



# Aplicaciones de Nanotubos de Carbono, Grafeno y Óxidos Metálicos en Sensores para Monitoreo de Equipo Eléctrico de Potencia

*Las empresas proveedoras de energía eléctrica, tienen la necesidad de eficientar los procesos de generación, transmisión y distribución de la energía*

*Para la integración, es fundamental tener disponibles tecnologías de monitoreo que sean de respuesta rápida y confiables.*



## Introducción

Actualmente, las empresas proveedoras de energía eléctrica tienen la necesidad de eficientar los procesos de generación, transmisión y distribución de la energía. Lo anterior, se puede lograr a través de varias directrices, una de ellas es la implantación de redes inteligentes en sus procesos que les permita tener el control de los mismos en forma continua, para detectar de manera oportuna cuando un equipo de potencia presenta anomalías en su funcionamiento, debido a la alteración en el comportamiento de sus componentes, lo que pondría en riesgo su integridad y por lo tanto, la confiabilidad de la red eléctrica. Contar con un monitoreo continuo permitirá tomar acciones inmediatas para evitar la salida del activo por una falla que ocasiona la pérdida de energía, pérdidas económicas, y según la magnitud de dicha falla, daños al medio ambiente y afectaciones humanas.

La integración de las redes inteligentes tiene su base en los sistemas de monitoreo continuo y para ello es fundamental tener disponibles tecnologías de monitoreo que sean de respuesta rápida, confiables y a un costo acorde a la inversión realizada por el activo, se recomienda no mayor a un 10 por ciento del valor del mismo.

Los materiales empleados como aislamiento (aceite, celulosa, SF<sub>6</sub>) en equipos eléctricos están sometidos a esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos durante su operación, que ocasionan un proceso de degradación, afectan la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los mismos. Los principales subproductos gaseosos que se forman en el aceite mineral y celulosa por la degradación de los aislamientos son: hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para el caso del gas Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), los principales subproductos son: ácido fluorhídrico (HF), sulfuro de tionilo (SOF<sub>2</sub>), sulfuro de sulfurilo (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Las tecnologías hoy disponibles para monitoreo de gases continuo (espectroscopia foto-acústica e infra-roja, electroquímica, entre otras), para tal fin, en la mayoría de los casos resultan complejas, no del todo confiables (comparadas con aquellas establecidas en laboratorio) y con costos elevados, tal que no se justifica su instalación en todos los equipos eléctricos. En algunos casos (sensores para monitoreo continuo de subproductos de gas SF<sub>6</sub>) no se cuenta con ella.

Otra variable de interés y de un impacto importante en el desempeño de transformadores es la deformación de los devanados, actualmente no se tiene una tecnología de monitoreo en línea comercialmente disponible. Contar con un sistema de este tipo,

---

*Los límites de detección de estos sensores para los gases antes mencionados, van desde 2.5 a 60 ppm y en algunos casos del orden de ppb*

---

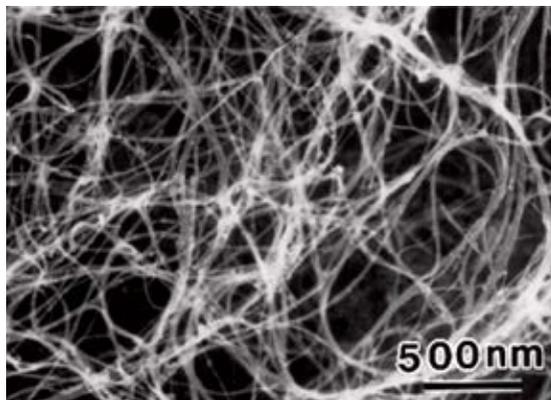


Figura 1a. Nanotubo de carbono de pared simple.

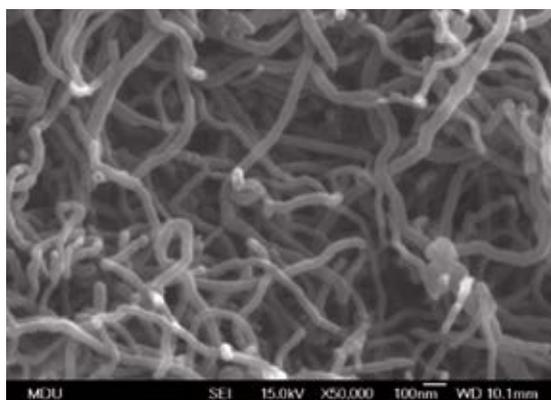


Figura 1b. Nanotubo de carbono de pared múltiple.

ayudará a prever fallas de gran magnitud por reducción de distancias dieléctricas, arcos eléctricos y cortocircuitos. Finalmente, las tecnologías disponibles para la medición de deformaciones en materiales, por ejemplo el conductor de líneas de transmisión, están soportadas en strain gauge y Fiber Bragg Grating (FBG por sus siglas en inglés). Algunas limitaciones de estas tecnologías, son su manejo (muy frágil, requiere superficies lisas) y de reutilización debido a que una vez realizada la medición la parte activa no se recupera, el costo y disponibilidad.

