

EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE UNA MATRIZ POLIMÉRICA CAUSADA POR EL CAMBIO EN LA ORIENTACIÓN DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO EMBEBIDOS BAJO UN CAMPO ELÉCTRICO

EVALUATION OF THE DEFORMATION OF A POLYMER MATRIX CAUSED BY THE CHANGE IN THE ORIENTATION OF EMBEDDED CARBON NANOTUBES UNDER AN ELECTRIC FIELD

López Chávez Enrique¹, Ruiz Ramírez José Efraín², Nájera Medina Porfirio Roberto³, Vargas Galarza Zully⁴, Salazar Neri José Aldo⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.381>

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, enrique.lc@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0009-2112-6140>

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, jose.rr@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0003-2039-0923>

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, dir_zacatepec@tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0006-9997-2003>

⁴Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, zully.vg@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5429-0897>

⁵Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, L22090747@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0007-0294-0492>

Resumen – Los polímeros electroactivos (EAP) se han convertido en un área de interés hacia el desarrollo de músculos artificiales, sistemas de control, dispositivos médicos, entre otros. Adicionalmente los nanotubos de carbono (CNT) son una excelente opción para esos propósitos por que poseen excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, que puede añadir rigidez y conductividad eléctrica a los polímeros. A pesar de que existen numerosos estudios sobre los CNT, en muy pocos de ellos se puede encontrar la deformación de matrices poliméricas causada por la orientación de dichos CNT bajo la acción de un campo eléctrico, por lo que en esta investigación se presenta una primera aproximación sobre la deformación de una matriz de polietileno con inclusiones de CNT. Para lograr esta deformación, la orientación de los CNT se simuló por el método de elementos finitos en el que un campo eléctrico es generado por la aplicación de una diferencia de potencial de 10 volts (de -5 a 5 volts en dos conductores) que generan un campo eléctrico $E = 8.033 \times 10^{-7} V/m$. El campo eléctrico a su vez genera un momento y una polarización sobre los nanotubos haciendo que estos se alineen verticalmente. Los resultados demostraron que la matriz de polietileno presentó una mayor deformación en las regiones donde se encuentran las inclusiones de CNT, mientras que las concentraciones más altas de esfuerzos ocurrieron en los mismos CNT.

Palabras Clave: Campo eléctrico, Deformación mecánica, Matriz polimérica, Método de elementos finitos, Nanotubos de carbono (CNT), polímeros electroactivos (PEA).

Abstract – Electroactive polymers have gained significant interest in fields such as the development of artificial muscles, control systems, medical devices, and more. Additionally, carbon nanotubes (CNT) are an excellent option for these purposes because they possess outstanding mechanical and electrical properties, which can enhance the rigidity and electrical conductivity of polymers. However, despite extensive studies on CNT, very few of them have addressed the deformation of polymeric matrices caused by the orientation of CNT under the influence of an electric field. Therefore, this work presents a preliminary approach to the deformation of a polyethylene matrix with CNT inclusions.

To achieve this deformation, the orientation of the CNT was simulated using the finite element method, where an electric field was generated by applying a potential difference of 10 volts (ranging from -5 to 5 volts across two conductors), resulting in an electric field $E = 8.033 \times 10^{-7} V/m$. The electric field, in turn, induces a moment and polarization on the nanotubes, causing them to align vertically. The results showed that the polyethylene matrix exhibited the highest deformation in regions with CNT inclusions, while the highest stress concentrations occurred within the nanotubes themselves.

Key words – Electric field, Mechanical deformation, Polymeric matrix, Finite element method, Carbon nanotubes (CNT), electroactive polymers (EAP).

INTRODUCCIÓN

Los nanotubos de carbono (CNT) poseen una estructura alargada y son capaces de reaccionar a la acción de un

campo eléctrico. Esta interacción del campo eléctrico con los CNT tiene diferentes efectos, uno de ellos está relacionado con promover la orientación de los nanotubos en diferentes medios. Otro efecto del campo eléctrico está relacionado a la diferencia de potencial de contacto entre el nanotubo y el material. Es necesario un estudio teórico y experimental más profundo sobre la influencia del campo eléctrico en la alineación de los CNT. Por ejemplo, Tang y Liang [1] determinan que el campo eléctrico E induce un momento dipolar en una partícula neutra y este potencial de interacción de dos partículas neutras en grandes distancias desde uno al otro está determinado por los valores de estos momentos dipolares inducidos.

