El grafeno es una monocapa de átomos de carbono empaquetados en una compacta estructura hexagonal (panal de abeja, Figura 3A) y bidimensional ...

EL GRAFENO, Premio Nobel de Física 2010

El Premio Nobel de Física es un indicador indiscutible de que una teoría puramente matemática está cerca de influir directamente en nuestra vida cotidiana.

Esto ha ocurrido en numerosas ocasiones. Por ejemplo, 42 años después de que Philip Eduard Anton von Lenard consiguiera el Nobel por su investigación en rayos catódicos, comenzaron las emisiones regulares de televisión en nuestras casas. Otro ejemplo: pasaron también 42 años entre el reconocimiento a Curie -por sus descubrimientos en radiactividad- y las ruinas que la bomba atómica dejó en Hiroshima. Así, transcurrieron 28 años entre el premio a Bardeen, Brattain and Shockley por su investigación en semiconductores, y la salida al mercado del primer ordenador personal.

Este año 2010, Andre Geim and Konstantin Novoselov comparten el Nobel de Física por su trabajo en un compuesto de carbono conocido como *grafeno* [Ref. 1].





Figura 1. *Andre Geim (izquier*

Si se cumplen las predicciones de los Premios Nobel, pronto veremos cómo este material empieza a tener un impacto extraordinario
en nuestra vida cotidiana
.

Comencemos entendiendo qué es el grafeno, qué propiedades se han estudiado hasta el momento y en qué se está pensando para el que ya se ha llamado "**el material del futuro**". El siguiente video ofrece una visión general muy interesante de lo que se espera de este material (" *Gr*
afeno el material del futuro
"; duración: 5m 52s):

Parece, pues, justificado, dedicar unas líneas al material que parece que va a revolucionar de manera inminente nuestra vida cotidiana.

Comencemos por la composición. El grafeno está formado por átomos de carbono. Podría decirse que **el carbono es el elemento químico más fascinante de la tabla periódica**. Es la base del ADN y, por tanto, de toda forma de vida sobre la Tierra; e
s el material base de los diamantes y también de los lápices. Ante esta diversidad de aplicaciones, es muy probable que todavía queden por descubrir multitud de usos -por ello, la gente ha empezado a soñar-.

Se encuentra en los lápices que utilizamos para escribir a diario y también en los diamantes más costosos del mundo. Puede existir en diferentes formas, de las cuales la más común es el *grafito*
, el mismo que se utiliza para la fabricación de la mina de los lápices que utilizamos a diario. El grafito consiste en un apilamiento de láminas de carbono de un solo átomo de espesor, en las

que dichos átomos se encuentran dispuestos siguiendo una estructura hexagonal (Figura 2).





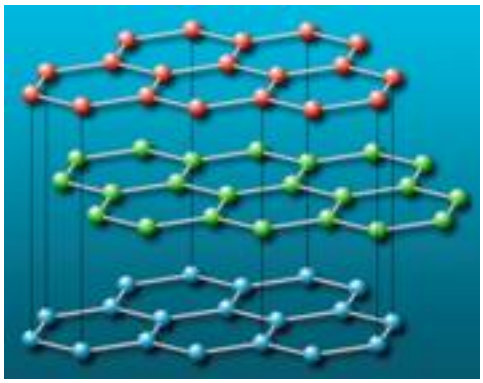


Figura 2. *El grafito es un mate*

Siempre se creyó que estas láminas de grafito no se podían producir de manera aislada. Este hecho, sin embargo, sorprendió cuando en 2004 Novoselov, Geim y sus colaboradores mostraron no sólo que era posible aislar una de dichas láminas de grafito, sino que, además, eran estables [2,3]. Cada una de estas láminas aisladas es lo que se conoce como *grafeno*.

El hecho es que la estructura es magnífica: el grafeno es **el primer material cristalino en dos dimensiones** y presenta propiedades únicas que lo hacen interesante tanto para la Ciencia básica como para multitud de aplicaciones. Así, entre otras propiedades fascinantes, es el material más resistente conocido, al mismo tiempo que es flexible como la goma, es transparente, conduce la electricidad mejor que el silicio, conduce el calor mejor que el cobre, resiste el calor mejor que el diamante, permite experimentos físicos que, de otro modo, precisarían de aceleradores de partículas de kilómetros de longitud.

Por otro lado, su **fabricación es extraordinariamente barata** y **cualquier laboratorio puede obtenerlo** , ya que el carbono es un material ampliamente conocido. En 2008, el grafeno producido por exfoliación era uno de los materiales más caros sobre la Tierra: una muestra de tamaño similar a la sección transversal de un cabello humano costaba más de 800€ (alrededor de 80 millones de € cada cm2) [4]. Desde entonces, los procedimientos de exfoliación se han ampliado a escalado industrial, y hoy día las compañías venden grafeno por toneladas [5]. Por otro lado, el precio del grafeno epitexial sobre sustrato de carburo de silicio (SiC) viene determinado por el precio del sustrato, que era de 80€/cm^2, aproximadamente, en 2009. Por tanto, en un período de tiempo de sólo un año el cm^2 ha pasado de 80M€ a 80€. Incluso se ha conseguido hoy día grafeno a más bajo coste a partir de níquel, tal y como describen recientemente científicos coreanos [6] a partir de obleas de hasta 80 cm [7].