Con base en todo lo antes mencionado, podemos ver que existen en el mercado algunas técnicas de diagnóstico y sistemas de monitoreo de variables en equipos eléctricos, sin embargo, se presentan situaciones no resueltas como: altos costos para algunos casos específicos, baja confiabilidad en la medición, selectividad de los sensores para algunos gases en especial, y en otros casos y de mayor reto no existe aún el sistema de monitoreo. Por lo tanto, resulta de vital importancia el desarrollo de sensores para la integración de sistemas de monitoreo en línea y de forma continua de las variables que mayor impacto tienen sobre el desempeño y



Figura 2. Plaquetas de Grafeno.

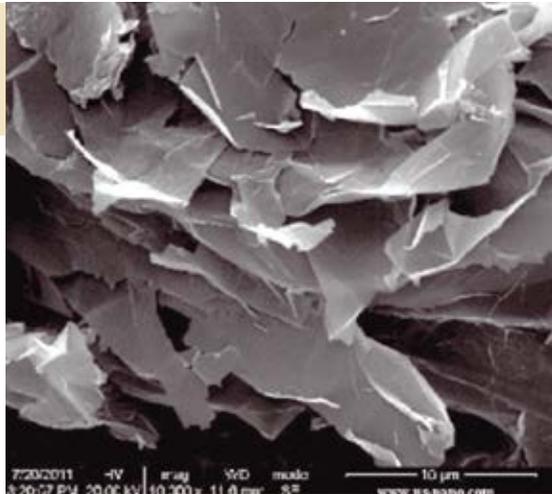


Figura 3. Nanopartículas de óxido de zinc (ZnO).



la confiabilidad en la operación de equipos de potencia. Para ello, consideramos que la nanotecnología es una buena opción para el desarrollo de dichos sensores.

### Sensores de gases

En la última década, el interés de la comunidad científica e industrial por el empleo de los materiales nanocompuestos basados en nanotubos de carbón (NTC), grafenos y óxidos metálicos ha incrementado exponencialmente debido a sus impresionantes propiedades, al encontrar una potencial aplicación como semiconductores o conductores eléctricos, sensores para detección de gases y la medición de parámetros mecánicos, y como materia prima para la fabricación de equipo especial, entre otros.

Los nanotubos de carbono están constituidos por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica. Estos pueden ser de pared simple (SWCNT por sus siglas en inglés), figura 1a y de pared múltiple (MWCNT por sus siglas en inglés), figura 1b.

El principal atributo de los nanotubos de carbono como sensores de gases es su capacidad para modificar su conductividad eléctrica inducida por la transferencia de carga con las moléculas del gas en cuestión. Los sensores basados en nanotubos de capa simple han mostrado tiempos de respuesta menor a los sensores de estado sólido. Son de tamaños pequeños y con una alta sensibilidad a temperatura ambiente. Algunos gases detectados con sensores basados en NTC, incluyen al metanol, etanol, 1-propanol y 2-propanol, amonio ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). En la pasada década, en Japón se inician una serie de trabajos de investigación encaminados al desarrollo de sensores basados en NTC para la detección de subproductos de  $\text{SF}_6$ . En uno de ellos, describen un sensor que utiliza NTC del tipo multicapa funcionalizado como parte activa. El gas  $\text{SF}_6$  se sometió a descargas parciales y midieron el cambio en la conductancia del sensor. El incremento en la conductancia del sensor se atribuyó a la interacción electrónica entre el sensor y los productos de la descomposición del  $\text{SF}_6$ , siendo éstos principalmente  $\text{SO}_2$  y HF. El sensor se saturó cuando la concentración de los gases fue del orden de 6 ppm. Algunas Universidades de Corea, proponen el uso de sensores miniatura de SWCNT fabricados por electroforesis, los cuales son capaces de detectar especies disociadas y oxidadas derivadas de la descomposición parcial del  $\text{SF}_6$  generada por descargas parciales. El sensor no reaccionó con el  $\text{SF}_6$  puro y puede ser regenerado mediante el burbujeo con aire fresco. En China, se reportó un método para detectar subproductos del  $\text{SF}_6$  debido a descargas parciales, utilizando un sensor basado en MWCNT modificado químicamente. El sensor fue capaz de detectar gases como el  $\text{SO}_2\text{F}_2$ ,  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y