Los CNT tienen características únicas de emisión [2-6], que son causadas por su alta relación de aspecto y buena conductividad eléctrica. En combinación con una alta estabilidad térmica, mecánica y química, estas propiedades de los CNT determinan la posibilidad de desarrollo de un nuevo tipo de dispositivos electrónicos de vacío en donde intervienen campos de electrones sobre cátodos de emisión basados en CNT. En contraste con los emisores convencionales de campo de electrones, los cátodos operan a un voltaje aplicado relativamente bajo (en el nivel 1 kV) que permite el desarrollo de dispositivos en miniatura. Esto es causado por la mejora del campo eléctrico, principalmente a causa de ello es el efecto cerca de una punta de nanotubo que puede ser varios cientos de veces mayor que la resistencia media del campo eléctrico en el espacio entre los electrodos. Existe una amplia aplicación de cátodos basados en CNT y las perspectivas de su uso en monitores planos [7], las fuentes de rayos X [8-14], tubos de iluminación [15-18], y los generadores y amplificadores que participan en la radiación de microondas [19,20] hacen que sea necesario encontrar los factores físicos que limitan la densidad de corriente de emisión de dichos cátodos para determinar la densidad de corriente máxima posible.

Desde el descubrimiento de los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT), se ha esperado que sean los componentes básicos de nanomateriales funcionales de nueva generación. Sin embargo, su fuerte propiedad de cohesión y escasa solubilidad ha estado restringiendo su aplicación a campos de investigación fundamental y aplicada. Uno de los métodos para superar estos problemas es hacer que los SWCNT se envuelvan con polímeros. A su vez, la fabricación eficiente de compuestos con CNT se ve impulsada por la capacidad de crear anisotropía en el nivel molecular para obtener las propiedades deseadas [21].

Alineación de los nanotubos de carbón bajo la acción de un campo eléctrico.

La alineación de los CNT, de acuerdo con lo establecido por M.A Shao-Jie [22], puede lograrse cuando el ángulo del nanotubo de orientación relativa al material depende de la fuerza del campo eléctrico externo dirigido perpendicularmente al plano de dicho material. Por lo

tanto, surge un problema en la dependencia del ángulo de orientación del nanotubo de carbón con respecto al material en la intensidad de campo eléctrico.

El valor de este ángulo se puede determinar a partir del equilibrio mecánico de las fuerzas que actúan sobre el nanotubo. El campo eléctrico E induce la polarización P en el nanotubo conductor, $P = \alpha_{II} E \cos(\phi)$. Aquí, α_{II} es la polarizabilidad longitudinal del tubo. La interacción entre el dipolo eléctrico formado y el campo eléctrico genera un momento M [22,23], que se expresa por:

$$M = EP = \frac{1}{2} E^2 (\alpha_{II} - \alpha_{\perp}) \sin(2\phi) \quad (1)$$

De acuerdo con cálculos numéricos [22-23], la polarizabilidad longitudinal y transversal del CNT son:

$$\alpha_{II} = (0.23 + 0.135D)(L^2 + 52.5) \quad (2)$$

$$\alpha_{\perp} = (0.12D^2 + 1.76)(L + 4.65) \quad (3)$$

donde D y L son el diámetro y la longitud del nanotubo, respectivamente. La polarizabilidad longitudinal es aproximadamente L / D veces más alta que la polarizabilidad transversal y para los nanotubos con gran relación de aspecto $L / D \gg 1$, la polarizabilidad transversal es insignificante en comparación con la polarizabilidad longitudinal.

Para una sola capa de CNT, $D^4 - d^4 \approx 4\delta D^3$, donde δ es el espesor efectivo de la pared de nanotubos y es aproximadamente 3.4 nanómetros. El ángulo de flexión de los CNT bajo la acción del campo eléctrico se determina a partir de la ecuación de equilibrio mecánico entre el momento de flexión y el momento de las fuerzas elásticas, de tal manera que:

$$E^2 (\alpha_{II} - \alpha_{\perp}) \sin(2\phi) / 2 = 0.15 \frac{Y(D^4 - d^4)}{L} (\theta - \phi) \quad (4)$$

donde el ángulo $\theta - \phi$ es el ángulo de flexión del nanotubo. La ecuación (5) permite la estimación del valor de la intensidad de campo eléctrico E_c , que compensa la flexión inicial del nanotubo. Teniendo en cuenta la condición $\phi \ll 1$, entonces:

$$E^2 = Y \frac{(D^4 - d^4)}{L^3 D} \quad (5)$$

En el caso de un CNT de múltiples capas, la ecuación (5) se reduce a:

$$E^2 = Y \left(\frac{D}{L} \right)^3 \quad (6)$$

mientras que, en el caso de un CNT de una sola capa, se puede escribir:

$$E^2 = Y \frac{4\delta}{D} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \quad (7)$$

DESARROLLO METODOLOGÍA Y ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO

El material que se utilizó para esta investigación es un polietileno de alto peso molecular el cual se emplea como matriz, las propiedades de dicho material se muestran en la tabla 1.

Los nanotubos de carbono se añaden dentro de la matriz de polietileno en forma de inclusiones. La Tabla 2 muestra las propiedades de los nanotubos de carbono.

Tabla 1. Propiedades del Polietileno.

