

El grafeno también en la industria nuclear

N. Gómez

Quizás estemos en el comienzo de una nueva era en la historia de la humanidad marcada por el uso de ciertos materiales. Al igual que la edad de piedra y la edad de los metales dividieron la prehistoria, el grafeno podría iniciar una nueva edad en la historia, separando el antes y el después del desarrollo tecnológico de este magnífico material.

Perhaps we are at the beginning of a new era in the human history which is marked by the use of certain materials. Like the Stone Age and the Metals Age splitted pre-history, grafene could initiate a new era in modern history separating a before and an after tecnology development of this wonderful material.



NATALIA GÓMEZ CASTAÑO

Técnico de proyecto en PR, combustible gastado y residuos especiales de la División Nuclear de GNFe.

ASECAL S.L.

Licenciada en CC. Físicas, especialidad Física Fundamental, por la Universidad Complutense de Madrid.

Desde las estructuras atómicas de la materia que forman parte de la vida en nuestro planeta, hasta las recientes cantidades de grafeno descubiertas en nebulosas planetarias en la galaxia vecina, *La Gran Nube de Magallanes*, el hexágono acompaña al ser humano desde siempre. El grafeno denominado, en la última década, como el *Material del Futuro*, ha estado presente en nuestro planeta desde su formación. Sin embargo, hasta 2004 no había sido posible su aislamiento. Desde que los científicos Andre Geim y Konstantin Novoselov y su equipo consiguieron aislarlo, hay un gran número de universidades y empresas que se encuentran realizando investigaciones en torno a las singulares propiedades de este material y buscando infinitas aplicaciones en campos como la medicina, farmacia, electrónica, energía, etc. El grafeno se podrá utilizar para construir aviones, prótesis, sensores, redes eléctricas que llevarán la electricidad a nuestra casa de forma supereficiente, incluso para construir contenedores de almacenamiento del hidrógeno necesarios en los futuros reactores de fusión.

¿QUÉ ES EL GRAFENO?

El grafeno está formado por átomos de carbono unidos mediante enlaces covalentes sp^2 creando una estructura atómica hexagonal, formando una lámina monocapa. Es la primera estructura cristalina en dos dimensiones. La forma en la que A. Geim y K. Novoselov fueron capaces de aislar el grafeno se basa en separar poco a poco capas de grafito cada vez más

delgadas y en la habilidad para ver fragmentos de diferente grosor con un microscopio óptico. El método denominado “exfoliación micromecánica” consiste en “pelar” capas que llegan a ser cada vez más delgadas hasta que el material sobre una cinta adhesiva se vuelve traslúcido. Luego hay que despegar el material de la cinta sobre un sustrato apropiado, suele ser una capa muy delgada (300 nm) de SiO_2 . Con un microscopio óptico, se produce entonces el contraste adecuado para observar láminas de un solo átomo de grosor, entre un conjunto de fragmentos de diferente espesor. En 2010 A. Geim y K. Novoselov recibieron el premio nobel de Física por este gran trabajo.

El carbono es uno de los elementos más fascinantes de la tabla periódica debido a sus singulares propiedades para formar enlaces químicos. Es la base del ADN y, por lo tanto, el res-

ponsable de la vida en la Tierra. El número atómico del carbono es 6, y su configuración electrónica es $1s^2 2s^2 2p^2$. Debido a la pequeña diferencia de energía entre los orbitales 2s y 2p, se pueden producir distintos

Orbitales s mezclados	Orbitales p mezclados	Tipo de orbitales híbridos	Número de orbitales híbridos	Geometría de los orbitales híbridos	Modelo de los orbitales híbridos formados
1	3	sp^3	4	109,5° tetraédrica	
1	2	sp^2	3	120° triangular plana	
1	1	sp	2	180° lineal	

Figura 1. Tipos de hibridación entre orbitales s y p.

tipos de hibridación. El proceso de hibridación de orbitales es una recombinación de los orbitales atómicos que forman parte del enlace en el átomo central. Los orbitales atómicos redistribuyen su carácter particular y originan nuevos orbitales híbridos equivalentes entre sí en forma y energía. En la Figura 1 se pueden ver los distintos tipos de orbitales híbridos entre orbitales s y p.

Dependiendo de los orbitales que participen en la hibridación se obtendrán distintas estructuras atómicas del elemento, con distintas disposiciones geométricas como se puede ver en la Figura 1. El carbono se puede encontrar en la Tierra en sus distintas formas alotrópicas, estas son estructuras multiatómicas con distintas configuraciones moleculares. Se dan unas configuraciones u otras según el tipo de hibridación que tenga la estructura del átomo de C. Las formas alotrópicas más conocidas son el diamante y el grafito.

