

NANOTECNOLOGÍA PARA LA CALEFACCIÓN DE COMPONENTES DE AUTOMÓVIL

Xavier Carod de Arriba

Eduard Ferreté Aymerich

Margarita González Benítez

Ignasi Casanova Hormaechea

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Abstract

From several years ago, the automotive sector is focusing its efforts on manufacturing more efficient and environmentally friendly products. The increasing interest in developing electric models has provided a lot of new materials and new efficient technologies. Issues like weight reduction or the decrease in electrical consumption have become the key to get, each time, more autonomy for this kind of vehicles.

This paper presents the development of a rearview heater prototype made out of a carbon nanotube coating which acts as an electric resistance and is able to produce heat by Joule effect applying a very little power. Furthermore, the technological viability of the application of this nanotechnology has been tested by thermal and structural stability studies of the heater material. It has been determined that the most important issues affecting the final properties of the heater are the carbon nanotube weight fraction, the shape of the sprayed surface and the location of the contacts. This technology is very versatile due to it is easily reproducible in other heated components inside a vehicle.

Keywords: *nanotechnology; carbon nanotubes; automotive; electric vehicle; heater*

Resumen

Desde hace ya unos años, el sector de la automoción centra sus esfuerzos en fabricar productos cada vez más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. El creciente interés en desarrollar modelos eléctricos, ha desencadenado un gran trabajo de desarrollo de nuevos materiales y tecnologías más eficientes. La reducción de peso y la disminución del consumo eléctrico se han convertido en factores clave para conceder cada vez más autonomía a este tipo de vehículos.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de calefactor para retrovisores mediante la aplicación de un recubrimiento a base de nanotubos de carbono, que actúa como resistencia eléctrica y produce calor por efecto Joule aplicando muy poca potencia. Además del desarrollo conceptual de esta nanotecnología, también se demuestra la viabilidad tecnológica de su aplicación al haberse testado la estabilidad térmica y estructural del material calefactor. Se ha determinado que la composición de nanotubos de carbono, la forma geométrica de la superficie recubierta y la disposición de los contactos son aspectos cruciales para obtener las propiedades deseadas. La versatilidad que ofrece esta tecnología es muy amplia, ya que es fácilmente reproducible en otras piezas calefactables del interior de un vehículo.

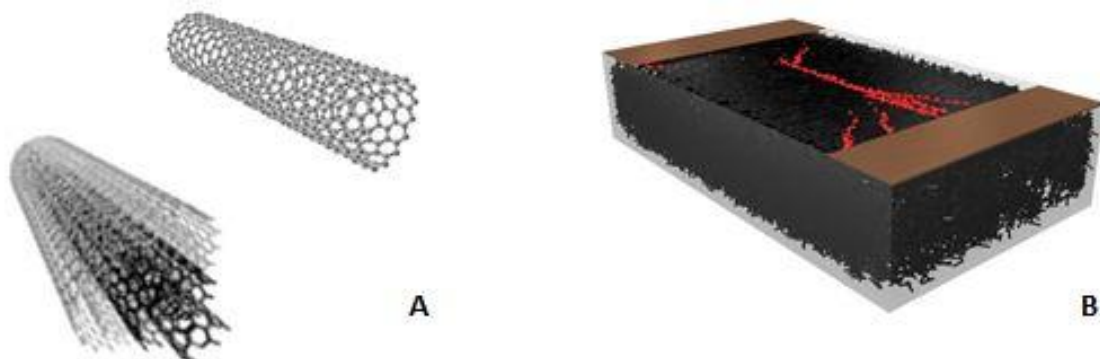
Palabras clave: nanotecnología; nanotubos de carbono; automoción; vehículo eléctrico; calefactor

1. Introducción

Los fabricantes de automóviles parecen apostar fuerte por el desarrollo del vehículo eléctrico como alternativa sostenible a los actuales modelos que usan combustibles fósiles como fuente de energía. A pesar de los nuevos desarrollos tecnológicos tanto en materiales, como en componentes, el principal problema al que se enfrentan los ingenieros es la autonomía de los vehículos. En este aspecto, la reducción del peso total del vehículo y la gestión eficiente de la energía dentro del mismo, son los factores que más pueden influir en el incremento de la autonomía de los modelos 100% eléctricos.

Existen muchos tipos de nanotubos de carbono, y todos presentan interesantes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas debido a su peculiar estructura química (Treacy et al., 1996; Sinnott et al., 2001; Belluci et al., 2005; Dombovari et al., 2010). La disposición tubular de monocapas de grafeno (figura 1A), permite la conducción de electrones por su interior y entre las distintas paredes en el caso de los nanotubos de pared múltiple, que son los que hemos usado en el desarrollo presentado. Las aplicaciones derivadas de la incorporación de nanotubos en matrices poliméricas son muy diversas, más allá que el producto llegue o no a ser un conductor eléctrico. (Collins et al., 2001; Yoo et al., 2006; Li et al., 2008; Spitalski et al., 2010; Shen et al., 2011)

Figura 1: nanotubos de carbono



Nota: A: Imagen virtual de la estructura de los nanotubos. B: representación 3D del mecanismo de conducción a macroescala. Principio de percolación.

