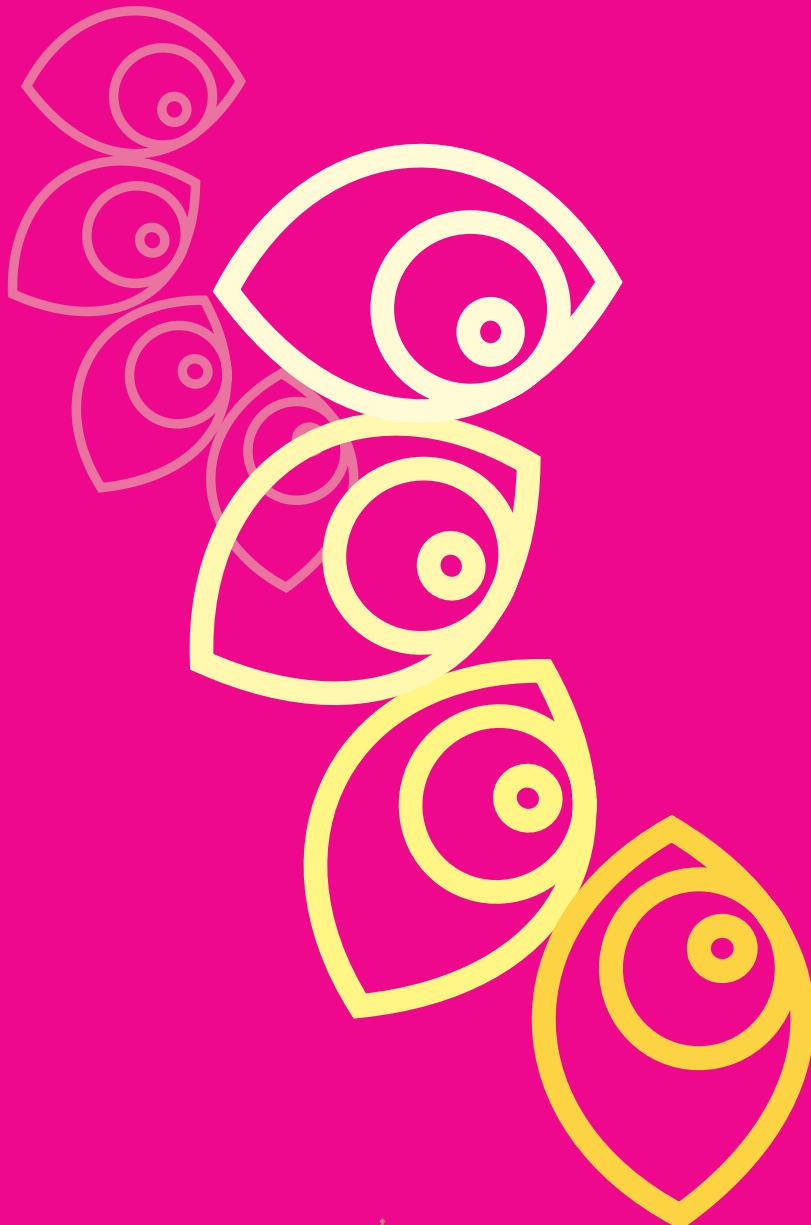


12

# Monografías del SOPT

Propiedades y aplicaciones  
del grafeno



MINISTERIO DE DEFENSA

12

# Monografías del SOPT

Propiedades y aplicaciones  
del grafeno



<http://www.mde.es/areasTematicas/investigacionDesarrollo/sistemas/>



MINISTERIO DE DEFENSA

**CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES**  
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Edita:



[www.bibliotecavirtualdefensa.es](http://www.bibliotecavirtualdefensa.es)

© Autor y editor, 2013

NIPO: 083-13-192-1 ( impresión bajo demanda)

Fecha de edición: julio 2013



NIPO: 083-13-193-7 (edición libro-e)  
ISBN: 978-84-9781-868-1 (edición libro-e)

Las opiniones emitidas en esta publicación son exclusiva responsabilidad del autor de la misma.  
Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido photocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © Copyright.

En esta edición se ha utilizado papel libre de cloro obtenido a partir de bosques gestionados de forma sostenible certificada.

## **PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL GRAFENO**

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>2. PROPIEDADES DEL GRAFENO.....</b>	<b>17</b>
2.1 Conductividad eléctrica.....	19
2.2 Conductividad térmica. ....	21
2.3 Resistencia mecánica.....	21
2.4 Otras propiedades de interés.....	23
<b>3. PRINCIPALES APLICACIONES.....</b>	<b>27</b>
3.1 Dispositivos electrónicos avanzados (procesadores de próxima generación) .....	29
3.2 Pantallas táctiles flexibles.....	32
3.3 Generación y almacenamiento de energía .....	33
3.4 Otras aplicaciones de interés .....	39
<b>4. EL GRAFENO EN DEFENSA.....</b>	<b>45</b>
4.1 Aplicaciones .....	47
4.2 El grafeno en la ETID .....	53
<b>5. PERSPECTIVAS DEL GRAFENO.....</b>	<b>57</b>
5.1 Publicaciones y patentes.....	59
5.2 Los retos del grafeno .....	61
5.3 ¿Podría el grafeno sustituir al silicio? .....	62
<b>6. EL MERCADO DEL GRAFENO.....</b>	<b>65</b>
6.1 La situación del mercado en España .....	69
6.2 La situación del mercado en Europa.....	71

	<u>Página</u>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>8 ANEXOS.....</b>	<b>81</b>
A. Métodos de obtención de grafeno .....	85
B. Productores/desarrolladores de grafeno .....	95
<b>9 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>107</b>

## PRÓLOGO

La presente Monografía ha sido realizada por el Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica (SOPT) de la Subdirección de Tecnología e Innovación (SDG TECIN) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM).

Quiero felicitar a todos los que han hecho posible esta monografía, y en concreto al técnico del Observatorio Tecnológico de Materiales, Luis Miguel Requejo Morcillo, por su dedicación y esfuerzo. También, extender este agradecimiento al resto de miembros del SOPT y muy especialmente al Dr. Carlos Rivera de Lucas, del Área de Optrónica y Acústica del ITM, que han contribuido a que podamos tener hoy este trabajo en nuestras manos.

C.F. Ing. JOSÉ MARÍA RIOLA RODRÍGUEZ  
*Jefe del SOPT*  
*Subdirección General de Tecnología e Innovación*  
*Dirección General de Armamento y Material*



## **MOTIVACIÓN**

Son muchas las noticias y desarrollos que se han publicado en los últimos años en relación al grafeno, a sus excelentes propiedades y a sus aplicaciones, que muestran a este material como uno de los más revolucionarios en el presente y que probablemente tendrá un mayor impacto en muchas industrias y sectores, entre ellos el de la Defensa. Esta monografía pretende ser una sencilla guía de consulta sobre el estado actual de la tecnología del grafeno y de sus potenciales aplicaciones, en principio civiles, pero especialmente en el sector de la defensa.

En primer lugar, se describe el grafeno, desde un punto de vista estructural e intentando explicar su comportamiento y sus propiedades de un modo sencillo, sin profundizar en aspectos o terminología que pueda resultar técnicamente muy compleja. Posteriormente se han descrito sus potenciales aplicaciones civiles y militares, revisando algunos de los últimos avances que se han logrado por parte de empresas y de la comunidad científica en todo el mundo.

Se ha incluido un capítulo en el que se analiza a grandes rasgos la situación actual del mercado del grafeno tanto a nivel nacional, como europeo, comparativamente al resto del mundo y en el que se ha estimado la progresión de este mercado en los próximos años.

Por último, dos anexos en esta monografía describen los procesos de fabricación de grafeno más empleados y conocidos a día de hoy y, además, con el objetivo de conocer cuáles son en la actualidad los actores más importantes vinculados a la fabricación y desarrollo de aplicaciones del grafeno, se ha llevado a cabo una recopilación de los mismos, mencionando brevemente sus principales actividades.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 1. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

El grafeno no es un material completamente nuevo por su composición ya que está formado por átomos de carbono, al igual que otros muchos materiales como el grafito, el diamante, los fulerenos, los nanotubos de carbono, etc. Sí es nuevo por su estructura, ya que se trata de un material que puede considerarse bidimensional tanto por la disposición de los átomos de carbono que lo forman como por poseer el mínimo espesor correspondiente a una única capa atómica (monocapa). En la figura 1-f se observa que la red cristalina bidimensional es de tipo hexagonal.

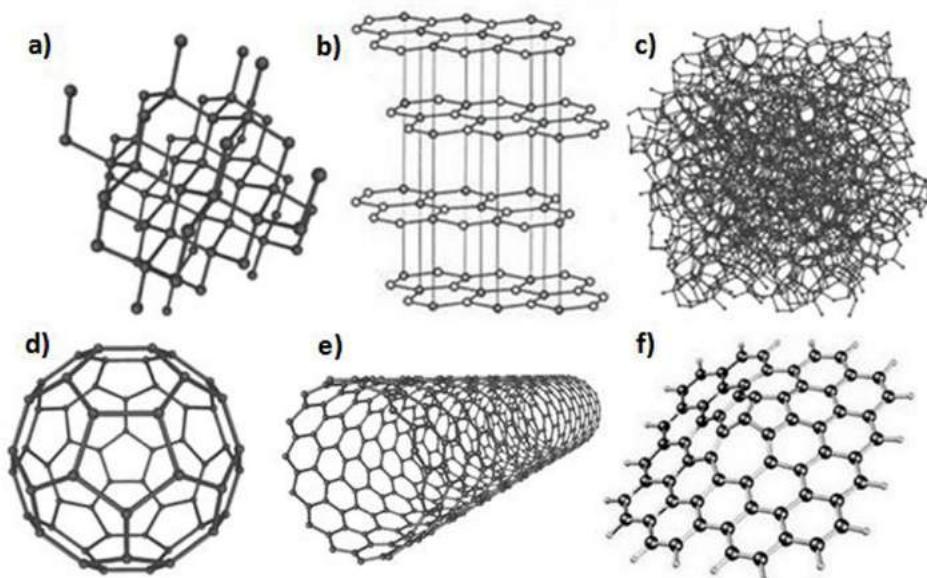


Figura 1.1 Algunas de las formas alótropicas del carbono más conocidas: a) diamante, b) grafito, c) carbono amorfico, d) fulereno, e) nanotubo de carbono, f) grafeno. (Fuente: <http://clasificacion106ae6.blogspot.com.es/2012/03/fromas-alotropicas-del-carbono.html>)

Hasta el año 2004, no se creía posible la existencia de una estructura como la del grafeno como entidad aislada. Se suponía que los cristales estrictamente bidimensionales eran termodinámicamente inestables, debido a fluctuaciones térmicas en redes cristalinas que teóricamente producirían desplazamientos atómicos dando lugar a una estructura en tres dimensiones. Esta hipótesis se apoyaba en numerosas pruebas experimentales, entre ellas el hallazgo de que la temperatura de fusión de láminas delgadas decrece rápidamente al disminuir su espesor, lo que provoca que una lámina se vuelva inestable para grosorres correspondientes a aproximadamente una docena de monocapas, lo que obliga a los cristales bidimensionales a tomar estructuras tridimensionales que les proporcionen estabilidad.

Sin embargo, en el año 2004 dos científicos de la Universidad de Manchester (Reino Unido), Andre Geim (Rusia, 1958) y Konstantin Novoselov (Rusia, 1974) fueron capaces de obtener e identificar por vez primera láminas individuales de grafeno junto con otros cristales bidimensionales.

## Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films

K. S. Novoselov,<sup>1</sup> A. K. Geim,<sup>1\*</sup> S. V. Morozov,<sup>2</sup> D. Jiang,<sup>1</sup> Y. Zhang,<sup>1</sup> S. V. Dubonos,<sup>2</sup> I. V. Grigorieva,<sup>1</sup> A. A. Firsov<sup>2</sup>

We describe monocrystalline graphitic films, which are a few atoms thick but are nonetheless stable under ambient conditions, metallic, and of remarkably high quality. The films are found to be a two-dimensional semimetal with a tiny overlap between valence and conductance bands, and they exhibit a strong ambipolar electric field effect such that electrons and holes in concentrations up to  $10^{13}$  per square centimeter and with room-temperature mobilities of  $\sim 10,000$  square centimeters per volt-second can be induced by applying gate voltage.

22 OCTOBER 2004 VOL 306 SCIENCE [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)

*Figura 1 2 Primer artículo científico mostrando las excelentes propiedades de conductividad eléctrica del grafeno. (Fuente: <http://www.sciencemag.org/>)*

Existen varias hipótesis que tratan de explicar la estabilidad de estas láminas aisladas. Por un lado, las láminas provienen de una estructura tridimensional previa, lo cual, unido a la fuerza de los enlaces covalentes entre los átomos de carbono, presumiblemente las hace resistentes a las fluctuaciones térmicas. Por otro lado, las ondulaciones microscópicas que presentan las láminas podrían contribuir a su estabilidad, aparte de dar cuenta de algunas otras propiedades del grafeno.

Sólo seis años después, en el año 2010, Geim y Novoselov recibieron el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de las propiedades extraordinarias que mostraba el grafeno, algunas de las cuales trataremos en esta monografía.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 2. PROPIEDADES DEL GRAFENO

## 2. PROPIEDADES DEL GRAFENO

El carbono en su configuración plana, como se ha comentado anteriormente, tiene propiedades extraordinarias. Desde un punto de vista estructural, el grafeno es el material más delgado jamás obtenido: una lámina de grafeno tiene un espesor de 3,35 Å (es decir,  $3,35 \cdot 10^{-10}$  m). Un cabello humano tiene un diámetro en el rango 0,02-0,200 mm (esto es,  $2-200 \cdot 10^{-5}$  m). Por tanto, el grafeno es 100.000 veces más delgado que el cabello más fino. Además, se trata de un material muy ligero: tiene una densidad de, únicamente, 0,77 mg/m<sup>2</sup>. Así, se calcula que una capa de grafeno capaz de cubrir un estadio de fútbol pesaría del orden de unos pocos gramos.

Estas y otras características que se describen a continuación hacen del grafeno un material muy interesante para el desarrollo de diversas aplicaciones.

### 2.1 Conductividad eléctrica

La característica más interesante del grafeno tiene que ver con la conductividad eléctrica. El grafeno conduce la electricidad tan bien como el cobre: su conductividad eléctrica es  $0,96 \cdot 10^8$  ( $\Omega \cdot m$ )<sup>-1</sup>, mientras que la del cobre es  $0,60 \cdot 10^8$  ( $\Omega \cdot m$ )<sup>-1</sup> y la del silicio de  $4,5 \cdot 10^4$  ( $\Omega \cdot m$ )<sup>-1</sup>.

Una forma de clasificar los materiales según lo bien que conduzcan la electricidad es en aislantes, conductores y semiconductores. Resulta que el grafeno no es ninguna de las tres, sino que comparte características de los conductores y los semiconductores.

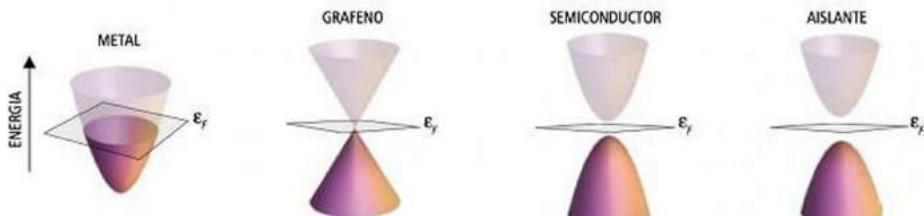


Figura 2.1 Posicionamiento de las bandas de energía de los materiales según su conductividad eléctrica (Fuente: <http://www.satinfo.es/blog/?p=6840>).

La figura muestra el posicionamiento de las bandas de energía (las curvas parabólicas) de los materiales según su conductividad. La inferior es la banda de valencia y la superior es la banda de conducción. El plano representa la energía de Fermi ( $\epsilon_F$ ), que es el nivel de energía máximo hasta el que llegan los electrones de un sólido a temperatura cero (a temperatura «finita» los estados superiores al nivel de Fermi, sólo tienen cierta probabilidad de ser ocupados). Cuando el nivel de Fermi está en la banda de conducción nos encontramos ante un metal (material conductor) ya que los electrones circulan libremente por esta banda. En el caso de los semiconductores y los aislantes el nivel de Fermi está entre las bandas de valencia y de conducción, y únicamente se diferencian en la anchura de la brecha, llamada gap o banda prohibida. En los semiconductores, el gap no es demasiado grande, lo que permite que si se les da la suficiente energía puedan conducir la corriente eléctrica. En los aislantes el gap es mucho mayor y es necesario un aporte energético muy superior, lo que dificulta la conducción.

En el caso del grafeno lo que nos encontramos es que no hay gap (como en los metales), con la peculiaridad de que el nivel de Fermi está justo en la unión entre ambas bandas de energía, es decir, que siendo la densidad de estados en el nivel de Fermi nula (como ocurre en los semiconductores) los electrones pueden saltar sin problema de la capa de valencia a la capa de conducción y facilitar en gran medida la conducción eléctrica.

Debido a la disposición espacial de los átomos de carbono en el grafeno y al tipo de enlace entre los carbonos, los electrones se desplazan sobre su superficie a una velocidad sin precedentes en ningún otro material. Se puede decir que los portadores de carga en el grafeno son quasi partículas sin masa que se mueven a una velocidad constante. Se ha podido medir dicha velocidad arrojando unos resultados sorprendentes: se mueven a alrededor de 1000 km/s, tan sólo 300 veces inferior a la velocidad de la luz en el vacío.