Así, hoy en día, a pesar de que el término *grafeno* puede no significar demasiado para el ciudadano de a pie, los expertos creen firmemente que sus **extraordinarias propiedades mecánicas y eléctricas influirán en las generaciones venideras como lo hicieran la televisión, la bomba atómica y el chip de silicio décadas después de que los científicos que los estudiaron recibieran el Premio Nobel.**

UNA ESTRUCTURA MAGNÍFICA: LA FUENTE DE TODOS LOS MATERIALES DE GRAFITO

El *grafeno* es una monocapa de átomos de carbono empaquetados en una compacta estructura hexagonal (panal de abeja, Figura 3A) y bidimensional (2D), con una distancia carbono-carbono de 0.142 nanómetros (es decir, $0.142 \cdot 10^{-9}$ m). Dicha estructura se puede apreciar en la Figura 3B.

A.

B.





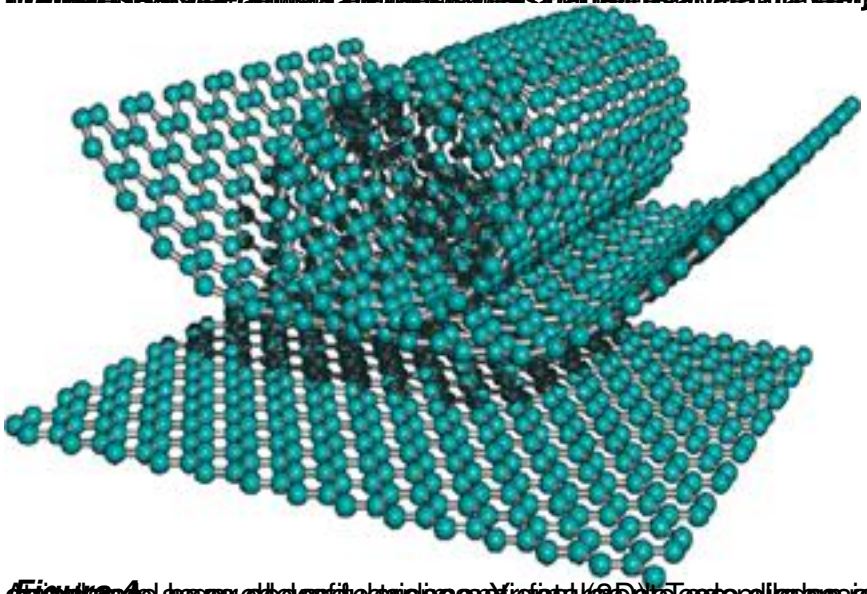


Figura 4. El grafeno se puede doblar en estructu

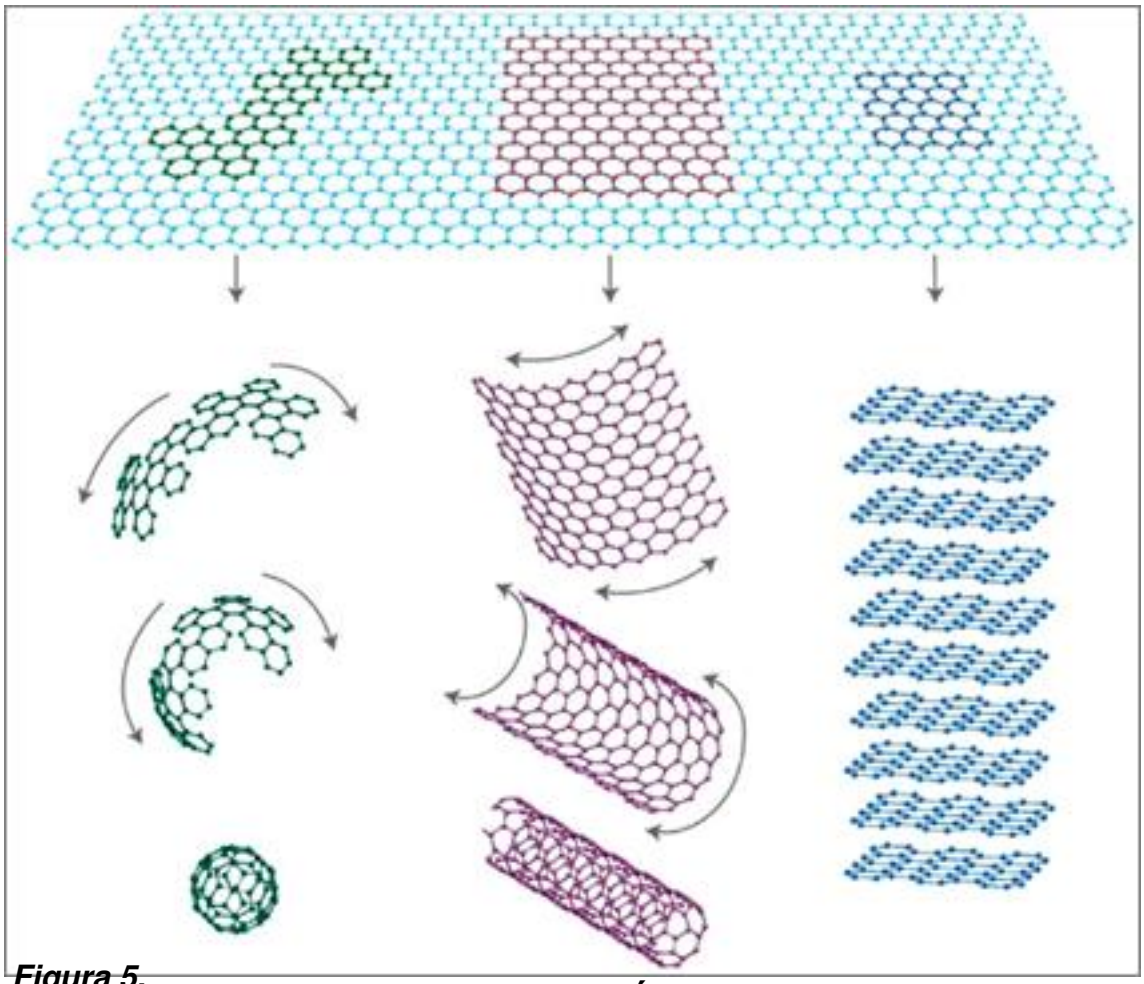


Figura 5. *El grafeno es la uni*

EL MATERIAL QUE NO PODÍA EXISTIR

El grafeno (o "grafito 2D") se viene estudiando desde un punto de vista teórico desde hace sesenta años [9-11] y ha sido ampliamente utilizado para describir propiedades interesantes de diversos materiales basados en carbono. Cuarenta años después, a mediados de la década de los ´80 del pasado siglo, se comprobó que el grafeno también constituía un excelente modelo de materia condensada, lo que lo lanzó como un juguete teórico para los expertos en Electrodinámica Cuántica [12-14].

Por otro lado, aunque se sabía que era una parte integral de materiales 3D, se presuponía que no existía en estado libre, se describía como un "material académico" y se creía que era inestable para crear estructuras curvadas reales tales como fulerenos o nanotubos. Sin embargo, de repente, el añejo modelo se volvió en 2004 una realidad cuando Novoselov, Geim y colaboradores consiguieron aislar el grafeno de manera estable [2,3]. La "fiebre del oro" del grafeno había comenzado.

EL GRAFENO EN LA LITERATURA CIENTÍFICA

A diferencia de lo que pueda parecer a primera vista, el impacto del descubrimiento de cada uno de los materiales grafíticos en la sociedad, en general, y en la comunidad científica, en particular, ha sido muy distinto. Así, hasta finales del siglo XX, sólo se conocían las tres formas básicas de carbono: diamante, grafito y carbono amorfo. Fue a mediados de la década de los ´80 cuando se descubrió el primer fulereno [15]; en los 25 años transcurridos desde entonces se han publicado alrededor de 12000 artículos sobre fulerenos.

A principios de la década de los ´90 se publicó el primer trabajo sobre nanotubos de carbono [16]; a día de hoy -20 años después- hay 35000 artículos sobre estos materiales, lo que hizo pensar a los investigadores que la revolución en la Nanotecnología ya se había producido. Sin embargo, en 2004, como se ha mencionado antes, Novoselov, Geim y colaboradores mostraron que era posible aislar una lámina de grafito y era estable [2,3];
a día de hoy -sólo 6 años después- ya se han publicado más de 9000 artículos científicos sobre grafeno, con un incremento espectacular a partir del año 2004.