Para que un composite polimérico con nanotubos de carbono sea conductor eléctrico, la distancia entre los nanotubos dispersados en la matriz debe ser lo suficientemente pequeña para que los electrones puedan saltar por efecto túnel de un nanotubo a otro. Es la conocida teoría de la percolación. (Sherman et al., 1983; Liang et al., 2000). La figura 1B es una representación de la conducción superficial de un composite de nanotubos. La corriente eléctrica pasará por los caminos que ofrezcan menor resistencia entre los dos contactos. Cuantos más caminos e inferior sea la resistencia que ofrezcan, más conductor será el compuesto.

Aprovechando esta capacidad de conducción eléctrica y la excelente conductividad térmica de los nanotubos (Yu et al., 2011), hemos optado por el desarrollo de una tecnología de calefacción mediante la aplicación de un recubrimiento a base de nanotubos de carbono. Dicho recubrimiento actúa como resistencia eléctrica superficial y produce calor por efecto Joule.

Además del desarrollo conceptual de esta nanotecnología, también se demuestra la viabilidad tecnológica de su aplicación al haberse testado la estabilidad térmica y estructural del material calefactor. Se han estudiado las variables más significativas en el diseño de la resistencia, cómo la composición de nanotubos de carbono, la forma geométrica de la superficie recubierta y la disposición de los contactos. Finalmente, se presenta un estudio de eficiencia del producto con un ejemplo de aplicación del recubrimiento en el diseño de un calefactor para el retrovisor exterior del vehículo.

2. Preparación y caracterización del Material

2.1 Preparación del material

El factor de mayor relevancia para obtener unas buenas propiedades al fabricar nanocomposites es la dispersión de las nanocargas. Para obtener una buena dispersión dentro la matriz polimérica, las nanopartículas y la propia matriz deben ser compatibles (Theodore et al., 2011). Los nanotubos de carbono presentan afinidad por los compuestos con estructuras aromáticas, de modo que los polímeros de la familia de los estirenos pueden ser un buen medio de dispersión. En nuestro contexto, uno de los polímeros compatible con los nanotubos que más se usa en el sector de la automoción es el ABS (Acrilonitrilo - Butadieno - Estireno). Esta es la matriz polimérica que hemos usado para la dispersión y también el material para el sustrato del recubrimiento.

Para preparar las suspensiones, se han disuelto los pellets sólidos de ABS en tolueno conjuntamente con los MWCNT. Se ha facilitado la mezcla con un agitador magnético y posteriormente se han aplicado ultrasonidos para segregar las aglomeraciones de nanotubos y mejorar la dispersión final. Se han preparado 7 suspensiones con diferentes concentraciones de MWCNT: 0,5%; 1%; 2,5%; 5%; 10%; 15% y 20%.

Posteriormente, se procede al recubrimiento por espray sobre el sustrato. La superficie de sustrato recubierta inicialmente ha sido de 1cm x 2cm. Con esta geometría se han realizado los test y caracterizaciones en primera instancia. Posteriormente se han preparado probetas con otras geometrías y dimensiones.

2.2 Caracterización del material

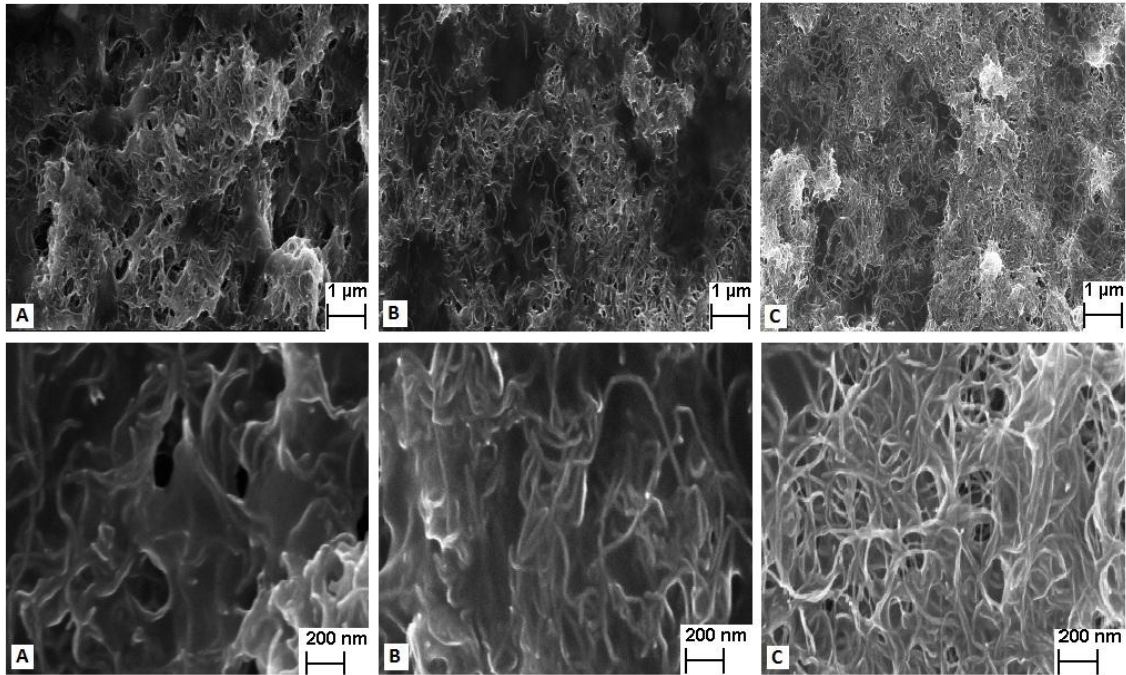
La dispersión de las muestras y la interacción entre los MWCNT y el polímero, se ha analizado mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), y las medidas eléctricas se han realizado en una estación de puntas. Se han realizado varias medidas en corriente continua para determinar la resistencia de los recubrimientos y la variación de esta resistencia en función de la temperatura y el tiempo. En todos los casos, se han aplicado contactos con barniz conductor.

