

Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados

Study of the electrical conductivity in electrical nanocomposites with disordered nanotubes

MEDINA-ÁNGEL, Gustavo^{†*} & BURLAK, Gennadiy

CIICAp, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62209.

ID 1^{er} Autor: *Gustavo, Medina-Ángel* / ORC ID: 0000-0002-0279-3492, Researcher ID Thomson: G-7236-2018, CVU CONACYT ID: 624958

ID 1^{er} Coautor: *Gennadiy, Burlak* / ORC ID: 0000-0003-4829-8435, Researcher ID Thomson: T-7967-2018, CVU CONACYT ID: 20332

Recibido Mayo 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

Resumen

Estudiamos la conductividad eléctrica de nano compuestos en una rejilla de tres dimensiones (3D) incorporando nano tubos de carbono (CNT) de forma aleatoria dentro del sistema. Nosotros variamos la longitud y radio de los nanotubos utilizando una distribución normal (Gauss) y generamos una posición aleatoria del nano tubo dentro del sistema usando el método Monte Carlo. La conductividad del sistema es asociada al fenómeno crítico de percolación en los CNT, en donde la intercepción o contacto entre los nano tubos crean un clúster infinito que es capaz de transmitir la conductividad eléctrica. Nosotros calculamos la probabilidad mínima necesaria para la transmisión de conductividad, mediante la técnica de optimización global en paralelo que permite estudiar el comportamiento de la conductividad en nano compuestos. Este enfoque nos permite estudiar los detalles de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos, incluso al nivel de las fluctuaciones de filtración en materiales a nano escala en el campo de la ingeniería y conductividad en los materiales.

Nano-Compuestos, Conductividad, Percolación

Abstract

We study the electrical conductivity of a three-dimensional (3D) nanocomposite with incorporated random carbon nanotubes (CNT) within the system. We varied the length and radius of the nanotubes using a normal distribution (Gauss) and generated a random position of the nano tube within the system using the Monte Carlo method. The conductivity of the system is associated with the critical phenomenon of percolation in the CNT, where the interception or contact in the nano tubes creates an infinite group that is capable of transmitting the electrical conductivity. We calculate the minimum probability necessary for the transmission of conductivity, by means of the technique of global optimization in parallel that allows to study the behavior of the conductivity in nanocomposites. This approach allows us to study the details of the electrical conductivity in electrical nanocomposites, even at the level of the fluctuations of filtering in nano-scale materials in the field of engineering and conductivity in materials.

Nanocomposites, Conductivity, Percolation

Citación: MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy. Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 18-26.

[†] Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (gustavo.isc@hotmail.com)

1. Introducción

En la actualidad la industria de la ingeniería a apostado por la nanotecnología, aprovechando su tamaño para poder construir dispositivos más pequeños y resistentes [1], esto trae como consecuencia la creación de materiales conductores que puedan transmitir la información en forma de pulsos digitales o corrientes analógicas por medio de nano estructuras conductoras. Este artículo se enfoca al estudio de la conductividad a través de estas nano estructuras [2] [3].

Este estudio es analógico y aplicado en la percolación de los CNT(Nanotubos de carbono), debido a sus extraordinarias y variadas aplicaciones en la rama de la nano-ingeniería como son por ejemplo en la creación de sensores pizoeléctricos [4], membranas artificiales, pinturas conductoras, textiles inteligentes [5], entre otras aplicaciones.

Nosotros estudiamos la percolación de los nanotubos de carbono en un sistema 3D [6], en donde implementamos cilindros que semejan la forma de los nanotubos de manera desordenada, con radios y longitudes de diferentes dimensiones tal como se muestra en la figura 1.

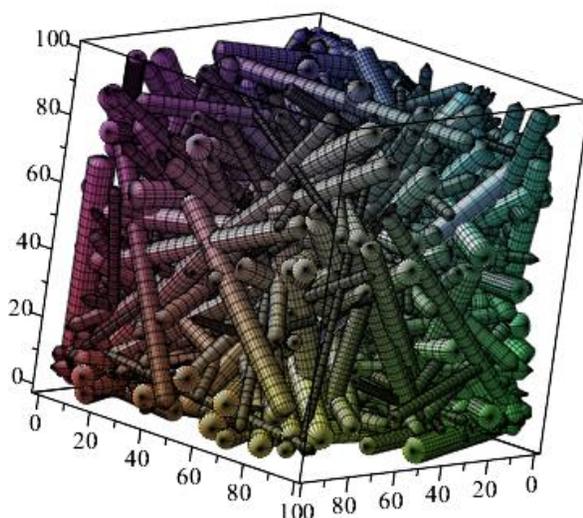


Figura 1 Rejilla tridimensional de percolación con nanotubos desordenados
Fuente: *Elaboración Propia*

2. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es encontrar una probabilidad crítica que satisfaga la percolación en la conductividad eléctrica, ya que esta probabilidad ayudaría a minimizar el ahorro en los materiales.

