las variables que afectan a la reacción y al potencial medido [2]:

$$E(t) = \sum E_n(t) p_n(t) \quad (2)$$

donde $p_n(t)$ es la función pulso unitario, tomando valor igual a uno en un intervalo de tiempo, y cero en el resto de valores y [3],

$$E_n(t) = E_0 + (n-1)\Delta E + i_a Z + \frac{RT}{(1-\alpha)F} \left\{ \ln\left(\frac{i_a}{FV}\right) - d \ln[A^-] - e \ln\left([Pol^*]_{inicial} - \frac{i_a t}{FV}\right) - \ln k_{a0} \right\} \quad (3)$$

con E_0 el potencial estándar de la reacción, n es el número de electrones arrancados de cada una de las cadenas poliméricas hasta un determinado momento durante el proceso de oxidación, ΔE es el incremento sufrido en el potencial debido al incremento de energía necesario para arrancar un nuevo electrón, R es la constante universal de los gases ($R=8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), T es la temperatura, i_a es la corriente anódica aplicada, Z es la impedancia del

sistema electroquímico, F es la constante de Faraday ($F=96485 \text{ C mol}^{-1}$), α es el coeficiente de simetría de la reacción, V es el volumen de material electroactivo, d y e son los órdenes de reacción asociados a la concentración de contraiones en disolución $[A^-]$ y concentración de centros activos en el polímero $[Pol^*]$ respectivamente y k_{a0} es el factor pre-exponencial.

A partir de la ecuación (3), es posible obtener las diversas relaciones que existen entre las variables experimentales y el potencial medido. Así:

- En el caso de que todas las variables experimentales sean mantenidas constantes, excepto la temperatura, se espera una variación lineal del potencial alcanzado respecto a la temperatura:

$$E_n(t) = M + NT \quad (4)$$

donde M y N son constantes.

- En el caso de que todas las variables experimentales sean mantenidas constantes, excepto la concentración de electrolito, se espera una variación semilogarítmica del potencial alcanzado respecto a la concentración:

$$E_n(t) = M' + N' \ln[A^-] \quad (5)$$

donde M' y N' son constantes.

- En el caso de que todas las variables experimentales sean mantenidas constantes, excepto la corriente eléctrica aplicada, se espera una variación casi lineal del potencial alcanzado respecto a la corriente aplicada [3]:

$$E_n(t) = M'' + N'' i_a \quad (6)$$

donde M'' y N'' son constantes.

Una vez obtenidas las ecuaciones, se comprobó que las ecuaciones 4-6 se ajustaban de forma adecuada a los resultados experimentales (Fig. 2). Para ello, se realizaron experimentos moviendo un músculo artificial de polipirrol/ ClO_4 desde una misma posición inicial hasta una misma posición final, aplicando una corriente eléctrica constante de 0.75 mA en una disolución acuosa 1 M LiClO_4 (ver detalles experimentales en [3]).

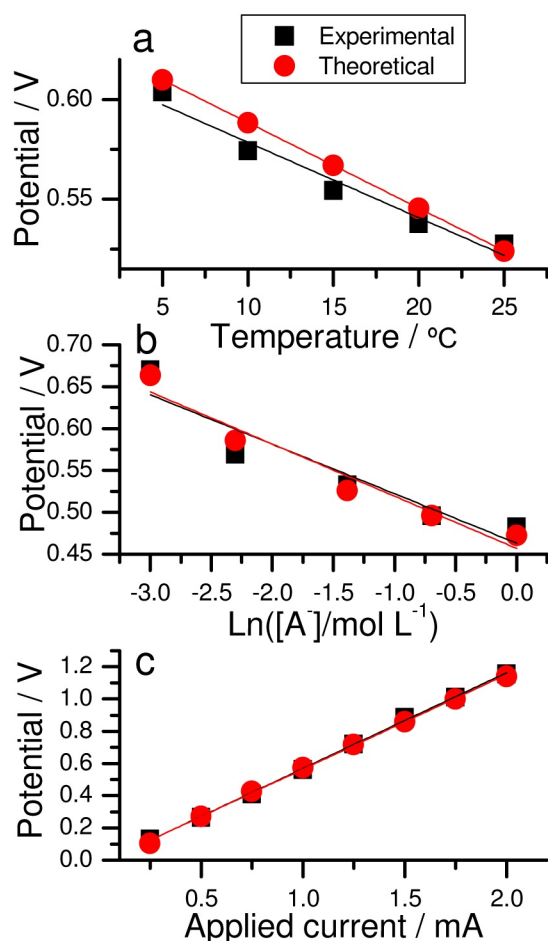


Fig. 2: Curvas de calibración de sensores basados en el potencial alcanzado: (a) Curva de calibración de un sensor de temperatura obtenida cuando se consumió una carga de 22.5 mC. (b) Curva de calibración de un sensor de concentración obtenida cuando se consumió una carga de 15 mC. (c) Curva de calibración de un sensor de corriente obtenida cuando se consumió una carga de 17.73 mC.

Las relaciones lineales o semilogarítmicas mostradas en la figura 2 pueden ser utilizadas a modo de curvas de calibración de un sensor, con el fin de obtener información de las mismas al mismo tiempo que el músculo artificial se encuentra en funcionamiento.

Además de estas tres variables, se ha demostrado experimentalmente (el estudio teórico se encuentra en proceso) que los músculos artificiales son capaces de sentir la masa que son capaces de arrastrar [4] o la masa de objetos que se encuentran en su radio de acción y que han de mover (músculos táctiles) [5].

3. Conclusiones

El funcionamiento de los músculos artificiales basados en la electroquímica de polímeros conductores está controlado por la reacción electroquímica responsable de los cambios en las propiedades de los polímeros, entre ellas su volumen.

Cualquier variable que afecta a dicha reacción afecta también a la respuesta del actuador.

Fue posible la obtención de la relación matemática entre cada una de las variables experimentales y la respuesta en potencial en potencial del músculo. Dicha relación fue comprobada experimentalmente, obteniendo un buen ajuste entre los datos simulados y los obtenidos experimentalmente.

Las relaciones obtenidas pueden ser utilizadas para conocer el valor de diversas variables experimentales tales como la temperatura, la concentración del electrolito o la corriente eléctrica aplicada. Todo ello sin la necesidad de utilizar un sensor adicional para conocer dichas variables.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad, Proyectos MAT2008-06702 y CTQ2007-60459 y la Fundación Séneca Proyecto 08684/PI/08, J.G. Martínez agradece al Ministerio de Educación por una beca FPU (AP2010-3460).

Referencias

- [1] K. Ogata (2009) Modern Control Engineering, 5.^a ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [2] T. F. Otero, J. J. Sanchez, J. G. Martinez (2012) Biomimetic Dual Sensing-Actuators Based on Conducting Polymers. Galvanostatic Theoretical Model for Actuators Sensing Temperature. *J. Phys. Chem. B*, 116, 5279-5290.
- [3] J. G. Martinez, T. F. Otero (2012) Biomimetic Dual Sensing-Actuators: Theoretical Description. Sensing Electrolyte Concentration and Driving Current. *J. Phys. Chem. B*, 116, 9223-9230.
- [4] T. F. Otero, M. T. Cortes (2003) A sensing muscle. *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 96, 152-156.
- [5] T. Otero, M. Cortes (2003) Artificial muscles with tactile sensitivity. *Adv. Mater.*, 15, 279-282.