Para caracterizar la estabilidad del compuesto, sus posibles cambios estructurales o variaciones en las propiedades térmicas; se ha procedido al análisis termogravimérico (TGA). El rango de temperatura ha sido de 150°C a 1000°C a 20 k/min, en un ambiente oxidante de aire sintético. También se han estudiado los cambios estructurales mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). El rango estudiado en este caso ha sido desde los -70°C a los 200°C.

2.2.1 Morfología y dispersión

En la figura 2 (imagen de SEM) se puede ver la buena dispersión de los nanotubos en la matriz polimérica. En todas las imágenes se aprecian claramente los nanotubos bien dispersos y no aglomerados. También se aprecia claramente el aumento de concentración de los nanotubos entre las distintas muestras.

Figura 2: Imágenes de microscopía SEM del recubrimiento de ABS+MWCNT

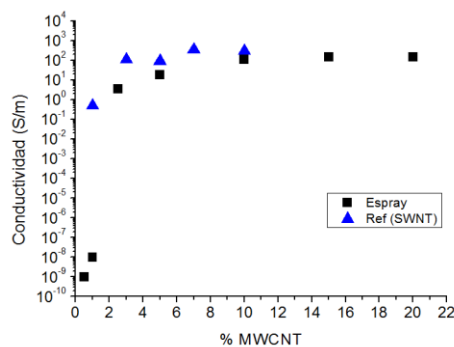


Nota: A: 2.5% MWCNT, B: 5% MWCNT y C: 10% MWCNT)

2.2.2 Propiedades eléctricas

Las medidas eléctricas verifican la buena dispersión de las muestras, ya que los valores de conductividad que se ven en la figura 3 se asemejan mucho a los valores de un estudio de referencia (Moniruzzaman et al., 2006).

Figura 3. Valores de conductividad (S/m) en función de la concentración en peso de MWCNT



Nota: en azul, estudio desarrollado por Moniruzzaman (2006) con nanotubos de pared simple (SWCNT).

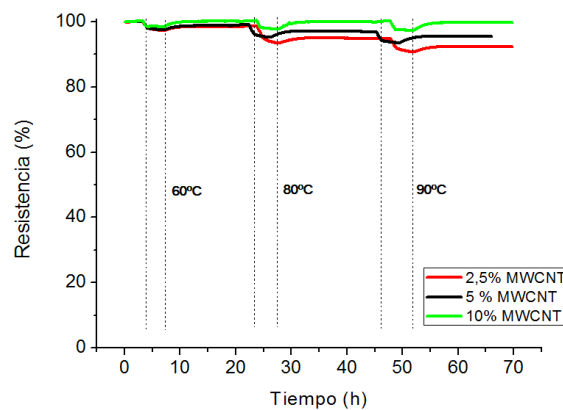
A porcentajes de MWCNT muy bajos, el compuesto resultante no es conductor, pero a partir de cierto contenido, se produce un salto en las propiedades eléctricas y el compuesto pasa a ser conductor, con un comportamiento claramente óhmico. Este punto de inflexión es conocido como límite de percolación (Kara, 2010), y guarda relación con la distancia entre las nanopartículas. Aumentando el contenido se reduce la distancia entre las partículas (nanotubos en nuestro caso) dispersos en la matriz de polímero. Cuando esta es

suficientemente pequeña para que los electrones puedan viajar por efecto túnel entre los nanotubos desde un contacto a otro, el material se vuelve conductor. En nuestro caso, el límite de percolación está alrededor del 1.5% de MWCNT y la conducción se estabiliza a partir del 10% (ver figura 3).

3. Viabilidad de la tecnología

Una de las características indispensables es que este material no varíe sus propiedades eléctricas con el uso prolongado o con la temperatura. Al ser un material que se utilizaría como calefactor, no conviene que al llegar a ciertas temperaturas, éste cambie sus propiedades. La figura 4 nos muestra la estabilidad de las propiedades eléctricas del compuesto al aplicar ciclos de temperatura de 60°C, 80°C y 90°C consecutivamente. Para las muestras del 2.5% y 5% se aprecia cierta deriva en la resistencia del material, mientras que para concentraciones a partir del 10% la resistencia no decae al volver al punto de inicio (30°C).