3. Objetivos Específicos

- Simular un sistema que represente los nanotubos de manera computacional.
- Encontrar el clúster infinito y la probabilidad crítica.
- Generar resultados para varias pruebas variando la longitud del cilindro.

4. Objeto Cilindro (Nanotubo)

Simulamos un cilindro en dimensiones nanométricas utilizando el esquema de programación orientada a objetos. Los valores importantes para poder representar un cilindro en nuestra rejilla son el radio r del cilindro, la longitud h del cilindro y su posición inicial así como su posición final, este último es determinado por los ángulos de orientación θ y φ .

En la figura 2, se muestra un esquema de los valores que se necesitan para representar un nanotubo dentro del sistema, en donde x_1 , y_1 y z_1 son valores aleatorios que determinaran el punto inicial del cilindro, r y h son valores determinados por el usuario y la orientación θ y φ son valores aleatorios.

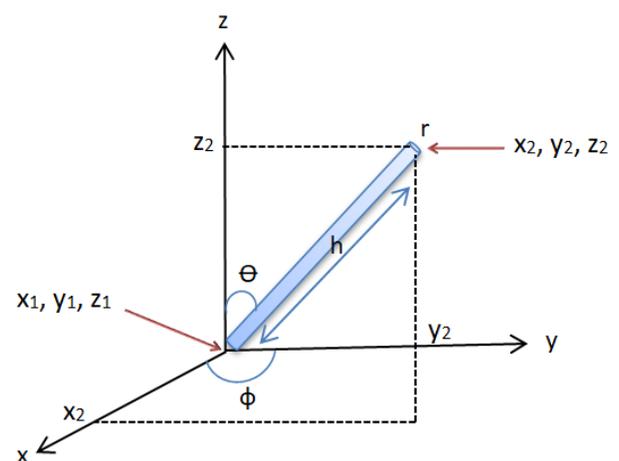


Figura 2 Esquema del nanotubo con sus parámetros y variables correspondientes.
Fuente: *Elaboración Propia*

Para obtener los valores x_2 , y_2 y z_2 , es necesario aplicar las ecuaciones 1, 2 y 3, ya que estos valores son determinados a partir de los puntos iniciales (x_1 , y_1 y z_1), ángulos de orientación (θ y φ) y longitud h del nanotubo [7].

$$z_2 = z_1 + h \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

$$y_2 = y_1 + h \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \quad (2)$$

MEDINA-ÁNGEL, Gustavo & BURLAK, Gennadiy. Estudio de la conductividad eléctrica en nano compuestos eléctricos con nano tubos desordenados. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018.

$$x_2 = x_1 + h \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \quad (3)$$

Se generarán varios cilindros en un arreglo tridimensional o rejilla 3D con valores aleatorios en sus posiciones y ángulos para cada uno de ellos, como se aprecia en la figura 2.

5. Percolacion y clústeres

Un clúster se genera cuando existe contacto entre dos o más nanotubos dentro de la rejilla [8], mientras que la percolación es el fenómeno que se da cuando la agrupación de estos nanotubos forma un clúster suficientemente grande que es capaz de atravesar la rejilla desde un punto hasta el otro extremo de la rejilla, a este clúster que atraviesa la rejilla de un extremo a otro es llamado clúster infinito.

En la figura 3, Se muestra una agrupación de cilindros formando un clúster, mientras que otros cilindros están separados y no forma parte de este clúster [9].

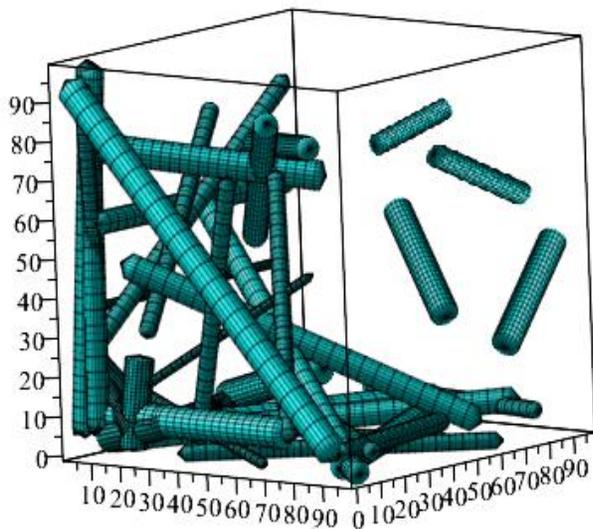


Figura 3 Clúster formado por cilindros con $P=0.01$

Fuente: *Elaboración Propia*

El número de cilindros está ligado directamente a la probabilidad P , que se asigne al generar el sistema, esta probabilidad puede tener un valor de 0 a 1, si asignamos un valor de probabilidad 0 a nuestro sistema, el arreglo estará vacío y ningún cilindro será generado, pero si asignamos el valor de 1, los arreglos contendrán un objeto cilindro para cada posición, mientras que si asignamos 0.5, en la mitad del arreglo contendrá un objeto cilindro y así sucesivamente para cada valor P , que se quiera estudiar.