Polietileno de alto peso molecular	
Densidad	950 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	0.565 – 1.50 GPa
Coefficiente de Poisson	0.42
Esfuerzo de cedencia a la tensión	11 – 43 MPa
Esfuerzo de cedencia a la compresión	4 – 31.7 Mpa
Esfuerzo ultimo a la tensión	10 – 43 Mpa
Esfuerzo ultimo a la compresión	4 - 31.7 MPa
Resistividad eléctrica	1 x 10 ¹⁶ Ωm

Fuente. Propiedades mecánicas del Polietileno (Zully Vargas Galarza, 2025).

Tabla 2. Propiedades de los nanotubos de carbón.

Propiedades de los nanotubos de carbón	
Densidad	1400 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	0.6 TPa
Esfuerzo ultimo	200 MPa
Dureza	200 GPa
Energía superficial	8.53 J/m ²
Coefficiente de Poisson	0.186
Resistividad eléctrica	1 x 10 ⁻⁶ Ωm

Fuente. Propiedades mecánicas de los nanotubos de carbón de pared simple (Porfirio Roberto Nájera Medina, 2025).

La geometría que se realizó para el análisis es bastante sencilla, con el fin de comprobar la deformación que existe en la matriz de polietileno a causa de la orientación de los CNT generado por un campo eléctrico. La matriz de polietileno tiene un diámetro de 500 micras y una longitud de 550 micras, por su parte los nanotubos de carbón cuentan con un diámetro de 5 micras y una longitud de 100 micras, y la separación que existe longitudinalmente entre los nanotubos es de 50 micras, esto se muestra en la figura 1a, se utilizó un total de 204 CNT, lo que representa el 26.3 % en relación con la matriz de polietileno.

Para generar el campo eléctrico se utilizaron dos conductores que se encuentran dentro de la matriz, dichos

conductores tienen un diámetro de 20 micras y una longitud de 550 micras. A los conductores se les aplico un voltaje de 5 y -5 volts respectivamente para generar un campo eléctrico $E = 8.033 \times 10^{-7} V/m$ sobre los nanotubos de carbón, de acuerdo con el análisis eléctrico. En la figura 1b se muestra el análisis eléctrico donde se observan los vectores de fuerza que salen de los conductores a causa del voltaje aplicado los cuales a su vez generan el campo eléctrico $E = 2.4 \times 10^{-7} V/m$ sobre el conductor.

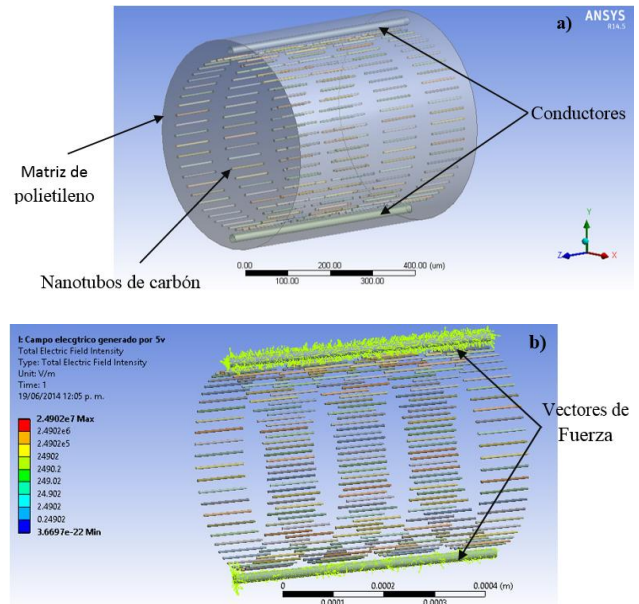
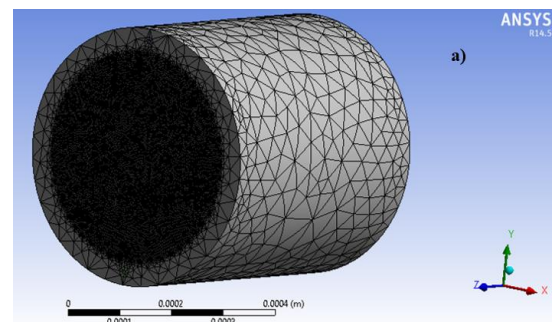


Figura 1. a) Geometría del modelo para el análisis y b) Campo eléctrico generado en el análisis eléctrico por los conductores (Zully Vargas Galarza, 2025).

El modelo presenta un total de 1,359,301 nodos y 597,319 elementos, el mallado que se realizó fue con elementos del tipo tetraédricos, en la figura 2a se muestra el mallado en la matriz y en la figura 2b se muestra la malla en los CNT. Se puede observar que la malla es mucho más fina en la zona donde se encuentran los nanotubos de carbón, esto es causado por el cambio de geometría que existe entre la matriz y dichos nanotubos.