El **diamante**, posee una hibridación sp^3 , es el resultado de la hibridación de un orbital 2s y tres orbitales 2p, dando lugar a cuatro orbitales sigma orientados en el espacio formando un tetraedro. Cada átomo de carbono aparece unido, mediante enlace covalente, con otros tres átomos vecinos, formando un tetraedro regular. Esto da lugar a que la disposición de la red cristalina del diamante sea FCC (*face centered cubic*) como se puede ver en la Figura 2, denominada empaquetamiento cúbico compacto centrado en las caras. Esta estructura le confiere gran dureza y alta conductividad térmica. El diamante sin dopar no posee electrones libres, por lo tanto es un magnífico aislante.

El **grafito** es el resultado de una hibridación sp^2 de los átomos de carbono, tanto su estructura como sus propiedades son consecuencias de esta hibridación. En la hibridación sp^2 participan dos orbitales 2p y un orbital 2s, generando tres orbitales sigma en forma triangular, como se indicaba en la Figura 1. Las uniones entre C-C forman una red hexagonal plana, estas láminas son el **grafeno**, que unidas unas con otras, a través del orbital p que no participa en la hibridación mediante fuerzas de Van der Waals, forman el grafito; cuya es-

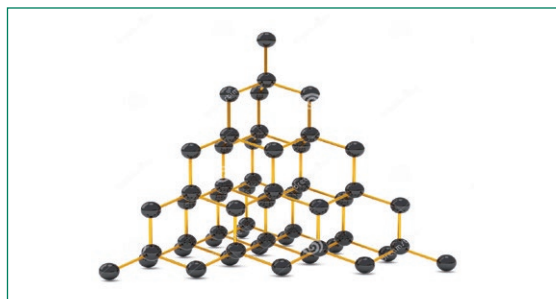


Figura 2. Estructura del diamante.

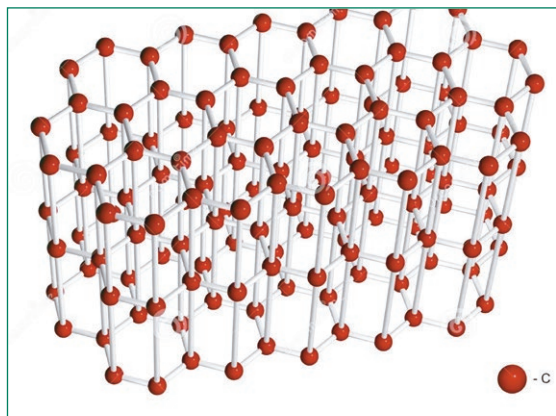


Figura 3. Estructura del grafito.

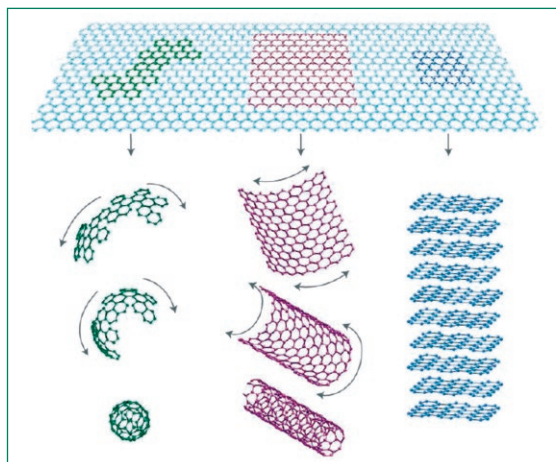


Figura 4. Fullerenos, nanotubos y grafeno.

tructura es la que se muestra en la Figura 3.

Del grafito surgen las llamadas formas gráficas que son los fullerenos, los nanotubos y el grafeno; todos ellos caracterizados por hibridación sp^2 .

- Los **fullerenos** están compuestos por átomos de carbono ordenados en estructuras esféricas tridimensionales. Sus patrones alternativos de hexágonos y pentágonos coinciden con el diseño de un balón de fútbol. El fullereno más conocido es el C₆₀, fue producido experimentalmente por R. Curl, H. Kroto y R. Smalley en 1985.
- Otra forma del carbono, muy conocida desde hace décadas, son los *na-*

notubos de carbono. Estos están formados por capas de grafeno enrolladas formando un tubo. Las propiedades mecánicas y electrónicas de estos son muy similares a las del grafeno. Las propiedades electrónicas de los nanotubos de carbono son sorprendentes, pueden ser conductores o semiconductores según la forma en que la hoja de grafeno esté enrollada en el tubo. La resistividad de estos nanotubos es más baja que la del cobre, su capacidad para conducir corriente (densidad de corriente) está por encima de 10^7 A/cm², lo que permite conducir intensidades que fusionarían cualquier metal.