El objetivo es encontrar una probabilidad con el cual se generen suficientes cilindros capaces de formar un clúster infinito que atraviese la rejilla y por lo tanto conducir la electricidad a través del sistema [10], esta probabilidad que es capaz de formar clústeres infinitos es también llamada Probabilidad crítica P_c .

En la figura 4, podemos observar un sistema conformado por cilindros agrupados formando un clúster infinito, donde a través de ella será conducida la corriente eléctrica. Los cilindros y clústeres que no forman parte de este clúster fueron eliminados para poder visualizar solo el clúster predominante, del cual podemos observar como algunos cilindros tocan el otro extremo de la rejilla [11].

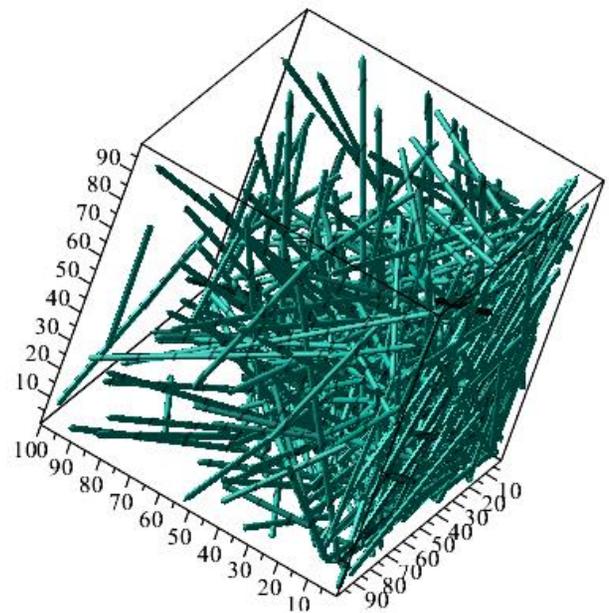


Figura 4 Clúster infinito con $P=0.2$

Fuente: *Elaboración Propia*

En la ingeniería, crear nanotubos de carbono con el mismo grosor y longitud no es posible, al menos no con la tecnología con la que ahora se cuenta, y al crearlas siempre existen un error en su uniformidad [12], es por ello que en este estudio aplicamos la distribución normal o distribución Gauss.

6.-Distribución Gauss

Aplicamos la distribución Gauss para nuestro estudio, ya que nos permite generar objetos con cierta desviación de error [13].

Nosotros aplicamos esta desviación al parámetro del radio r denominado como μr y al parámetro longitud h , denominado como μh y las desviaciones para estos parámetros son denominadas como σr y σh , respectivamente, estas últimas serán las desviaciones de error que se les aplicará a cada uno de los objetos cilindro, al crearlas en el sistema.

En la gráfica 1, se observa la distribución Gaussiana que se implementó para nuestro estudio, en donde a , es la medida idónea con el cual deben ser generados los nanotubos y σ , es el error que ocurre al crear nanotubos más chicos o más grandes respecto a la media.

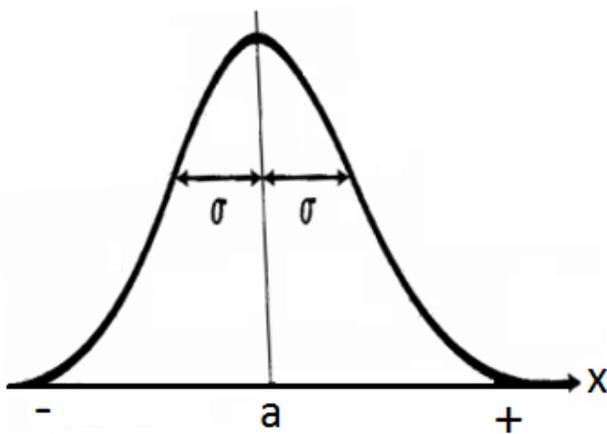


Gráfico 1 Distribución Gauss
Fuente: Elaboración propia

La distribución Gauss está regida por la siguiente ecuación:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Dónde: $a = (h, r)$ y σ es aplicable para “a”.

En las gráficas 2 y 3, se muestran los histogramas de los tamaños y longitudes de los nanotubos simulados como resultado de la ecuación 4 (Ecuación de Gauss). Podemos observar un máximo y un mínimo para su longitud y su grosor, estas serán el rango de medidas en las que se estarán generando los nanotubos simulados.

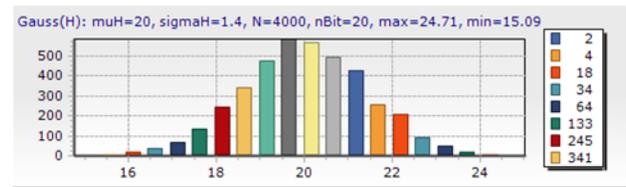


Gráfico 2 Histograma de la distribución de Gauss de la longitud h de los nanotubos generado por $\mu h = 20$ y $\sigma h = 1.4$, con una longitud máxima $h_{max} = 24.71$ y una longitud mínima $h_{min} = 15.09$, se observa una distribución homogénea.