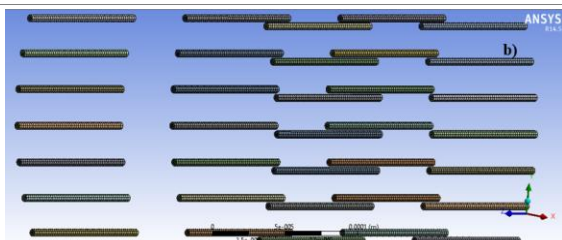


Figura 2. a) Mallado en la matriz y b) Mallado en los nanotubos de carbón (Enrique López Chávez, 2025).

La dirección del campo eléctrico es desde el conductor de los 5 volts hacia el conductor con -5 volts, por esta razón los nanotubos se orientan hacia dicha dirección, para mostrar esto, en la figura 3 se muestra la dirección del campo eléctrico, cabe mencionar que las líneas que se presentan pasan sobre los nanotubos de carbón.

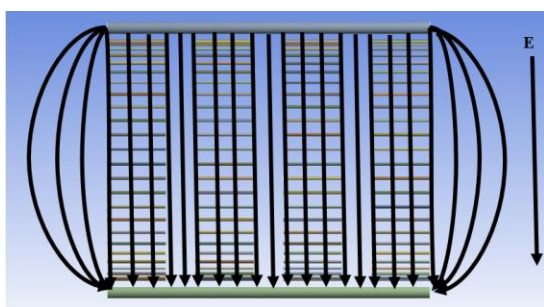


Figura 3. Dirección del campo eléctrico (José Efraín Ruíz Ramírez, 2025).

De acuerdo con la ecuación (1), para generar el momento M sobre los nanotubos es necesario calcular tanto el campo eléctrico como el momento dipolar que genera dicho campo, por esta razón se realizó el análisis eléctrico para obtener el campo que actúa sobre los nanotubos mostrado en la figura 1b. Ahora bien, una vez calculado el campo eléctrico es necesario calcular la polarización longitudinal y transversal utilizando la ecuación 2 y 3. Al obtener dichos valores es posible calcular el momento M que es la fuerza que actúa sobre los nanotubos de carbón en el análisis estático y ya que el campo eléctrico es constante de acuerdo con Faraday, la fuerza sobre los nanotubos es la misma en cada uno de los nanotubos. En la tabla 3 se presentan las condiciones de frontera que se utilizaron de acuerdo con los cálculos para el modelo que se está analizando.

Tabla 3. Condiciones de la frontera.

Condición	Valor
Voltaje sobre los conductores	5 y -5 Volts
Polarización longitudinal	$12.075 \text{ \AA}^3$
Polarización transversal	$8.184 \text{ \AA}^3$
Momento	$1.25 \times 10^{-12} \text{ N}$

Fuente. Condiciones de frontera aplicados sobre el modelo (José Aldo Salazar Neri, 2025).

El análisis eléctrico además de mostrar el campo eléctrico que se genera también muestra otro aspecto importante como el calor generado a causa del voltaje que se aplica sobre los conductores. Este punto es importante ya que hay que recordar que la aguja polimérica se introduce sobre el paciente y si se genera demasiado calor esto podría llegar a generar molestias. El valor máximo de calor se concentra en el conductor (como se muestra en la figura 4) al cual se aplica los 5 volts con un valor de 0.1403 W/m^3 el cual es mínimo y el calor que se genera sobre la matriz es aún menor.

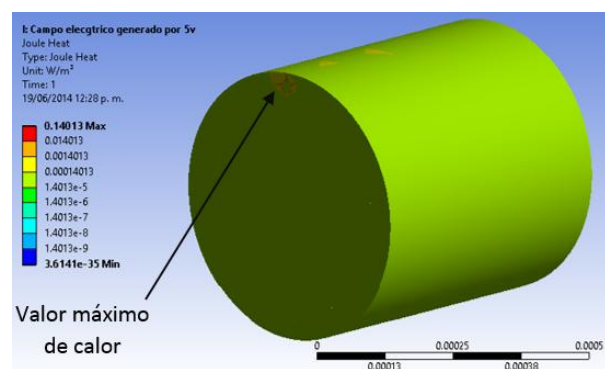


Figura 4. El máximo calor se genera sobre el conductor (José Efraín Ruíz Ramírez, 2025).

Con el momento $M = 1.25 \times 10^{-13} \text{ Nm}$ se realiza el análisis estático para obtener tanto la deformación de la matriz a causa de los CNT y la orientación de estos últimos. Como se mencionó anteriormente la fuerza se ejerce sobre cada uno de los nanotubos de carbón como se muestra en la figura 5.

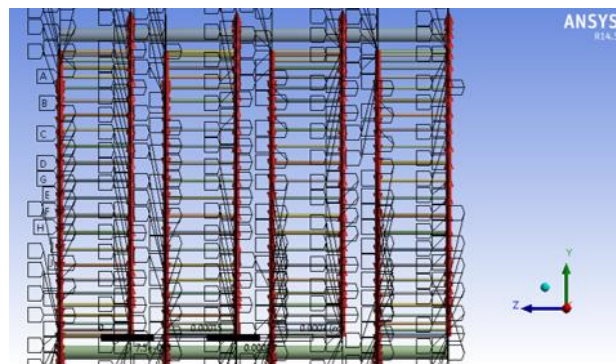


Figura 5. Distribución de las fuerzas sobre los nanotubos (Porfirio Roberto Nájera Medina, 2025).