Desde un punto de vista estructural, la distribución a nivel atómico en el grafeno proporciona un camino sin obstáculos para la circulación de los electrones (por lo tanto el choque de los electrones con los átomos es menor – menor efecto Joule – y el material se calienta menos que cualquier otro). En cualquier material, la energía asociada a su temperatura se traduce en la vibración de la red atómica (dispersión por fones). Cuando los electrones viajan a través del material, pueden chocar con estos átomos vibrantes, dando lugar a la resistencia eléctrica. Ésta

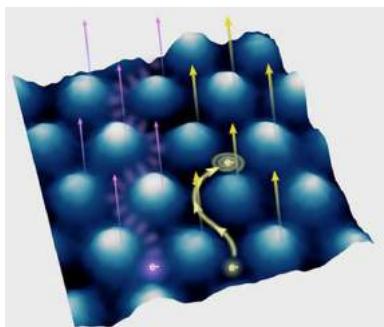


Figura 2.2 Los electrones corren por el grafeno a la máxima velocidad posible, como si no tuvieran masa (Fuente: <http://www.nano-tech-now.com/>).

es «intrínseca» del material y no puede eliminarse a menos que el material se enfríe hasta cerca del cero absoluto. Ciertos estudios (Michael S. Fuhrer) han demostrado que las vibraciones térmicas tienen un efecto extremadamente pequeño sobre los electrones en el grafeno, de tal modo que los átomos que vibran a temperatura ambiente producen una resistividad que es cerca del 35 por ciento menor que la resistividad de la plata, el material de más baja resistividad a temperatura ambiente conocido hasta el momento.

## 2.2 Conductividad térmica.

Como conductor de calor, el grafeno «supera a todos los materiales conocidos». La conductividad térmica del grafeno se ha medido, y se encuentra en un valor de aproximadamente  $5.000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . El cobre presenta un valor de aproximadamente  $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  a temperatura ambiente. Por tanto, el grafeno conduce 10 veces mejor el calor que el cobre.

La gran conductividad térmica del grafeno es probablemente resultado de la relativa facilidad que tienen los átomos de carbono para moverse en el grafeno, comparada con otros materiales. Investigadores (Alexander Balandin de la Universidad de California Riverside) se encuentran trabajando en una teoría que explique por qué esto es así.

Se cree que la alta conductividad térmica del grafeno, su forma plana y su capacidad para integrarse con el silicio podrían jugar un papel importante en la disipación de calor de los futuros dispositivos electrónicos. Esto lo convierte en un candidato ideal para la fabricación de disipadores térmicos y de materiales compuestos de gran conductividad térmica.

## 2.3 Resistencia mecánica

El grafeno es el material más resistente desde un punto de vista mecánico. Tiene una resistencia mecánica de  $42 \text{ N/m}$  (tensión a rotura). Si elegimos una hipotética lámina del acero más resistente, del mismo espesor que el grafeno ésta tendría una resistencia de  $0,40 \text{ N/m}$ . Por tanto, se podría decir que el grafeno es unas 100 veces más resistente que el más resistente de

los aceros. Puede resultar curioso que una única capa de grafeno sea tan dura y resistente, cuando el grafito, que no es más que una superposición de capas de grafeno se rompe con tanta facilidad. El motivo es sencillo: en el grafito, las capas de grafeno se encuentran unidas por fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas mucho más débiles que las uniones covalentes entre los carbonos que conforman una lámina de grafeno.

Tal es la fuerza del grafeno, por ejemplo, que de acuerdo con el comité del Premio Nobel, una hipotética hamaca de un metro cuadrado de grafeno perfecto podría soportar a un gato de 4 kilos. La hamaca pesaría 0,77 miligramos – menos del peso de un bigote de gato – y sería virtualmente invisible.

Para medir esta resistencia, se utilizó un microscopio de fuerza atómica que «presionaba» perpendicularmente la hoja de grafeno para doblarla y obtener así su límite elástico. De estos experimentos se concluyó que la constante

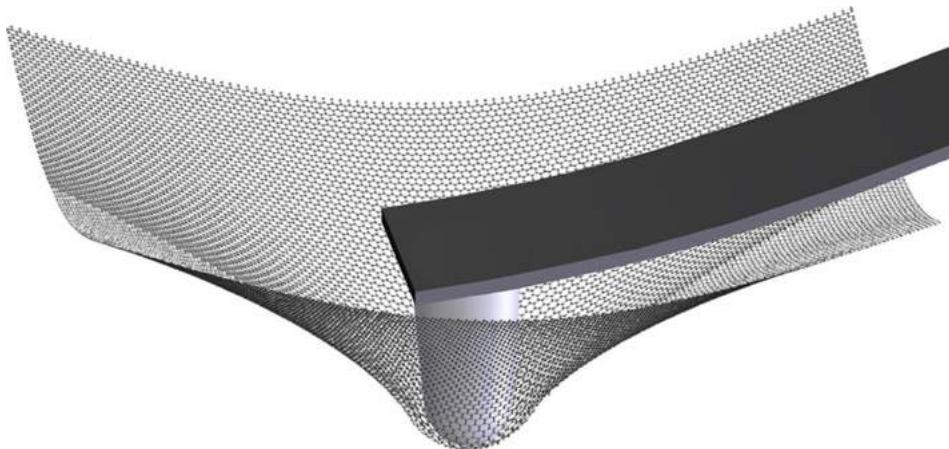


Figura 2.3 Idealización de microscopio de fuerza atómica presionando sobre una hoja de grafeno para obtener su límite elástico (Fuente: <http://forosforum.com/>).

elástica (que indica lo que puede deformarse un cuerpo sin sufrir deformación permanente) del grafeno era enorme, pudiéndose estirar hasta un 10% de su tamaño normal de forma reversible. Cierto es que esta característica se ha alcanzado en un grafeno que apenas presenta impurezas o defectos en su red.

Debido a esta combinación de flexibilidad y resistencia, ofrece un increíble potencial para su aplicación industrias tan importantes como la del automóvil y la aeronáutica, ya que permite el desarrollo de materiales más ligeros (en comparación con el acero, un conjunto de láminas de grafeno

del grosor del papel es seis veces más ligero, presenta de cinco a seis veces menor densidad) y resistentes, dando lugar a vehículos y aeronaves menos pesados, más seguros, y que consumen menos combustible. Este comportamiento del grafeno también puede ser interesante para su uso en nanotecnología, ya que podría aguantar grandes presiones apenas sin deformarse. Por ejemplo, una hoja de grafeno podría ser capaz de soportar que se les coloque encima átomos mucho más pesados que el carbono (como es el oro), prácticamente sin sufrir una deformación.

## 2.4 Otras propiedades de interés

Otras propiedades del grafeno que merece la pena destacar por su interés para el desarrollo de nuevas aplicaciones son las siguientes:

*Capacidad para la formación de nuevos materiales.*

El grafeno puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar nuevos compuestos químicos con diferentes propiedades. Este hecho dota a este material de un gran potencial de desarrollo siendo una de las líneas de investigación que mayor interés despierta dentro de la comunidad científica.

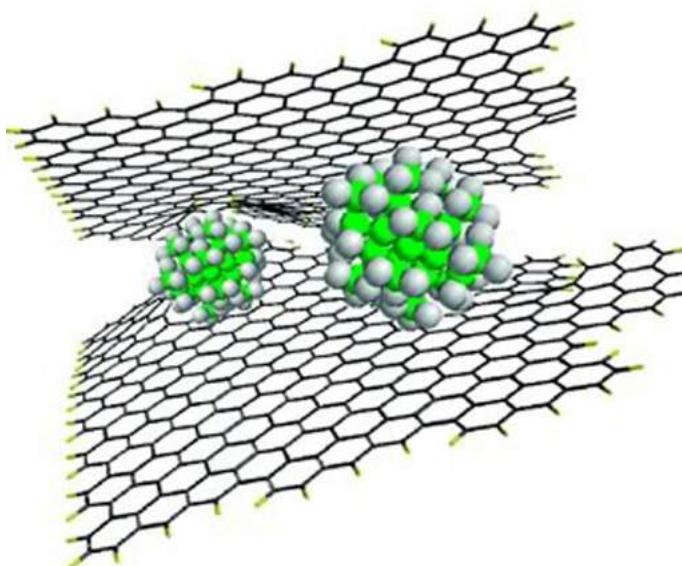
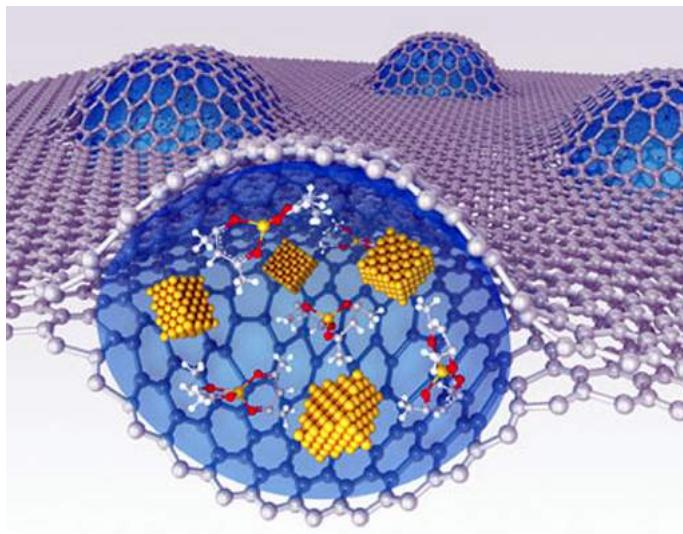


Figura 2.4 Nuevos materiales compuestos a partir de grafeno  
(Fuente: <http://www.chem.unc.edu/>).

Un ejemplo es el proyecto europeo de cooperación Nanomaster, que comenzó en diciembre de 2011, cuenta con una financiación de 4,2 millones de euros bajo el 7º Programa Marco y tiene una duración prevista de cuatro años. En el proyecto participan dos entidades nacionales, el Instituto Tecnológico del Plástico AIMPLAS y la empresa Avanzare Innovación Tecnológica SL en un total de 13 empresas de siete nacionalidades distintas. El objetivo del proyecto es la reducción de la cantidad de plástico en un 50%, con la consiguiente reducción de peso en piezas finales, además de conferirle funcionalidades térmicas y eléctricas. Este objetivo está previsto que se consiga mediante el desarrollo de la nueva generación de nanocomposites reforzados con grafeno que podrán utilizarse en los procesos de producción masiva de piezas plásticas.

#### *Capacidad aislante*

El equipo de investigación de Andre Geim, Rahul Nair e Irina Grigorieva de la Universidad de Manchester ha comprobado que las membranas hechas de óxido de grafeno son impermeables a todos los gases y líquidos, a tratarse de un material con una densidad atómica muy alta (50 millones de átomos por centímetro).



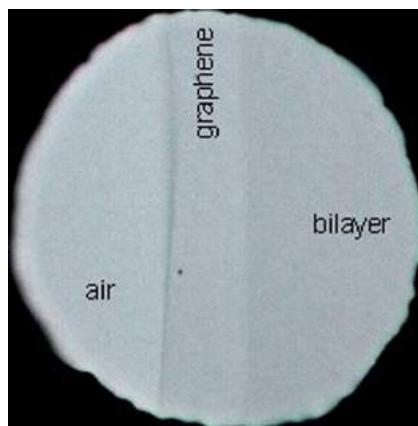
*Figura 2 5 Dos capas de grafeno podrían atrapar bolsillos de disolución en donde ocurren diversas reacciones (Fuente: <http://neofronteras.com/>)*

Curiosamente, cuando los investigadores intentaron lo mismo con el agua ordinaria, descubrieron que ésta se evapora con tanta facilidad como si el recipiente estuviera destapado en vez de cubierto por la membrana de grafeno. Los autores del trabajo opinan que el secreto del nuevo material se halla en que las hojas de óxido de grafeno se colocan de tal forma que dejan espacio entre sí solo para una capa de moléculas de agua. Si otro átomo intenta penetrar, resulta que los capilares de grafeno les son demasiado pequeños porque cuando no hay agua el espacio entre las hojas de grafeno se estrecha, o quedan atascados con las moléculas de agua.

### *Propiedades ópticas*

Las propiedades ópticas del grafeno también le auguran un futuro esperanzador en un gran número de aplicaciones. El grafeno es un material casi completamente transparente, ya que absorbe casi 2,3% de la intensidad de la luz blanca que llega a su superficie (transmitancia aprox. 97.7%). Esta propiedad, unida a la flexibilidad, ha abierto la posibilidad de fabricar circuitos flexibles y transparentes.

El grafeno presenta además una gran transparencia a los haces de electrones, debido a su insignificante sección eficaz de dispersión electrónica. Esto los convierte en soportes ideales en TEM (Microscopía Electrónica de Transmisión), dado que resultan prácticamente transparentes para esta técnica. De esta manera resulta posible observar átomos individuales adsorbidos.



*Figura 2 6 Fotografía en la que se observa como una lámina de grafeno es prácticamente invisible (Fuente: <http://en.wikipedia.org>)*

### *Propiedades magnéticas*

El grafeno no es un material magnético, pero la modificación de su estructura permite desarrollar nuevas capacidades magnéticas. En la Universidad de Manchester, se propusieron modificar el grafeno para volver el material magnético. Los investigadores comenzaron a trabajar con el grafeno y lo salpicaron con otros átomos no magnéticos, como los de flúor y retiraron algunos átomos de carbono de la estructura. Los huecos que dejaron al retirar los átomos de carbono junto a los átomos que habían añadido comenzaron a comportarse de la misma manera que la estructura del hierro y, por tanto, este grafeno modificado presentó propiedades magnéticas.

Sin embargo, los defectos introducidos en el material deben estar separados entre sí lo suficiente como para que el campo magnético producido no se anule entre sí y, por tanto, se eliminan las propiedades magnéticas del material. De hecho, si se retiran demasiados átomos de carbono de la estructura ésta se vuelve inestable.

Recientemente, investigadores del instituto Imdea-Nanociencia y las universidades Autónoma y Complutense de Madrid han logrado dotar al grafeno de propiedades magnéticas. Esto lo han conseguido mediante una técnica que consiste en hacer crecer una capa de grafeno sobre un cristal metálico de rutenio dentro de una cámara de ultra alto vacío y posteriormente evaporando encima moléculas orgánicas de tetraciano-*p*-quinodimetano (TCNQ), una sustancia gaseosa que actúa como un semiconductor a bajas temperaturas.

El avance, publicado por la revista *Nature Physics*, abre la puerta al desarrollo de dispositivos de grafeno, capaces de multiplicar tanto la velocidad de procesamiento de la información como la cantidad de datos que se pueden almacenar en los dispositivos electrónicos, con aplicaciones en campos como las telecomunicaciones, la informática, la energía y la biomedicina.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

### 3. PRINCIPALES APLICACIONES

### 3. PRINCIPALES APLICACIONES

El grafeno tiene una amplia variedad de aplicaciones posibles. A continuación, se describen algunas de las más interesantes.

#### 3.1 Dispositivos electrónicos avanzados (procesadores de próxima generación)

Debido a las propiedades electrónicas del grafeno, la industria de semiconductores tiene la intención de construir ordenadores mucho más rápidos que los actuales mediante el desarrollo de microprocesadores con transistores de grafeno. El secreto de la alta velocidad consiste en desarrollar transistores más pequeños, de forma que la distancia que deben recorrer los electrones cuando los atraviesan sea lo más pequeña posible. La velocidad con la que pueden pasar a través de estos dispositivos también es muy importante, y el grafeno (que permite a los electrones una movilidad hasta 200 veces mayor que el silicio) parece ser el material elegido para construirlos.

Se está trabajando en la implementación del grafeno en Transistores de Efecto de Campo (*Field Effect Transistor*, FET) con una velocidad de conmutación muy elevada (algunos prototipos ya han alcanzado los 100 GHz, es decir, más del doble de rápido que un transistor de silicio de dimensiones comparables, aunque se cree que podrían alcanzar velocidades de 1.000 GHz), así como de transistores en los que el flujo de electrones es muy pequeño y está totalmente controlado (*Single Electron Transistor*, SET). Además, como el procesado del grafeno es compatible con las tecnologías de fabricación planar estándar usadas en micro y nanoelectrónica, debería serlo con los equipos de fabricación de chips de las fábricas de semiconductores existentes.

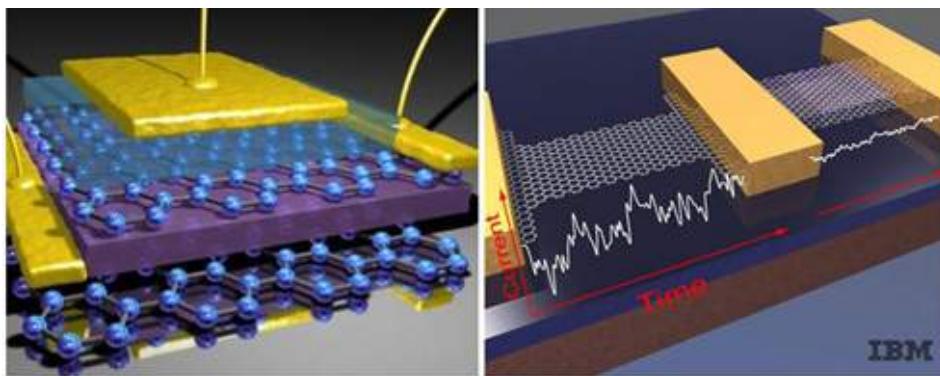


Figura 3.1 Esquema de transistores de grafeno. Izq (Fuente: <http://nanotechweb.org>). Der (<http://www.digitaltrends.com>)

Un equipo de investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), liderado por el español Tomás Palacios, es uno de los primeros en el desarrollo de circuitos y dispositivos electrónicos de grafeno. Su primer prototipo de transistor de grafeno de bajo coste fue presentado en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física en marzo de 2009 y, desde entonces, se han producido avances importantes y prometedores. Tomás Palacios cree que todavía queda mucho trabajo por hacer para mejorar el rendimiento de los circuitos y dispositivos.

Investigadores de IBM han logrado desarrollar un circuito integrado que está construido sobre una oblea de carburo de silicio y se compone de transistores FET hechos de grafeno. El circuito también incluye estructuras metálicas que conectan a los transistores de grafeno dentro del circuito integrado. Una de las mayores dificultades fue la integración del transistor FET de grafeno con los demás componentes dentro del circuito, debido a que, por un lado, los metales utilizados para la construcción de otras partes del circuito (aluminio, oro, paladio, etc.) no se adhieren muy bien al grafeno, y por otro, el grafeno, siendo sólo de un átomo de espesor, se daña fácilmente con los procesos estándares de grabado de semiconductores. Una de las características notables del modelo alcanzado es que el rendimiento del dispositivo no cambia demasiado cuando la temperatura varía entre 27°C y 127°C. Eso significa que un circuito integrado de grafeno no tendrá que estar sobre-dimensionado para compensar los cambios de temperatura y que de este modo se lograrán circuitos sencillos de construir y, en consecuencia, económicos.