Fuente: Elaboración propia

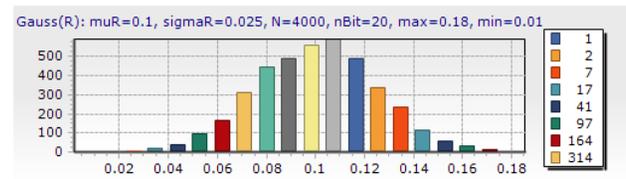


Gráfico 3 Histograma de la distribución de Gauss del grosor r de los nanotubos generado por $\mu r = 0.1$ y $\sigma r = 0.025$, con un grosor máximo $r_{max} = 0.18$ y un grosor mínimo de $r_{min} = 0.01$, se observa también una distribución homogénea.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se agregaron los nanotubos a la rejilla con sus correspondientes desviaciones, es necesario saber que cilindros pertenecen al clúster infinito, para ello es necesario analizar cada uno de los contactos que existen entre todos los cilindros en el sistema y eliminar los cilindros que no tengan contacto con algún clúster o clúster infinito.

7.-Contactos entre nanotubos

Para determinar los contactos entre los cilindros, se analiza un cilindro y se compara con todos los otros cilindros en el sistema, y se analiza si tiene un contacto entre sus radios r a través de toda su longitud h y determinada por la ecuaciones 5, 6 y 7.

$$d^2 = r_1^2 + 2r_1r_2 \cdot \cos(\theta) + r_2^2 \quad (5)$$

$$r_1^2 + r_2^2 - d^2 = -d \cdot r_1r_2 \cdot \cos(\theta) < 2r_1r_2 \quad (6)$$

$$r_1^2 + r_2^2 - d^2 < 2r_1r_2 \quad (7)$$

Dónde: $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$, para rangos de ángulos $\cos(\theta)$. En la figura 5, podemos observar un ejemplo esquemático entre el contacto entre dos cilindros,

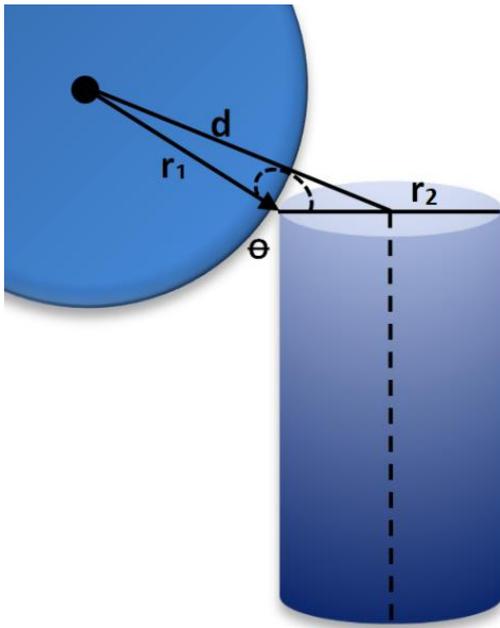


Figura 5 Contacto entre dos cilindros
Fuente: Elaboración Propia

Se observa un primer cilindro con vista horizontal y con vista frontal con radio r_1 y otro segundo cilindro vertical y perpendicular al primer cilindro con radio r_2 , observamos que el contacto entre ellos generan un ángulo theta θ y una distancia d entre los radios de los cilindros. Si la suma de los radios de los cilindros menos la distancia que existe entre sus radios es mayor a $2r_1r_2$, entonces existirá contacto entre estos dos objetos, tal como se determinan en la ecuación 7.

Se formarán varios clústeres agrupados por contactos entre los cilindros pero solo aquellos clústeres que tengan un contacto desde la posición inicial del arreglo L , y un contacto en la altura máxima del mismo arreglo se visualizara en la simulación del sistema y por lo tanto existirá percolación en el sistema.

8. Estructura de programación

Para la programación y generación de los resultados utilizamos como lenguaje de programación, Microsoft Visual C#, en su versión 2017. Se crearon 4 clases principales; la primera clase **Cilindro**, donde se construye el objeto cilindro que simulará cada uno de los CNT, la segunda clase **ArrayCilindros**, la cual contiene varios objetos en la rejilla, en esta clase se define si existe o no percolación para una determinada probabilidad P y también se obtiene el volumen de clúster infinito sobre total de los cilindros en el sistema $P(p)$.

La tercera clase, **ParallCilindros** se encarga de realizar varias calculaciones para una distribución de P en paralelo usando la librería TPL (Task Parall Label) de C# [14], ya que para cada probabilidad puede existir o no clústeres infinitos, es por ello que se necesitan calcular varias pruebas variando P , en donde se tienen que definir una probabilidad inicial, una probabilidad final y el número pruebas que se quieren distribuir en la probabilidad, de esta manera se distribuyen N probabilidades en un rango de probabilidad a estudiar.