Figura.4: Ciclos de temperatura



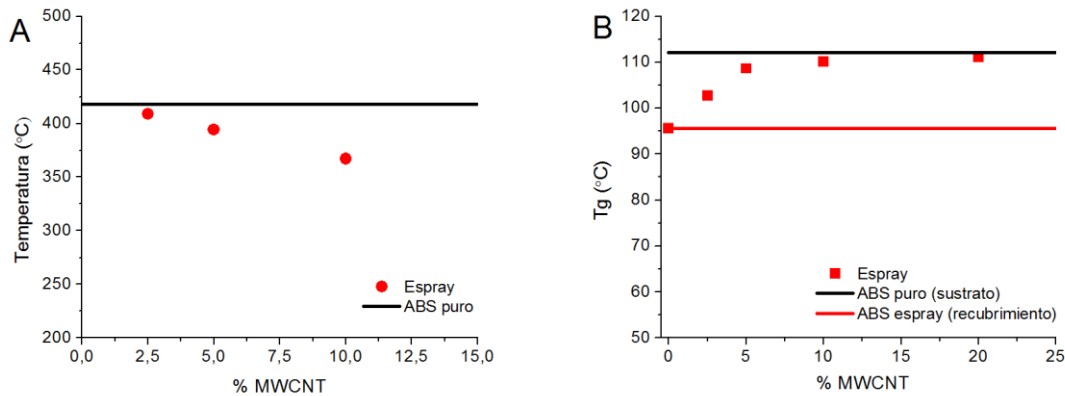
Nota: Variación de la resistencia por efecto de la temperatura a tres concentraciones diferentes de MWCNT ABS.

Las muestras han sido expuestas a tres ciclos consecutivos de calentamiento – enfriamiento, alcanzando 60°C, 80°C y 90°C respectivamente.

También es esencial, para las aplicaciones del compuesto, estudiar la estabilidad térmica y estructural del propio material, y ver cómo varía por la incorporación de los nanotubos de carbono.

Lo que se muestra en la figura 5A son las denominadas temperaturas de degradación media del material. Los puntos corresponden a la temperatura en que el material ha perdido el 50% de su masa inicial, mientras la línea indica la referencia, que es el ABS sin nanotubos. Como se puede observar, la temperatura de degradación del material disminuye ligeramente con el aumento de concentración de nanotubos, pero no afecta al rango de temperaturas de trabajo al que se someterá.

Figura 5: Resultados de TGA y DSC del material



Nota: A: Medidas de TGA del ABS (línea) y del ABS/MWCNT. Puntos de temperatura media de degradación, 50% de pérdida de peso de cada muestra. B: Punto de ablandamiento del ABS sin procesar (línea negra), ABS aplicado por espray 0% nanotubos (línea roja) y concentraciones crecientes de nanotubos (puntos).

El ABS es un polímero con muy poca cristalinidad. Este tipo de polímeros presenta plasticidad o ablandamiento de forma natural a partir de una temperatura. Para esta aplicación no nos interesa que el polímero llegue a sufrir estos cambios estructurales por efecto de la temperatura, ya que eso provocaría una modificación drástica de las propiedades eléctricas y también de las mecánicas.

Es conocido y ampliamente estudiado, que la presencia de nanotubos de carbono en matrices poliméricas tiene un efecto de refuerzo estructural (Spitalsky et al, 2010). Una buena dispersión dentro de la matriz propicia una estructura más resistente y con mejores propiedades mecánicas. Estos cambios estructurales son debidos a la disminución de la movilidad de las cadenas de polímero a causa de la adición de nanotubos, lo que conlleva un aumento en la temperatura de ablandamiento. En nuestro compuesto podemos observar este fenómeno (figura 5B), pero no obstante, también se aprecia el efecto del disolvente atrapado en el material por el propio proceso de espray, que tiene un efecto contrario. El resultado final es la compensación entre los dos mecanismos competitivos, por lo que el punto de ablandamiento tampoco se ve severamente afectado.

4. Variables que afectan al diseño del producto

Con este material, apto para la función de calefacción siempre que no se excedan los 90-100°C, se debe proceder al diseño de una resistencia superficial cuyas propiedades permitan alcanzar las especificaciones necesarias para cada aplicación. La potencia eléctrica que se aplique es lo que nos fijará el valor de temperatura que puede alcanzar el sistema. La potencia eléctrica se define como el producto de la diferencia de potencial aplicada por la intensidad del corriente que pasa a través de un material (Ec. 1). También puede resultar más cómodo usar la ley de Joule para dicho cálculo (Ec. 2).

$$P = V \times I \quad (\text{Ec. 1})$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Ec. 2})$$

Si nos centramos en la aplicación de esta tecnología para la calefacción de componentes del automóvil, la diferencia de potencial pasa a ser una variable fija con un valor de 12V. De

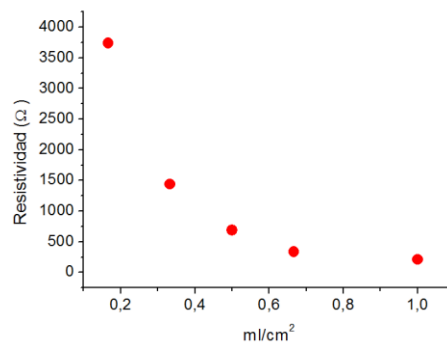
modo que, según la ecuación 2, la variable que nos definirá la potencia disipada por el sistema será la resistencia eléctrica. Veamos entonces qué parámetros en el diseño afectan al valor final de resistencia.