Tanto el grafito que utilizamos en nuestros lapiceros como los fullerenos descubiertos recientemente en nebulosas planetarias, y los nanotubos, están formados de capas de grafeno.

PROPIEDADES DEL GRAFENO

- Atendiendo a su estructura electrónica, el grafeno es un material que se encuentra entre semiconductor y metal, porque todos sus electrones se encuentran en la banda de valencia y no hay ninguno en la banda de conducción. Los niveles de energía están dispuestos en forma de diábolo, de forma que la banda de valencia y la banda de conducción se tocan en un punto conocido como punto de Dirac, esto hace que el grafeno no tenga Gap (Figura 5).
- Los electrones en el grafeno se mueven a velocidades muy altas, 300 veces menor que c (velocidad de la luz), y su resistividad a temperatura ambiente es de 10^{-8} Ω m esto implica que sea 1,6 veces más conductor que el cobre.
- Posee una gran conductividad térmica, dominada por los fonones de su red bidimensional, aproximadamente 5000 W/m K; en comparación con la conductividad térmica del cobre a temperatura ambiente que es de 401 W/m K.
- Es extremadamente duro, posee una altísima resistencia mecánica; puede aguantar hasta tensiones de 42N/m. El grafeno es 100 veces más fuerte que cualquier acero.

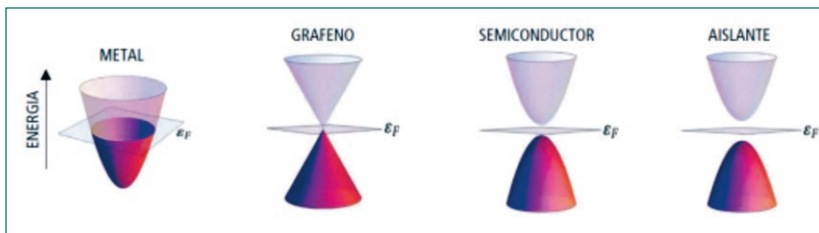


Figura 5. Distribución de las bandas de valencia y conducción.



Figura 6. Pantallas táctiles.

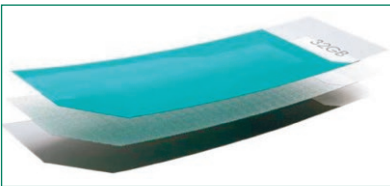


Figura 7. Memoria flash híbrida.



Figura 8. Blindajes de grafeno.

- Además es un material muy ligero, su densidad es $0,77\text{mg/m}^2$. Una lámina de grafeno cubriendo el campo de fútbol del estadio *Vicente Calderón* pesaría aproximadamente 5,5 Kg.
- Posee una transmitancia óptica, fracción de luz a una determinada longitud de onda que atraviesa una superficie por unidad de tiempo muy elevada, aproximadamente del 97 % independientemente de la longitud de onda. Esto le confiere su transparencia e impide la observación directa a través de un microscopio óptico, por ello es necesario depositar las láminas de grafeno en un sustrato de Si.
- La elasticidad en el silicio es del 1 %, y en el grafeno es del 10 %.

Con todas estas magníficas propiedades, el grafeno se convierte en el material más interesante a investigar en este momento. Actualmente la industria del grafeno se está desarrollando a gran velocidad, existen numerosas universidades y empresas dedicadas a la producción e investigación de sus propiedades y aplicaciones.

APLICACIONES Y ALGUNOS DESCUBRIMIENTOS RECIENTES

- Creación de **pantallas táctiles**, el grafeno se presenta como candidato ideal para la fabricación de electrodos conductores transparentes, empleados por ejemplo en pantallas táctiles y de cristal líquido, células fotovoltaicas orgánicas y LED orgánicos.
- Nuevos **dispositivos de almacenamiento**, el grafeno se utilizará para la creación de nuevos transistores que se aplicarán en producir nuevas memorias RAM, HDD, USB y Flash. En los HDD se espera alcanzar 1.000 veces la capacidad actual. Las memorias Flash híbridas (son de silicio y grafeno) son 30 veces más rápidas y poseen mayor capacidad y menor consumo.
- **Baterías eficientes y duraderas**, gracias a la gran movilidad de portadores (electrones o huecos) en el

grafeno, se obtendrán baterías que se recargan en muy poco tiempo. Ya se ha creado la primera batería de móvil basada en el grafeno que puede almacenar la energía necesaria para un Smartphone en cinco minutos. Además se trata de baterías resistentes cuyo deterioro no aparece hasta pasados los 5.000 ciclos de carga.