Recientemente, Kartik Mohanram (Universidad Rice) ha usado el grafeno para crear un transistor que puede cambiar y trabajar entre tres modos

diferentes de operación, lo que en los circuitos convencionales requiere tres transistores (uno por modo de operación). Este nuevo transistor de grafeno es un dispositivo analógico, del tipo que se utiliza para las comunicaciones inalámbricas en los auriculares Bluetooth y las etiquetas de identificación por radio frecuencia (RFID).

Este tipo de transistores configurables podría permitir el desarrollo de chips más compactos para enviar y recibir señales inalámbricas. Unos chips que utilizarán menos transistores, manteniendo las mismas funciones podrían ser más baratos, consumir menos energía, y liberar espacio en el interior de dispositivos electrónicos portátiles como los teléfonos de tipo smartphone, donde el espacio es reducido. El Departamento de Defensa de EE.UU., ya ha presentado un chip de grafeno un 55% más potente que una versión anterior y que, de momento, es para aplicaciones militares de identificación por RFID.

Samsung es otra empresa que se une al desarrollo de la electrónica de alta velocidad y bajo consumo. Ha construido hace relativamente poco tiempo un dispositivo denominado *Barristor*, capaz de conmutar a frecuencias cercanas al terahercio. El *Barristor* es básicamente un transistor basado en una combinación de silicio y grafeno. La empresa ha establecido 9 patentes sobre esta tecnología, por lo que supone liderará el desarrollo de circuitos integrados que utilicen como base estos *Barristores*.

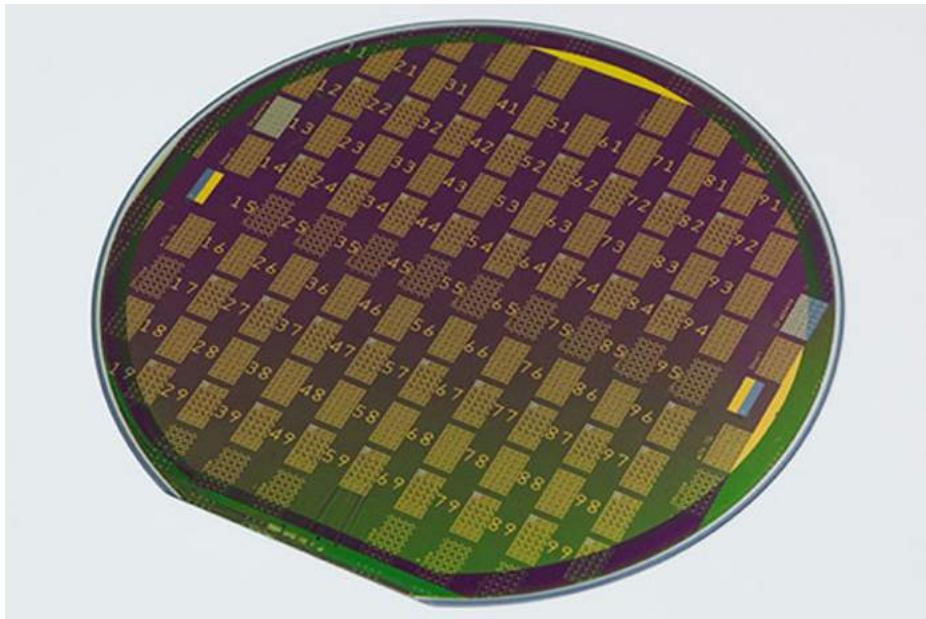


Figura 3.2 Detalle del Barristor (Fuente: publicado el 17 de mayo 2012 en la revista Science)

### *Apilamiento del grafeno*

Se ha especulado mucho con la posibilidad de apilar láminas individuales de grafeno entre capas de materiales aislantes para crear nuevos dispositivos electrónicos. Había dudas de la posibilidad de hacerlo sin perder sus excelentes propiedades como conductor de electricidad y calor, debido a que, además de que los enlaces entre capas son diferentes, durante el proceso de fabricación de estas estructuras tipo «sándwich» es inevitable que se acumulen, entre capa y capa, otros materiales no deseados, que pueden debilitar las cualidades de la estructura general y empeorar su rendimiento.

El análisis del corte transversal de una de estas estructuras ha demostrado que el grafeno es apto para la fabricación de nuevos componentes electrónicos en combinación con otros materiales. Se descubrió que las estructuras eran prácticamente perfectas incluso aunque se acumulasen más de diez capas en la construcción de éstas (artículo publicado en *Nature Materials*).

### **3.2 Pantallas táctiles flexibles**

Dada su transparencia y buena conductividad, el grafeno se puede emplear en la fabricación de pantallas táctiles flexibles de dispositivos electrónicos con una vida útil casi ilimitada y a bajo costo.

Las investigaciones realizadas en paralelo en la Universidad de Texas (Estados Unidos) y en la Universidad de Corea del Sur, han dado como resultado la fabricación de láminas rectangulares de grafeno con buenas propiedades de conducción eléctrica al mismo tiempo que son transparentes. Actualmente, los investigadores deben demostrar que las hojas fabricadas con este material tienen una excelente calidad, aunque han surgido problemas de fracturas o discontinuidades que afectan su rendimiento.

Determinados centros de investigación y empresas ya han fabricado pantallas táctiles:

- En la Universidad de Groningen (Países Bajos) se ha creado una pantalla táctil de 10 metros.
- Samsung presentó a comienzos de 2011 unos prototipos de pantallas Amoled flexibles, pero con un coste muy elevado.

- Investigadores de la Universidad de Rice crean nuevas pantallas OLEDs que prometen ser irrompibles.

Recientemente, investigadores del Institut de Ciències Fotòniques (ICFO) han desarrollado un dispositivo electrónico flexible y ultrasensible a la luz, que supone un nuevo paso hacia la obtención de móviles flexibles y ordenadores que se puedan enrollar como una revista. La clave de su invento ha sido situar una capa cristalina de puntos cuánticos (una nanoestructura semiconductor que confina el movimiento, en las tres direcciones espaciales, de los electrones) sobre la hoja de grafeno. De este modo, se ha podido superar el obstáculo que planteaba la baja capacidad de absorción de luz que tiene el grafeno. El ICFO ha patentado el invento y está estudiando la posibilidad de crear una empresa para explotarlo comercialmente.



Figura 3.4 Ejemplos de dispositivos desarrollados a partir del grafeno (Fuente: <http://grafeno.com/>)

Este mismo dispositivo, debido a su alta sensibilidad a la luz, abre la vía a crear también innovadores e interesantes productos de fotodetección, como pueden ser las cámaras de visión nocturna y detectores de moléculas -basados en el análisis espectroscópico de la luz que reflejan- para el diagnóstico médico o la industria farmacéutica.

### 3.3 Generación y almacenamiento de energía

#### Supercondensadores

Los fabricantes de automóviles generalmente utilizan baterías de un tamaño más grande de lo necesario para compensar la pérdida de capacidad de almacenamiento de energía a lo largo del tiempo, así como el hecho

de que las baterías no pueden ser descargadas por completo sin dañarlas. La solución a estos problemas de las baterías pasa por su sustitución por supercondensadores. Un condensador puede almacenar carga eléctrica de forma viva y no gracias a reacciones químicas. Tiene la ventaja de una carga inmediata y de aguantar un número de ciclos de carga ilimitado, aunque a igualdad de peso, éstos sólo almacenan entre un 5 y un 10% de energía que las baterías (en comparación a las de hidruro metálico de níquel).

Actualmente, los condensadores que se han utilizado para hacer las pruebas sólo han dado resultados en accesorios de computadora como son los ratones (la empresa Genius ha creado un ratón actualmente a la venta inalámbrico con condensador como método de alimentación único, que es capaz de ofrecer hasta una semana de uso con tan sólo tres minutos de carga).

Esto podría cambiar a raíz de fabricar condensadores basados en el grafeno. La capacidad de un condensador depende en gran medida del área de las placas que lo conforman, de modo que la relación superficie/peso tiene que ser lo más alta posible para mejorar dicha capacidad. Una capa de grafeno ocupa una superficie específica de  $2675\text{ m}^2/\text{g}$ . El aumento de la superficie de un electrodo supercondensador aumenta la capacidad de almacenamiento debido a que una mayor cantidad de los iones en el electrolito líquido tienen acceso a él. El grafeno, como se ha visto, tiene una elevada área superficial, pero las hojas tienden a juntarse, bloqueando el acceso a sus superficies.

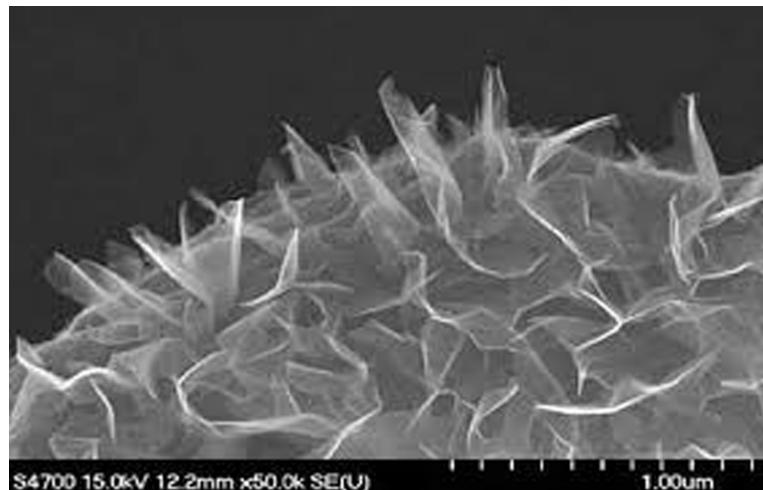


Figura 3.5 La elevada relación superficie/peso del grafeno permitiría la fabricación de condensadores con gran capacidad de almacenamiento de energía (Fuente: <http://spectrum.ieee.org/>)

Existen muchos equipos de investigación tratando de conseguir supercondensadores basados en grafeno, pero en general, los dispositivos obtenidos hasta la fecha no alcanzan los valores de capacidad teóricos de 550 F/g (faradios por gramo). Investigadores de UCLA han desarrollado una forma de hacer que las hojas de grafeno se contraigan para que no se apilen cuando estén cerca unas de otras, haciendo más fácil que el electrolito acceda a sus superficies. Se sigue refinando la forma y las dimensiones del grafeno para mejorar el rendimiento final y se ha planteado desarrollar electrolitos más baratos.

Se han desarrollado en UCLA unos electrodos supercondensadores que pueden almacenar casi tanta energía como los electrodos utilizados actualmente en las baterías para vehículos híbridos. Éstos almacenaron 85,6 Wh/kg a temperatura ambiente y 180 Wh/kg a 80°C. Eso se traduciría en entre 21 y 43 Wh/kg para un ultra condensador completo, el cual pesaría más que el electrodo solo. Esta capacidad de almacenamiento del prototipo es comparable a la de las baterías de hidruros de níquel, que almacenan entre 40 y 100 Wh/kg. Los nuevos electrodos de alta energía podrían permitir que los supercondensadores compitieran con estas baterías. A pesar de que aún almacenan menos energía, permite su carga en segundos o minutos. Además, como no tienen que ser de gran tamaño para compensar la pérdida de capacidad con el tiempo, podrían ser más baratos que las baterías actuales. Se siguen intentando aumentar la capacidad de este tipo de condensador con la meta de conseguir un sistema que supere a la mejor batería de iones de litio (a igualdad de peso).



Figura 3.6 Fotografía de una lámina de grafeno multicapa. (Fuente: <http://www.nanowerk.com>)

Teléfonos, tablets, ordenadores, coches eléctricos, etc. podrían aprovecharse de esta tecnología, en el sentido en que sería muy ventajoso cargar todos estos dispositivos en minutos sin estar atado a la espera de horas como ocurre en la actualidad.

## Baterías

La gran área superficial del grafeno y su gran conductividad lo postulan como posible sucesor del grafito en la fabricación de ánodos de baterías de ión litio. Existen diversos grupos de investigación que han logrado importantes mejoras en la obtención de nuevas baterías.

Un equipo de ingenieros de la Universidad de Northwestern en Estados Unidos (doctor Harold Kung y su equipo de investigadores) ha creado un electrodo para las baterías de ión de litio que permite que las baterías conserven la carga hasta diez veces más que las actuales y que se puedan cargar diez veces más rápido que las actuales (duraría más de una semana y se cargaría en apenas 15 minutos). Se ha conseguido introducir más iones de litio en la unidad y acelerar su movimiento alterando los materiales utilizados para fabricar la batería. La carga máxima se aumentó mediante la sustitución de láminas de silicio con pequeños racimos de grafeno para aumentar la cantidad de iones de litio que una batería puede almacenar. Una mayor rapidez en la carga del dispositivo se logró gracias a un proceso de oxidación química que consiguió perforar orificios minúsculos, de entre 20 y 40 nanómetros de ancho, en las láminas de grafeno. De este modo, se ayuda a los iones de litio a moverse y a encontrar, mucho más rápido, un lugar para almacenarse. Se ha probado que, después de que la batería ha sido cargada alrededor de 150 veces, pierde potencia aunque la batería sería todavía cinco veces más efectiva que las hechas de ión de litio que existen en el mercado actualmente. Actualmente, las investigaciones se han concentrado en mejorar los ánodos, aunque se planea estudiar el cátodo para introducir mejoras. Se estima que las pilas que usan esta tecnología podrían estar en las tiendas en los próximos tres o cinco años.

Un grupo de investigadores del KAIST (Instituto Avanzado de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur) han usado papel de grafeno con un recubrimiento de litio como ánodo y un cátodo de  $V_2O_5$  desarrollado sobre una lámina de grafeno dando como resultado baterías flexibles con mayor densidad energética y muchos más ciclos de carga.

Investigadores de la empresa americana Leyden Energy ha desarrollado una variante de las baterías de ión litio. El cambio estructural no es otro que la sustitución del hexafluorofosfato de litio por un material llamado *imida*, que es una sal de carbono y nitrógeno que no se degrada con el agua del interior de la batería y no le afectan las altas temperaturas. Además permite una densidad de 225 Wh/kg y una capacidad de 1.000 ciclos de carga y descarga frente a los 140 Wh/kg y los 300 ciclos de otras baterías más conven-

cionales. En la actualidad, el único problema de la *imida* es que producen corrosión en el aluminio de los conductores, pero aquí es donde entra de nuevo en juego el grafeno, que cumple la misma función del aluminio sin inmutarse por la acción del calor ambiental o la *imida*. Las baterías de imida pueden ser utilizadas para productos electrónicos o desarrollar versiones más grandes para automoción. La empresa Leyden Energy ya las está fabricando y se espera que el primer portátil esté disponible ya en 2012.



Figura 3 7 Batería desarrollada por Leyden Energy. (Fuente: <http://sysblog.info/>)

La empresa Vorbeck, en colaboración con la Universidad de Princeton y el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) ha desarrollado un compuesto de Ion Litio y una mezcla de grafeno (Vor-Charge). Esta combinación permite a los materiales el transporte más rápido de iones y de conducción eléctrica, mejorando el rendimiento general de las baterías.

### Células solares

El grafeno también puede aportar un enfoque prometedor para la fabricación de células solares ligeras, flexibles y baratas. Un problema que persiste y que ha ralentizado el desarrollo de dichas células ha sido la dificultad para encontrar los materiales apropiados para que los electrodos lleven la corriente desde y hacia las células. Actualmente, el material estándar utilizado hasta el momento para la fabricación de los electrodos está conformado por

indio, estaño y óxido, pero el indio es caro y es un material escaso, por lo que la búsqueda ha sido el de un sustituto adecuado. Tampoco ha sido fácil hacer electrodos con materiales orgánicos, y estos no pueden igualar a las células a pesar de su flexibilidad, transparencia y bajo coste.

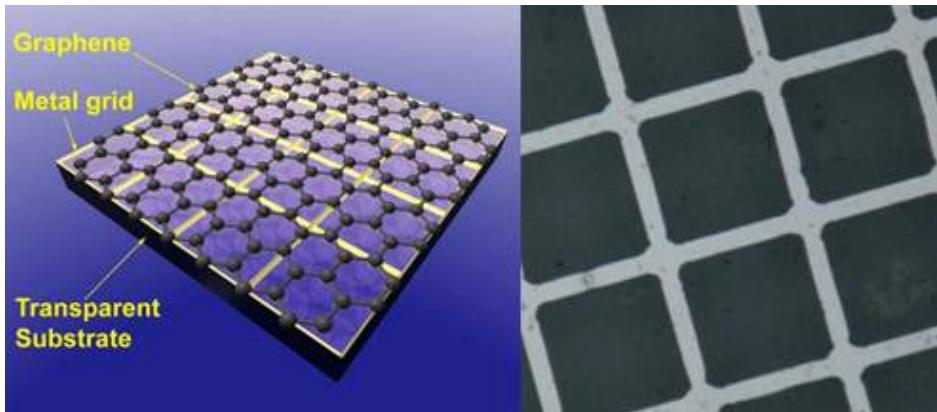


Figura 3.8 La celda combina una hoja de una sola capa de grafeno de alta conductividad con una fina malla de nanocables metálicos. (Fuente: <http://www.gizmag.com/>)

El mayor obstáculo para la obtención de energía eléctrica a partir de la luz con grafeno es su transparencia: absorbe sólo aproximadamente el 3% de la energía de la luz y de esta manera la mayor parte de fotones pasan a través del grafeno sin participar en la generación de corriente eléctrica. Científicos de la Universidad de Manchester han logrado convertir el material en una 'trampa' de luz al extender en su superficie diminutas 'cintas' de oro y titanio de unos nanómetros de anchura, lo que aumenta la opacidad del material unas 20 veces. Esta estructura hace al grafeno prácticamente opaco, absorbiendo el material más del 60% de la luz.

Recientemente, un equipo de investigación de la Universidad de Florida, ha logrado alcanzar una eficiencia del 8,6% con una nueva célula solar, gracias un tratamiento químico en el que se dopa al grafeno con TFSA. Se estima que si las células solares con grafeno alcanzaran eficiencias de conversión de un 10%, podrían ser un claro competidor del silicio en el mercado de los paneles solares, siempre y cuando sus costes de producción sean mantenidos en un nivel lo bastante bajo.