9. Resultados

Un ejemplo de la distribución de N probabilidades sobre una distribución Probabilidad inicial-Probabilidad final se muestra en la tabla 1, donde existe una probabilidad inicial de 0.01 hasta 0.2, y 10 ejecuciones en paralelo, cada ejecución corresponde a un sistema o rejilla L con el mismo tamaño, pero diferente probabilidad P entre ellas. En donde L es un arreglo cubico de $n \times n \times n$. P_b es la correspondencia que existe del volumen total de los cilindros entre el volumen que hay en los cilindros agrupados en el clúster infinito que es determinada por la ecuación 8.

$$P(p) = \frac{\sum_0^L v}{\sum_0^C v} \quad (8)$$

Dónde: L =Tamaño del arreglo, C =Tamaño del clúster y v =Volumen del cilindro.

N	Probabilidad	Pb
1	0.01	0.00422535211267606
2	0.0311111111	0.0726643598615917
3	0.0522222222	0.334449884050502
4	0.0733333333	0.686885549990725
5	0.0944444444	0.844773960216998
6	0.1155555556	0.952211338676165
7	0.1366666667	1.00441944556047
8	0.1577777778	1.00013037809648
9	0.1788888889	1.00600046157397
10	0.2	1.01206854936037

Tabla 1 Se muestran los resultados hechos para un rango de probabilidad de 0.01 hasta 0.2 con 10 probabilidades distribuidas en ese rango
Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 1, podemos observar que existe percolación a partir del valor de probabilidad de 0.052222222, que se encuentra sombreada de azul en la tabla, para los valores posteriores a este, existen clústeres infinitos.

Los valores utilizados para las dimensiones del cilindro fueron: longitud del cilindro: $\mu_h=20$ nm, grosor del cilindro: $\mu_r=0.1$ nm, y con desviaciones de $\sigma_h=1.4$ en su longitud y $\sigma_r=0.025$ en su grosor, donde nm es la unidad básica para 1 nanómetro [15]. En el gráfico 4, también se puede apreciar el volumen del clúster para cada prueba que está asociada a la conductividad eléctrica “S” [16]. Podemos observar que conforme aumenta la probabilidad, el volumen en el clúster aumenta.

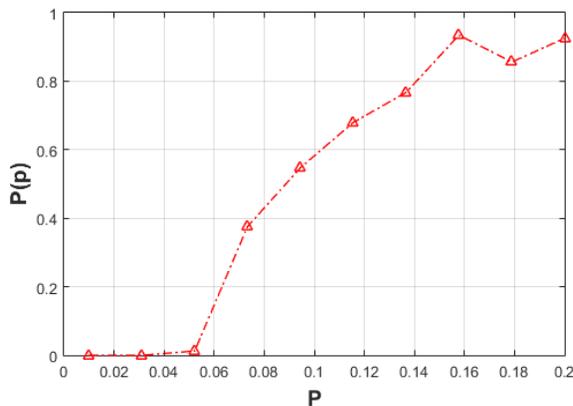


Gráfico 4 Se muestra el comportamiento de $P(p)$ volumen de los cilindros en la rejilla para 10 calculaciones, entre las probabilidades: 0.01 hasta 0.2
Fuente: *Elaboración Propia*

Las pruebas realizadas para cada calculación en paralelo fueron aproximadamente de 45 minutos a 1 hora en una computadora Dell Intel (R) core (TM) i7-6700HQ de 64 bits, a 2.60 GHZ con 8 GB de RAM de almacenamiento.

10. Ajuste de los resultados

A partir de los datos de la tabla 1, podríamos tener una idea de que valor para P que es necesario para poder obtener clústeres infinitos, y conseguir metales conductores, más sin embargo, en el rango de calculación entre cada probabilidad existen muchos valores que no se analizaron, ya que P puede ser demasiado finito como cualquier número.

Es por ello que se realizó un ajuste numérico de los datos [17], utilizando la función *Fit* en Matlab a los resultados anteriores determinados por la ecuación:

$$P(p) = b(p - pc)\beta \tag{9}$$

Dónde: b , pc y β , son constantes.

En la gráfica 2 podemos apreciar la aplicación de la función *Fit* a los valores de la gráfica 1.

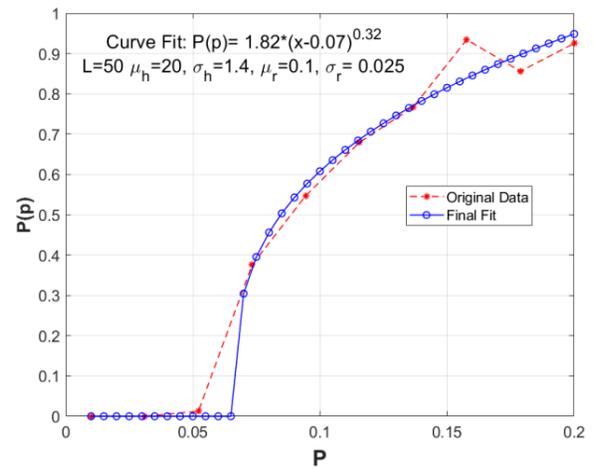


Gráfico 5 Datos ajustados de la gráfica 4, en un rango de probabilidad $P=0.1$ a 0.2 , con valores de: $L=50$, $\mu_h=20$, $\sigma_h=1.4$, $\mu_r=0.1$ y $\sigma_r=0.025$
Fuente: *Elaboración Propia*

