



MODELADO DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA DE MATERIALES COMPÓSITOS POLÍMERO-NANOTUBOS DE CARBONO

Rafael Vargas-Bernal^a, Gabriel Herrera-Pérez^a, Margarita Tecpoyotl-Torres^b, and Juan Gerardo Juárez-Sánchez^a

^aDepartamento de Ingeniería en Materiales, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), Carretera Irapuato-Silao Km. 12.5, C.P. 36821, Irapuato, Guanajuato, México. ravargas@itesi.edu.mx, gaherrera@itesi.edu.mx, gerardo_juarezs@hotmail.com

^bCentro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, México. tecpoyotl@uaem.mx

RESUMEN

La innovación tecnológica de alto valor agregado en el área de ingeniería en electrónica viene del desarrollo de nuevos materiales basados en propiedades físicas extraordinarias. Los materiales compósitos basados en polímeros y nanotubos de carbono están permitiendo el desarrollo de aplicaciones de vanguardia tales como los materiales usados como cubiertas protectoras para alcanzar la disipación electrostática de la carga eléctrica y el blindaje a la interferencia electromagnética (EMI). La diferencia entre estas aplicaciones se deriva de la sintonización de propiedades eléctricas que tales materiales pueden tener al controlar el porcentaje de nanotubos de carbono dentro del compósito. Desafortunadamente, los investigadores deben realizar un sinnúmero de pruebas experimentales antes de obtener la combinación perfecta que se ajuste a las propiedades eléctricas deseadas: conductividad eléctrica, permitividad dieléctrica, etc. Para reducir los gastos y la inversión de tiempo involucrados en esta actividad en el diseño de materiales, el modelado de propiedades eléctricas tales como la permitividad dieléctrica de los materiales compósitos basados en polímeros termoplásticos y nanotubos de carbono con la finalidad de predecir esta propiedad antes de que el material compósito sea sintetizado en el laboratorio a fin de reducir el número de realizaciones prácticas requerido para alcanzar el valor de permitividad dieléctrica esperado. Fue encontrado que la permitividad dieléctrica del material compósito se incrementa cuando la fracción volumétrica de nanotubos de carbono crece dentro de la matriz polimérica, que existe una región de transición y dos valores de saturación (permitividad mínima y permitividad máxima). Este tipo de predicción permitirá al diseñador conocer los valores máximo y mínimo de la permitividad dieléctrica, así como aprovechar la región de transición para el diseño de dispositivos electrónicos basado en elementos eléctricos que aprovechan la carga eléctrica almacenada en la matriz polimérica.

1. INTRODUCCIÓN

En electromagnetismo, la permitividad absoluta es la medida de la resistencia que es encontrada cuando se forma un campo eléctrico en un medio [1]. En otras palabras, la permitividad es una medida de cómo un campo eléctrico afecta, y es afectado por, un medio dieléctrico. La permitividad de un medio describe que tanto campo eléctrico (más correctamente, flujo) es generado por carga unitaria en ese medio (ver la Figura 1) [2]. Entre más flujo eléctrico existe en un medio con una



permitividad baja (por unidad de carga) debido a los efectos de polarización. La permitividad está directamente relacionada a la susceptibilidad eléctrica, la cual es una medida de qué tan fácil un dieléctrico se polariza en respuesta a un campo eléctrico [3]. De esta manera, la permitividad se relaciona a la habilidad de un material para resistir a un campo eléctrico y “permitir” es un nombre no-apropiado. La permitividad relativa de un material dieléctrico es su permitividad dieléctrica expresada como una razón relativa a la permitividad del vacío $\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m. Igualmente, la permitividad relativa es la razón de la capacitancia de un capacitor usando este material como un dieléctrico, comparado con un capacitor similar que tiene al vacío como su dieléctrico.