---

*La integración de las redes inteligentes tiene su base en los sistemas de monitoreo continuo y para ello es fundamental tener disponibles tecnologías de monitoreo que sean de respuesta rápida*

---



HF, reportando la respuesta como función de la suma de la concentración de cada uno de los gases. Recientemente se reportó que el tratamiento de los NTC con plasma, mejoró la sensibilidad del sensor cuando se expuso a  $H_2S$ .

Otro material de propiedades sorprendentes es el Grafeno (Figura 2). Éste es un alótropo bidimensional del carbono, y puede considerarse como una capa delgada del átomo de grafito, con un área por unidad de masa del orden de  $2,600 \text{ m}^2 / \text{g}$ , siendo esta mayor que la del nanotubo de carbón ( $1.315 \text{ m}^2 / \text{g}$ ), lo cual le da una mayor capacidad de interacción. Los sensores fabricados con Grafenos son de tipo resistivo. Se ha reportado que los sensores utilizando el Grafeno en su forma base y funcionalizado muestran capacidad para detección de gases como:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ , y  $NO_2$ . Los límites de detección de estos sensores para los gases antes mencionados van desde 2.5 a 60 ppm y en algunos casos del orden de ppb.

Para el monitoreo de gases disueltos en aceite mineral en transformadores, las Instituciones Chinas reportan que sensores basados en nanopartículas de óxidos metálicos (figura 3) como el  $SnO_2$  (dióxido de estaño) el cual mostró buena respuesta a la presencia de gases como  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ , y  $C_2H_2$ . Otros sensores evaluados por esta misma institución, son los basados en nanotubos de carbono dopados con Ni (Níquel) y tratamiento ácido. Otras propuestas de diversas instituciones son el uso de nanopartículas de óxido de zinc ( $ZnO$ ) o nanotubos dopados con paladio y grupos hidroxilos ( $OH$ ). Es importante señalar que en todos los trabajos publicados, los resultados se obtuvieron al utilizar gases en su forma pura o en mezclas con inertes, es decir, no disueltos en aceite, en donde esto resulta muy complejo y este es un gran reto para llevar la tecnología a la práctica.

Los sensores de gases basados en Nanotubos, Grafenos u Óxidos Metálicos, pueden construirse por varios métodos: por vaciado del Nanocompuesto (material activo) sobre un circuito interdigitado.

Otro método simple es el de serigrafía del Nanocompuesto sobre los electrodos. Un método más complejo es el de dielectroforesis, en donde las nanopartículas son polarizadas por un campo eléctrico no uniforme, para de esta forma controlar la separación, orientación y posición de las mismas. En los casos en donde se requiera incrementar la sensibilidad del sensor con la aplicación de calor, se introduce una resistencia entre el material de soporte y los electrodos.

Las ventajas que tendrían los sensores desarrollados con nanotecnología comparados con técnicas tradicionales son: monitoreo en línea y de forma continua, selectividad y sensibilidad a un gas en particular, menor tamaño, tiempo de respuesta rápido y bajo costo. A la fecha se han reportado una gran cantidad de artículos y patentes de propuestas

# AQUÍ ESTAMOS PARA CREAR EL FUTURO – JUNTOS.

*¡Logre su visión de un sistema de gestión  
robusto y eficaz con Gensuite!*



- Basado en Mejores Prácticas
- Configuraciones Flexibles
- **Compatibilidad Móvil**
- **+16 Idiomas Disponibles**
- Sistema de Análisis de Información Integrado
- Evolución e Innovación Continua
- **Grupo de colaboración de Suscriptores**



Soluciones efectivas para empresas  
globales o incluso sitios individuales -  
¡Compatible con cada perfil operativo!

Conozca más, visítenos en  
[www.gensuite.com](http://www.gensuite.com) ... ¡Solicite una  
Demostración hoy mismo!





de sensores basados en nanotecnología, sin embargo, no hay disponible comercialmente un dispositivo capaz de monitorear continuamente los gases antes mencionados.