De la gráfica 5, podemos observar la aplicación de la función *Fit*, en donde obtenemos los resultados para la función: $P(p)=b(p-pc)\beta$, donde $b=1.82$, $pc=0.07$ y $\beta=0.32$. En la gráfica 6, observamos otro ejemplo de la aplicación de la función *Fit*, pero para un μ_h , más pequeña: $\mu_h=15$, mientras que en el gráfico 7, aplicamos la misma función *Fit* pero para un valor μ_h más grande: $\mu_h=25$, se puede observar que las tres graficas tienen una variación diferente dependiendo del valor de μ_h .

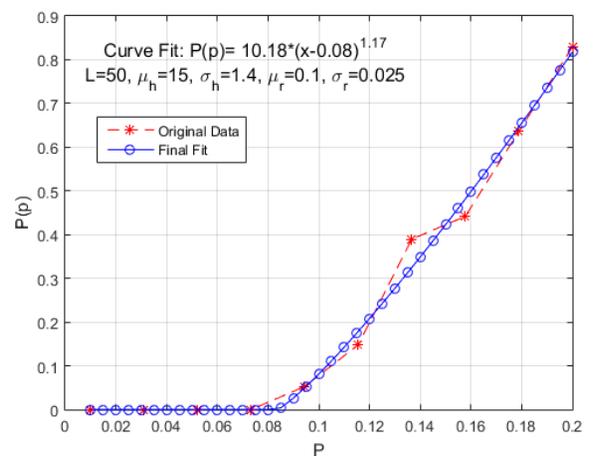


Gráfico 6 Datos ajustados en un rango de probabilidad $P=0.1$ a 0.2 , con valores de: $L=50$, $\mu_h=15$, $\sigma_h=1.4$, $\mu_r=0.1$ y $\sigma_r=0.025$.
Fuente: *Elaboración Propia*

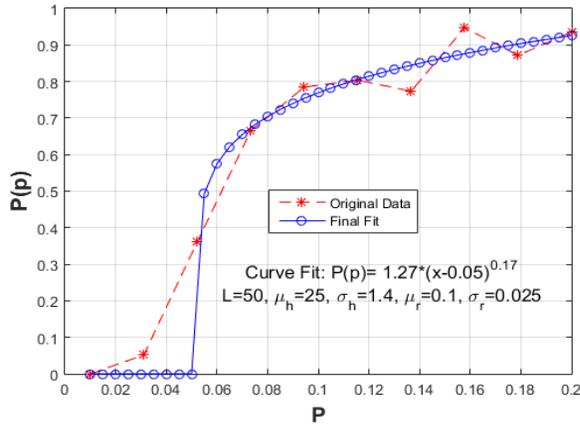


Gráfico 7 Datos ajustados en un rango de probabilidad $P=0.1$ a 0.2 , con valores de: $L=50$, $\mu_h=25$, $\sigma_h=1.4$, $\mu_r=0.1$ y $\sigma_r=0.025$
 Fuente: *Elaboración Propia*

Realizamos una serie de pruebas variando el valor de la longitud del nanotubo simulado de 15 a 25 nanómetros (rangos típicamente usados en la generación de nanotubos en la ingeniería) en una rejilla con dimensiones $L=50 \times 50 \times 50$, conservando los mismos valores para el grosor del nanotubo $\mu_r=0.1$ y su desviación $\sigma_r=0.025$, mientras que el valor para la desviación de su longitud es $\sigma_h=1.4$. En la tabla 2, podemos observar que para cada valor de μ_r , obtenemos un valor de probabilidad crítica P_{cr} , que disminuye conforme aumentamos la longitud del nanotubo, esto es lógico, pues mientras más largo y grueso sea el nanotubo, hay más posibilidad de generar intercepción entre los nanotubos y por lo tanto clústeres infinitos, recordemos que la probabilidad crítica, entre más pequeña sea, será más el ahorro que podemos tener en cuanto a materiales, es por ello que es bastante importante encontrar una probabilidad crítica satisfactoria para μ_h y μ_r , para este artículo nosotros enfocamos este estudio hacia la longitud del cilindro μ_h y para algunas desviaciones de sus desviaciones σ_r .

μ_h	L	σ_h	μ_r	σ_r	P_{cr}
15	50	1.4	0.1	0.025	0.084
16	50	1.4	0.1	0.025	0.09
17	50	1.4	0.1	0.025	0.091
18	50	1.4	0.1	0.025	0.072
19	50	1.4	0.1	0.025	0.073
20	50	1.4	0.1	0.025	0.066
21	50	1.4	0.1	0.025	0.052
22	50	1.4	0.1	0.025	0.052
23	50	1.4	0.1	0.025	0.052
24	50	1.4	0.1	0.025	0.052
25	50	1.4	0.1	0.025	0.052

Tabla 2 Se muestran diferentes variaciones de longitudes del cilindro ($\mu_h=15$ nanómetros hasta $\mu_h=25$ nanómetros), que pueden simular en nuestro sistema
 Fuente: *Elaboración Propia*

En el gráfico 8, se muestra el comportamiento de la tabla 2 aplicando un *Spline* de matlab [18], donde podemos observar una P_{cr} , que disminuye con nanotubos con longitudes mas largas. Podemos observar también que para longitudes cercanas a 25 nanómetros, se alcanza una P_{cr} más estable.