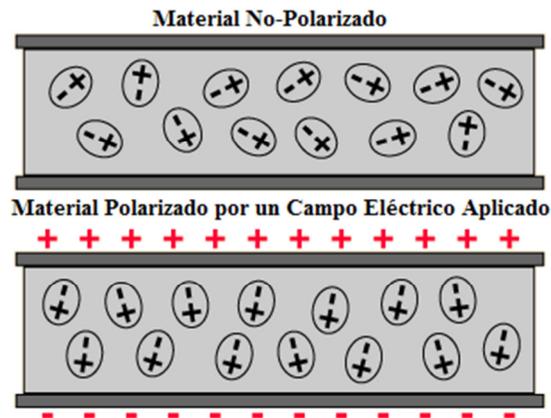


Figura 1. El concepto de permitividad dieléctrica de un material.

Las propiedades dieléctricas de compósitos de matrices no-conductoras son importantes desde tanto los puntos de vista práctico y teórico. Dos aplicaciones prácticas importantes donde el conocimiento de las propiedades dieléctricas es requerido son: (1) el calentamiento por microondas de materiales compósitos y (2) medición de la composición de materiales compósitos. Ya que las propiedades eléctricas de materiales compósitos son dependientes de su composición, la composición puede ser determinada al medir la constante dieléctrica.

En este artículo, el valor de la permitividad dieléctrica de materiales compósitos basados en polímeros y nanotubos de carbono es predicho a través del uso de modelos matemáticos donde la permitividad dieléctrica es determinada en función de la concentración volumétrica de nanotubos de carbono incluida en la matriz polimérica.

2. TEORÍA

Varias relaciones empíricas y teóricas han sido desarrolladas para predecir el comportamiento dieléctrico de los compósitos [1-3]. Las primeras relaciones empíricas pueden ser expresadas como la regla de las mezclas de Voigt (Ecuación 1), regla de las mezclas de Reuss (Ecuación 2) y la regla de las mezclas logarítmica de Lichtenecker (Ecuación 3):

$$\epsilon = \phi \epsilon_d + (1 - \phi) \epsilon_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{\phi}{\epsilon_d} + \frac{1 - \phi}{\epsilon_m} \quad (2)$$



$$\log(\varepsilon) = \phi \log(\varepsilon_d) + (1 - \phi) \log(\varepsilon_m) \quad (3)$$

donde ϕ es la fracción volumétrica de la fase dispersante, ε es la permitividad dieléctrica del compuesto, ε_d es la permitividad dieléctrica de la fase dispersante y ε_m es la permitividad dieléctrica de la matriz.

Posteriormente, otros modelos han sido desarrollados como lo es el modelo de Maxwell-Garnett expresado como [2-3]:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = \frac{1 + 2\phi \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_m}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_m} \right)}{1 - \phi \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_m}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_m} \right)}. \quad (4)$$

El modelo de Lewis-Nielsen (Ecuación 5) es expresado como:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = \frac{1 + 2\phi \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_m}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_m} \right)}{1 - \phi \psi \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_m}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_m} \right)}. \quad (5)$$

donde

$$\psi = 1 + \phi \left(\frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \right),$$

y, donde ϕ_m es la fracción volumétrica máxima. El modelo Lewis-Nielsen es la modificación del modelo Maxwell-Garnett, cuando $\phi_m \rightarrow 1$. Además, la regla simétrica de Bruggeman (Ecuación 6) se expresa como [1-2]:

$$\left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon}{\varepsilon_d + n\varepsilon} \right) \phi + \left(\frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m + n\varepsilon} \right) (1 - \phi) = 0, \quad (6)$$

donde n está relacionado con el umbral de percolación o concentración mínima requerida para cambiar abruptamente de un estado de baja permitividad a uno de valor máximo obtenido gracias a la presencia de un mayor número de nanotubos de carbono dentro de la matriz polimérica.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Todos los modelos matemáticos descritos en la sección de teoría han sido simulados para ABS y nanotubos de carbono. El comportamiento de la permitividad dieléctrica predicho según las reglas de las mezclas de Voigt, Reuss y logarítmica de Lichtenecker, se ilustra en la Figura 2. El modelo de Voigt predice el valor máximo de permitividad, el modelo de Reuss predice el valor mínimo y el modelo de Lichtenecker predice un valor intermedio entre ambos valores. A continuación, se simuló el comportamiento de la permitividad del modelo de Maxwell-Garnett y el modelo Lewis-Nielsen son simuladas para poder comparar su desempeño para predecir el comportamiento de la matriz sobre la permitividad, como se muestra en la Figura 3. Para analizar el comportamiento del valor máximo de la permitividad, se hace una comparación entre el modelo de Bruggeman y la



regla de las mezclas de Voigt, a fin de predecir el comportamiento para alcanzar el valor máximo de permitividad dieléctrica del material compuesto, vea la Figura 4.