Un descubrimiento más reciente llevado a cabo por un equipo de investigación del MIT (Pablo Jarillo-Herrero), ha mostrado que el grafeno tiene una res-

puesta termoeléctrica muy sensible a la luz. Al someter una lámina de grafeno a la luz de un láser, aparecieron dos regiones en el material con diferentes propiedades eléctricas (unión pn) que, además, provocó una diferencia de temperatura entre ambas zonas de material. Esta diferencia de temperatura en materiales ya se había podido observar ante temperaturas extremadamente bajas o cuando se bombardean intensamente con un láser de alta potencia, sin embargo, en el caso del grafeno el fenómeno apareció a temperatura ambiente y con una luz que no era más intensa que la luz del sol.



Figura 3.9 Los próximos paneles solares podrán fabricarse con grafeno. (Fuente: <http://grafeno.com/>)

Este hallazgo implica que el grafeno podría utilizarse en la recolección de energía solar puesto que el grafeno es capaz de responder a un intervalo amplio de longitudes de onda (en contraposición a los materiales habituales que únicamente responden a longitudes de onda concretas). También como fotodetector (o en sistemas de visión nocturna) puesto que podría reaccionar ante un intervalo de

energía bastante amplio, desde la luz visible hasta los infrarrojos, algo que no todos los fotodetectores pueden hacer.

### 3.4 Otras aplicaciones de interés

#### *Fabricación de nuevos materiales compuestos*

El grafeno, así como otros muchos materiales muestran propiedades extraordinarias al tratarlas como entidades individuales a escala nanométrica. Pero para que estos materiales puedan ser utilizados, es necesario poder integrarlos en estructuras tridimensionales de mayor tamaño.

- Muchos investigadores han visto que la adición de grafeno para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica da como resultado componentes más rígidos y resistentes que los compuestos de nanotubos de carbono con un peso similar. Según los estudios realizados, el grafeno une mejor a los polímeros, lo que

permite un acoplamiento más eficaz del en la estructura del material compuesto. Esta propiedad podría dar lugar a la fabricación de componentes con alta relación resistencia - peso para usos tales como palas de los aerogeneradores o componentes de aeronaves.

### Sensores

La adsorción de moléculas sobre la superficie del grafeno da lugar a un dopaje del mismo, bien generando electrones o huecos en función de la naturaleza del material adsorbido, y por tanto a pequeños cambios en su resistividad. Esto, unido a su elevada superficie específica (aprox.  $2.600 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ), convierte al grafeno en un potencial candidato para la elaboración de sensores de gran sensibilidad (de gases, biosensores, etc.), pudiendo llegar a niveles de detección de moléculas o átomos individuales.

También permite desarrollar sensores para diagnosticar enfermedades, mediante la unión de moléculas que son sensibles a enfermedades particulares a los átomos de carbono en el grafeno.

### Aplicaciones clínicas y medioambientales.

Investigadores del MIT han logrado purificar el agua de manera más eficiente que los métodos actuales (ósmosis inversa) mediante el uso de láminas de grafeno perforadas con agujeros de tamaño preciso, a la que se le añadieron otros elementos provocando que los bordes de estas minúsculas aperturas interactuasen químicamente con las moléculas de agua — repeliéndolas o atrayéndolas.

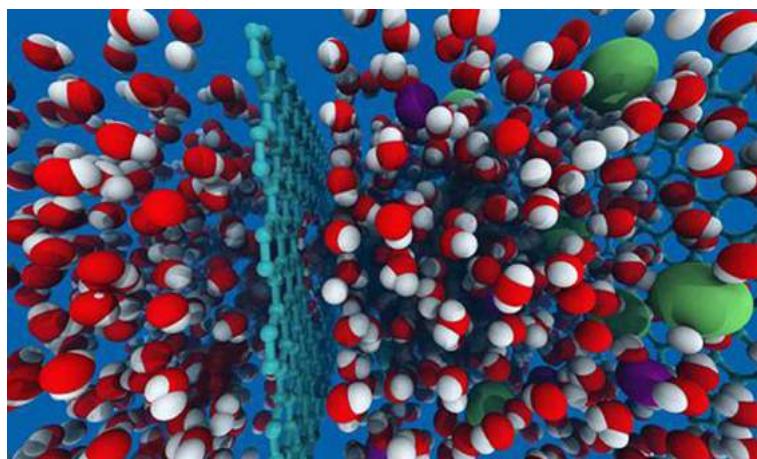


Figura 3 10 Desalinización mediante grafeno (Fuente: <http://www.monografias.com/>)

La ósmosis inversa usa membranas para filtrar la sal del agua y requiere de presiones extremadamente altas (y por tanto del uso de energía) para hacer que el agua pase a través de las membranas, que son unas mil veces más gruesas que el grafeno. El nuevo sistema de grafeno funciona a una presión mucho menor, y por tanto, según los investigadores, podría purificar el agua a un coste mucho más bajo. Además, teniendo en cuenta que el grafeno es un material tan fuerte, las láminas de éste deberían ser más duraderas que las membranas usadas actualmente en la ósmosis inversa. En este caso, el grafeno a emplear no tendría por qué ser tan puro como en el caso de los usos electrónicos u ópticos.

La clave del nuevo proceso es el control preciso del tamaño de los agujeros en la lámina de grafeno, evitando los poros demasiado grandes por donde puede pasar la sal y los demasiado pequeños donde quedarían bloqueadas las moléculas de agua. El tamaño ideal es de aproximadamente un nanómetro. Precisamente en este punto se encuentra el mayor inconveniente de esta aplicación ya que los métodos actuales no permiten fabricar estructuras tan precisas de los poros a gran escala.

Se trata de una aplicación muy interesante, tanto para el ámbito civil como para el militar. La disponibilidad de agua potable es cada vez más escasa en muchas partes del mundo, y más en muchas de las regiones donde existen conflictos armados. Una fuente prometedora de agua potable es el virtualmente ilimitado suministro de agua de mar del mundo, pero hasta el momento las tecnologías de desalinización son demasiado caras para un uso masivo.

### *Disipadores térmicos*

A medida que los dispositivos electrónicos avanzan, la necesidad de una disipación mejor es mucho mayor. Los actuales disipadores de aluminio o cobre suelen ser suficientes, pero en la universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos, ha encontrado una manera más eficiente de refrigerar cualquier tipo de dispositivo utilizando una aleación de cobre y grafeno, más eficiente (permite disipar el calor generado por cualquier circuito eléctrico hasta un 25% más rápido que un bloque de cobre puro según las pruebas llevadas a cabo) y económica que los productos fabricados con otras aleaciones más tradicionales.

## *Aviónica*

Parece ser que los aditivos de combustible confeccionados con partículas minúsculas de grafeno podrían lograr que los aviones supersónicos vuelen aún más rápido y que sus motores diesel lleguen a contar con mejores condiciones de eficiencia y protección de la sustentabilidad ambiental.

Según una nota de prensa de la Universidad de Princeton, el Pentágono les ha asignado tres millones de dólares para estudiar la forma en la cual nanopartículas compuestas por fragmentos de hojas moleculares de grafeno pueden incorporarse como aditivos al combustible de los aviones supersónicos. Estas partículas diminutas podrían ayudar a volar más rápido a estas aeronaves y a lograr que los motores diesel sean más limpios y eficientes.

Entre los principales objetivos del equipo dirigido por los ingenieros de Princeton destacan la comprensión del proceso de ignición de los combustibles con ayuda de nanopartículas, y la certeza sobre el tipo de partículas que funcionarían mejor para la construcción de los motores del futuro. Al entender mejor el proceso, se incrementarán las posibilidades de obtener una mayor eficacia en el combustible y los motores. De lograrse este avance, se estaría eliminando una de las principales trabas para un mayor desarrollo de las aeronaves supersónicas, lo que podría dar nacimiento a una nueva generación de motores de combustión.

## *Tratamientos antibacterianos*

Actualmente, se están investigando las propiedades antibacterianas del grafeno. Como ejemplo, podemos mencionar el trabajo de los de investigadores del Instituto de Física Aplicada de Shangai (China). Este equipo ha intentado crecer diversas cepas bacterianas sobre papel de óxido de grafeno, y células humanas. Las bacterias no pudieron crecer sobre el papel, mientras que no se observó ningún efecto adverso sobre las células. Así, dado el efecto antibacteriano del grafeno y el hecho de que puede ser producido en grandes volúmenes, este material podría utilizarse para vendajes, envases para alimentos o para fabricar prendas de vestir y calzado sin olor.

## *Recubrimientos*

Diversos grupos de investigación están trabajando para desarrollar materiales compuestos de grafeno para emplearlos como recubrimientos

para proteger los metales contra la corrosión. Científicos de la Universidad de Vanderbilt en Nashville han llevado a cabo experimentos y demostraron que un recubrimiento basado en grafeno proporcionaba la misma protección a la corrosión como un recubrimiento orgánico convencional cinco veces más grueso.

No sólo se está estudiando el efecto de estos recubrimientos en distintos metales, sino también en buscar métodos convencionales de aplicación, lo que simplificaría la producción y aumentaría las posibilidades de mercado.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 4. EL GRAFENO EN DEFENSA

## 4. EL GRAFENO EN DEFENSA

Se estima que el grafeno puede tener un impacto significativo para los sistemas de Defensa en los próximos 15 años, a través de los desarrollos que se puedan haber producido en muchos campos de la investigación y el desarrollo como la electrónica, electro-óptica, materiales estructurales y de protección, generación y almacenamiento de energía, materiales compuestos multifuncionales, etc. También se espera que el impulso de esta tecnología para aplicaciones que no son de defensa acelere la incorporación de este material en dichos sistemas.

Es importante tener muy en cuenta este último punto ya que el grafeno es un claro ejemplo de una tendencia que ha venido teniendo lugar en los últimos tiempos. A diferencia de lo que pasaba hace años, en donde la investigación en el sector de Defensa era uno de los principales motores del desarrollo de aplicaciones civiles, actualmente sucede que, en general, las instituciones militares ya no se encuentran a la vanguardia de todos los avances científicos y tecnológicos que se llevan a cabo, sino que dichos avances provienen, cada vez en mayor proporción, de la I+T que se realiza en el ámbito civil. Por ello, en los próximos años se espera que los avances más importantes en torno al grafeno y que puedan ser de interés para la mejora de las capacidades militares provengan de las actividades de I+T y de la innovación desarrolladas en el sector civil.

En este capítulo se ofrece una visión general de los usos potenciales de los dispositivos basados en el grafeno para el sector de defensa, y de cómo estos podrían mejorar las capacidades y operatividad de nuestras Fuerzas Armadas.

### 4.1 Aplicaciones

#### *Dispositivos electrónicos*

El desarrollo futuro de la electrónica de radio-frecuencia (RF) es de suma importancia para mejorar los sistemas cada vez más exigentes, sobre

todo teniendo en cuenta la dificultad de mantener la tendencia histórica que predice la ley de Moore (según la cual el número de transistores por unidad de superficie en circuitos integrados se duplica cada dos años) con los tradicionales basados en silicio (según el propio Moore, su ley dejará de cumplirse llegados al periodo que va desde 2017 a 2022).

El destino de los sistemas de radiofrecuencia es principalmente para comunicaciones, ya sean móviles, terrestres o por satélite. Sin embargo, las comunicaciones terrestres o por satélite (1,6, 2,5, 5,2, 23 y 28 GHz) a más altas frecuencias o potencias, así como las correspondientes a bandas puramente militares (banda X entre 8 y 12 GHz), son idóneas para la utilización de una tecnología como el grafeno, que permitiría fabricar transistores más pequeños, y así aumentar la capacidad de los circuitos integrados y, por tanto, las prestaciones de los dispositivos electrónicos.

Se espera que la fabricación de circuitos integrados de alta frecuencia basados en grafeno suponga un salto cualitativo en la capacidad actual de los dispositivos inalámbricos, debido fundamentalmente a un aumento en su rendimiento acompañado de reducciones considerables en términos de tamaño, peso y consumo. Las ventajas ofrecidas afectarían tanto a los terminales de comunicaciones del combatiente como a los integrados en distintos tipos de plataformas (radares, antenas, etc.).

Como se explicará en apartados posteriores, uno de los desafíos de los transistores de grafeno es integrarlos con otros componentes en un solo

chip, lo que no se había logrado hasta ahora, debido principalmente a una mala adherencia del grafeno con metales y óxidos y a la falta de sistemas de fabricación fiables para producir dispositivos y circuitos reproducibles. Precisamente éste es uno de los objetivos del Programa CERA (*Carbon Electronics for RF Applications*), financiado por DARPA.

Figura 4.1 Ejemplo de oblea objetivo dentro del Programa CERA (Fuente: <http://nanotechweb.org/>)

### *Generación y almacenamiento de energía*

El desarrollo de supercondensadores y baterías basados en grafeno permitiría disponer de unidades de almacenamiento de energía de reducido tamaño y peso, con una capacidad de almacenamiento muy superior a las actuales baterías de litio.

Esto sería fundamental para el combatiente, ya que vería muy reducida su carga, al poder disponer de unidades que podrían incluso ir integradas en el propio uniforme y que generaría la energía necesaria para poder disponer de todos sus subsistemas durante las misiones que le sean encomendadas. Esta reducción de peso también sería muy importante en el desarrollo de vehículos no tripulados (UXVs), mejorando los sistemas de propulsión principal, lo que concedería una mayor autonomía o permitiría disponer de una mayor carga de pago.

En lo que se refiere al resto de plataformas militares, se podrían mejorar las unidades de potencia auxiliar en plataformas tripuladas de gran tamaño, alimentando a su vez todos sus sistemas sin tener que conectar el motor (reduciendo así la firma térmica y acústica). Además, se considera de gran interés desde el punto de vista logístico (menor consumo de combustible) incrementar el grado de electrificación de las plataformas, tanto en sus sistemas de propulsión como en los sistemas de armamento y auxiliares, alcanzando el concepto de plataforma completamente eléctrica.

### *Sistemas de protección pasiva*

Como ya se ha comentado en esta monografía, el grafeno es el material más resistente que se conoce, por lo que ofrece un increíble po-

tencial para su aplicación en la fabricación de materiales para el desarrollo de sistemas de protección pasiva más livianos, flexibles y mucho más efectivos que los actuales.



Ya existen investigadores que han elaborado nuevos materiales derivados del grafeno. Así, en la Universidad de Wollongong (UOW) en Australia han desarrollado un nuevo material compuesto elaborado en base a una mezcla de igual proporción entre grafeno y nanotubos de carbono, que produce las fibras más duras que se han fabricado hasta

Figura 4.2 El grafeno es el material más resistente que existe  
(Fuente: <http://www.monografias.com/>)

ahora. Afirman que su resistencia supera 6 veces a la del hilo de una araña y 12 veces al kevlar y que el nuevo material podría resultar más barato y más fácil de hacer (por un método de hilatura en húmedo). Estas nuevas fibras artificiales podrían utilizarse en aplicaciones tales como los chalecos antibalas, músculos artificiales o incluso en el ámbito de los microrrobots.



Figura 4.3 En un futuro, se podrían fabricar chalecos antibalas ligeros y flexibles que incorporarían grafeno (Fuente: <http://www.monografias.com/>)

El equipo liderado por Ali Reza Ranjbartoreh perteneciente a la Universidad Tecnológica de Australia, ha presentado un innovador material desarrollado a base de láminas de grafeno. El resultado son láminas de grafeno del grosor del papel, que muestran un grado de resistencia en relación al acero dos veces superior.

### Pantallas flexibles

Como ya se comentó en apartados anteriores, la transparencia y buena conductividad del grafeno, hacen que este material se pueda emplear en la fabricación de pantallas táctiles flexibles. Una pantalla capaz de doblarse tendría muchas ventajas. Por un lado, serían más ligeras y delgadas y se esperaría que fueran más duraderas que las actuales pantallas rígidas de teléfonos y tabletas, ya que no usan vidrio.

Desde el punto de vista militar, el mayor beneficiario sería el propio soldado, que sería el usuario de este tipo de dispositivos que podrían ir integrados en el propio uniforme, con un consumo de energía mucho menor que el de las pantallas actuales. Además, le podría permitir una vía rápida de acceder a la información que apareciese en la pantalla (por ejemplo, situación en el campo de batalla, cambios de objetivo o estratégicos, etc.), sin que eso suponga pérdida alguna de movilidad y operatividad del combatiente al no tener que emplear una mano para sujetar la pantalla.



*Figura 4.4 Los futuros dispositivos electrónicos le permitirán al soldado acceder de un modo más rápido a la información sin que ello suponga mermar sus capacidades operativas (Fuente: <http://konstruarto.blogspot.com.es>)*

### *Dispositivos oprónicos*

Científicos de los centros IQFR-CSIC, ICFO y nanoGUNE han logrado atrapar y confinar luz en grafeno, convirtiéndolo en un candidato muy prometedor para procesar información óptica a escalas nanométricas, así como detección óptica y optoelectrónica ultra-rápidas (esto es, una nueva plataforma para procesar información óptica y para detección ultra-sensible).

Esta capacidad para atrapar luz en volúmenes extraordinariamente pequeños podría dar lugar a una nueva generación de nano-sensores con aplicaciones en diversas áreas de interés para defensa como sensores de luz, bio-detección, etc.

Un conjunto formado por un conductor de la electricidad como es el grafeno, junto con nanocristales ultrasensibles a la luz, podría convertirse en el nuevo material ideal para los fotodetectores, dando lugar a múltiples aplicaciones de los sistemas de visión nocturna. Podrían obtenerse imágenes con mejor resolución a partir de umbrales de luz muy por debajo que los necesarios actualmente.

## Sensores

Resulta muy interesante observar las nuevas aplicaciones que van surgiendo a partir del grafeno. Una muy interesante desde el punto de vista de la seguridad y la defensa es la que se ha desarrollado en el Instituto Politécnico Rensselaer y que muestra cómo una espuma de grafeno puede ser utilizada para la detección de explosivos y otros productos químicos potencialmente peligrosos, superando a los sensores que actualmente se comercializan (Este sensor de grafeno ha podido detectar amoniaco - $\text{NH}_3$ - y dióxido de nitrógeno - $\text{NO}_2$ - a una concentración que es un orden de magnitud menor que los detectores actuales).

Este descubrimiento abre la puerta a una nueva generación de sensores de gas y químicos, que pueden ser diseñados para detectar muchos gases y especies químicas diferentes. Los principales beneficiarios serían los artificieros y el personal especializado en la detección de agentes químicos.