- **Materiales para construcción** teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, se pueden crear materiales muy resistentes y a la vez ligeros. Este tipo de materiales serían muy útiles en la industria aeronáutica (aviones ultraligeros capaces de soportar esfuerzos muy altos), en la industria de la automoción, en la construcción de álabes de aerogeneradores, incluso en la construcción de puentes y edificios con altos requisitos sísmicos...
- **Blindajes de grafeno**, un estudio entre las universidades de Rice y Massachusetts ha demostrado, que el grafeno disipa la energía antes de la rotura por un impacto de proyectil mucho mejor que el kevlar. Además la Armada de Estados Unidos ya trabaja en escudos electromagnéticos basados en grafeno para proteger sus antenas de posibles tormentas solares. También Apple se suma a la industria del grafeno, tiene una patente para la aplicación de sus propiedades como dissipador de calor. Y dentro del sector nuclear se están llevando a cabo numerosos experimentos para estudiar el comportamiento del grafeno frente la radiactividad. Estos experimentos pueden ayudar en la obtención de nuevos materiales para blindajes de la radioactividad en las centrales nucleares.

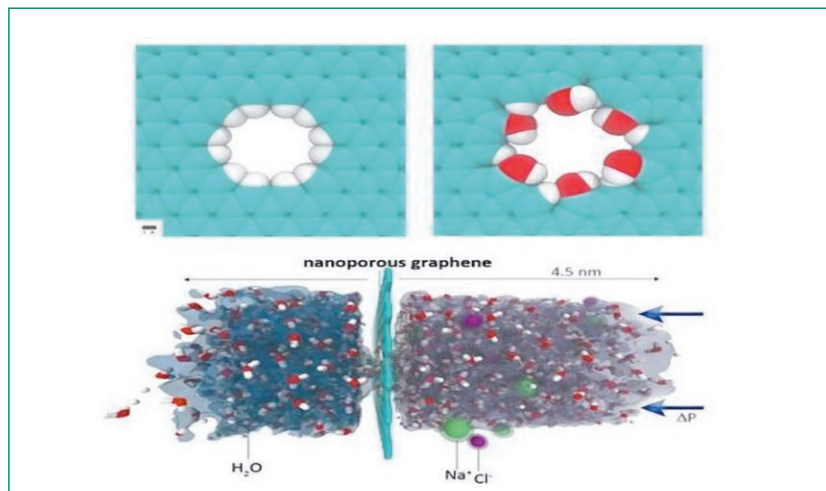


Figura 9. Simulación de nanoporos de grafeno.

- **Sensores moleculares** basados en grafeno, se ha demostrado que estos sensores pueden detectar moléculas de todo tipo. Los resultados han sido satisfactorios tanto en la detección de partículas de explosivos y productos químicos, como con el gas Sarin o el cloro. Estos sensores moleculares utilizan dos electrodos con una capa microscópica de nanotubos de carbono. A cada material se le mide un patrón de conductancia eléctrica entre electrodos en ausencia de impurezas y al exponerlo a cualquier molécula, ésta "contamina" la conductividad del sensor de forma concreta, dando la posibilidad de descifrar cuál es la materia detectada en cuestión de segundos.
- **Convertidores de agua salada en agua potable**, dos investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts han demostrado teóricamente a través de simulaciones, que los nanoporos de grafeno (Figura 9) pueden filtrar la sal del agua a una velocidad de 2 a 3 veces mayor que la mejor tecnología de desalinización comercial que existe en la actualidad (la ósmosis inversa).
- **Catalizadores de grafeno más eficientes**, estos nuevos catalizadores mostraron una reducción de oxígeno de alrededor de 15 milivoltios más en el potencial de aparición positiva (el inicio de la reacción) y un 70 % más de densidad de corriente que los catalizadores convencionales basados en platino.
- **Contenedores de hidrógeno**, investigadores de la universidad de Maryland han desarrollado una nanocaja de tamaño atómico, dentro de la cual los átomos de hidrógeno pueden ser almacenados. Los investigadores afirman que se pueden usar campos eléctricos para abrir y cerrar la caja, pudiendo liberar el hidrogeno almacenado en el momento deseado.
- **Antenas de grafeno-Si** cuando en la red de grafeno se reemplazan dos átomos de carbono por otros dos de silicio, el material es capaz de convertir señales ópticas en señales eléctricas y viceversa. Con este descubrimiento se podrían construir conductores muy pequeños, enfocar una luz en uno de sus extremos y ver como el