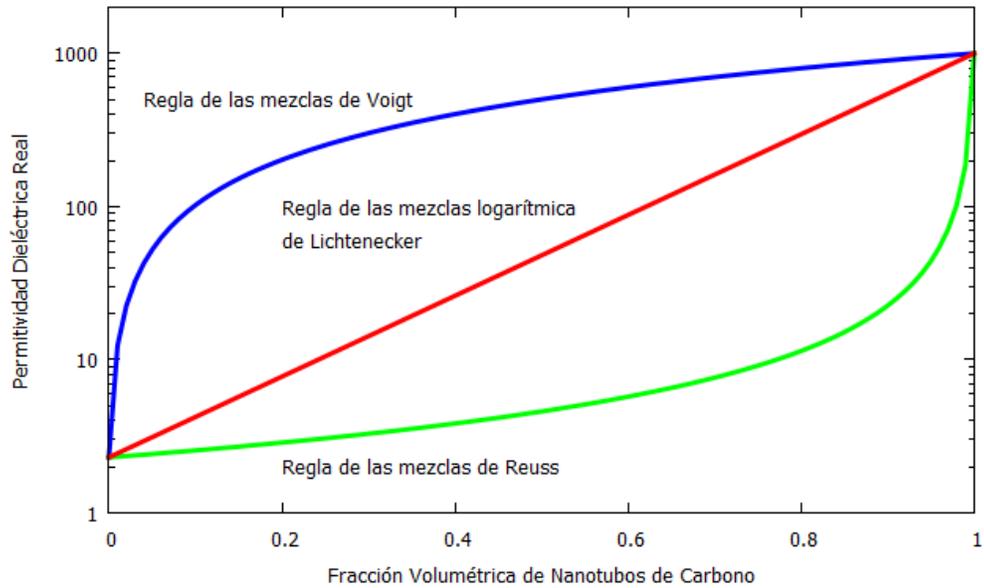


Figura 2. Predicción de la permitividad dieléctrica de materiales compósitos basados en ABS y nanotubos de carbono usando la regla de las mezclas.