## *Nuevos materiales (materiales compuestos de grafeno)*

Debido a la combinación de flexibilidad y resistencia que tiene el grafeno, presenta unas características idóneas para su aplicación en un gran número de industrias como la del automóvil y la aeronáutica, ya que permite el desarrollo de materiales más ligeros (en comparación con el acero, un conjunto de láminas de grafeno del grosor del papel es seis veces más ligero, presenta de cinco a seis veces menor densidad) y resistentes, dando lugar a plataformas menos pesadas, más seguras, y que utilizan menos combustible.

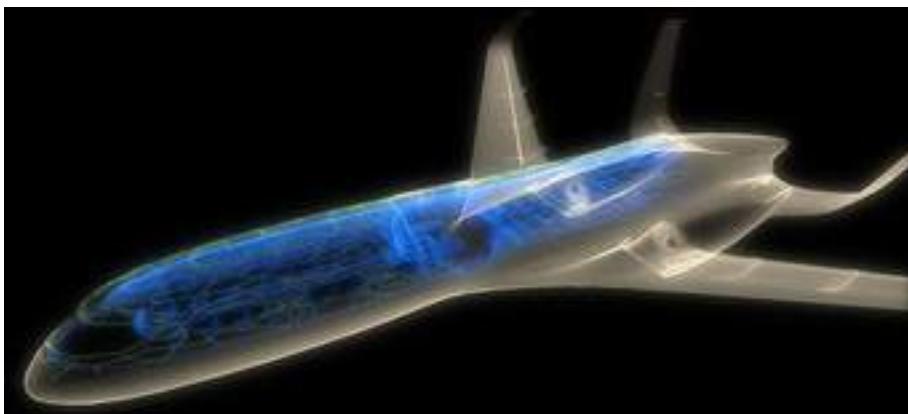


Figura 4.5 El grafeno puede suponer una revolución en la aviación y el sector aeroespacial (Fuente: <http://www.fierasdelaingenieria.com>)

## 4.2 El grafeno en la ETID

El interés que tiene el grafeno para el Ministerio de Defensa aparece reflejado en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2010). Son muchas y variadas las metas tecnológicas en las que el desarrollo de dispositivos y productos basados en grafeno tendrían un papel importante. En este apartado, se van a destacar algunas de ellas:

Dentro del Área de Actuación Funcional ISTAR:

- *MT 2.1.6* Disponer de capacidad tecnológica en sensores y emisores EO (IR) para su utilización en aplicaciones militares y de seguridad muy específicas y exigentes.
- *MT 2.2.2* Aumentar las capacidades automáticas de detección, localización, reconocimiento y/o identificación.
- *MT 2.2.5* Aumentar la capacidad de procesado de información de los sistemas actuales, avanzando en nuevas arquitecturas e introduciendo componentes HW más potentes y capaces.
- *MT 2.3.3* Desarrollar tecnologías clave (HW y SW) que aumenten la capacidad de transmisión de datos de los sistemas SATCOM y TDL.

Dentro del Área de Actuación Funcional PLATAFORMAS:

- *MT 3.2.2* Aumentar la resistencia estructural de las plataformas frente a impactos balísticos y explosiones mediante el desarrollo de nuevos materiales (blindajes pasivos más eficaces).
- *MT 3.2.3* Reducir el peso de las plataformas mediante el uso de materiales más ligeros sin pérdida de prestaciones.
- *MT 3.3.1* Incrementar las capacidades tecnológicas que permita mejorar los sistemas de propulsión principal de UXVs y de potencia auxiliar en plataformas tripuladas de gran tamaño a través del desarrollo de sistemas de generación y/o almacenamiento de energía eléctrica más eficientes.
- *MT 3.3.2* Incrementar el grado de electrificación de plataformas a través del desarrollo tecnologías de propulsión híbrida y eléctrica.
- *MT 3.3.4* Disminuir la dependencia de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en bases y campamentos.

- *MT 3.4.5 Incrementar las capacidades tecnológicas que permitan aumentar la seguridad y las prestaciones de las plataformas a través la integración de sensores (sensores EO, acústicos, radar, etc.).*
- *MT 3.4.6 Mejorar las comunicaciones de las plataformas terrestres.*
- *MT 3.5.1 Incrementar las capacidades tecnológicas que permitan diseñar cascos de última generación.*
- *MT 3.5.2 Incrementar las capacidades tecnológicas que permitan integrar múltiples funcionalidades en superestructuras integradas en la plataforma naval.*

Dentro del Área de Actuación Funcional PROTECCION PERSONAL:

- *MT 4.1.1 Incrementar la capacidad tecnológica que permita obtener capacidad de detección de IEDs a distancia o remotamente, con prestaciones operativas, y capacidad de evaluación de sistemas de detección.*
- *MT 4.2.1 Obtener capacidad de detección, identificación y monitoreo NBQ altamente sensible y a tiempo real a través sistemas puntuales, remotos y standoff no invasivos.*
- *MT 4.2.3 Obtener capacidad nacional en protección individual a través de equipos de protección ligeros, confortables y de elevado grado de protección, que no supongan la reducción de la operatividad del combatiente.*
- *MT 4.3.2 Mejorar la protección balística mediante la investigación en nuevos materiales (nanoestructurados, autorreparables, biomiméticos, exoesqueletos, tejidos multifunción, etc.), procurando evitar los límites impuestos a la protección debidos a la falta de ergonomía de dichos sistemas.*
- *MT 4.3.3 Aumentar la capacidad en combate cercano mediante el uso de sistemas con capacidad de uso en red, sensores en todo el espectro electromagnético y la difusión de datos.*
- *MT 4.3.4 Incrementar la capacidad tecnológica que permita reducir la carga física actualmente transportada por el combatiente reduciendo la dependencia de baterías y aumentando la eficiencia energética de los sistemas.*

Dentro del Área de Actuación Funcional PROTECCION DE PLATAFORMAS E INSTALACIONES:

- *MT 5.1.1* Incrementar la capacidad tecnológica que permita el desarrollo de sistemas ESM y ECM de no comunicaciones modulares, multifuncionales, reconfigurables y multiplataforma.
- *MT 5.3.1* Incrementar la capacidad tecnológica que permita el desarrollo de sensores y actuadores y su integración en el sistema de autoprotección.

Dentro del Área de Actuación Funcional TICS:

- *MT 6.2.3* Incrementar la capacidad tecnológica de desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas.
- *MT 6.2.5* Incrementar la capacidad tecnológica de desarrollar sistemas de comunicaciones acústicas submarinas.
- *MT 6.2.7* Incrementar la capacidad tecnológica de desarrollar antenas inteligentes capaces de mimetizarse con las plataformas.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 5. PERSPECTIVAS DEL GRAFENO

## 5. PERSPECTIVAS DEL GRAFENO

Aunque los investigadores han pasado más de 25 años estudiando las buenas propiedades de las formas alotrópicas del carbono como son los fulerenos, nanotubos de carbono y el grafeno, etc. siempre ha existido la dificultad de su comercialización, ya que ésta ni es rápida, ni es fácil.

Los fulerenos, que fueron descubiertos en 1985, y los nanotubos de carbono, en 1991, hasta ahora han tenido un impacto industrial limitado. Los fulerenos aún apenas han encontrado aplicaciones prácticas y aunque la situación de los nanotubos es mejor, son costosos de producir y difíciles de controlar (la producción a escala industrial genera una maraña de tubos de pared única, de pared múltiple, semiconductores y metálicos de varias longitudes y diámetros, todos con diferentes propiedades electrónicas). Estos ejemplos suponen una lección sobre cómo de difícil puede ser la comercialización de un nuevo material.

Parece ser que tanto la comunidad científica como la industrial es bastante más optimista con respecto al grafeno (los procesos de fabricación de grafeno de alta calidad dan menos problemas que, por ejemplo, la síntesis de nanotubos de carbono, cuya variabilidad y reproducibilidad no está controlada, y las láminas planas resultantes son mayores y más fáciles de manejar que los nanotubos), y prueba de ello es el rápido desarrollo de ciertas aplicaciones y la colaboración existente en numerosos proyectos entre los centros de investigación y grandes empresas.

### 5.1 Publicaciones y patentes

El interés entorno al grafeno, de acuerdo con las publicaciones y patentes anuales sobre él, está creciendo de un modo muy rápido. Así, en 2009, el grafeno fue tema de alrededor de 2000 artículos de investigación y más de 550 patentes, mientras que tan sólo un año después, el número de publicaciones se situó en más de 3000 y el de patentes se duplicó superando el millar.

Datos más recientes pertenecientes a un informe publicado por la firma consultora de patentes CambridgeIP muestra que, a finales de 2012 se

contabilizaron 7.351 patentes de grafeno y de aplicaciones vinculadas con él. Además, colocan a China es el país del mundo con más patentes de este material (2.200), seguida por Estados Unidos (1.754).

El peso de estas patentes recae en centros de investigación y universidades y en empresas (grandes y PYMEs) de un modo equitativo. Según CambridgeIP, Samsung es la empresa con mayor número de patentes, con un total de 407, seguida de la estadounidense IBM con 134.

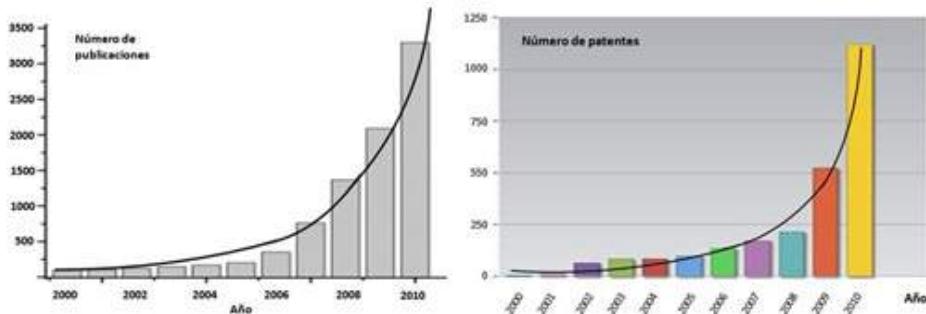


Figura 5.1 Interés creciente en el desarrollo de aplicaciones del grafeno. Las figuras muestran el aumento producido en el número de publicaciones (izq.) y de patentes (der.) relacionado con grafeno. (Fuente: <http://info.thomsoninnovation.com/>)

La siguiente figura muestra que los países que mayores avances están consiguiendo en el desarrollo de aplicaciones del grafeno son EEUU, Japón y Corea del Sur, que destacan bastante sobre el resto.

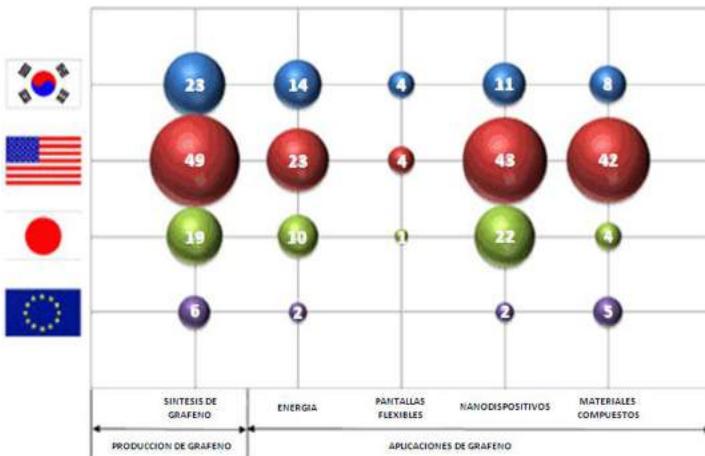


Figura 5.2 Distribución de patentes entre los países que más esfuerzos invierten en el desarrollo de aplicaciones de grafeno (Fuente: Displaybank February 2011)

Precisamente Corea del Sur ha invertido más 300 millones de dólares para comercializar el material, y compañías como IBM o Samsung está probando electrónica basada en el grafeno para la fabricación de dispositivos ultra-pequeños y ultra-rápidos.

Dentro de la Unión Europea, la Comisión Europea financiará actividades para el desarrollo de aplicaciones del grafeno durante 10 años por una cantidad total de aproximadamente 1.000 millones de euros (100 M€/año). Del mismo modo, el Reino Unido destinó unos 38 millones de euros en 2011 a la construcción de un centro dedicado a su investigación y en septiembre de 2012, aportó otros 26 millones de euros más. Países como Dinamarca, Suecia, Alemania y Holanda ya desarrollan programas específicos sobre grafeno con inversiones que rondan los 5 millones de euros.

## 5.2 Los retos del grafeno

Viendo el interés que ha despertado el grafeno, no sólo dentro de la comunidad científica, sino además en determinados sectores industriales, podría pensarse que el grafeno debería revolucionar en muy poco tiempo el mundo tecnológico e incluso ser una alternativa al silicio. La realidad es a día de hoy muy diferente, ya que también tiene algunos problemas, entre los que se destacan los siguientes:

- Por un lado, una única lámina de grafeno conduce tan bien la carga, que es difícil detener la corriente. Este problema debe resolverse si se quiere usar el material para crear dispositivos digitales, los cuales controlan el flujo de corriente como en los interruptores de encendido-apagado. Para cambiar las propiedades electrónicas de forma adecuada (creando una ‘banda prohibida’, o ruptura en los niveles de energía de los electrones, convirtiéndolo en un semiconductor) la lámina debe cortarse en finas bandas lo que aún no es posible con las tecnologías comerciales.

En este sentido, ya hay estudios que proponen soluciones a este problema. En el NPL (National Physical Laboratory) del Reino Unido, los científicos han comprobado que la luz puede utilizarse para controlar las propiedades eléctricas del grafeno. El equipo muestra que cuando el grafeno está recubierto con polímeros sensibles a la luz, sus propiedades eléctricas únicas pueden ser controladas con precisión y por lo tanto explotadas. Del mismo modo, científicos de la universidad de Berkeley (Dr. Xiang Zhang) han ideado un dispositivo basado en grafeno que es capaz de dejar pasar la luz o no, funcionando así como conmutador o modulador óptico, muy compacto y muy

rápido. De momento han obtenido velocidades de modulación de 1 GHz, pero esperan que se puedan alcanzar sin problemas los 500 GHz en un sólo modulador. Además, se ha conseguido que el dispositivo tenga un tamaño muy compacto (unas 25 micras), por lo cual este podría llevar a otras aplicaciones, como por ejemplo utilizarlo para crear chips ópticos que utilicen la luz en lugar de la electricidad para transmitir información.

Recientemente, Un equipo de científicos de los Estados Unidos, integrado por Matthew Yankowitz, Daniel Cormode y Brian LeRoy, han utilizado nitruro de boro, un material estructuralmente similar al grafeno pero que no es conductor de la electricidad, para crear «circuitos» de un solo átomo de grosor. El nitruro de boro proporciona un buen soporte mecánico al grafeno, a la vez que influye en la manera en que los electrones se desplazan por el interior del grafeno, resultado que podría servir para desarrollar una nueva forma de control del flujo eléctrico en los chips de grafeno.

- Por otro lado, uno de los principales impedimentos en la construcción de microprocesadores es la presión. Los materiales usados para fabricar los transistores no sólo deben tener excelentes propiedades eléctricas, sino que también deben ser capaces de superar la tensión a la que se ven sometidos durante el proceso de fabricación y al calentamiento generado por repetidas operaciones. El proceso utilizado para estampar conexiones eléctricas metálicas en los microprocesadores, por ejemplo, ejerce una tensión que puede provocar el fallo de los chips.
- Además, científicos del NIST (National Institute of Standards and Technology) en los EEUU han observado que el grafeno comienza a experimentar una reducción en la cantidad de electrones que puede transportar, en el momento en que se coloca en dispositivos y entre las capas de otros materiales. Esto es debido a que las imperfecciones producidas cuando los materiales se ponen juntos causan enormes valles y colinas en la superficie del grafeno, los cuales impiden la fluidez de los electrones desde una zona del grafeno a la otra. No obstante, es precisamente este obstáculo lo que podría hacer que el nuevo material sea un candidato ideal para estudiar las interacciones entre los conductores eléctricos y aislantes.

### **5.3 ¿Podría el grafeno sustituir al silicio?**

La increíbles propiedades eléctricas del grafeno hacen que éste sea una alternativa a materiales más convencionales, como por ejemplo el silicio, y que esté destinado a la fabricación de semiconductores en aplicacio-

nes que van desde los chips de ordenadores de gran velocidad hasta los sensores bioquímicos, ya que, para misma tarea, el grafeno consume menos electricidad que el silicio.

Existe quien asegura que el grafeno sustituirá completamente al silicio en la fabricación de microprocesadores, pero la verdad es que a día de hoy, debido principalmente a los problemas planteados anteriormente, la comunidad científica opina que esto podría tener lugar en no menos de una década. Además, es importante tener en cuenta que son muchos los recursos empleados en cuanto a personas/año y dinero gastado en el desarrollo de la electrónica del silicio. Según James Tour, químico orgánico especializado en nanotecnología en la Universidad de Rice en Houston, Texas, «pedir al grafeno que compita con el silicio es como pedirle a un niño de 10 años que dé un concierto de piano dado que ha estado dando clases de piano durante los últimos seis años».

En definitiva, lo más probable es que, antes de ver un procesador construido con grafeno, se pase una fase en la que se utilicen ambos materiales, grafeno y silicio. El desarrollo de mecanismos que permitan la fabricación de chips híbridos que integren grafeno con otros semiconductores más tradicionales como el silicio o el nitruro de galio es importante, ya que, aunque los transistores de grafeno son más rápidos que los del silicio, no se pueden utilizar todavía en microprocesadores, pues consumirían demasiada energía.

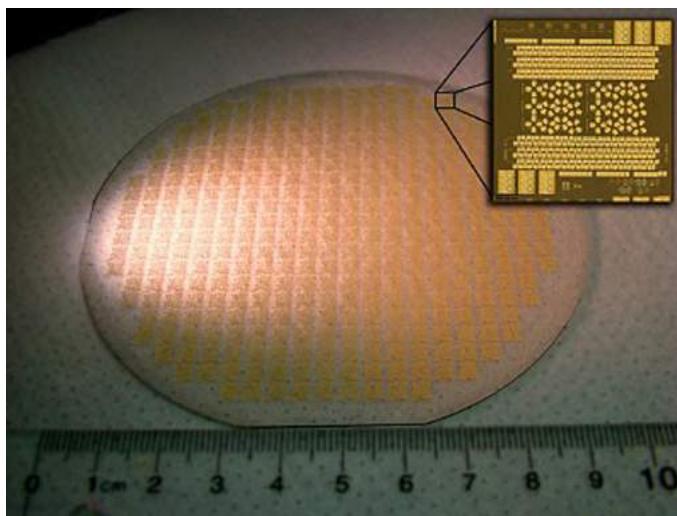


Figura 5.3 Oblea de grafeno que contiene alrededor de 75.000 dispositivos. Esquina superior derecha - imagen de un solo chip. (Fuente: <http://eetimes.com/General/PrintView/4087452>).