4.1 La resistividad del material

La resistividad de un material es una propiedad intrínseca del mismo, y se define como la inversa de la conductividad. Nuestros recubrimientos poliméricos presentan distintas resistividades en función del porcentaje de MWCNT que contengan, como hemos podido apreciar en los datos de la figura 3.

Al aplicar una suspensión de ABS + MWCNT por espray, los valores de resistividad del recubrimiento resultante variarán en función del grosor de la capa, pero hasta cierto punto. Nuestro sistema está pensado para que la conducción de la electricidad sea superficial. No obstante, cuando se aplica por espay poca cantidad de material, se pueden apreciar variaciones en la resistividad, que terminan estabilizándose cuando se aplican más de 25-30 ml, tal como se aprecia en la figura 6.

.Figura 6: Efecto del volumen de suspensión aplicado en el valor final de resistividad

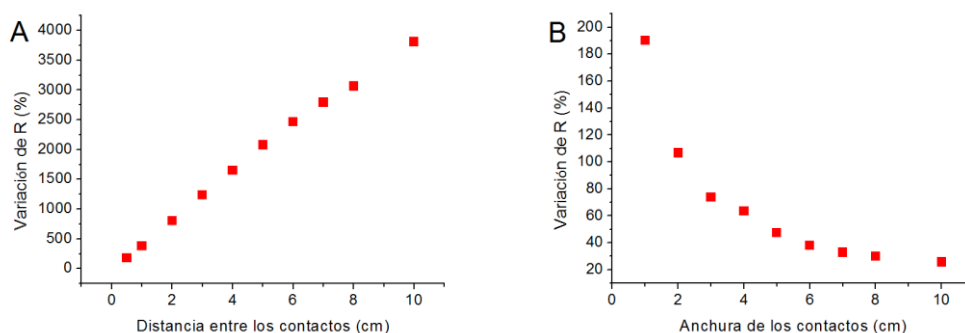


Nota: Resistividad superficial de unas muestras de 2x2cm con 10% MWCNT en función del volumen de suspensión aplicado mediante espray por cm2 de superficie.

4.2 Los contactos

La disposición de los contactos eléctricos en la superficie recubierta tiene tanta o más influencia en el valor de resistencia que las propiedades eléctricas de propio material.

Figura 7: Variación porcentual de la resistencia en función de la disposición de los contactos



Nota: A: Efecto de la distancia entre contactos. B: Efecto la anchura de los contactos.

Los experimentos cuyos resultados se representan en la figura 7, nos han permitido entender la importancia de aspectos como la distancia entre los contactos o la anchura de los mismos.

Hemos determinado que la resistencia eléctrica del sistema aumenta de forma lineal con la relación de aspecto superficial, definida como la distancia entre los contactos dividida por la anchura de los mismos. Esto es lo que sucede con superficies conductoras metálicas, dónde la relación entre la resistencia superficial y la resistividad superficial, viene dada por la ecuación 3.

$$R = \rho \times \frac{l}{D} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde R es la Resistencia superficial, ρ es la resistividad superficial, l es la distancia entre contactos y D la anchura de los contactos.

Es interesante observar que nuestra superficie conductora a base de ABS con nanotubos presenta un comportamiento parecido al de una superficie metálica, cuando los mecanismos de conducción de electrones son totalmente distintos entre los dos materiales. Esto nos permite simplificar los cálculos para el diseño de la resistencia final, pudiendo hacer uso de las ecuaciones ya definidas para recubrimientos conductores metálicos.

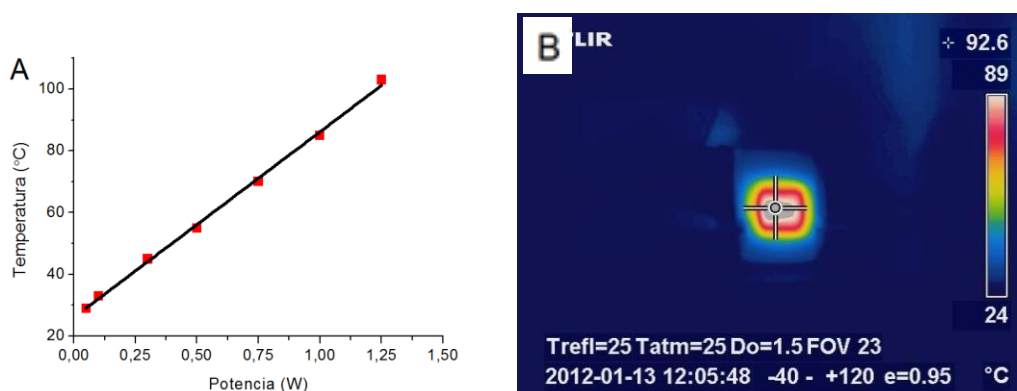
5. Elección del material y calibración del sistema

Fijar el porcentaje de nanotubos y el volumen de suspensión que a aplicar en el proceso de spray, nos definirá la resistividad de nuestro material de recubrimiento.