### Sensores de parámetros mecánicos

También se presentan algunos fenómenos mecánicos importantes de monitorear como son: la vibración (produce deformación en devanados) en transformadores y deformaciones en los conductores derivado de esfuerzos, cambios de temperatura ambiente y por distorsiones de flujo en la red eléctrica.

La vibración en equipo de potencia como son los transformadores, tiene su origen en fenó-

menos naturales y por fenómenos eléctricos internos como magnetostricción y fuerzas electromagnéticas. La medición de la vibración se realiza comúnmente al utilizar acelerómetros basados en piezoeléctricos. Para detectar anomalías directas en el núcleo y devanado se emplea la técnica de Análisis de Respuesta a la Frecuencia (FRA por sus siglas en inglés), ésta se realiza fuera de línea. Esto implica dejar de procesar energía con las consecuentes pérdidas económicas, además, no se puede detectar en el momento que la posible falla es incipiente. Respecto al desarrollo de sensores basados en nanotecnología para la medición de vibración hay muy pocos reportes, en uno de ellos utilizan a los nanotubos de carbono como sensores de masa, que sugieren el empleo de nanotubos de ZnO, entre otros. Sin embargo, en el mercado sólo están disponibles sensores que emplean acelerómetros que combinan la tecnología MEMS y recientemente, propuestas que usan Vibrómetros de Láser Doppler. Para la medición de la deformación en materiales existen tecnologías soportadas en strain gauge y Fiber Bragg Grating (FBG por sus siglas en inglés) principalmente. La primera con problemas de manejo (muy frágil, requiere superficies lisas) y de reutilización debido a que una vez realizada la medición la parte activa no se recupera. La segunda, su desventaja radica en su costo y disponibilidad. Con base en lo anterior, empiezan a aparecer investigaciones con el uso de la nanotecnología, principalmente nanotubos de carbono y grafeno, para la fabricación de sensores de deformación.

El Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL, antes IIE) ha incursionado en este área de investigación aplicada a través del desarrollo de sistemas (se tiene uno a escala prototipo para subproductos



Figura 4. Sensor escala prototipo de SF<sub>6</sub>.



*El interés de la comunidad científica e industrial por el empleo de los materiales nanocompuestos basados en nanotubos de carbón, grafenos y óxidos metálicos ha incrementado exponencialmente*

de SF<sub>6</sub>, figura 4) de monitoreo continuo de gases que emplean sensores basados en nanotubos de carbono. Adicionalmente, se explorará el desarrollo de sensores capaces de monitorear la deformación en devanados de transformadores y en el conductor de líneas de transmisión. Asimismo, se evalúan las propiedades dieléctricas de los nanocompuestos para poder establecer los mecanismos de polarización y conducción, conocer su comportamiento mecánico-dinámico para establecer su capacidad para soportar esfuerzos, y estructurales para determinar su impacto en las propiedades dieléctricas y mecánicas. También se evalúa el efecto de la modificación superficial de los nanotubos con agentes acoplantes (organosilanos) y ácidos para incrementar la dispersión en la matriz polimérica. Lo anterior, con

### \* Leonardo Rejón García

Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1998. Maestro en Ingeniería Química por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en 1990. Ingeniero Químico por la Universidad Veracruzana en 1986. Ingresó al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), antes Instituto de Investigaciones Eléctricas en 1989 como investigador en el Departamento de Materiales. En septiembre de 2001 fue nombrado Gerente de la Gerencia de Materiales y Procesos Químicos, cargo que desempeñó hasta julio de 2010. En ese mismo año inició su colaboración en la Gerencia de Equipos Eléctricos, donde ha contribuido a través de la dirección y participación en proyectos relacionados con el desarrollo de metodologías para la gestión del mantenimiento de activos basado en condición, impulsando esta línea hacia el área de máquinas rotatorias. Asimismo ha tomado el liderazgo en la formación de un grupo de investigación aplicada en el desarrollo de sistemas de monitoreo de la calidad del aislamiento de equipo eléctrico primario, utilizando la nanotecnología. Ha publicado más de veinte artículos en revistas arbitradas y ha generado propiedad intelectual a través del otorgamiento de patentes, secretos industriales y derechos de autor relacionados con el desarrollo de materiales aislantes y semiconductores basados en polímeros y nanocompuestos, reología y relajación dieléctrica de dispersiones y emulsiones. Es miembro del comité de evaluación de proyectos del CONACYT y del comité de revisión por pares de las revistas Polymer Engineering Science, Journal Applied Polymer Science, Material Science and Technology, entre otras. Fue asesor huésped en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de 1989 a 1993 como candidato a investigador y de 1998 a 2012 como investigador nivel 1. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores (SEI-Morelos).

la finalidad de contribuir al fortalecimiento de la capacidad de monitoreo y diagnóstico continuo, así como en la administración del mantenimiento de activos, todo bajo el contexto estratégico del sector energético del país y a la Estrategia Nacional de Energía en lo referente a los temas estratégicos denominados: Dotar de flexibilidad a las redes de transmisión y distribución, y desarrollar soluciones y productos para enfrentar y superar nuestros retos.