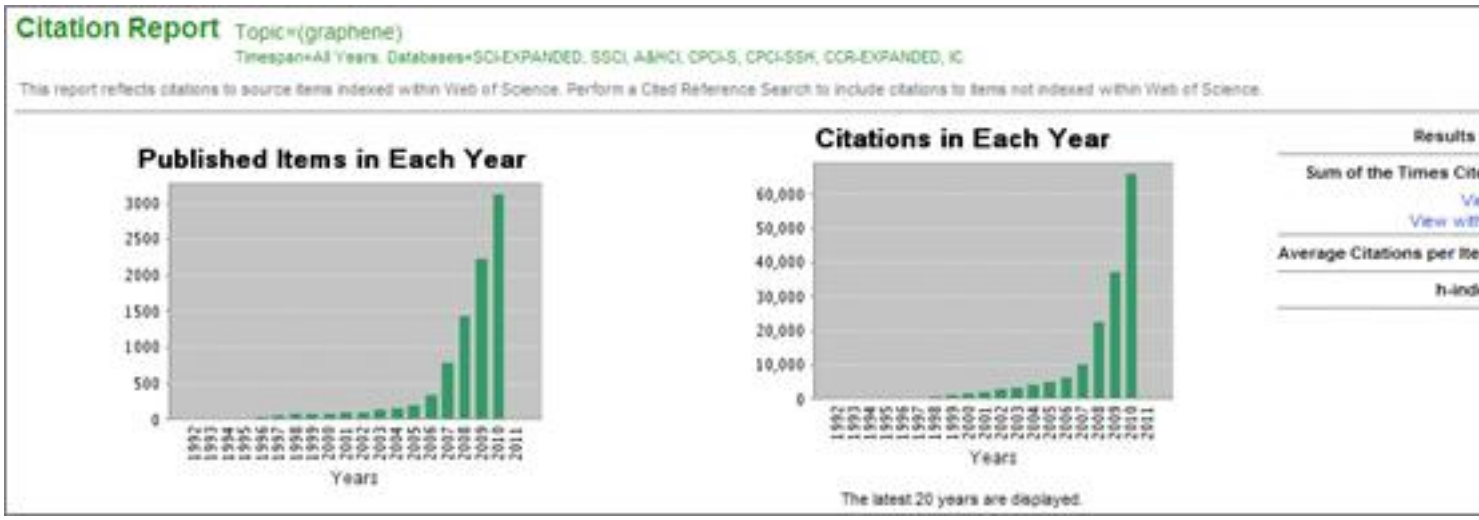


Figura 6. *Evolución del núme*

CÓMO CONSEGUIR GRAFENO: EL ARTE DEL "DIBUJO A LÁPIZ" O LA "TÉCNICA DE LA CINTA ADHESIVA"

A lo largo de su breve historia, ha habido algunos intentos de crecer grafeno continuo y de calidad por diferentes técnicas. Sin embargo, al estudiar sus propiedades por diversas técnicas de superficie, no se llegó a ninguna conclusión optimista acerca de su calidad y su continuidad. Así, ante la inexistencia de obleas de grafeno de calidad, la mayoría de los grupos experimentales han optado por utilizar muestras obtenidas por exfoliación o rotura micromecánica de grafito, es decir, la misma técnica que permitió al grupo de Manchester aislar grafeno por primera vez en 2004 [2,3].

Utilizaron cinta adhesiva para dividir repetidamente los cristales de grafito en láminas más finas. La cinta adhesiva se disolvió en acetona y, tras una serie de pasos, los fragmentos que incluían monocapas de grafito (grafeno) se depositaron sobre obleas de silicio y se observaron al microscopio óptico. Un año después, los investigadores simplificaron la técnica y comenzaron a utilizar deposición en seco, evitando el paso en el que el grafeno flota en un líquido. A esta técnica se le conoce como la "**técnica del dibujo a lápiz**" o "**técnica de la cinta adhesiva** ". El primer nombre se le dio porque la técnica de deposición en seco recuerda al dibujo trazado con un lápiz o con una pieza de grafito [17]. La clave del éxito consistió, probablemente, en elegir acertadamente un sustrato que proporcionara un contraste óptico aceptable. El siguiente vídeo ilustra esta sencilla técnica, para la que simplemente se requiere unas pinzas y unos centímetros de celo (
"
Making Graphene 101, Ozyilmaz' Group
"; duración: 1m 45s)
:

PROPIEDADES Y FUTURAS APLICACIONES EXTRAORDINARIAS

Tal y como se menciona en la Figura 7, "que el grafeno sea una capa de un solo átomo de espesor, le confiere cinco características nunca vistas", y se comentan las diferencias con el silicio. Son las siguientes: velocidad, grosor, dureza/resistencia, flexibilidad y las aplicaciones para las que se puede utilizar cada uno. Veamos cada una de estas propiedades con más detalle.



Figura 7 *. Comparación de 5*

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, $2\text{-}200 \cdot 10^{-5}$ m). Por tanto, el grafeno es 100.000 veces más delgado que el cabello más fino.

El grafeno es un material ultraligero. Tiene una *densidad* de, únicamente, 0.77 mg/m^2. Así, una hipotética hamaca con 1 m^2 de superficie hecha de grafeno pesaría 0.77 mg, esto es, menos de 1 mg.