Al ejercer la fuerza sobre los nanotubos, estos se orientan en la dirección del campo eléctrico, provocando la deformación de la matriz de polietileno, por otra parte, las concentraciones más altas de esfuerzos ocurrieron en los mismos nanotubos a causa de su elevado módulo de elasticidad en comparación del polietileno. En la figura 6 se muestra la orientación que obtienen los CNT, así como los esfuerzos que se generan sobre ellos, un aspecto importante de señalar es que aparentemente los nanotubos presentan una deformación, lo cual no es

correcto ya que la fuerza que se aplica es demasiado pequeña en comparación al módulo de elasticidad de los nanotubos, se observa que existe deformación ya que el programa de elemento infinito exagera las deformaciones con el fin de poder apreciar el comportamiento del fenómeno. Por ello, es importante aclarar que los nanotubos no sufren deformación. No obstante, su orientación en la matriz sí es posible, aunque, como se observa, las deformaciones en esta son muy pequeñas.

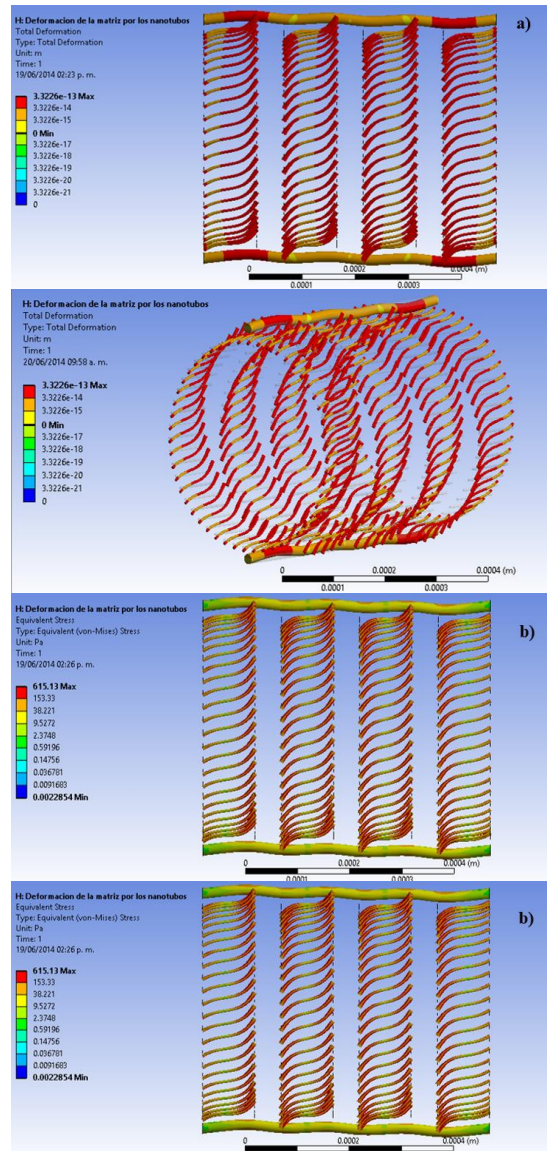


Figura 6. a) Orientación de los nanotubos de carbón y b) Esfuerzos generados sobre los nanotubos (Enrique López Chávez, 2025).

Como se mencionó anteriormente la deformación que se presenta en la matriz es generada por la orientación de los CNT, dicha deformación de la matriz es aproximadamente de 3.226×10^{-13} m, y se presentó una mayor deformación en las regiones donde se encuentran las inclusiones de CNT como se observa en la figura 7, y

las concentraciones más bajas de esfuerzos se encuentran en aquellas zonas donde no hay presencia de nanotubos. Como se mencionó, los esfuerzos se concentran en los nanotubos de carbono, como se muestra en la figura 8.