Por lo que refiere al porcentaje de nanotubos, hemos decidido usar una suspensión de ABS + MWCNT al 15% en masa, considerando que es el límite a partir del cual incorporar más nanotubos al recubrimiento no mejora sustancialmente las propiedades eléctricas respecto al coste que puede tener el producto final. Por otro lado, observando la figura 6, hemos decidido aplicar 1 ml de suspensión por cm^2 de superficie a recubrir. Igual que en el caso anterior, éste es un valor límite a partir del cual gastar más material no supone una mejora en las propiedades del producto final.

De este modo fijamos que el material para el recubrimiento tiene una resistividad superficial $\rho=210 \Omega$ para los cálculos de diseño. Ahora el reto es diseñar una resistencia cuyas propiedades eléctricas y térmicas cumplan con los requerimientos de cada aplicación. Es necesario, ahora que hemos definido el material, calibrar el sistema y así conocer la resistencia necesaria para alcanzar una temperatura concreta.

Figura 8: Calibración del sistema calefactor



Nota: A: Gráfica de resistencia vs. Temperatura. B: Termografía del sistema.

La figura 8 ilustra el proceso de calibración, que se ha desarrollado con la ayuda de una cámara termográfica. En el ensayo se ha aumentado progresivamente la potencia mientras se media la temperatura que alcanzaba el sistema.

Dado que la tendencia es prácticamente lineal, podemos interpolar y averiguar el valor de potencia necesario para alcanzar una temperatura concreta. Aplicando las ecuaciones (Ec.2 y Ec.3) para una diferencia de potencial de 12V y fijada la resistividad del material, podemos calcular la resistencia que debe tener nuestro diseño, que será función, únicamente, de la relación de aspecto (l/D).

6. Ejemplo de aplicación. Calefactor para un retrovisor exterior

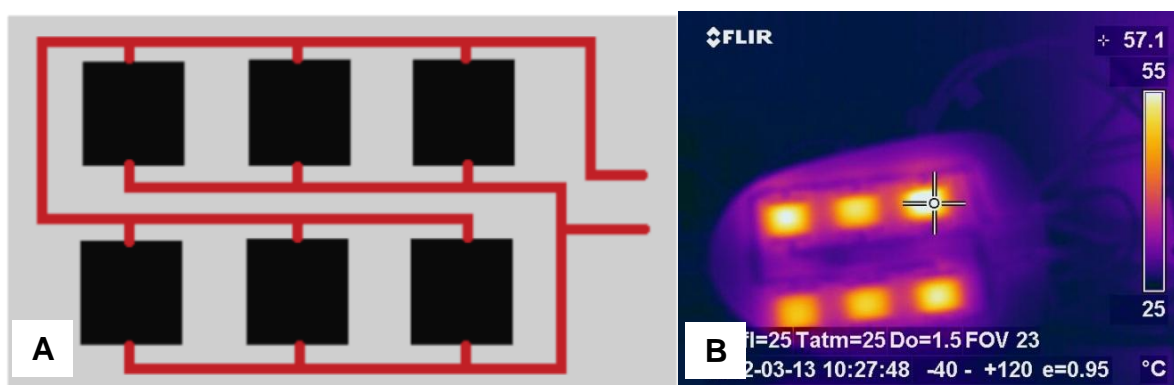
Para valorar el potencial del sistema de calefacción con nanotubos, se ha desarrollado una prueba de concepto de un calefactor para retrovisor exterior. Este sistema es una de las aplicaciones que más temperatura demanda, requiriendo alcanzar, entre 60 y 80°C.

6.1 Diseño

En este caso, hemos optado por asociar pequeñas unidades de 2x2cm en paralelo para reducir la resistencia global del sistema. En concreto, hemos dispuesto 6 de estas unidades como se muestra en la figura 9A. Según las leyes de Kirchhoff, la resistencia global del sistema será la sexta parte de la resistencia de una unidad, mientras que la intensidad de corriente total se multiplica por seis y lo mismo le sucede a la potencia.

Interpolando en la gráfica de la figura 8, calculamos que la potencia necesaria para calentar cada unidad a 80°C es de 0,9W. Calentar todo el sistema consumirá entonces seis veces más: 5,4W. Por lo tanto, la resistencia global equivalente que debe tener nuestro sistema es de aproximadamente 27Ω.

Figura 9: Sistema de resistencias en paralelo para la calefacción del retrovisor.



Nota: A) Esquema del sistema calefactor en paralelo. B) Termografía del sistema calefactor funcionando a 12V.

Fotografía tomada después de cuatro minutos de la puesta en marcha.

6.2 Caracterización eléctrica y térmica

Una vez aplicado el espray y proporcionados los contactos eléctricos, se ha procedido a la caracterización eléctrica y térmica. Nuestro sistema calefactor tiene una resistencia de 38.5Ω, superior a la prevista por los cálculos de diseño. Esta desviación era esperable, ya que los propios contactos presentan una pequeña resistencia (en este caso en serie) y que el proceso de aplicación de espray ha sido manual.