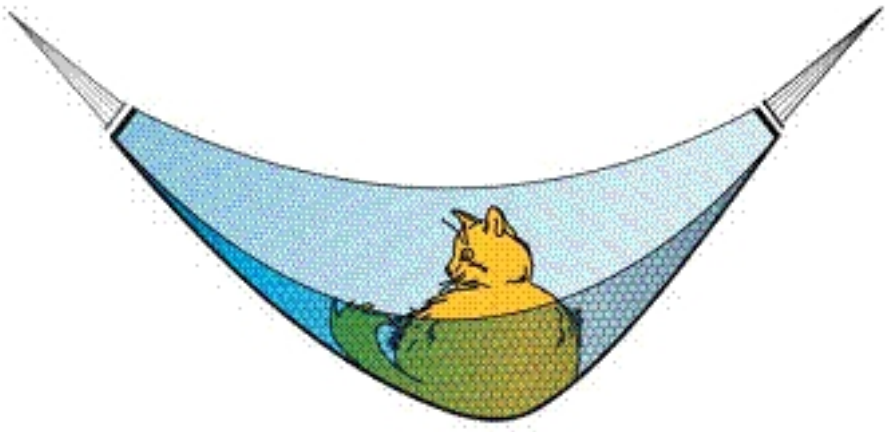


Figura 8. *Nuestra hipotética ham*

El grafeno tiene una *resistencia mecánica* de 42 N/m. Existe una gran variedad de aceros, con un amplio rango de propiedades mecánica. Elijamos una hipotética lámina del acero más resistente, del mismo espesor que el grafeno (es decir, $3.35 \cdot 10^{-10}$ m). Ésta lámina tendría una resistencia de 0.40 N/m. Por tanto, el grafeno es 100 veces más resistente que el más resistente de los aceros.

Así, en nuestra hamaca hipotética de 1 m^2 de superficie, colocada entre dos árboles, podríamos mantener un peso de, aproximadamente, 4 kg sin que rompiera. Así, sería posible hacer una *hamaca casi invisible* de grafeno *que mantuviese a un gato* sin romperse. La hamaca *pesaría menos de 1 mg* (siguiendo con la analogía, pesaría lo que uno de los pelos del bigote del gato).

Por tanto, dado que es un material ultraligero y casi indestructible, el grafeno y sus compuestos podrían revolucionar dramáticamente la industria aeroespacial y la de automoción. Su investigación se ha acelerado hasta tal punto que ya es posible producir grandes volúmenes de material a nivel de laboratorio. Pronto será posible, por ejemplo, producir a nivel industrial láminas de grafeno de cientos de metros, embeberlas en otros materiales como agente reforzante, o crear partículas microscópicas para utilizarlas en tintas conductoras.

Teniendo en cuenta el espesor del grafeno, su *conductividad eléctrica* es $0.96 \cdot 10^6$ $(\Omega \cdot m)^{-1}$. La conductividad del cobre es $0.60 \cdot 10^6$ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ y la del silicio es $100 \cdot 10^6$ $(\Omega \cdot m)^{-1}$

Por tanto, el grafeno conduce la electricidad mejor que el cobre y, asombrosamente, 100 veces mejor que el silicio.

La *conductividad térmica* del grafeno se ha medido, y se encuentra en un valor de, aproximadamente, 5000 $Wm^{-1}K^{-1}$. El cobre presenta un valor de 400 $Wm^{-1}K^{-1}$ a temperatura ambiente. Por tanto, el grafeno conduce 100 veces mejor el calor que el cobre.

Con una conductividad eléctrica 100 veces mayor que la del silicio y una conductividad térmica extraordinaria que hace que no desprenda calor,
el grafeno podría cambiar la industria de la electrónica.
Los circuitos de los ordenadores personales hechos en grafeno podrían alojar un número de

transistores órdenes de magnitud mayor que hoy día en el mismo espacio. Además, gracias a la habilidad de disipar calor, los procesadores de grafeno serían de un tamaño incluso menor que el de los actuales chips de silicio. Lo mejor está, pues, aún por venir. De hecho, el gigante IBM está ya fabricando prototipos de transistores de grafeno. Se ha comprobado que estos dispositivos trabajan a una frecuencia de 100 GHz, esto es, 10 veces superior a la de los transistores actuales. Esto convierte al grafeno en
el candidato idóneo para reemplazar al silicio
. Ya se habla de que el "Valle del Silicio" debería ir actualizando su nombre a "Valle del Grafeno".

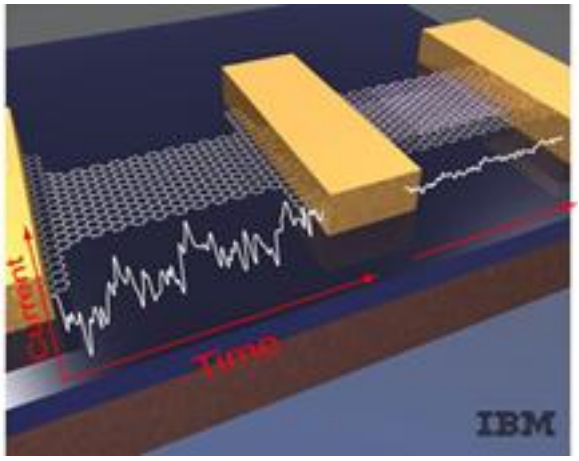


Figura 9. *IBM está fabricando*

En cuanto a *propiedades ópticas*, el grafeno es un material casi transparente, ya que absorbe casi 2.3% de la intensidad de la luz blanca que llega a su superficie. Esta propiedad, unida a la flexibilidad, ha abierto la posibilidad d fabricar circuitos flexibles y transparentes como se muestra en la Figura 10.

