



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO EN PROSPECTIVA PARA PRÓTESIS DE MANO USANDO GRAFENO

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**PRESENTA:
JESÚS PÁVEL SANDOVAL JACOBO**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ**



MÉXICO D.F.

AGOSTO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos:

A Fernando, mi hijo, porque eres mi mayor compromiso y mi fuerza para salir adelante.

A Jesús Sandoval, mi padre, fuente inagotable de erudición y conocimientos, mi apoyo educativo, económico y moral. Mi director de tesis.

A María Jacobo, mi madre, cuya sabiduría, intuición y conocimientos me mantuvieron estable, sano y feliz.

A Galia Sandoval, mi hermana por tus sus atenciones maternas, su preocupación por mi salud emocional y física.

A Katia Sandoval, mi hermana por tus sus consejos, alegría y cariño.

A mis abuelos maternos Rafael Jacobo García y Ernestina Femat Torres por haber formado una mujer valiente, inteligente, amorosa y bella.

A mis abuelos paternos Pablo Sandoval Cruz y Susana Ramírez Meneses por darme un padre valiente, fuerte, inteligente, que da sin esperar nada a cambio.

A Karen, mi compañera de vida. Me mostraste las recompensas del esfuerzo.

A mi asesor, el Dr. Jesús Manuel Dorador por ayudarme en esta última etapa de la carrera.

A todas aquellas personas que cambian su vida y libertad por la nuestra, que con sus acciones mejoran este mundo en crisis.

A la vida por ser tan generosa.

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto PAPIIT IT102512 “Diseño de sistemas mecatrónicos aplicados al ser humano”.

ÍNDICE

OBJETIVO	4
ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL GRAFENO	11
2.2 FORMAS DE OBTENCIÓN	15
2.3 PROPIEDADES	23
2.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS	23
2.3.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS.....	33
2.3.3 PROPIEDADES TÉRMICAS	42
3. ESTUDIO DEL PROBLEMA.....	44
3.1 TIPOS DE PRÓTESIS EXISTENTES	47
3.2 LIMITANTES	58
4. PROPUESTA DE DISEÑO	62
5. CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS.....	73
TABLA DE NOMENCLATURA	77

OBJETIVO

A través de una recopilación de información acerca del grafeno en journals se realizará un estudio de prospectiva de las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del grafeno que sustenten la aplicación de este material en la fabricación de prótesis de mano disminuyendo su peso, volumen de la parte electrónica y desgaste de la parte mecánica con el fin de dejar una base teórica para trabajos futuros que requieran desarrollar nuevas prótesis y mejorar los elementos mencionados anteriormente.

ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

El grafeno es un material ligero y maleable, presenta características que podrían solucionar el problema tanto de consumo energético como de recarga y desperdicio de baterías ya que debido a sus propiedades de alta velocidad de transmisión de datos, el tiempo de recarga puede llegar a ser de segundos con ayuda de radiación electromagnética proveniente del sol.

Samsung es una empresa con mucho interés en la aplicación de grafeno en múltiples usos, como por ejemplo en la creación de nuevos transistores; sin embargo, no se llegará a implementar un modelo real debido a que las formas de obtención de grafeno no están del todo optimizadas para su producción a gran escala; la investigación científica seguramente la hará factible a corto plazo y por lo tanto no se tiene aún una forma de producción en masa, por lo que se hará una propuesta conceptual del grafeno en prótesis. La presente investigación pretende dar una solución al problema de peso y volumen de los elementos electrónicos y de control que forman parte de una prótesis de mano mediante el empleo de grafeno.

1. INTRODUCCIÓN

La historia de la tecnología está marcada por épocas representativas en donde se desarrollan saltos evolutivos sustanciales, gigantes que marcan la importancia de su mención.

Sin tomar en cuenta los avances primitivos, podemos asegurar que la primera gran época para el avance de la tecnología fue la revolución industrial que se vivió en el siglo XIX en donde el trabajo del hombre es reemplazado por primera vez por una máquina.

El segundo gran salto se debió al desarrollo de la industria electrónica en la segunda mitad del siglo XX, en donde gracias al uso de los semiconductores, se redujeron los grandes tamaños de los dispositivos eléctricos.

Ahora, en el siglo XXI nos encontramos dando el siguiente salto cuántico del desarrollo tecnológico, con el desarrollo de la nanotecnología.

Richard Feynman, Premio Nobel de Física es considerado como el padre de la nanotecnología. En 1959 aportó una idea que revolucionó la forma de pensar de aquel tiempo, ya que planteó que ninguna ley física evitaba que se pudiesen hacer cosas en pequeño, como miniaturizar las computadoras, escribir la información contenida en todos los libros en un cubo del tamaño de una partícula de polvo o construir maquinaria con átomos y moléculas.