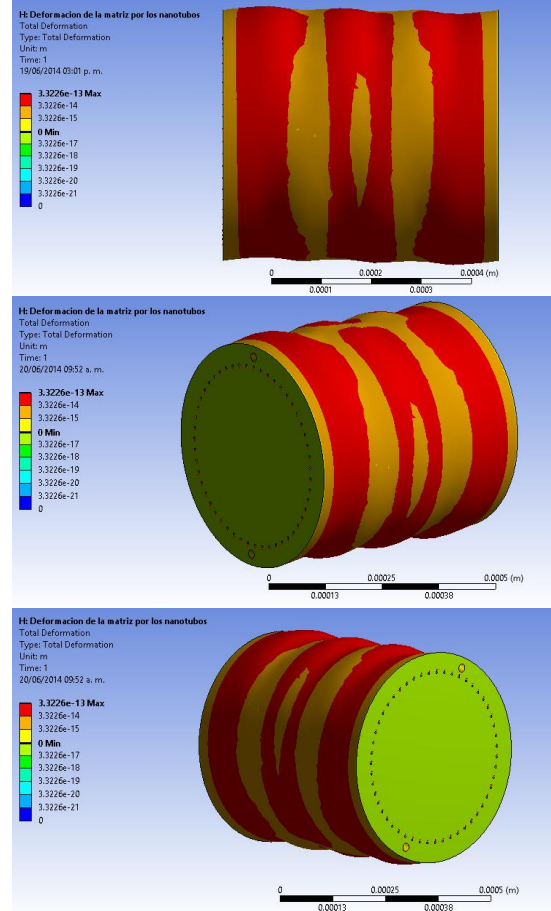


Figura 7. Deformación de la matriz de polietileno (Enrique López Chávez, 2025)

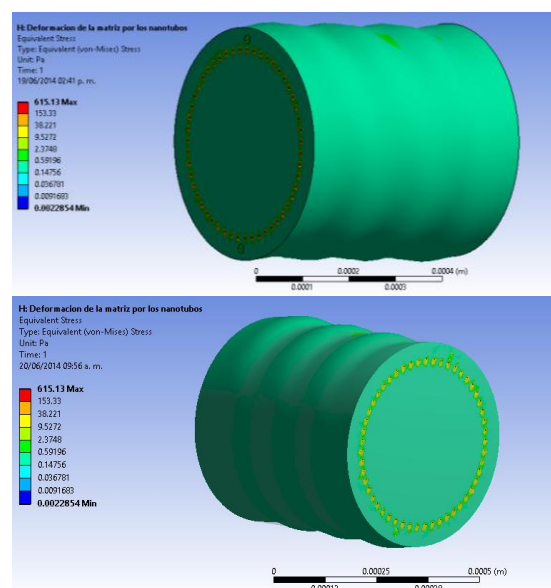


Figura 8. Los máximos esfuerzos se encuentran en los nanotubos de carbón (José Aldo Salazar Neri, 2025).

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con un área del conductor de $3.5 \times 10^{-8} m^2$ y un voltaje aplicado de 5 volts, se genera un campo eléctrico $E = 8.033 \times 10^{-7} V/m$, si el área del conductor aumenta el campo eléctrico también se incrementará ya que el campo está en función del área y por consiguiente la fuerza que se aplica a los nanotubos será mayor, lo que provocará una mayor deformación sobre la matriz de polietileno. Con la fuerza generada a partir del campo eléctrico y la polarización sobre los nanotubos se tiene un desplazamiento o deformación de la matriz igual a $3.226 \times 10^{-13} m$, aunque este valor puede parecer pequeño, al considerar que el área de la matriz es $1.25 \times 10^{-6} m^2$, la deformación inducida por los CNT adquiere mayor relevancia. La aplicación de fuerza sobre los nanotubos genera una concentración máxima de esfuerzos en ellos, con un valor aproximado de 615 Pa.

Efecto del campo eléctrico sobre la orientación y deformación de CNT:

Según Baughman et al. (2002) en su estudio sobre actuadores basados en nanotubos [24], se establece que la aplicación de campos eléctricos genera polarización inducida en los CNT, provocando fuerzas de tracción o compresión que pueden ser transmitidas a la matriz polimérica a través de la interfaz. Aunque la deformación lineal puede ser pequeña, los efectos acumulativos a escala macro pueden traducirse en cambios mensurables en forma, módulo elástico o dirección de esfuerzos del material compuesto.

Relación entre el área transversal del conductor y el aumento del campo efectivo:

El planteamiento sugiere que, al aumentar el área del conductor, también aumenta el campo eléctrico. Sin embargo, desde un punto de vista físico, el campo eléctrico ($E = V/d$) es independiente del área y depende directamente del voltaje y la distancia entre electrodos. No obstante, el flujo de corriente o densidad de carga inducida sí depende del área, lo que podría incrementar la fuerza neta actuante sobre los CNT.

Estudios como el de Tavakkol et al. (2014) muestran cómo un aumento en la densidad de CNT o en la eficiencia del contacto CNT-matriz lleva a una mayor transmisión de la fuerza inducida por campo eléctrico, especialmente en matrices como el polietileno. Esto se traduce en mayores deformaciones locales [25].

Concentración de esfuerzos y su efecto en la matriz:

La concentración máxima de esfuerzos de 615 Pa observada en los CNT representa un valor moderado, pero no despreciable considerando las escalas nanométricas. De hecho, Li and Chou (2003) demostraron que en nanocompuestos poliméricos reforzados con CNT, incluso fuerzas muy pequeñas pueden inducir deformaciones significativas localizadas, alterando las propiedades globales del material. Esto es

atribuible a la alta relación superficie-volumen de los nanotubos y su eficiencia en transferir cargas mecánicas [26].