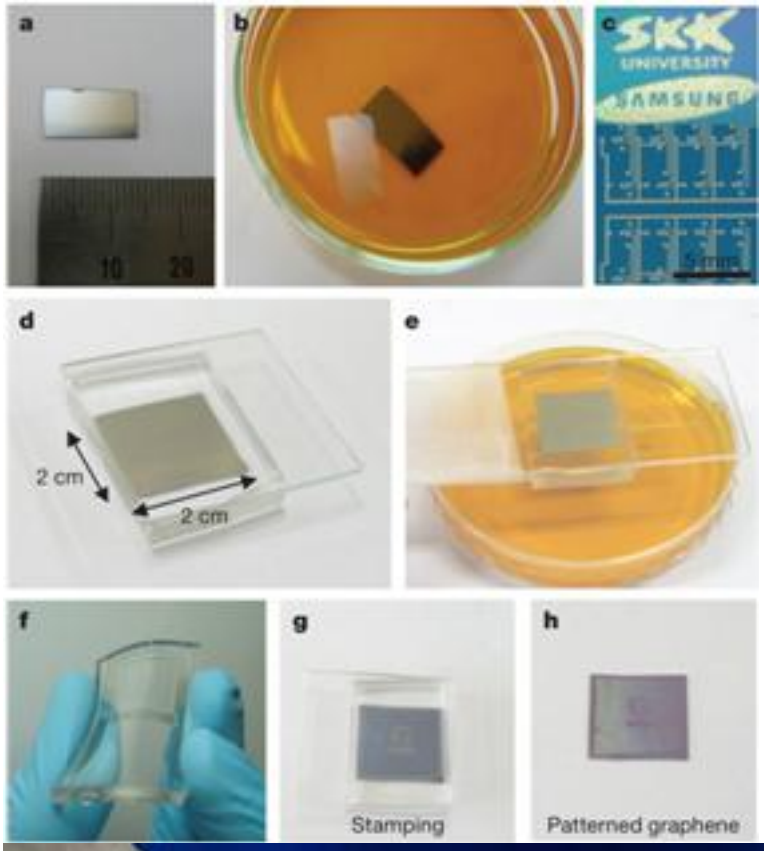




Figura 10. [illegible] Georgia Institute of Technology y el [illegible] Gracias a las propiedade