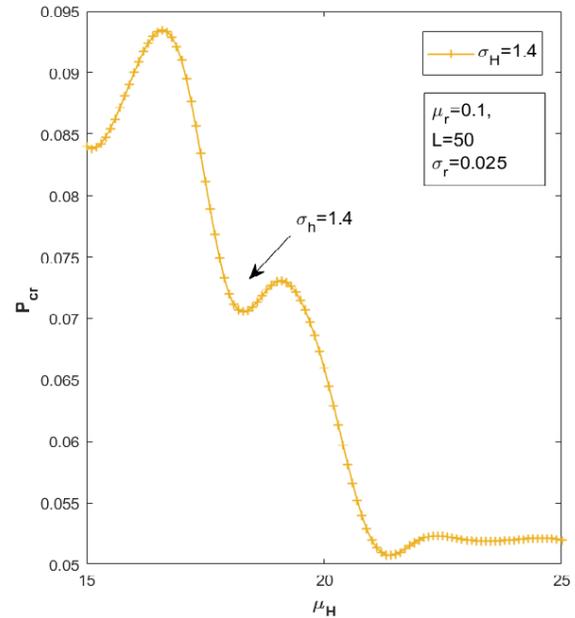


Gráfico 8 Se muestra el comportamiento de P_{cr} , para varias pruebas en donde se varia la longitud del cilindro μ_h de 15 a 25 nanómetros, para una desviación $\sigma_h=1.4$
 Fuente: *Elaboración Propia*

Realizamos algunas pruebas variando las desviaciones para el rango de μ_h de 15 a 25 nanómetros y con otras desviaciones de: 0.01, 0.05, 0.4, 1, 1.2 y 1.4 nanómetros, en el gráfico 9 podemos observar el comportamiento de estas desviaciones para rangos $\mu_h=15$ a 25 nanómetros. Podemos apreciar que para los valores de 0.001, 0.05, 0.4 los valores convergen aproximadamente en un rango de probabilidad crítica P_{cr} de 0.09 a 0.1 cuando los nanotubos miden 15 nanómetros a diferencia de las desviaciones mayores a 1, donde los valores de P_{cr} , caen por debajo de 0.09 o por encima de 0.1.

A partir del valor $\mu_h = 22$ y valores mayores a este podemos observar que la probabilidad crítica se estabiliza sin importar la desviación que se les aplique. También observamos que las fluctuaciones en las curvas son muy similares en picos para los puntos en el eje $X \rightarrow \mu_h$.

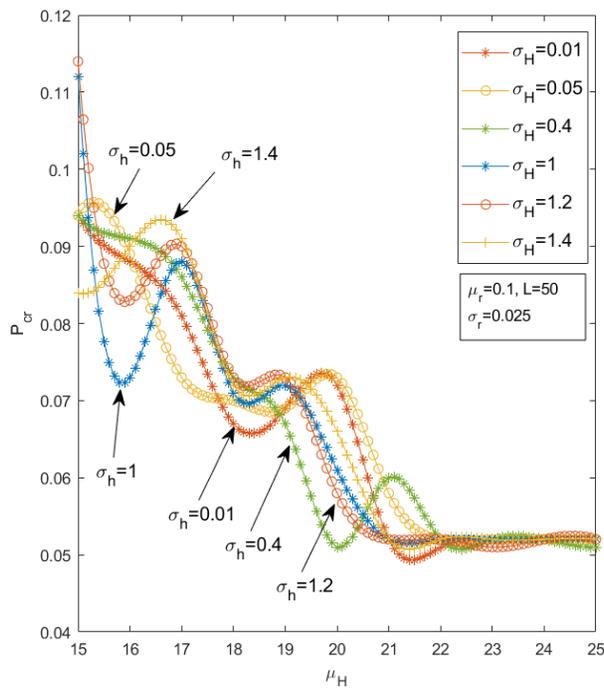


Gráfico 9 Se muestran los resultados graficados para los rangos de $\mu_h = 12$ a 25 nanómetros pero con 6 desviaciones diferentes: $\sigma_h = 0.01, 0.05, 0.4, 1, 1.2$ y 1.4 , con grosores de radio $\mu_r = 0.1$ y $\sigma_r = 0.25$ en una rejilla de dimensión $L=50$ para las 6 curvas

Fuente: Elaboración Propia

11. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos del último gráfico podemos decir que existe cierta tendencia para alcanzar una probabilidad crítica pequeña cuando los nanotubos son largos, aproximadamente mayores o iguales a $\mu_h = 22$ nanómetros y que las desviaciones no influyen cuando los nanotubos tienen este valor, pero sí influyen cuando son menores a este.