CONCLUSIONES

El resultado muestra cómo el campo eléctrico generado influye en la deformación de la matriz de polietileno. A medida que se aumenta el área del conductor, aumenta el campo eléctrico y, por ende, la fuerza sobre los nanotubos (CNTs) también aumentan, lo que lleva a una mayor deformación. Este concepto es importante porque sugiere una relación directa entre el área del conductor y la deformación inducida en la matriz, lo que permite la manipulación controlada de la deformación mediante el ajuste del área. A pesar de que la deformación puede parecer pequeña, el resultado aclara que el área de la matriz hace que esta deformación tenga un impacto significativo, destacando la relevancia de este fenómeno en aplicaciones donde incluso pequeñas deformaciones pueden tener efectos notables, como en materiales compuestos. El análisis de la concentración de esfuerzos dentro de los nanotubos también es un alcance importante. Esto ayuda a entender cómo se distribuyen las fuerzas aplicadas sobre los nanotubos y puede ser relevante para predecir comportamientos de materiales compuestos con nanotubos, su resistencia y durabilidad. El resultado indica que el campo eléctrico depende directamente del área, pero en la práctica, la relación entre el área del conductor y el campo eléctrico puede ser más compleja. Factores como la geometría exacta del conductor y los efectos de borde no se abordan completamente en el cálculo. Aunque la deformación se presenta como significativa debido al área de la matriz, el valor es extremadamente pequeño. Esto podría limitar la aplicabilidad del modelo a sistemas donde se requieran deformaciones más grandes o donde se necesite una sensibilidad más alta. El modelo asume una concentración de esfuerzos constante en los nanotubos sin considerar variaciones posibles debido a factores como la orientación de los nanotubos, la distribución de las cargas o las posibles heterogeneidades en la matriz de polietileno. La realidad podría ser más compleja, y la deformación real podría variar dependiendo de estos factores. El análisis hace supuestos ideales sobre el comportamiento de los nanotubos y la matriz, como la uniformidad de la polarización y la respuesta lineal a la fuerza aplicada. En condiciones reales, los nanotubos podrían experimentar desalineaciones, defectos, o interacciones más complejas con la matriz, lo que afectaría la precisión del modelo.

Baughman et al. (2002) demostraron que los nanotubos de carbono (particularmente de pared simple) pueden actuar como materiales actuadores altamente eficientes, capaces de generar deformaciones mecánicas significativas en respuesta a estímulos eléctricos de bajo voltaje [24]. Yang et al., 2018 por su parte demostraron que la aplicación de un campo eléctrico de alta frecuencia

durante el procesamiento de nanocompuestos de polipropileno con nanotubos de carbono multi-pared (MWCNTs) induce un alineamiento efectivo de los nanotubos dentro de la matriz polimérica, lo cual mejora significativamente sus propiedades eléctricas, dieléctricas y mecánicas. Este alineamiento favorece la formación de redes conductoras más eficientes y aumenta la rigidez del material, evidenciada por un mayor módulo de almacenamiento. Los resultados confirman que el control de la microestructura mediante campos eléctricos es una estrategia eficaz para optimizar el desempeño funcional de materiales compuestos, permitiendo el desarrollo de sistemas inteligentes y multifuncionales para aplicaciones avanzadas en sensores, actuadores y dispositivos electroactivos [27].