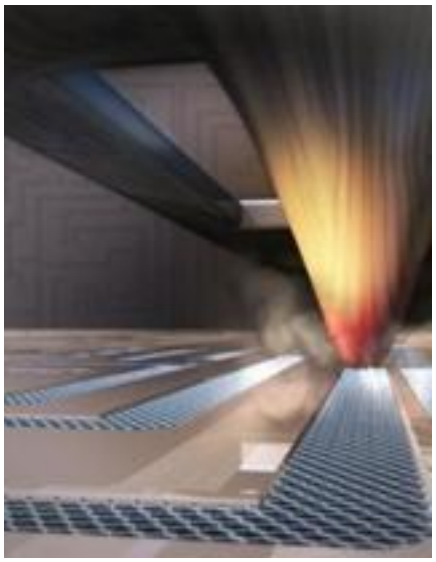
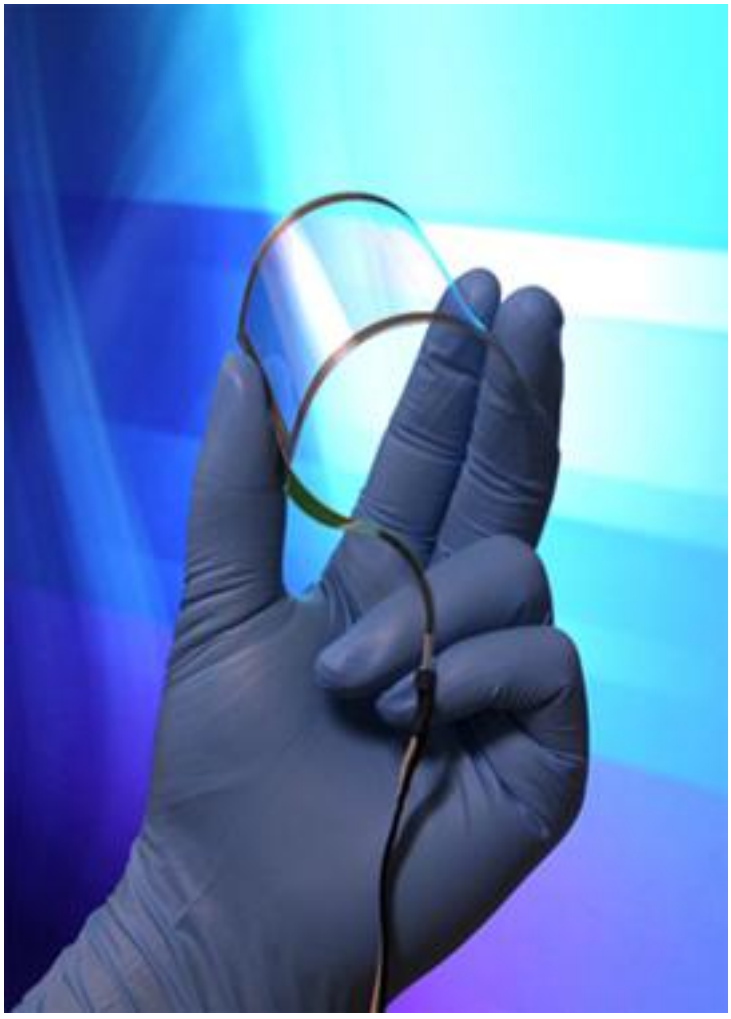