El prefijo nano- proviene del latín *nanus*, que significa “enano” y actualmente nano tiene la acepción de una mil millonésima parte ($1/1,000,000,000$); existen dos disciplinas que se dedican a indagar las propiedades y comportamiento de la materia a la escala nano, así como las aplicaciones de este “nuevo” mundo:

La nanociencia estudia los procesos fundamentales que ocurren en las estructuras de un tamaño entre 1 y 100 nanómetros, las cuales se conocen como nanoestructuras.

La nanotecnología es el área de investigación que estudia, diseña y fabrica materiales o sistemas a escalas nanométricas y les da aplicación práctica.

Pero, ¿por qué estudiar sus propiedades? Las propiedades físicas, químicas y biológicas que tienen los materiales y las leyes que rigen el comportamiento de la materia a escalas nanométricas difieren en muchas formas de sus propiedades en los sistemas macroscópicos.

Nanopartículas de oro, como las mostradas en la figura 1, pueden ser de color rojo, naranja, púrpura o hasta verdoso, dependiendo de su tamaño nanométrico. Estas nanopartículas tienen punto de fusión y otras propiedades físicas y químicas diferentes, entonces, a esas escalas el oro deja de comportarse como el oro que conocemos.

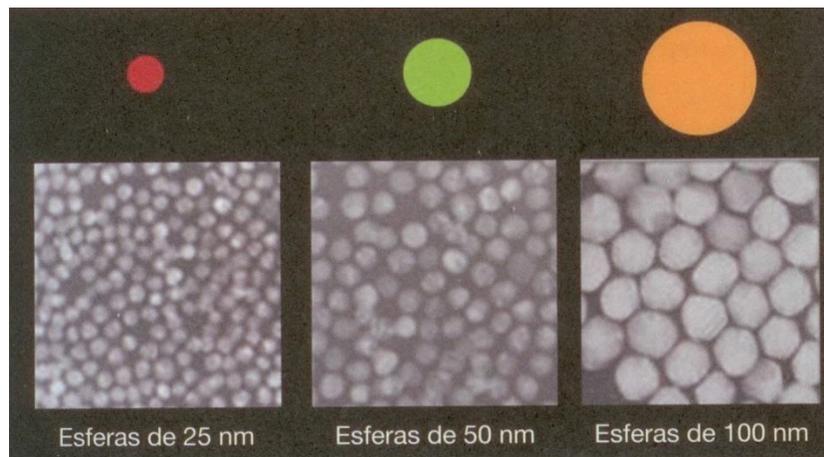


Fig. 1. El oro varía sus propiedades ópticas dependiendo de la escala con que se forme. Fuente: [1].

La investigación en nanotecnología busca entender y aprovechar las nuevas propiedades que generan las escalas nanométricas para fabricar materiales completamente nuevos y dispositivos que puedan superar las limitaciones del presente ya sea creando estructuras con tipos de arreglos atómicos diferentes o con nuevas composiciones químicas.

El carbono representa el 0.2% de la corteza terrestre, es un elemento sólido a temperatura ambiente y tiene una gran facilidad para unirse consigo mismo y con

otros átomos pequeños al punto de formar más de diez millones de moléculas diferentes.

El carbono si se combina con el oxígeno forma el dióxido de carbono, indispensable en el ciclo vital de las plantas, ya que es la fuente de carbono para la producción de miles de compuestos orgánicos que requiere su supervivencia.

Los átomos de carbono se combinan con el hidrógeno y se forman los hidrocarburos, esenciales para la industria energética y de la transformación.

Cuando los átomos de carbono se combinan con el oxígeno y el hidrógeno, forma compuestos como las grasas, alcoholes, cetonas, ácidos, entre otros muchos. Si además de oxígeno e hidrógeno, se combina con nitrógeno, se forman las proteínas, biomoléculas indispensables para la vida.

Por otra parte, si se combina con el átomo de flúor genera los materiales conocidos como teflones de amplia utilidad doméstica e industrial ya que se crean polímeros con propiedades únicas. Otros polímeros que contienen átomos de cloro, por ejemplo el policloruro de vinilo, mejor conocido como PVC, es igualmente importante en la vida doméstica e industrial actual.

Los átomos de carbono, dependiendo de las condiciones en las que se formen pueden encontrarse en la naturaleza en distintas formas que llamamos alotropías. Se conocen cuatro alotropos del carbono (ver figura 2):

Tridimensionales. El grafito es el alotropo más abundante y representativo de este tipo de alotropía. Una sola capa es muy estable, fuerte y flexible, pero entre capa y capa la fuerza de adhesión es muy débil y puede haber fácilmente desprendimientos de porciones de material. Otro alotropo tridimensional es el diamante, el material más duro que existe y uno de los más caros también.