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por las valiosas facilidades y el apoyo brindado durante el proceso de elaboración de este artículo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tang, H., Liang, S.D., Deng, S.Z., Xu, N.S. Comparison of field and thermionic emissions from carbon nanotubes. *J. Phys. D* 2006, 39, 5280–5284.
- [2] Chernozatonskii, L.A., Gulyaev, Y.V., Kosakovskaja, Z.J., Sinitsyn, N.I., Torgashov, G.V., Zakharchenko, Yu, F., Fedorov, E.A., Val'chuk, V.P. Electron field emission from nanofilament carbon films. *Chem. Phys. Lett.* 1995, 233, 63–68.
- [3] De Heer, W.A., Chatelain, A., Ugarte, D. A carbon nanotube field-emission electron source. *Science* 1995, 270, 1179–1180.
- [4] Rinzler, A.G., Hafner, J.H., Nikolaev, P., Nordlander, P., Colbert, D.T., Smalley, R.E., Lou, L., Kim, S.G. Unraveling nanotubes: Field emission from an atomic wire. *Science* 1995, 269, 1550–1553.
- [5] Eletsii, A.V. Carbon nanotubes and their emission properties. *Phys. Usp.* 2002, 45, 369–402.
- [6] Eletsii, A.V. Carbon nanotube-based electron field emitters. *Phys. Usp.* 2010, 53, 863–892.
- [7] Mauger, M., Vu, T.V. Vertically aligned carbon nanotube arrays for giant field emission displays. *J. Vac. Sci. Technol. B* 2006, 24, 997–1003.
- [8] Gutman, G., Strumban, E., Sozontov, E., Jenrow, K. X-ray scalpel—A new device for targeted X-ray brachytherapy and stereotactic radiosurgery. *Phys. Med. Biol.* 2007, 52, 1757–1770.
- [9] Dickler, A. Xoft Axxent electronic brachytherapy—A new device for delivering brachytherapy to the breast. *Nat. Rev. Clin. Oncol.* 2009, 6, 138–142.
- [10] Schneider, F., Fuchs, H., Steil, F.L.V., Ziglio, F., Kraus-Tiefenbacher, U., Lohr, F., Wenzet, F. A novel device for intravaginal electronic brachytherapy. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2009, 74, 1298–1305.
- [11] Rivard, M.J., Davis, S.D., De Werd, L.A., Rusch Thomas, W., Axelrod, S. Calculated and measured brachytherapy dosimetry parameters in water for the Xoft Axxent X-Ray Source: An electronic brachytherapy source. *Med. Phys.* 2006, 33, 4020–4032.
- [12] Kim, H.J., Ha, J.M., Heo, S.H., Choy, S.O. Small-sized flat-tip CNT emitters for miniaturized X-ray tubes. *J. Nanomater.* 2012, 2012, doi: [10.1155/2012/854602](https://doi.org/10.1155/2012/854602).
- [13] Zhang, J., Yang, G., Lee, Y.Z., Lu, J.P., Zhou, O. Multiplexing radiography using a carbon nanotube-based X-ray source. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 89, doi: [10.1063/1.2234744](https://doi.org/10.1063/1.2234744).
- [14] Kawakita, K., Hata, K., Sato, H., Saito, Y. Development of microfocused X-ray source by using carbon nanotube field emitter. *J. Vac. Sci. Technol. B* 2006, 24, 950–952.
- [15] Obratsov, A.N., Kleshch, V.I. Cold and laser stimulated electron emission from nanocarbons. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 2009, 4, 207–219.
- [16] Croci, M., Arfaoui, I., Stöckli, T., Chatelain, A., Bonard, J.-M. A fully sealed luminescent tube based on carbon nanotube field emission. *Microelectron. J.* 2004, 35, 329–336.
- [17] Antony, J., Qiang, Y. Cathodoluminescence from a device of carbon nanotube-field emission display with ZnO nanocluster phosphor. *Nanotechnology* 2007, 18, doi: [10.1088/09574484/18/29/295703](https://doi.org/10.1088/09574484/18/29/295703).
- [18] Bonard, J., Stöckli, T., Noury, O., Châtelain, A. Field emission from cylindrical carbon nanotube cathodes: Possibilities for luminescent tubes. *Appl. Phys. Lett.* 2001, 78, 2775–2777.
- [19] Teo, K.V.K., Minoux, E., Hudanski, L., Peauger, F., Schnell, J.-P., Gangloff, L., Legagneux, P., Dieumegard, D., Amaratunga, G.A.J., Milneet, W.I. Microwave devices: Carbon nanotubes as cold cathodes. *Nature* 2005, 437, 968–969.
- [20] Milne, W.I., Teo, K.B.K., Minoux, E., Groening, O., Gangloff, L., Hudanski, L., Schnell, J.-P., Dieumegard, D., Peauger, F., Bu, I.Y.Y., et al. Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers. *J. Vac. Sci. Technol. B* 2006, 24, 345–348.
- [21] Walters D A et al 2001 *Chem. Phys. Lett.* 338 14

- [22] Shao-Jie, M.A., Guo, W.L. Mechanism of carbon nanotubes aligning along applied electric field. Chin. Phys. Lett. 2008, 25, 270–273.
- [23] Bocharov, G.S., Knizhnik, A.A., Eletsii, A.V., Sommerer, T.J. Influence of the electric field on the alignment of carbon nanotubes during their growth and emission. Tech. Phys. 2012, 57, 270–278.
- [24] Baughman, R. H., et al. "Carbon nanotube actuators." Science 297.5589 (2002): 787–792.
- [25] Tavakkol, M., et al. "Electric field-induced deformation of CNT/polymer nanocomposites." Composites Science and Technology 104 (2014): 93–99.
- [26] Li, C., & Chou, T.-W. "A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes." International Journal of Solids and Structures 40.10 (2003): 2487–2499.
- [27] Yang et al., 2018 "Electric field-induced alignment of MWCNTs during the processing of PP/MWCNT composites"

Tabla de Roles de Contribución

Rol	Autor (es)
Conceptualización	Enrique López Chávez
Curación de datos	José Aldo Salazar Neri
Metodología	Enrique López Chávez
Administración del Proyecto	Porfirio Roberto Nájera Medina
Recursos	Zully Vargas Galarza
Software	José Efraín Ruiz Ramírez
Supervisión	Porfirio Roberto Nájera Medina
Validación	José Efraín Ruiz Ramírez
Visualización	José Aldo Salazar Neri
Redacción- Borrador Original	Zully Vargas Galarza
Redacción-Revisión y edición	Enrique López Chávez



Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.