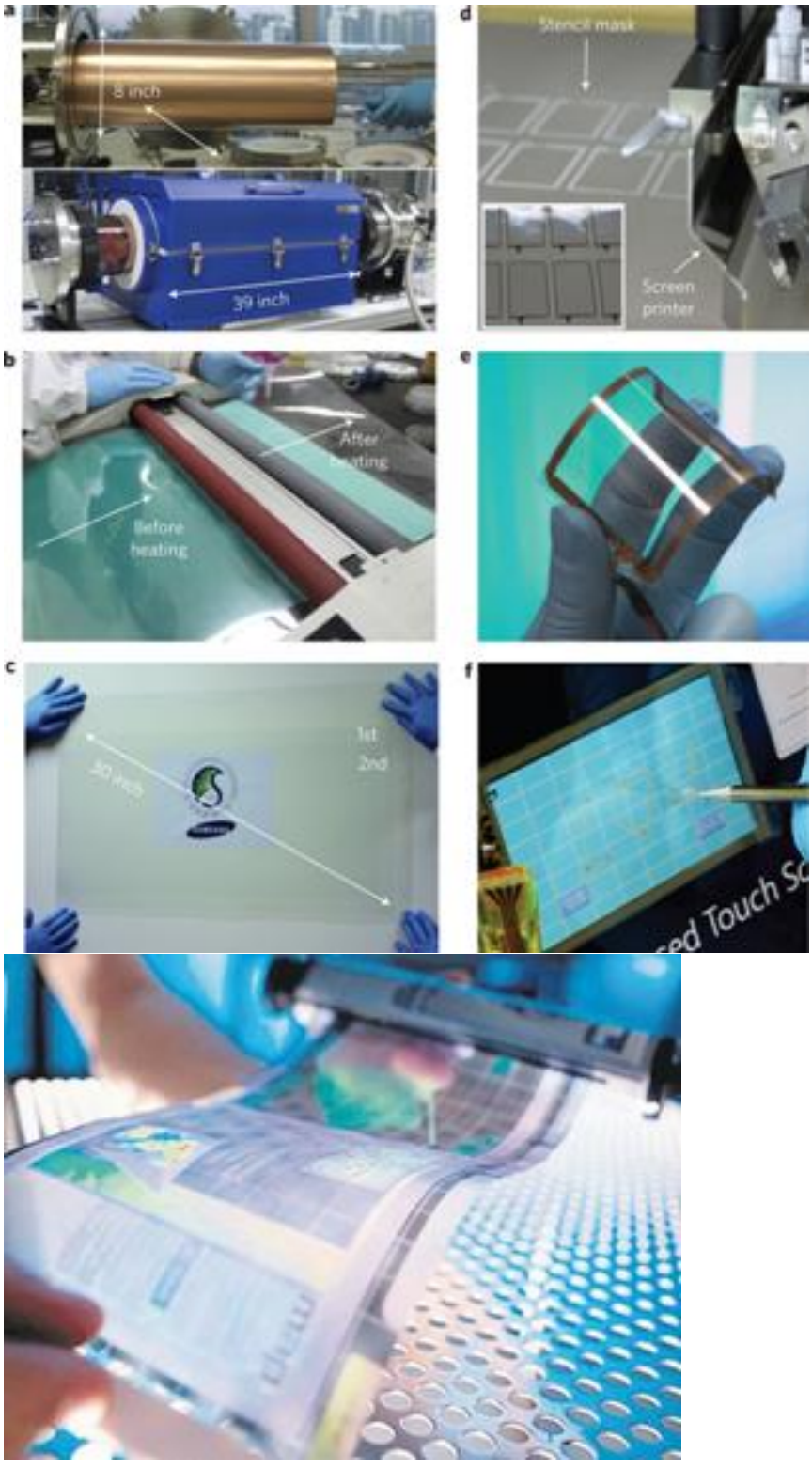
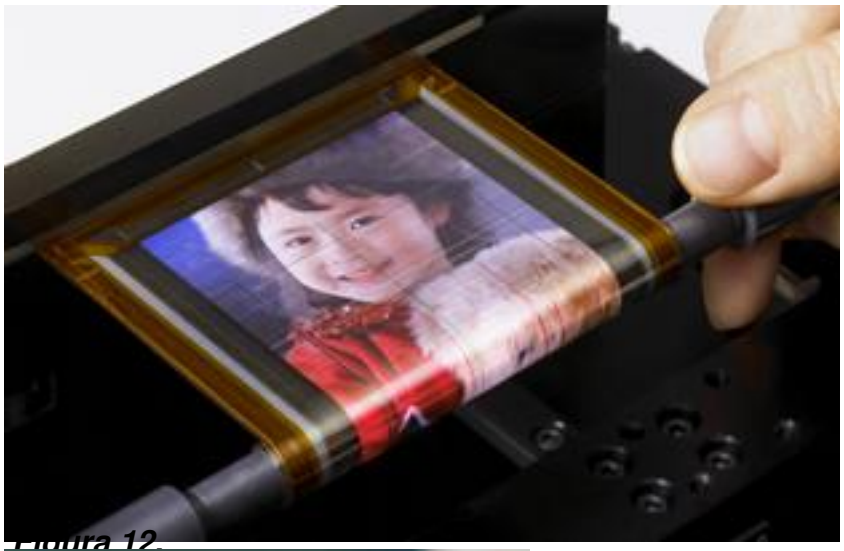