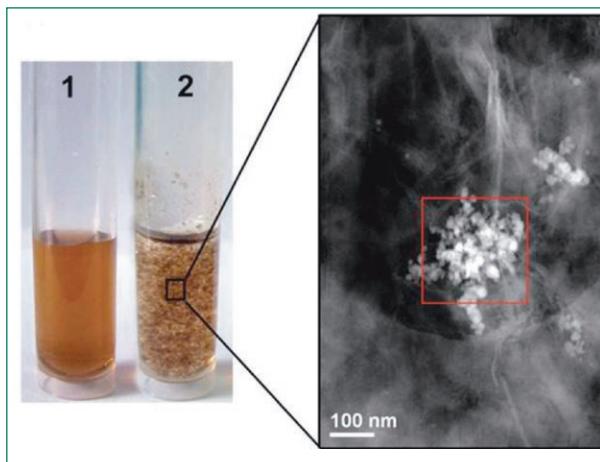


Figura 10. Comportamiento anfipático del grafeno.

material convierte esos fotones en electrones que se transmiten a través de la estructura del grafeno, y en el otro extremo del nanotubo se volverían a convertir en luz.

- **Descontaminación nuclear** con grafeno. Los investigadores liderados por Stepan Kalmykov en la Universidad Estatal de Moscú en Rusia, y James Tour en la Universidad de Houston en EE.UU. han encontrado la solución perfecta para la descontaminación de aguas con actínidos. El grafeno adquiere un comportamiento anfílico o anfipático, como ocurre con el agua y el aceite, cuando se mezcla con elementos de las tierras raras de la tabla periódica. Ha resultado ser muy bueno para eliminar radionúclidos del agua, sus investigaciones han ido encaminadas en eliminar radioisótopos como Th, U, Np, Pu, Am. Los resultados han sido espectaculares, en concentraciones de óxido de grafeno menores de 0,1 g/l se han eliminado el 95 % de Pu, Am, Th y el 55 % de U en cinco minutos. Cuanto mayor es el pH en la disolución más cantidad de estos radionúclidos son eliminados. En la central nuclear japonesa de Fukushima se empezarán las pruebas de limpieza de aguas con óxido de grafeno para descontaminar las aguas que se encuentran almacenadas en tanques. Según los cálculos iniciales realizados, se descontaminarán 25 gramos de isótopo radiactivo por cada kilogramo de óxido de grafeno. Este óxido de grafeno ha sido suministrado por la empresa española Graphenano.

APLICACIONES DEL GRAFENO EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

De acuerdo con todas estas propiedades y aplicaciones podemos visua-

lizar el grafeno en infinitas aplicaciones en la industria nuclear:

- Formando parte del hormigón del Edificio de Contención y/o en el acero de la vasija.
- En sensores de grafeno para los controles de materiales explosivos que se encuentran en la entrada de las centrales.
- En los trabajos realizados en zona controlada, donde los operarios utilizarían buzos de grafeno con los que se encontrarán más protegidos tanto a la contaminación como a la radiación debido a su posible aplicación como blindaje, utilizando buzos impermeables, flexibles, ligeros y resistentes.
- Las aguas contaminadas con actínidos, se podrán descontaminar gracias al poder anfipático del grafeno.
- Tras un suceso de pérdida de corriente eléctrica (SBO), la planta no tendrá que preocuparse de restaurar la corriente en pocas horas ya que las baterías de grafeno tendrán capacidades muchísimo más grandes que las actuales.
- Con ordenadores formados por componentes electrónicos de grafeno, se podrán simular millones de casos en códigos de neutrones o de termohidráulica en pocos minutos.
- El grafeno también contribuirá en el futuro reactor de fusión, este material podrá ser utilizado para fabricar contenedores que almacenen el hidrógeno, que es necesario para alimentar la reacción de fusión.
- Toda la electricidad generada en las centrales eléctricas, será transportada hasta nuestros hogares por redes de grafeno.

CONCLUSIONES

Cualquier cosa que imaginemos podría estar fabricada con grafeno, aprovechándonos de sus magníficas propiedades. En los próximos años la generación de grafeno será tan cotidiana como la producción de electricidad, será una verdadera revolución tecnológica, ya se conoce como la *Era del grafeno*.

Se puede afirmar que el futuro será hexagonal. ■