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 6. EL MERCADO DEL GRAFENO

## 6. EL MERCADO DEL GRAFENO

Las excepcionales propiedades electrónicas, térmicas, mecánicas, aislantes que ya se han tratado en los apartados anteriores y la alta superficie específica del grafeno y de los materiales derivados del mismo hacen de este material una tecnología potencialmente disruptiva para muchas industrias. Como se ha podido comprobar anteriormente, el número de patentes y de publicaciones relacionadas con el grafeno han crecido mucho en los últimos años y se esperan grandes sumas de dinero para el desarrollo de aplicaciones y de dispositivos basados en la tecnología del grafeno. La siguiente figura representa una estimación (en porcentaje) de a qué sectores o usuarios finales destinan las empresas de grafeno sus productos.

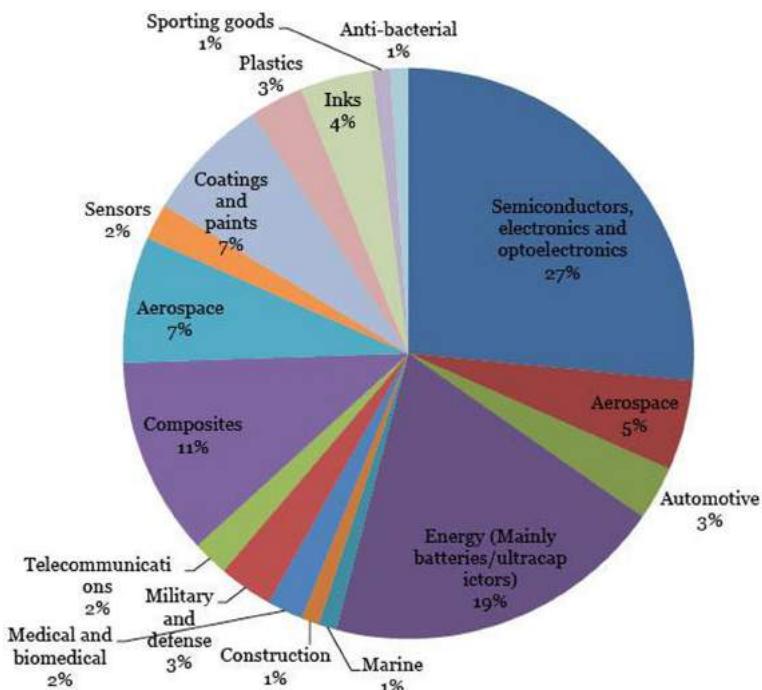


Figura 6.1 Consumo de grafeno (%) por usuarios finales (sectores) (Fuente: <http://www.electronics.ca/publications/news/48/Applications-of-Graphene-by-End-User-Markets.html>).

Se puede observar que los sectores de la electrónica (tecnología de semiconductores), el energético y el de la obtención de nuevos materiales para el transporte son los mayores consumidores de grafeno en la actualidad. Sectores como el de la Defensa muy posiblemente aumentarán su porcentaje en los próximos años, aprovechándose de los desarrollos generados en los sectores mencionados anteriormente y una vez que la tecnología del grafeno adquiera mayor madurez.

Según algunos estudios de mercado realizados (BCC Research «*Graphene: Technologies, Applications, and Markets*» y Research and Markets Global Graphene Market-*Analyst View*»), se espera que las primeras ventas significantes desde un punto de vista comercial de productos de grafeno tengan lugar antes de 2015, cuando la cuota global del mercado alcance los 48 millones €. El factor impulsor clave del mercado será la demanda por parte de la industria de los semiconductores. Según dichos estudios, será a partir de entonces cuando este mercado sufra un gran crecimiento, pudiendo llegar a crecer hasta los 480 millones € para el año 2020 (más de un 50% de crecimiento anual entre 2015 y 2020).

Por poner cifras, se muestra una gráfica con el crecimiento de mercado esperado en algunos de los sectores en los que la aplicación de grafeno puede tener mayor impacto.

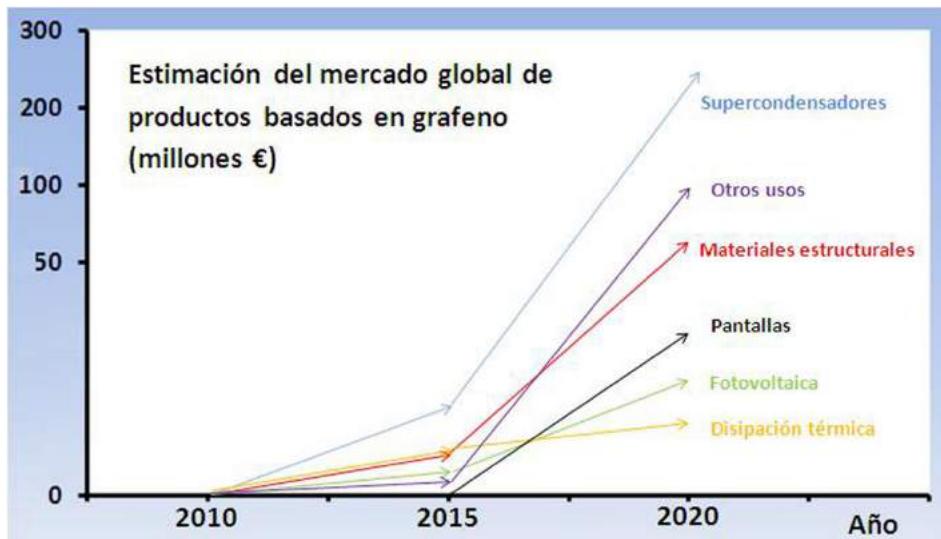


Figura 6.2 Estimación del mercado global de productos basados en grafeno para los próximos años.

En 2015, se estima que los materiales estructurales representarán aproximadamente el 25% del mercado (unos 10 millones €). Este sector se espera que aumente para llegar a 65 millones € para el año 2020.

Dentro del sector de la energía, los supercondensadores tendrán un impacto muy destacable en el mercado, ya que se ha estimado que ocuparán aproximadamente la mitad del mercado de las tecnologías de grafeno para el año 2020. Por otro lado, las células fotovoltaicas basadas en grafeno presentarán un crecimiento más comedido: de 5 millones € en 2015 a 25 millones € en 2020.

Se piensa que la cuota de mercado de las pantallas fabricadas con grafeno comenzará a mostrar cifras significativas en 2020 (aproximadamente 35 millones €). Por otro lado, parece ser que el mercado de los disipadores de calor basados en carbono mostrará su mayor crecimiento hasta 2015 (10 millones €) alcanzando los 15 millones € en 2020.

Con respecto a las otras aplicaciones, entre las que se incluyen todo lo relativo a la industria de los semiconductores, sensores, etc. se estima que tendrán un mayor auge a partir de 2015, logrando alcanzar en 2020 un mercado global de aproximadamente los 100 millones €.

## 6.1 La situación del mercado en España

España ha logrado alcanzar una posición de privilegio a nivel empresarial en el mercado del grafeno, tanto en I+D como a nivel de producción de este material. Dispone de un nutrido grupo de empresas, centros tecnológicos y universidades que trabajan en el desarrollo de aplicaciones del grafeno y en la mejora de los procesos de producción.

España es a día de hoy el primer exportador de grafeno de Europa, especialmente al mercado asiático. Gran culpa de ello la tienen empresas como son Avanzare, Graphenea, Grupo Antolín y Graphenano con dos firmas estadounidenses y una británica como principales competidores. De momento, son muy pocas las empresas dedicadas a la producción de grafeno en todo el mundo.



Figura 6.3 Entidades nacionales que trabajan en el desarrollo de aplicaciones del grafeno y en la mejora de los procesos de producción (año 2010) (Fuente: presentaciones “Industrial Day” sobre grafeno – mayo 2011).

La empresa Avanzare Innovación Tecnológica, S.L está situada en La Rioja y es la primera firma española con mayor capacidad de fabricación de grafeno de Europa. Se espera superar las 30 toneladas de material este año y tiene acuerdos de distribución en varios países. En la feria Nanotech 2009 de Tokio (Japón) presentó un nuevo método que ha permitido la producción industrial del grafeno (anteriormente a esta fecha, sólo se producía a escala de laboratorio).

Graphenea es una empresa con sede en el centro de investigación CIC Nanogune de San Sebastián. Es pionera en la fabricación de láminas de grafeno de alta pureza y calidad. Su capacidad actual de producción es de aproximadamente 2.000 obleas al año, aunque se espera poder aumentar ésta (hasta 200.000 en un plazo de tres o cuatro años) para poder atender las demandas del mercado.

Grupo Antolín también ha logrado posicionarse como referente mundial y europeo en la fabricación de grafeno de alta calidad. En Burgos, más concretamente en el Centro I+D+i de Villafría y en una planta piloto construida en este complejo, la empresa ha desarrollado un novedoso proceso que permite obtener industrialmente este material a partir de las

nanofibras de carbono. Esta innovación ha llevado a la creación de la marca Granph Nanotech, que comercializa desde Burgos grafeno envasado en frascos a centros de investigación, laboratorios de universidades y compañías especializadas de todo el mundo.

Graphenano es una empresa con capital español y alemán situada en Alicante, capaz de producir grafeno a nivel industrial. Su sistema de producción de grafeno a partir de dióxido de carbono ha situado a la empresa en el punto de mira de grandes multinacionales. Puede producir kilómetros de láminas de grafeno, toneladas de polvo y piezas tridimensionales (cables), a un precio muy competitivo (aproximadamente 200 € por un kilo de grafeno en polvo).

Aunque el sector del grafeno es muy pequeño aún, éste está creciendo rápidamente. El hecho de que España sea un referente dentro de este sector podría tener un efecto muy positivo en la economía del país, ya que empresas como las citadas anteriormente ejercen un efecto multiplicador ya que generan y atraen más inversiones y son el germen de nuevas empresas en sectores como la nanotecnología.

Según el MINECO (anteriormente MICINN), el análisis de los proyectos financiados entre los años 2008-2010, desvela una financiación de 7,8 millones de € en 67 proyectos relacionados con grafeno.

## 6.2 La situación del mercado en Europa

Desde que se presentó el grafeno, la UE ha apoyado la investigación sobre el mismo mediante la financiación de proyectos y la formación de investigadores. El liderazgo científico de los europeos es un hecho indiscutible gracias a su labor de investigación en las fronteras del conocimiento sobre dominios tan variados como la ingeniería y la ciencia de los materiales.

En Europa, existen aproximadamente 500 grupos y entidades registrados que trabajan en el desarrollo del grafeno y de sus aplicaciones, tal y como se pueden apreciar en las siguientes figuras. Dado el nivel de desarrollo en el que se encuentra el grafeno, es lógico que la mayor cantidad de entidades sean grupos dentro de las universidades y centros de investigación. España, como ya se ha comentado anteriormente, cuenta con una gran capacidad investigadora en este sector, y se encuentra a la cabeza en Europa, junto con naciones como Francia, Alemania y Reino Unido.

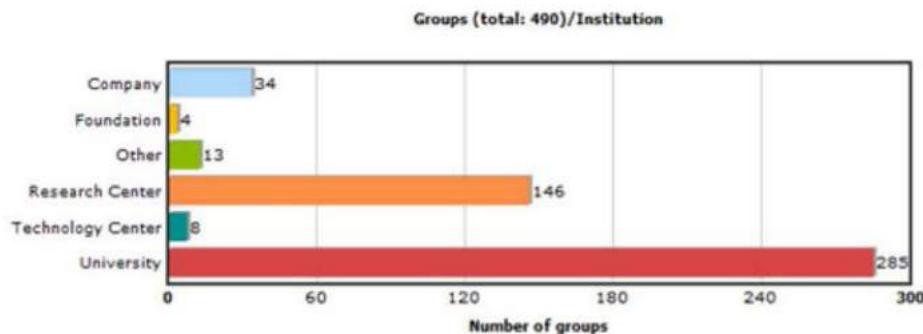


Figura 6.4 Entidades relacionadas con la investigación y desarrollo del grafeno contabilizados en Europa (año 2010) (Fuente: presentaciones “Industrial Day” sobre grafeno – mayo 2011).

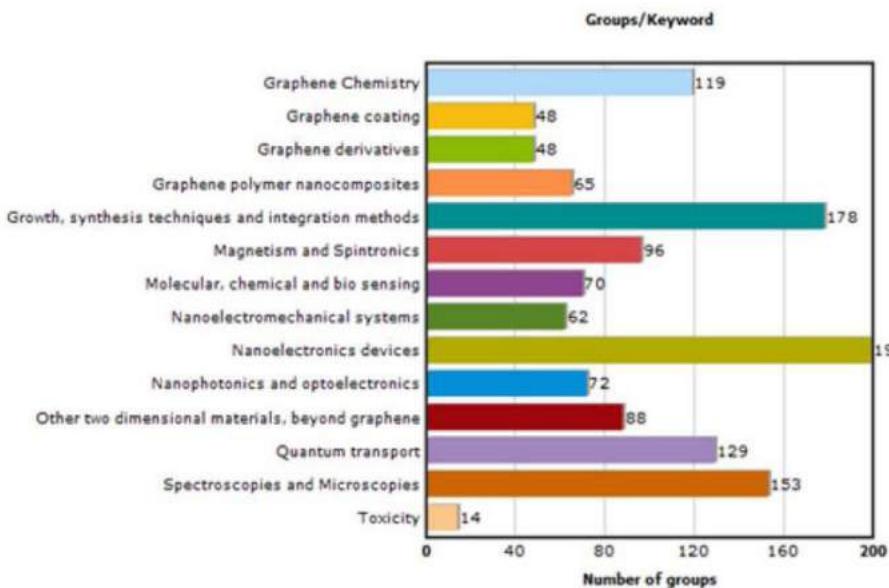


Figura 6.5 Relación entre el número de entidades / aplicación basada en el grafeno en Europa (año 2010)- (Fuente: presentaciones “Industrial Day” sobre grafeno – mayo 2011).

Existen algunas iniciativas europeas relacionadas con el desarrollo de aplicaciones del grafeno:

### *Tecnologías Futuras y Emergentes (FET)*

La Comisión Europea seleccionó en enero de 2013 a los dos proyectos ganadores del concurso europeo de Tecnologías Futuras y Emergentes (FET). El proyecto «*Graphene Science and technology for ICT and beyond*» ha sido una de las propuestas seleccionadas por la CE y obtendrá una financiación de 1.000 millones de euros en diez años para la investigación y desarrollo del grafeno y de sus aplicaciones. El plan de acción de GRAPHENE dará comienzo en 2013.

El proyecto está liderado por el profesor Jari Kinaret, de la Universidad de Chalmers, en Suecia, y participa un amplio colectivo de científicos europeos interdisciplinarios formado por más de 130 grupos de investigación. Este proyecto ejercerá como una incubadora sostenible de nuevas ramas de aplicaciones basadas en el grafeno. También se asegurará de que empresas europeas desempeñen una función primordial en el gran cambio tecnológico que se producirá durante los próximos diez años. Se puede encontrar información más detallada en la página web:

<http://www.graphene-flagship.eu/GF/index.php>

- *EuroGRAPHENE*

EuroGRAPHENE es un programa de cuatro años de duración, que apoya la cooperación a escala europea para profundizar en la comprensión de las propiedades físicas del grafeno, ampliar la investigación en nuevas áreas de modificación química del material, la búsqueda de nuevos métodos de obtención, el estudio de sus propiedades electrónicas, mecánicas y electromecánicas, efectos optoelectrónicos y modelar dispositivos basados en el grafeno para las aplicaciones funcionales.

La iniciativa EuroGRAPHENE supone un marco colaborativo que reunirá a técnicos, teóricos y experimentalistas en consorcios formados por grandes, pequeñas y medianas empresas y grupos de investigación europeos que son líderes a nivel global, con el objetivo de acelerar el ritmo de la investigación europea en el grafeno y sus aplicaciones.

Se puede encontrar más información sobre el Programa EuroGRAPHENE en la página web:

<http://www.esf.org/activities/eurocores/running-programmes/eurographene.html>



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha definido al grafeno por parte de la comunidad científica como el material que revolucionará el futuro, provocando desde importantes cambios en la industria de la telefonía móvil, las telecomunicaciones o la fabricación de chips, hasta la forma de elaborar fármacos contra el cáncer. Sus magníficas propiedades han movilizado a industria e investigadores para obtener aplicaciones y nuevos productos basados en este material.

El interés para los sectores de la Defensa y la Seguridad en el grafeno también es alto, por todas sus posibles aplicaciones y potencial mejora de capacidades del combatiente, plataformas, sistemas de comunicación, etc.

Según diversos analistas, el mercado del grafeno crecerá mucho durante los próximos 10 años en diversos sectores como el de la electrónica, el energético, el transporte, etc. Europa ha apostado fuertemente en el desarrollo de esta tecnología y por ello invertirá más de 1.000 M€ en su estudio y desarrollo de aplicaciones en los próximos 10 años (Programa Graphene Flagship). Por lo tanto, se puede afirmar que habrá continuidad en los trabajos para el desarrollo del grafeno durante, al menos, los próximos 10 años.

El grafeno es un material muy joven, y muchos expertos opinan que no habrá productos comerciales basados en grafeno (siendo optimistas) hasta 2020. Son muchos los campos de aplicación de este material y, por lo tanto, son muchos los temas que hay que estudiar y retos que superar. Por ello, aún se está a tiempo de iniciar proyectos en este campo, eso sí, teniendo clara y definida el área de aplicación en el que se quiere participar. Está claro que la anticipación es clave para posicionarse bien en un mercado tan novedoso, pero siempre hay que ir mejorando los productos y creando otros nuevos para nuevos clientes.