Figura 11. ***Los científicos***




a
8 inch
39 inch
d
Stencil mask
Screen printer
b
After heating
Before heating
e
c
30 inch
1st
2nd
f



Pantallas táctiles fabr

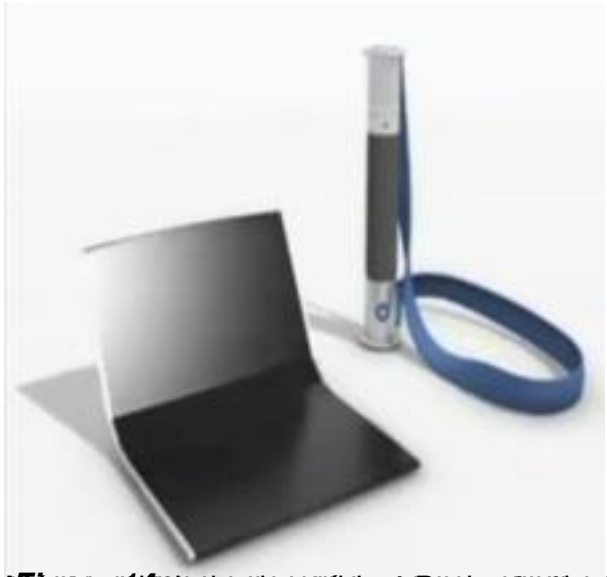






Figura 12: Electrodo transparen

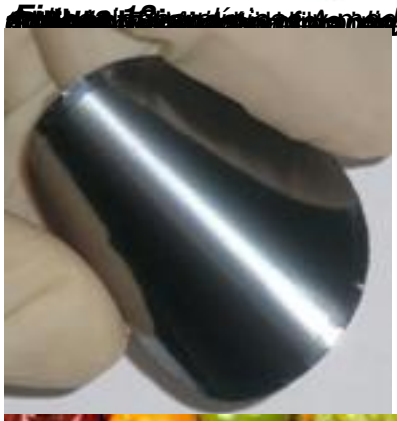




Ordenador enroll



Baterías mejoradas







tipo de pa

REFERENCIAS

[1] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/

[2] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y, Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films". Science, Vol. 306, [5696], pp. 666-669 (2004). DOI: 10.1126/science.1102896.

[3] Novoselov, K.S. et al. Two-dimensional atomic crystals. Proc. Natl Acad. Sci. USA 102, 10451–10453 (2005).

[4] Carbon Wonderland". Scientific American. April 2008. http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=carbon-wonderland. Retrieved 2009-05-05.

[5] Segal, M. (2009). "Selling graphene by the ton". Nature Nanotechnology 4 (10): 612. doi:10.1038/nnano.2009.279.

[6] Patel, P.. "Bigger, Stretchier Graphene", Technology Review, MIT, 2009-01-15.

[7] Bae, S. et al. (2010). "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes". Nature nanotechnology 5 (8): 574–8. doi:10.1038/nnano.2010.132.

[8] Geim, A. K. and Novoselov, K. S. (2007). "The rise of graphene". Nature Materials 6 (3): 183–191. doi:10.1038/nmat1849.

[9] Wallace, P.R. The band theory of graphite. Phys. Rev. 71, 622–634 (1947).

[10] McClure, J.W. Diamagnetism of graphite. Phys. Rev. 104, 666–671 (1956).

[11] Slonczewski, J.C., Weiss, P.R. Band structure of graphite. Phys. Rev. 109, 272–279 (1958).

[12] Semenoff, G.W. Condensed-matter simulation of a three-dimensional anomaly. Phys. Rev. Lett. 53, 2449–2452 (1984).

[13] Fradkin, E. Critical behavior of disordered degenerate semiconductors. Phys. Rev. B 33, 3263–3268 (1986).

[14] Haldane, F.D.M. Model for a quantum Hall effect without Landau levels: Condensed-matter realization of the 'parity anomaly'. Phys. Rev. Lett. 61, 2015–2018 (1988)

[15] Kroto, H.W. et al. (1985). "C60: Buckminsterfullerene". Nature 318: 162–163. doi:10.1038/318162a0.

[16] Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 354, 56–58 (1991).

[17] Geim, A.K., MacDonald, A.H. (2007). "Graphene: Exploring carbon flatland". Physics Today 60: 35–41. doi:10.1063/1.2774096.