## Referencias

Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 354 (6348), 56-58, 1991.

Rittersma Z. M. Recent achievements in miniaturised humidity sensors—a review transductions techniques. Sensors and Actuators A, 96 (2-3), 196-210, 2002.

Novoselov K. S., Geim A. K., Morosov S. B., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science, 306, 666-669, 2004.

Suehiro J., Zhou G., Imakiire H., Ding W., and Hara M. Controlled fabrication of carbon nanotube NO<sub>2</sub> gas sensor using dielectrophoretic impedance measurement. Sensors and Actuators B, 108 (1-2), 398-403, 2005.

García B., Burgos J.C. and Alonso A. Winding deformations in power transformers by tank vibrations monitoring. Electric Power Systems Research 74: 129-138, 2005.

Weidong D., Ryota H., Kohei O., Junya S., Kiminobu I., Masanori H. Analysis of PD-generated SF<sub>6</sub> Decomposition Gases Adsorbed on Carbon Nanotubes. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 13 (6), 1200-1207, 2006.

Niraj S., Jiazhi M., and Yeow T.W. Carbon Nanotube-Based Sensors. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 6, 573-590, 2006.

Jimenez G., Riu J. and Rius F. X. Gas sensor base on nanostructured materials. Analyst, 132, 1083- 1099, 2007.

De Zhang W. and Zhang W. Review Article. Carbon Nanotubes as Active Components for Gas Sensors. Journal of Sensors. Article ID 160698. 2009.

Wang Y. and Yeow T.W., A review a carbon nanotube-based gas sensors. Journal of Sensors, 1-24, 2009.

Jung S., et al. Single-Walled Carbon Nanotube Sensors for Monitoring Partial Discharge Induced Dissociation of SF<sub>6</sub>. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 9, 7336-7339, 2009.

Zhang X., Wang-ting L., Tang J. and Xiao P. Study on PD Detection in SF<sub>6</sub> using Multiwall Carbon Nanotube Films Sensor. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. 17 (3), 833-838, 2010.

Ernie W. y Aravind V. Graphene sensors. IEEE Sensors Journal, 11(12), 3161-3170, 2011.

Xiao L. y colaboradores. A survey on gas sensing technology. Sensors 12, 9635-9665, 2012.

Fazel Y. y Nikhil K. Graphenme-Based Chemical Sensors. The Journal of Physical Chemistry Letters, 3, 1746-1753, 2012.

Qu Z., Weigenm Ch., Shudi P. y Xiaoping S. Nano-tin oxide gas sensor detection characteristic for hydrocar-

bon gases dissolved in transformer oil. International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, 2012, 384-387.

Michael F. L. y colaboradores. Carbon nanotubes: present and future Comercial applications. Science 339, 535-539, 2013.

Robert B. Nanomaterials for gas sensing: a review recent research. Sensor Review, 34(1), 1-8, 2014.

Sari L. y colaboradores. Review of recent trend in gas sensing technologies and their miniaturization potential. Sensor Review, 34(1), 24-35, 2014.

Ma P. C., Kim J. K., Tang B.Z. Functionalization of carbon nanotubes using a silane coupling agent. Carbon; 44:3232-8. 2006.

Hill D. E., Lin Y., Rao A. M., Allard L. F., Sun Y. P. Functionalization of carbon nanotubes with polystyrene. Macromolecules; 35:9466-71. 2002.

De Zhang W. and Zhang W. Review Article. Carbon Nanotubes as Active Components for Gas Sensors. Journal of Sensors. Volume 2009, Article ID 160698, 2009.

Zhang X., Wu X., Yang B. and Xiao H. Enhancement of gas sensing characteristic of multiwall carbon nanotube by CF<sub>4</sub> plasma treatment for SF<sub>6</sub> decomposition component detection. Journal of Nanomaterials, 2015, Article ID 171545.