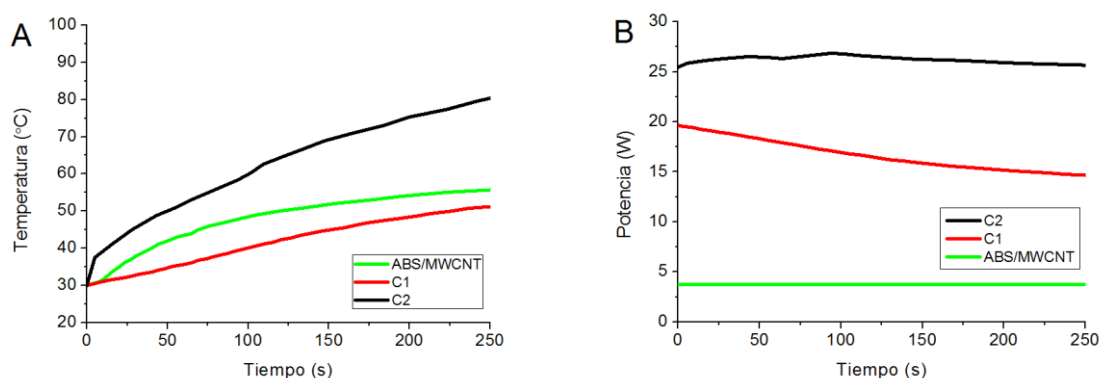
En la termografía presentada en la figura 9B aparece nuestro sistema calefactor en funcionamiento. Después de cuatro minutos solamente ha alcanzado los 57°C y se encuentra en proceso de estabilización de la temperatura con una potencia constante de 3.1W. Analizar cómo se calienta el sistema con el tiempo nos dará información acerca del trabajo eléctrico que realiza.

6.3 Comparación con los sistemas convencionales

Hemos comparado el proceso de calentamiento durante los primeros cuatro minutos de funcionamiento de nuestro sistema calefactor con el de dos sistemas implantados en los vehículos actualmente (Figura 10A). Ambas son resistencias implementadas en un film de espuma acrílica situado entre el espejo y el soporte de ABS. El modelo C1 es una Pista conductiva constituida por una mezcla de varios materiales en buena parte metálicos, mientras el modelo C2 es una pista conductiva en base aluminio.

Ambos sistemas implementados en la actualidad presentan una resistencia inferior al nuestro, por lo que la potencia que consumo es mayor al incrementar la corriente que circula entre contactos.

Figura 10: Comparación energética entre los sistemas comerciales y el desarrollo presentado



Nota: A: Comparación de la puesta en marcha de los sistemas. B: Evolución de la potencia consumida con el tiempo. El área bajo la curva corresponde al trabajo en cada caso.

Se puede calcular el trabajo eléctrico realizado por los tres sistemas de una forma sencilla, integrando el área bajo las curvas de la figura 10B según la ecuación 4:

$$W = \int_0^t P dt = V \times \int_0^t I dt = V^2 \times \int_0^t \frac{1}{R} dt \quad (\text{Ec. 4})$$

Los resultados son aproximadamente 900J en el recubrimiento de ABS/MWCNT, mientras que en los otros el trabajo ha resultado ser mucho mayor (4200 para C2 y 6200 para C1). En este caso, el ahorro energético es relativamente grande, y se debe multiplicar por dos, que son los espejos retrovisores que tiene un vehículo.

7. Conclusiones

Des del punto de vista funcional, nuestro recubrimiento a base de ABS con nanotubos de carbono ofrece muy buenas prestaciones al incorporarse como elemento calefactor en

componentes de un vehículo. Es capaz de alcanzar las temperaturas requeridas para cada aplicación consumiendo menos energía.

Está a nuestro alcance y se deben estudiar detalladamente de cara a una implementación del producto, los aspectos de durabilidad del material y de mejora del diseño. Nuestro recubrimiento polimérico con nanotubos de carbono debe superar exitosamente todos los requerimientos del fabricante de componentes, que vienen marcados por normativas, por las condiciones de servicio de la tecnología y por las necesidades del usuario.

En cuanto a la mejora del diseño, existen unos puntos clave en el proceso descrito en los que se puede incidir con resultados muy positivos. Por ejemplo, la disposición de los contactos es uno de los factores que más influye en el valor de resistencia eléctrica del sistema. Por eso, puede resultar interesante diseñar el circuito e imprimirlo en el soporte de ABS (que se puede producir en serie) y posteriormente aplicar el recubrimiento de ABS con nanotubos.

Esta prueba de concepto nos muestra el potencial del uso de nanotecnologías en el sector de la automoción, particularmente interesante en su aplicación al vehículo eléctrico, donde la eficiencia y la gestión de la energía son uno de los puntos más estudiados en el desarrollo de estos nuevos modelos.