El P_{cr} más estable para todas las desviaciones en nuestras pruebas es aproximadamente de 0.05 para nanotubos mayores o iguales a 22 nanómetros y como consecuencia en este rango no habrá fallas en la conductividad eléctrica “S”, ya que el número de nanotubos y su volumen es bastante grande como para poder formar clústeres infinitos que conduzcan la electricidad de un punto a otro del medio.

Como trabajo a futuro se pretende implementar de manera conjunta las desviaciones en el grosor “ σ_r ” y de longitud “ σ_h ” del nanotubo, y de esta manera obtener más variaciones para nuestro caso de estudio.

12. Referencia

- [1] Rahman, R., & Servati, P. (2012). Effects of inter-tube distance and alignment on tunnelling resistance and strain sensitivity of nanotube/polymer composite films. *Nanotechnology*, 5(055703), 23.
- [2] Kuo-Chi Lin., Daniel Lee., Linan An., Young Hoon Joo. (2013). Finite-Size Scaling Features of Electric Conductivity Percolation in Nanocomposites. *Nanoscience and Nanoengineering*, 1(1), 15-22.
- [3] Estrella Laredo., Alfredo Bello., Mario Grimau., Defeng Wu. (2011). PERCOLACIÓN, UNIVERSALIDAD Y PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE NANOCOMPUESTOS POLÍMEROS/NANOTUBOS DE CARBÓN, PCL/PLA/NTC. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales.*, 2-3.
- [4] Herrera-May, A., AGuilEra-Cortés, L. A., Manjarrez, E., & González-Palacios, M. (2010). Sistemas nanoelectromecánicos: Origen, aplicaciones y Desafíos. *Interciencia*, 35(3), 163-170.
- [5] Otero, T. F. (2003). POLÍMEROS CONDUCTORES: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES ELECTROQUÍMICAS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4(4), 1-50.
- [6] Heng, Gu., Jiaojiao, Wang., Choongho, Yu. (2016). Three-dimensional Modeling of Percolation Behavior of Electrical Conductivity in Segregated Network Polymer Nanocomposites Using Monte Carlo Method. *Advances in Materials*, 1(1-8), 5.g
- [7] Bao, W. S., Meguid, S. A., Zhu, Z. H., & Meguid, M. J. (2011). Modeling electrical conductivities of nanocomposites with aligned carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 22(48), 485704.
- [8] Du, N., Zhang, H., Chen, B. D., Wu, J. B., Ma, X. Y., Liu, Z. H. & Tu, J. P. (2007). Porous Co₃O₄ Nanotubes Derived From Co₄(CO)₁₂ Clusters on Carbon Nanotube Templates: A Highly Efficient Material For Li-Battery Applications. *Advanced Materials*, 19(24), 4505-4509.

- [9] Grujicic, M., Cao, G., & Roy, W. N. (2004). A computational analysis of the percolation threshold and the electrical conductivity of carbon nanotubes filled polymeric materials. *Journal of materials science*, 39(14), 4441-4449.
- [10] Lysenkov, E. A., Yakovlev, Y. V., & Klepko, V. V. (2013). Percolation properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes. *Ukrainian journal of physics*, 58(4), 378-384.
- [11] Kyrlyuk, A. V., Hermant, M. C., Schilling, T., Klumperman, B., Koning, C. E., & Van der Schoot, P. (2011). Controlling electrical percolation in multicomponent carbon nanotube dispersions. *Nature nanotechnology*, 6(6), 364.
- [12] Zdenko, Spitalskya., Dimitrios, Tasisb., Konstantinos, Papagelisb., Costas Galiotis. (2010). Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 357-401.
- [13] Hongqing ZHENG, Yongquan ZHOU. ((2012). A Novel Cuckoo Search Optimization Algorithm Base on Gauss Distribution. *Journal of Computational Information Systems*, 8(10), 4193-4200.
- [14] Sierra, F. J. (2013). *Enciclopedia de microsoft visual C# - 4a ed, 4 ed., Ra-Ma Editorial, S.A., 2013. . Ra-Ma Editorial.*
- [15] Zhao, X. B., Ji, X. H., Zhang, Y. H., Zhu, T. J., Tu, J. P., & Zhang, X. B. (2005). Bismuth telluride nanotubes and the effects on the thermoelectric properties of nanotube-containing nanocomposites. *Applied Physics Letters*, 86(6), 062111.
- [16] Asiaei, S., Khatibi, A. A., Baniasadi, M., & Safdari, M. (2010). Effects of carbon nanotubes geometrical distribution on electrical percolation of nanocomposites: a comprehensive approach. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(6), 818-829.
- [17] Peñuñuri F., Zambrano M., Acosta C., Zaragoza N. (2010). Ajuste de datos a modelos físicos usando Mathematica. *Ingeniería*, 14(1), 55-66.
- [18] Rodríguez, M. G. (2003). *Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.