Crear una empresa o grupo de investigación que gire en torno al grafeno conlleva una serie de puntos clave y de riesgos, aunque las posibilidades de este material a medio y largo plazo parecen claras:

- Financiación: antes de aventurarse a trabajar con el grafeno, es necesario contar con una financiación que permita trabajar sin la presión de tener que generar un producto a corto plazo. Una financiación adecuada permite además patentar los desarrollos que se produzcan.
- Personal: contar con el personal científico adecuado y con talento es fundamental para el desarrollo tecnológico. Todos los planes de formación relacionados con el área de los materiales podrían incluir un apartado para tratar materiales novedosos como el grafeno.
- Definición de una estrategia a corto, medio y largo plazo: es decir, tener claro qué se quiere hacer, para qué se quiere hacer, quién será el o los clientes a los que irá destinada la tecnología, conocer si lo que se pretende hacer ya se hace (competencia), posibles colaboradores, etc.

En cuanto a la producción del material, actualmente el volumen de oferta es mayor que el que demanda el mercado porque éste es muy pequeño y está fundamentalmente destinado a investigación, siendo los usuarios laboratorios que utilizan cantidades mínimas para caracterizar el material o para desarrollar aplicaciones. En el momento en el que se empezaran a fabricar productos que incluyeran grafeno, la demanda y, por tanto el volumen de fabricación se multiplicaría, lo cual tendría una repercusión directa en el precio del material.

El precio del grafeno es a día de hoy bastante elevado. Se pueden adquirir láminas a un coste que va desde los 300 € a los 1.000 €, dependiendo de la calidad y tamaño de la misma. Para los laboratorios estas cifras son asequibles, pero para la fabricación a escala industrial de dispositivos resultaría costoso. Por otro lado, es necesario recordar que el grafeno en sí mismo no debería ser caro ya que el carbono es un elemento muy abundante. Los costes elevados actuales se deben en gran medida a los costes indirectos que conlleva la producción del grafeno (cuesta prácticamente lo mismo fabricar 1 lámina que 10.000) Por lo tanto, conforme aumente la demanda, el precio del grafeno será mucho menor (actualmente ya se puede adquirir polvo de grafeno a 200€/Kg), hasta el punto

de que podría situarse incluso por debajo del coste del silicio (que cuesta alrededor de 50€).

La inversión directa del propio Ministerio de Defensa en el desarrollo de aplicaciones con grafeno se considera que tendría un beneficio limitado, dado el limitado número de dispositivos que el Ministerio de Defensa emplearía para uso propio.

Sería de mayor interés mantener un alto nivel de compromiso con las iniciativas nacionales y europeas que han surgido o que pudieran surgir y con el tejido industrial y de I+D nacional que existe actualmente y que trabajan en el desarrollo de aplicaciones basadas en grafeno. La participación de los centros de I+D de Defensa en este tipo de iniciativas junto con el tejido industrial y de I+D nacional tendría implicaciones muy positivas para el propio ministerio, como son la capacidad de adquirir un criterio tecnológico propio, de vigilancia tecnológica y en cierta medida podría la de promover iniciativas dirigidas al desarrollo de aplicaciones para integrar en los futuros sistemas de defensa.

Por lo tanto, para los organismos de Defensa con interés en el desarrollo de las aplicaciones con grafeno:

- Se considera que la opción de invertir en el desarrollo de nuevos procesos de fabricación de grafeno no sería lo adecuado (el rol de Defensa en este caso no es el de productor de material). Ya existen bastantes productores nacionales a los que se les podría comprar directamente el material.
- Se considera conveniente crear convenios o consorcios con los grupos de investigación nacionales, para colaborar con éstos en proyectos sobre el desarrollo de tecnologías de interés para defensa, tal y como se ha mencionado anteriormente.
- Se considera de interés mantener una línea de simulación / diseño, ya que no supone una gran inversión en equipamiento, con el fin de adquirir una base de conocimiento mínima, que permita sentar unas bases para conseguir los objetivos planteados anteriormente: criterio tecnológico, conocer el estado del arte y nuevos desarrollos, participar y promover propuestas de interés para defensa, etc.



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

**8 ANEXOS**



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## A. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE GRAFENO

## A. Métodos de obtención de grafeno

De la misma manera que ha ocurrido anteriormente con fulerenos y nanotubos de carbono, la transferencia de las excelentes propiedades del grafeno mostradas en el laboratorio a aplicaciones de la vida cotidiana presenta una gran barrera, que es la dificultad en su obtención y procesamiento a gran escala de un modo económico viable.

### A-1 *Exfoliación micromecánica*

El primer método con el que se obtuvo grafeno (2004) se basaba en la exfoliación micromecánica de piezas macroscópicas de grafito. Este método se ha ido perfeccionando y en la actualidad se produce la exfoliación frotando directamente grafito pirolítico altamente orientado contra una superficie (generalmente de Si/SiO<sub>2</sub>) como si se escribiera sobre la misma. Así, se consigue la obtención de láminas de grafeno monocapa o bicapa (espesores no mayores de 3 nm) de gran tamaño (hasta 0,2 mm) y de una calidad tanto estructural como electrónica muy alta (en este sentido, es el método más efectivo). El problema radica en que no es un método escalable. Al ser un proceso manual, la obtención del material es bastante laboriosa y el rendimiento que se obtiene es muy bajo, ya que se precisa localizar las láminas de grafeno entre una gran cantidad de pequeños copos de grafito que las enmascaran (para esto se emplea un microscopio óptico). Este proceso que puede llevar varias horas da como resultado la identificación de sólo unas pocas láminas de grafeno por área de substrato. Esto, combinado con la falta de precisión a la hora de posicionar de manera controlada estas láminas, limita la implantación del grafeno en los dispositivos actuales.

Estos desarrollos son muy recientes, y solo el tiempo dirá si se ha conseguido de verdad aumentar el rendimiento de manera significativa respecto a la exfoliación estándar.

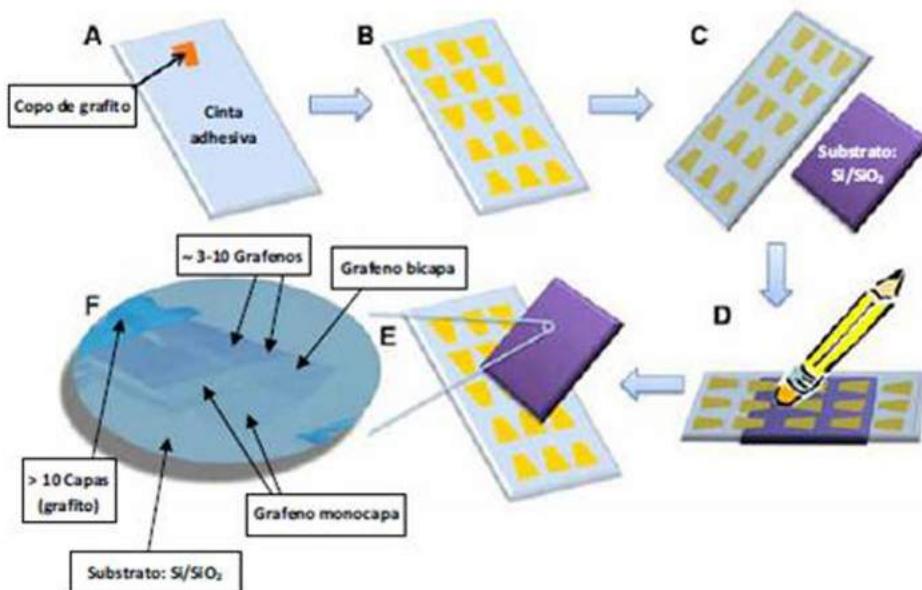


Figura A 1 Proceso de exfoliación micromecánica de grafito. (A) Un copo de grafito es adherido a cinta adhesiva. (B) Se exfolia el copo en repetidas ocasiones, obteniéndose varios copos más finos. (C) Se presionan los copos contra una superficie limpia de Si/SiO<sub>2</sub> que actuará como substrato. (D) Se frota con suavidad la parte trasera de la cinta adhesiva, asegurándose así un contacto entre los copos y el substrato. (E) Se retira con cuidado la cinta, dejando láminas de grafito sobre el substrato junto con una gran cantidad de material grafítico. (F) Cuando se encuentran sobre un substrato de Si/SiO<sub>2</sub>, las láminas de grafito se pueden identificar con la ayuda de un microscopio óptico gracias a un fenómeno de interferencia provocado por la diferencia de recorridos ópticos, permitiendo discriminar entre grafenos de diferentes capas. (Fuente: Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafito – Univ. de Oviedo).

Actualmente se están desarrollando y refinando métodos alternativos para la preparación de grafeno con el objetivo de abaratar los costes de producción a la vez que se aumenta la cantidad de material obtenido. Los métodos que parecen más prometedores se describen en los siguientes apartados.

#### A-2 Depósito químico en fase vapor (CVD)

Depósito químico en fase vapor (CVD) de hidrocarburos (generalmente metano) sobre metales de transición, como el níquel o el rutenio, que actúan de primer soporte y catalizador.

En el interior de una cámara, encontramos el substrato metálico y el metano, que se calienta a unos 1.000°C, rompiéndose sus enlaces y produciéndose seguidamente el depósito de los átomos de carbono (nucleación) en la superficie metálica y posterior crecimiento de la lámina de grafeno. Mediante este método se sintetizan láminas monocapa de grafeno de una gran calidad estructural y que pueden ser de gran tamaño. También permite la posibilidad de dopar las láminas mediante la sustitución de átomos introduciendo diferentes gases durante el crecimiento.

Uno de los mayores inconvenientes de este proceso es que la presencia del substrato metálico imposibilita el empleo del grafeno como componente electrónico, por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de transferencia de la lámina a un soporte adecuado (un nuevo substrato aislante o semiconductor). Además, el hecho de involucrar altas temperaturas y bajas presiones lo convierte en un método costoso e instrumentalmente complejo.

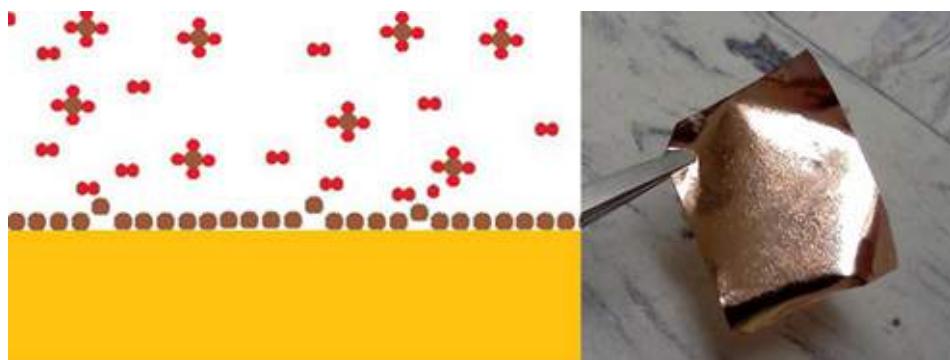


Figura A 2 Diagrama del Depósito Químico en fase vapor (CVD) de hidrocarburos sobre una superficie metálica y resultado de una lámina de cobre tras la deposición de grafeno (Fuente: <http://www.graphenelabs.com/>).

### A-3 Crecimiento epitaxial

Crecimiento epitaxial de grafeno en superficies eléctricamente aislantes, principalmente el carburo de silicio, SiC.

Este método parece tener gran potencial con vistas a una producción masiva de grafeno. Se basa en la sublimación térmica del silicio a temperaturas que pueden superar los 1.300°C, al mismo tiempo que los átomos de carbono se reordenan para formar una capa de grafeno. Se producen láminas de gran calidad estructural, aunque el control sobre el número de láminas, dificulta esta técnica. La necesidad de trabajar en ultra alto vacío y la gran temperatura necesaria para producir la sublimación del silicio también limitan enormemente su aplicación a gran escala. Sin embargo, recientes estudios realizados a presión atmosférica en argón parecen indicar que es posible obtener láminas de una calidad estructural mejor incluso que la de las láminas obtenidas en vacío.

#### *A-4 Exfoliación química*

Exfoliación química, mediante procesado químico de óxido de grafito o mediante el empleo de disolventes, basada en la intercalación de moléculas entre las láminas del grafito.

Exfoliación de grafito en determinados disolventes orgánicos o surfactantes. Se obtienen láminas de grafeno de gran calidad, aunque sus tamaños laterales se restringen a unos pocos cientos de nanómetros (áreas

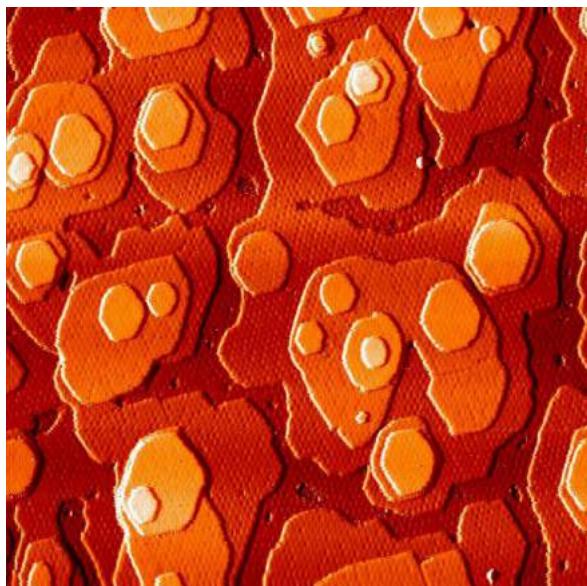


Figura A 3 Representación de crecimiento epitaxial de grafeno. (Fuente: <http://www.uam.es>).

superficiales demasiado pequeñas). La ventaja de este método radica en que se evitan los procesos previos de oxidación y reducción (como ocurre en el proceso que se describe a continuación), lo que implica un aumento en la calidad estructural de los grafenos obtenidos. Por otro lado, la concentración de grafeno que se consigue es más pequeña y las láminas obtenidas están sólo minoritariamente formadas por una monocapa, siendo el resto láminas de unas pocas capas.

### A-5 Grafeno obtenido a partir de óxido de grafito

Implica la oxidación y posterior exfoliación de grafito en fase líquida, obteniéndose láminas de óxido de grafeno que pueden ser reducidas para obtener dispersiones de grafeno.

Este método quizá sea a día de hoy resulta prometedor con vistas a su producción y procesado a gran escala. Esto es debido a que se obtiene una gran cantidad de material estable en forma de dispersión acuosa u orgánica sin la necesidad de emplear surfactantes o estabilizadores, y con un bajo coste económico.

Este método se inicia con la oxidación de las láminas de grafito mediante el uso de sustancias muy oxidantes en medio ácido ( $H_2SO_4$ ) y la obtención así de un material que posee una estructura laminar constituida por capas apiladas de óxido de grafeno (conocido como método Hummers). Estas capas presentan grupos oxigenados (grupos hidroxilo, epoxi, y carboxílicos) y las moléculas de agua adsorbidas hacen aumentar considerablemente la distancia entre láminas, con lo que la energía de interacción entre capas disminuye y el óxido de grafito resulta fácilmente exfoliable en medio por aplicación suave de ultrasonidos. Se obtienen por lo tanto suspensiones coloidales de láminas de una monocapa de óxido de grafeno (GO, del inglés *grapheneoxide*).

Debido a la presencia de todos estos grupos oxigenados, tanto el GO como el óxido de grafito son eléctricamente poco conductores, lo que limita su aplicabilidad. Por este motivo, se llevan a cabo tratamientos de reducción para poder obtener láminas conductoras (el más extendido es el empleo de hidracina  $-H_2N-NH_2-$  como agente reductor, efectuando un tratamiento térmico adicional para incrementar la eficiencia de la reducción y mejorar la calidad estructural de las láminas). Estas láminas individuales de GO reducido, tienen la ventaja de que pueden ser depositadas en específicas áreas superficiales y en un rango amplio de substratos.

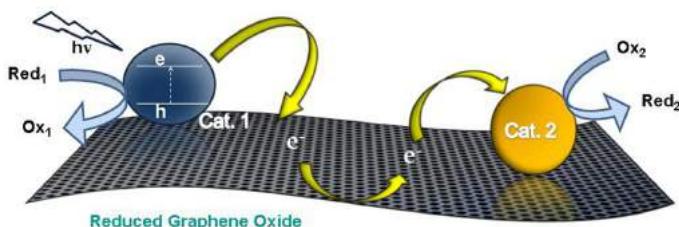


Figura A 4 Esquema de la obtención de GO reducido (Fuente: <http://phys.org>).

Tras la reducción, la conductividad de las láminas se incrementa enormemente (en tres órdenes de magnitud mayor que el GO), aunque las funcionalidades oxigenadas introducidas en la fase de oxidación no son totalmente eliminadas de las láminas, lo cual repercute en una disminución de la calidad estructural de las láminas. Los grafenos que se obtienen mediante este método (denominado CMG - grafeno químicamente modificado) distan mucho de ser las láminas perfectas que se obtienen por exfoliación mecánica, lo que involucra una degradación en las propiedades del material en comparación con el grafeno originario (como por ejemplo una movilidad de los portadores de carga entre 2-3 órdenes de magnitud menor, un módulo elástico menor - 0,25TPa frente a 1TPa para grafeno original - aunque se mantiene en un valor relativamente alto). Por ello, el CMG no resulta apto para cierto tipo de aplicaciones que requieren una gran pureza de los grafenos (generalmente la elaboración de dispositivos electrónicos) pero sí resulta muy útil para preparar materiales compuestos conductores y de una gran resistencia mecánica, recubrimientos flexibles y conductores en pantallas táctiles, sensores moleculares de gases, soportes transparentes para TEM, etc. en donde esta pureza no constituye un factor tan decisivo.

#### *A-6 Desarrollo de los métodos de obtención de grafeno*

Vistos los métodos de obtención de grafeno descritos anteriormente, se puede decir que existen varias técnicas para aproximarse a la obtención de láminas individuales de grafeno, aunque los métodos que proporcionan una alta calidad de estas láminas, no permiten una producción elevada, ni la posibilidad de controlar el depósito sobre cualquier substrato. Por otro lado, se han desarrollado procesos de oxidación-reducción que sí permiten una elevada producción de láminas individuales y un depósito controlado, pero con unos valores en conducción eléctrica cuatro órdenes de magnitud menores que el grafeno libre de defectos.