Los nanotubos son de carbono, el polímero son cadenas de carbono, y los contactos se podrían aplicar con tinta conductiva en base carbono... Los tres componentes presentan propiedades físicas y químicas radicalmente distintas, pero están hechos del mismo elemento: el carbono. Entonces, desde el punto de vista de diseño, el uso de nanotecnologías puede suponer una mejora también para problemáticas de gestión de residuos y la separación de componentes.

Gracias a que la ciencia y la tecnología ya permiten manipular las estructuras a nanoescala, podemos definir una nueva generación de materiales compuestos. Aquellos que, en vez de estar compuestos de diversos elementos materiales, están compuestos de diversas estructuras químicas del mismo elemento.

8. Agradecimientos

Este estudio es parte del trabajo realizado por los investigadores de la Cátedra SEAT/UPC y del Centre de Recerca en nanoEnginyeria (CRnE) de la UPC en el marco del proyecto nAUTO2; bajo el liderazgo del Centro Técnico de SEAT. Dicho proyecto, financiado por ACCIÓ (Generalitat de Catalunya) y fondos FEDER (UE), ha tenido como objetivo buscar soluciones a ciertas necesidades específicas del sector de la automoción mediante el uso de nanotecnologías. Agradecemos a todos los colaboradores del proyecto por su apoyo al trabajo realizado.

9. Referencias

- Belluci, S. (2005). Carbon nanotubes: physics and applications. *Physica Status Solidi, C2* (1): 34–47. doi:10.1002/pssc.200460105
- Collins, P. G., Arnold, M.S. & Avouris, P. (2001). Engineering carbon nanotubes and nanotube circuits using electrical breakdown". *Science* 292 (5517): 706–709. doi:10.1126/science.1058782
- Dombovari, A., Halonen, N., Sapi, A., Szabo, M., Toth, G., Mäklin, J. & Kordas, K. (2010). Moderate anisotropy in the electrical conductivity of bulk MWCNT/epoxy composites. *Carbon*, 48, 1918-1925. Doi: 10.1016/j.carbon.2010.01.057.

- Yoo, H.J., Jung, Y.C., Sahoo, N.G. & Cho, J.W. (2006). Polyurethane-carbon nanotube nanocomposites prepared by in-situ polymerization with electroactive shape memory. *Journal of Macromolecular Science. Part B*, 45:4, 441-451. doi:10.1080/00222340600767471
- Yu, J., Tonpheng, B., Gröbner, G. & Andersson, O. (2011). Thermal properties and transition studies of multi-wall carbon nanotube/nylon-6 composites. *Carbon*, 49, 4858-4866. doi:10.1016/j.carbon.2011.07.006
- Kara, S., Arda, E., Dolastir, F. & Peckan, Ö. (2010). Electrical and optical percolations of polystyrene latex–multiwalled carbon nanotube composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 4/15, vol. 344, no. 2, 395-401. doi:10.1016/j.jcis.2009.12.056.
- Li, Y., Chen, C., Zhang, S., Ni, Y. & Huang, J. (2008). Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding characteristics of multiwalled carbon nanotube filled polyacrylate composite films. *Applied Surface Science*, 7/15, vol. 254, no. 18, 5766-5771. doi:10.1016/j.apsusc.2008.03.077.
- Liang, X., Ling, L., Lu, C. and Liu, L., (2000). Resistivity of carbon fibers/ABS resin composites. *Materials Letters*, 4, vol. 43, no.3, 144-147. doi:10.1016/S0167-577X(99)00247-5
- Moniruzzaman, M. & Winey, K.I. (2006). Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *Macromolecules*, vol. 39, no.16, 5194-5205.
- Shen, H., Jiao, Q., Zhao, Y., Li, H. & Sun, Z. (2011). Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of multiwalled carbon nanotubes filled ABS composites. *Advanced Engineering Materials*, 1-3, vol. 194-196, 1554-1557. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.194-196.1554.
- Sherman, R.D., Middleman, L.M. & Jacobs, S.M. (1983). Electron transport processes in conductor-filled polymers. *Polymer Engineering & Science*, vol. 23, no. 1, 36-46. doi:10.1002/pen.760230109
- Sinnott, S.B.; Andrews, R. (2001). Carbon nanotubes: synthesis, properties, and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 26 (3), 145–249. doi:10.1080/20014091104189
- Spitalsky, Z., Tasis, D., Papagelis, K. & Galiotis, C. (2010). Carbon nanotube-polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science*, 3, vol. 35, no. 3, 357-401. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.09.003.
- Theodore, M., Hosur, M., Thomas, J. & Jeelani, S. (2011). Influence of functionalization on properties of MWCNT-epoxy nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 1/25, vol. 528, no. 3. 1192-1200. doi: 10.1016/j.msea.2010.09.095.
- Treacy, M.M.J.; Ebbesen, T.W. & Gibson, J.M. (1996). Exceptionally high young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature* 381 (6584). 678–680. doi:10.1038/381678a0

Correspondencia (Para más información contacte con):

Xavier Carod de Arriba
Departamento de Proyectos de Ingeniería
Universitat Politècnica de Catalunya
Phone: +34 93 401 59 42 – +34 660 035 942
E-mail: xavier.carod@upc.edu