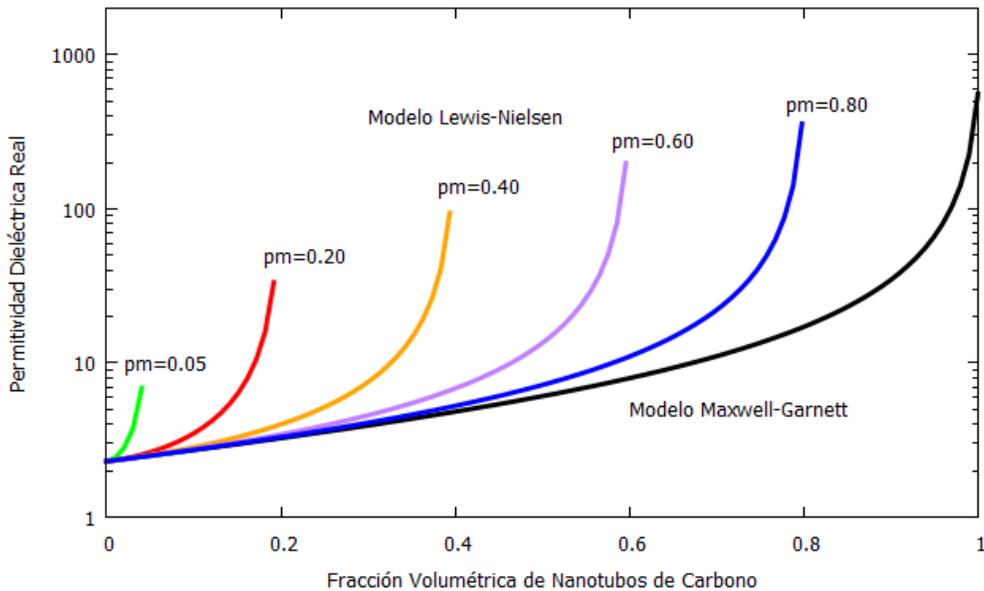


Figura 3. Predicción de la permitividad dieléctrica de materiales compósitos basados en ABS y nanotubos de carbono usando el modelo Maxwell-Garnett y el modelo Lewis-Nielsen.

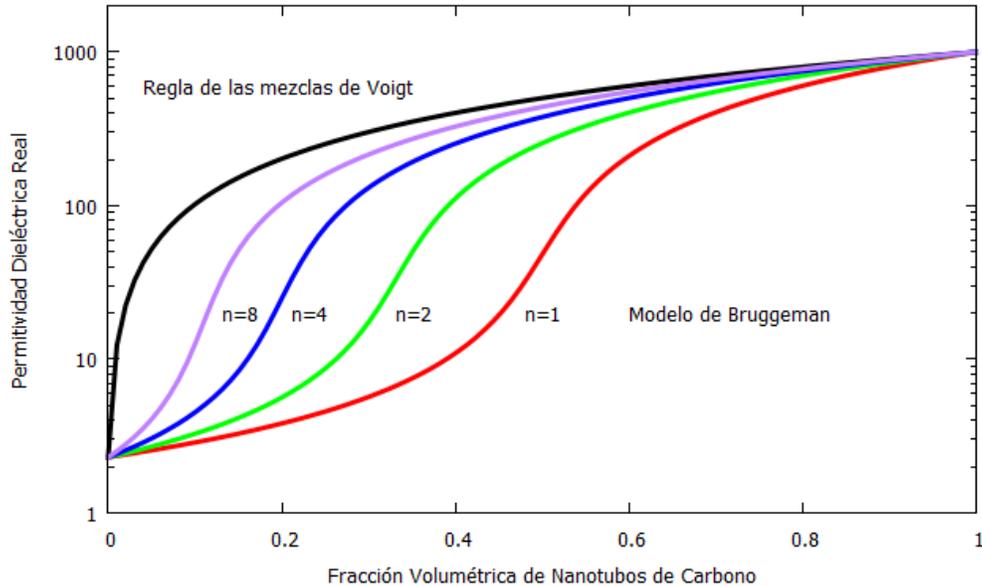


Figura 4. Predicción de la permitividad dieléctrica de materiales compósitos basados en ABS y nanotubos de carbono usando la regla de las mezclas de Voigt y el modelo de Bruggeman.

4. CONCLUSIONES

Hasta ahora, los modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de la permitividad dieléctrica de los materiales compósitos han permitido establecer los valores máximo y mínimo de la permitividad los cuales están asociados con la permitividad dieléctrica de los nanotubos de carbono y el de la matriz. Sin embargo, el comportamiento más exacto de la permitividad dieléctrica puede ser predicho usando el modelo de Bruggeman. A través de los resultados puede ser establecido que es necesario el desarrollo de nuevos modelos matemáticos que permitan predecir la permitividad dieléctrica de los materiales compósitos con mayor exactitud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a CONACYT por el apoyo económico al proyecto de Ciencia Básica 2010 de No. 152524 y al Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) por su apoyo para presentar el trabajo en el congreso.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Rajinder, *Electromagnetic, Mechanical, and Transport Properties of Composite Materials*, CRC Press: Boca Raton, FL, 2015.
2. G. Maier, "Low Dielectric Constant Polymers for Microelectronics", *Progress in Polymer Science*, Vol. 26, No. 1, 2001, pp. 3-65.
3. Z. Ahmad, "Polymeric Dielectric Materials", in *Dielectric Material* (Intech, Rijeka, Croatia, 2012), Chapter 1, pp. 3-26.