Por ello, se deduce que la implantación del grafeno en la industria de los semiconductores es a día de hoy complicada, siendo necesario desarrollar métodos alternativos que aglutinen varios aspectos: alta calidad, producción masiva, y posibilidad de ordenar estas láminas individuales a nuestro antojo. Industria y grupos de investigación colaboran para lograrlo. Como ejemplos, se describen los siguientes hallazgos recientes:

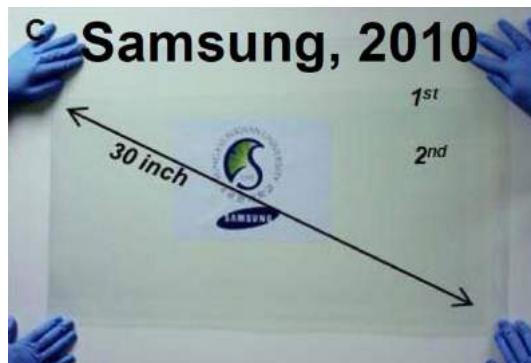


Figura A 5 Láminas flexibles de grafeno de 30 pulgadas (Fuente: <http://grafeno.com/>)

- Un grupo de investigadores de Samsung y de la Universidad Sun-gkyunkwan, en Corea del Sur, han conseguido fabricar láminas flexibles de grafeno de 30 pulgadas (unos 76 centímetros de diagonal).
- Un equipo de investigación de la Universidad de Pensilvania, (Charlie Johnson, profesor de física) ha sido capaz de crear grafeno de alta calidad (por encima del 95% de su superficie) con materiales fácilmente disponibles y procesos de fabricación que se pueden escalar a niveles industriales.
- Texas Instruments está perfeccionando un nuevo método de crear hojas de grafeno que eventualmente le permitirá producir más rápido productos electrónicos más pequeños y de menor potencia, basados en el carbono en lugar de silicio.
- Investigadores de la universidad de Illinois (Narayan Hosmane) han encontrado una forma sencilla y barata de producir grafeno a gran escala. La nueva técnica consistiría en quemar magnesio metálico puro en hielo seco. El nuevo método convierte el dióxido de carbono directamente en capas de grafeno (de menos de 10 átomos de espesor).



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## B. PRODUCTORES/ DESARROLLADORES DE GRAFENO

## B. Productores/desarrolladores de grafeno

A continuación se destacan algunas de las principales empresas, centros de I+D y grupos de investigación en Universidades más conocidos en el campo de la fabricación y desarrollo de aplicaciones basadas en grafeno en España.

### Empresas

NOMBRE	Avanzare	PAIS	ESPAÑA
ACTIVIDAD	Proveedor de nanomateriales con altas prestaciones, que aportan soluciones basadas en la nanotecnología para aplicarlas en un amplio rango de productos para empresas de la industria de la automoción, aeronáutica, textil, madera, papel, plástico, goma, pintura, construcción, cable, electrodomésticos y embalaje principalmente.		
PAG. WEB	<a href="http://www.avanzare.es/index.php">http://www.avanzare.es/index.php</a>		
NOMBRE	Graphenea Nanomaterials.	PAIS	ESPAÑA
ACTIVIDAD	Fabrica láminas de grafeno de alta pureza, principalmente para aplicar en dispositivos electrónicos.		
PAG. WEB	<a href="http://www.graphenea.com/">http://www.graphenea.com/</a>		
NOMBRE	Granph Nanotech (Grupo Antolín)	PAIS	ESPAÑA
ACTIVIDAD	Fabricación de grafeno de alta calidad a partir de las nanofibras de carbono. Comercializa grafeno envasado en frascos a centros de investigación, laboratorios de universidades y compañías especializadas de todo el mundo.		
PAG. WEB	<a href="http://www.granphnanotech.com/">http://www.granphnanotech.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphenano	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabrica y suministra grafeno en distintas presentaciones (láminas, polvo, etc.) y/o nanofibras de carbono a empresas para sus investigaciones o para implantar directamente en sus productos.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.graphenano.com/">http://www.graphenano.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Nanoinnova	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabricación y distribución de grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nanoinnova.com/Home/RD">http://www.nanoinnova.com/Home/RD</a>		

*Universidades y centros de investigación.*

<b>NOMBRE</b>	IMDEA Materiales	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de materiales basados en grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.materiales.imdea.org/">http://www.materiales.imdea.org/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Instituto Catalán de la nanotecnología (ICN)	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de propiedades físicas y químicas de los nanomateriales.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.icn.cat/">http://www.icn.cat/</a>		

<b>NOMBRE</b>	ICMM-CSIC	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de materiales basados en grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.icmm.csic.es/graphene/">http://www.icmm.csic.es/graphene/</a>		

<b>NOMBRE</b>	CIC-NANOGLUNE	<b>PAÍS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las propiedades ópticas del grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nanogune.eu/en/">http://www.nanogune.eu/en/</a>		

<b>NOMBRE</b>	DIPC	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de la estructura y de las propiedades electrónicas de materiales nanoestructurados.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://dipc.ehu.es/">http://dipc.ehu.es/</a>		

<b>NOMBRE</b>	ICFO	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de dispositivos optoelectrónicos (fotodetectores basados en grafeno)		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.icfo.es/">http://www.icfo.es/</a>		

<b>NOMBRE</b>	UNIV POLIT DE BARCELONA	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Crecimiento de capas de grafeno sobre substratos metálicos para aplicaciones biomédicas.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ub.edu">http://www.ub.edu</a>		

<b>NOMBRE</b>	UNIZAR	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Preparación y caracterización de grafeno para la fabricación de dispositivos.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.unizar.es/">www.unizar.es/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Departamento. de Física de la Materia Condensada de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM)	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de métodos de crecimiento de láminas de grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.uam.es/">www.uam.es/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Univ Alicante (Laboratorio Mixto de Investigación GRAAnPH-LAB)	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Investigación sobre la obtención de nanoplaquetas de óxido de grafeno a partir de nanofibras de carbono y la purificación, reducción y deposición controlada de las mismas		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.uacit.ua.es">http://www.uacit.ua.es</a>		

<b>NOMBRE</b>	Universidad de Granada	<b>PAIS</b>	ESPAÑA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las Propiedades magneto-electrónicas y aplicaciones nanotecnológicas del grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ugr.es/">www.ugr.es/</a>		

Algunas de las principales empresas, centros de I+D y grupos de investigación en universidades más conocidos en el campo de la fabricación y desarrollo de aplicaciones basadas en grafeno en Europa y resto del mundo son:

*Empresas*

<b>NOMBRE</b>	Amo GmbH	<b>PAIS</b>	ALEMANIA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de nano-dispositivos electrónicos basados en el grafeno. Están especializados en el campo de la nano-fabricación y la nano-electrónica.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.amo.de">http://www.amo.de</a>		

<b>NOMBRE</b>	Durham Graphene Science	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Empresa de I+D especializada en la producción de grafeno y en el desarrollo de productos para diversas aplicaciones.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.durhamgraphene.com">http://www.durhamgraphene.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphene Industries Ltd.	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Es suministrador de láminas de grafeno de alta calidad.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://grapheneindustries.com/">http://grapheneindustries.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Angstrom Materials Inc.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Uno de los mayores productores mundiales de láminas grafeno. Colabora con empresas para el desarrollo de productos basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://angstrommaterials.com">http://angstrommaterials.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	Carben Semicon Ltd.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo nuevos materiales para la electrónica basados en el grafeno. Producen a nivel comercial películas funcionalizadas basadas en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.carbensemicon.com">www.carbensemicon.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	CVD Equipment Corp.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de productos de grafeno obtenidos por CVD (CVD3DGraphene™).		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.cvdequipment.com">http://www.cvdequipment.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphene Devices Ltd (GDL)	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Especializada en la optimización de propiedades de materiales compuestos, plásticos, tintas y recubrimientos basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.graphenedev.com">http://www.graphenedev.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphene Energy, Inc.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de condensadores para almacenamiento de energía basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.grapheneenergy.net/">http://www.grapheneenergy.net/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphene Frontiers	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Producen películas de una sola capa de grafeno utilizando un método desarrollado en la Universidad de Pennsylvania.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://graphenefrontiers.com/">http://graphenefrontiers.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphenelab	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de materiales y dispositivos comercializables basados en grafeno, principalmente para el sector de la electrónica.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.graphenelab.com">http://www.graphenelab.com</a>		

<b>NOMBRE</b>	Graphene Works, Inc.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Produce grafeno epitaxial. Comercializa grafeno para la investigación de nuevos materiales y aplicaciones en electrónica.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.grapheneworks.com/">http://www.grapheneworks.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	HRL Laboratories, LLC	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabrica componentes basados en grafeno para aplicar en el sector de las comunicaciones de banda ancha, imágenes y los sistemas radar.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.hrl.com/">http://www.hrl.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Intel	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de circuitos integrados basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.intel.es/">http://www.intel.es/</a>		

<b>NOMBRE</b>	IBM	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de circuitos integrados basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ibm.com/">http://www.ibm.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Nanotek Instruments, Inc.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Investigación, desarrollo, fabricación y comercialización de nano-materiales para el almacenamiento y la conversión de energía (las pilas de combustible, baterías y supercondensadores).		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nanotekinstruments.com/">http://www.nanotekinstruments.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Nanosperse LLC	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Diseña y fabrica nuevos materiales compuestos de durabilidad, fiabilidad mejorada y con nuevas funcionalidades.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://nanosperse.com/">http://nanosperse.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Texas Instruments, Inc.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabricación de semiconductores basados en grafeno. Mejora de los procesos de fabricación de láminas de grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ti.com/">www.ti.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Vorbeck Materials Corporation	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrolla formulaciones de grafeno y materiales compuestos. Fabrica tintas conductoras basadas en grafeno para imprimir antenas RFID y contactos eléctricos para pantallas flexibles. Fabrica grafeno para la producción de baterías de ion litio.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.vorbeck.com/">http://www.vorbeck.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	XG Sciences	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabricación de láminas de grafeno y de nuevos materiales multifuncionales basados en dichas láminas.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.xgsciences.com/">http://www.xgsciences.com/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Xolve	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de nanomateriales compuestos, almacenamiento de energía y revestimientos basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.xolve.com/about/">http://www.xolve.com/about/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Hanwha Nanotech	<b>PAIS</b>	COREA DEL SUR
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabricación de láminas de grafeno para el sector de la electrónica.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.hanwhananotech.com/">http://www.hanwhananotech.com/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Samsung Electronics Co. Ltd.,	<b>PAIS</b>	COREA DEL SUR
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrolla pantallas flexibles basadas en la tecnología del grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.samsung.com/">http://www.samsung.com/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Harbin Mulan Foreign Economic Trade Co.	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Especializada en el desarrollo y comercialización de nanopartículas y materiales avanzados.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.sino-graphite.com/">http://www.sino-graphite.com/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Xiamen knano graphene Technology Co.,Ltd.	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabricación de grafeno en masa y desarrollo de nuevas aplicaciones.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.knano.com.cn">http://www.knano.com.cn</a>		
<b>NOMBRE</b>	XP Nano Material Co. Ltd	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo y producción de nanomateriales (nanotubos de carbono, grafeno y nano-polvos).		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nanocnts.com/">www.nanocnts.com/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Quantum Materials Corporation.	<b>PAIS</b>	INDIA
<b>ACTIVIDAD</b>	Fabrica nanomateriales de alta calidad para sectores como el de la automoción, aeronáutico, Defensa, etc.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.quantum-materials.in/about-us.php">http://www.quantum-materials.in/about-us.php</a>		

*Universidades y centros de investigación.*

<b>NOMBRE</b>	University of Manchester	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las propiedades electrónicas, mecánicas, químicas, ópticas y biológicas del grafeno. En este centro, se identificaron por vez primera láminas individuales de grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.graphene.manchester.ac.uk/">http://www.graphene.manchester.ac.uk/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Institute of Electronic Materials Technology (ITME)	<b>PAIS</b>	POLONIA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de materiales, dispositivos y componentes basados en grafeno para uso en electrónica, micromecánica, etc.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.itme.edu.pl">www.itme.edu.pl</a>		

<b>NOMBRE</b>	Institute for Microelectronics Technology, Chernogolovka	<b>PAIS</b>	RUSIA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de dispositivos electrónicos basados en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ipmt-hpm.ac.ru/index.en.html">http://www.ipmt-hpm.ac.ru/index.en.html</a>		

<b>NOMBRE</b>	Radboud University Nijmegen	<b>PAIS</b>	HOLANDA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio del comportamiento electrónico del grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ru.nl">http://www.ru.nl</a>		

<b>NOMBRE</b>	Universidad Tecnológica de Chalmers.	<b>PAIS</b>	SUECIA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de aplicaciones TIC basadas en el grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.chalmers.se">http://www.chalmers.se</a>		

<b>NOMBRE</b>	Universidad de Lancaster	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de aplicaciones TIC basadas en el grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.lancs.ac.uk/">http://www.lancs.ac.uk/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Universidad de Cambridge	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de aplicaciones TIC basadas en el grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.cam.ac.uk/">http://www.cam.ac.uk/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Universidad de Durham	<b>PAIS</b>	REINO UNIDO
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de propiedades físicas y químicas de nanoestructuras		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.dur.ac.uk/">http://www.dur.ac.uk/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Brookhaven National Laboratory (Dpto. de energía)	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Trabajos con grafeno para el desarrollo de supercondensadores para el almacenamiento de energía.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.bnl.gov">http://www.bnl.gov</a>		
<b>NOMBRE</b>	Cornell Center for Materials Research (CCMR)	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Crecimiento de membranas basadas en grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.ccmr.cornell.edu/">http://www.ccmr.cornell.edu/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Georgia Tech - MRSEC	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Crecimiento epitaxial de grafeno para aplicaciones electrónicas.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.graphene.gatech.edu/">http://www.graphene.gatech.edu/</a>		
<b>NOMBRE</b>	Massachusetts Institute of Technology (MIT-CG)	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de dispositivos y sistemas basados en Grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www-mtl.mit.edu/wpmu/graphene/">http://www-mtl.mit.edu/wpmu/graphene/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Princeton University- Laboratorio de materiales cerámicos.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de materiales para la generación/conver- sión de energía.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.princeton.edu/~cml">http://www.princeton.edu/~cml</a>		

<b>NOMBRE</b>	Rensselaer Polytechnic Institute	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Aplicaciones del grafeno en detección de gases y explosivos.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.rpi.edu">http://www.rpi.edu</a>		

<b>NOMBRE</b>	Stanford University	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudios sobre la conductividad eléctrica del grafeno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.stanford.edu/group/GGG/graphene.html">http://www.stanford.edu/group/GGG/graphene.html</a>		

<b>NOMBRE</b>	University of Texas	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudios de la síntesis, caracterización y aplicación de grafeno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://bucky-central.me.utexas.edu/">http://bucky-central.me.utexas.edu/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Department of Physics University of California.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las propiedades electrónicas, magnéti- cas, mecánicas de nanomateriales		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.physics.berkeley.edu">http://www.physics.berkeley.edu</a>		

<b>NOMBRE</b>	Maryland NanoCenter.	<b>PAIS</b>	EEUU
<b>ACTIVIDAD</b>	Investigación de nanomateriales dirigida al desarro- llo de nuevos productos para la industria		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nanocenter.umd.edu">http://www.nanocenter.umd.edu</a>		

<b>NOMBRE</b>	Sungkyunkwan University	<b>PAIS</b>	COREA DEL SUR
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de dispositivos electrónicos. Tecnología de semiconductores.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://chem.skku.edu/graphene/">http://chem.skku.edu/graphene/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Harbin Institute of Technology	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las propiedades electrónicas del grafe-no.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://en.hit.edu.cn/">en.hit.edu.cn/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Chinese Academy of Sciences	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio del procesado de laminas de grafeno para su aplicación en dispositivos electrónicos		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://english.cas.cn/">http://english.cas.cn/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Nanjing University	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Estudio de las propiedades magnéticas en el gra-feno		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.nju.edu.cn/cps/site/njueweb/">www.nju.edu.cn/cps/site/njueweb/</a>		

<b>NOMBRE</b>	Huaqiao University	<b>PAIS</b>	CHINA
<b>ACTIVIDAD</b>	Desarrollo de procesos para el procesado de gra-feno.		
<b>PAG. WEB</b>	<a href="http://www.hqu.edu.cn/en/">www.hqu.edu.cn/en/</a>		



SISTEMA DE OBSERVACIÓN Y  
PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

## 9 BIBLIOGRAFIA

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. Jari Kinaret, Vladimir Falko, Andrea Ferrari, Ana Helman, Jani Kivioja, Daniel Neumaier, Konstantin Novoselov, Vincenzo Palermo, Stephan Roche «Publishable flagship proposal report Deliverable 6.3 – Graphene flagship», 2012.
2. Intellectual Property Office (UK) «An Analysis of Worldwide Patent Filings Relating to Graphene», 2011.
3. Dr. Livio Baldi «Report on Graphene Workshop» Brussels, March 21-22, 2011.
4. Presentaciones «Industrial Day» sobre grafeno organizado por ICMM, 2011.
5. Presentación Rodney S. Ruoff (University of Texas) «Graphene Materials and Opportunities», 2011.
6. Pablo Solís Fernández «Tesis: Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno», Univ. Oviedo 2011.
7. Doug Speight (ORNL) «High Quality, Scalable Graphene Production», 2011.
8. Benjamin Pollard «Tesis: Growing Graphene via Chemical Vapor Deposition» Pomona College, 2011.
9. Jeong-Sun Moon (HRL Laboratories, LLC) «Carbon-based Electronics: Graphene» 1st NANO-TEC Workshop European Commission ICT Theme, 2010.
10. Philip Shapira «Graphene research profile: UK and US publications 2000-2010», 2010.
11. John Toon «Epitaxial Graphene Shows Promise for Replacing Silicon in High-Performance Electronics» Research Horizons, Volume 27, Number 3, 2010.

12. Frank Schwierz «Graphene transistors» *Nature Nanotechnologies*, 2010.
13. Yanwu Zhu , Shanthi Murali , Weiwei Cai , Xuesong Li , Ji Won Suk , Jeffrey R. Potts , and Rodney S. Ruoff «Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications» *Advanced Materials*, 2010.
14. Vicente López Fernández «Tesis: Nanomateriales basados en carbono», 2009.