- Bidimensionales. El grafeno, pertenece a esta categoría; está constituido por una sola capa atómica de carbono, o con un número reducido de capas (por lo general, menor a diez), dispuestos en un enrejado hexagonal.
- Monodimensionales. Los nanotubos, son nanoestructuras con forma cilíndrica las cuales pueden tener una o varias capas (varios tubos

colocados uno dentro de otro), tienen un diámetro de uno o varios nanómetros y pueden ser tan largos como un milímetro. Cada extremo del nanotubo puede estar cerrado por la mitad de una molécula de fullereno.

- Cero dimensionales. Los fullerenos, estructuras atómicas de 60 átomos de carbono (C_{60}), muy parecida a un balón de fútbol soccer; está formado por 12 pentágonos y 20 hexágonos. Su diámetro es aproximadamente de 0.7 nanómetros.

Como símil a los nanotubos de muchas capas, los fullerenos pueden estar compuestos de varias esferas concéntricas en cuyo caso son llamadas nanocebollas.

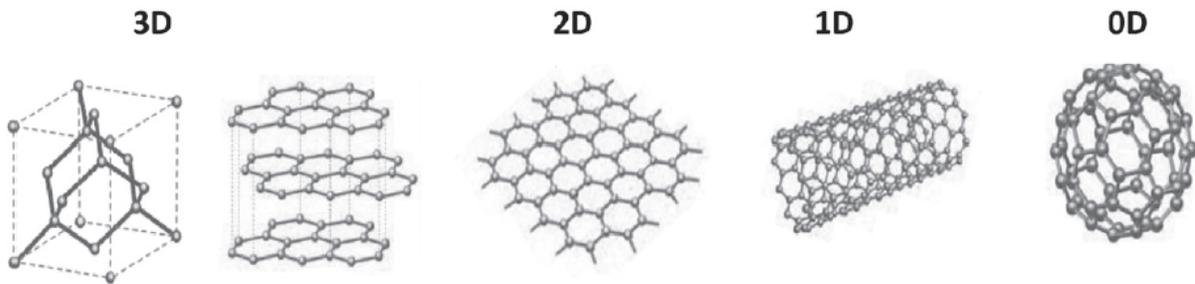


Fig. 2. Alotropías del carbono. Fuente: [2].

El carbono ha focalizado en mayor grado la atención científica y tecnológica debido, principalmente, a las propiedades que presentan sus estructuras nanométricas.

El fullereno por ejemplo, al ser hueco puede tener incluido otras clases de átomos y de esta forma modificar sus propiedades. Se pueden intercalar metales entre dos moléculas de C_{60} y tener propiedades superconductoras.

Así mismo los fullerenos podrían usarse como nanocápsulas para almacenar y transportar otras moléculas sin ninguna interacción con el exterior y serviría, por ejemplo para aislar desechos tóxicos peligrosos. También podrían utilizarse en medicina enlazando su estructura con antibióticos específicos para combatir

algunas bacterias, virus o células cancerosas. Su uso también está pensado como lubricante.

Los nanotubos de carbón, son muy fuertes y resistentes al estirarlos, pueden ser retorcidos, aplanados, y doblados sin romperse y se piensa que después de deformarlos pueden recobrar su forma original, además son resistentes bajo compresión. Estas propiedades mecánicas son favorables para aplicaciones en la industria aeroespacial, se planea además usarlos como puntas en los microscopios de efecto túnel y como fuentes de emisión de campo para fabricar pantallas ultradelgadas; por sus propiedades electrónicas pueden ser empleados en transistores y como compuertas lógicas.

La nanociencia y la nanotecnología constituyen uno de los motores más importantes de la sociedad del conocimiento actual, pues sus aplicaciones tendrán fuerte impacto en el desarrollo de nuevos materiales, así como en técnicas y procesos de producción y en consecuencia en el desarrollo científico y tecnológico.

Los alcances de la nanotecnología son ilimitados, actualmente se investiga en la creación de catalizadores más rápidos, materiales más livianos y más resistentes, celdas solares más delgadas y con un costo por watt mucho más barato, ahorro energético, procesadores más rápidos y más pequeños, favorecer el crecimiento de neuronas, eliminar tumores, decodificación del ADN, tratamiento del cáncer, crear biosensores, hasta la invisibilidad en materiales cuya base de funcionamiento radica en que las propiedades del material son distintas a las de sus constituyentes.

Se espera mucho de la nanotecnología pues tendrá un impacto directo en todos los aspectos de nuestras vidas: en salud, en la vivienda, en el transporte y seguramente hasta en la seguridad del mundo.

El presente trabajo se concentra en las características del grafeno, ya que por su red atómica bidimensional presenta propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas únicas.

El primer capítulo describe las características físicas, químicas, ópticas del grafeno; las formas de obtención que se han logrado hasta el momento, así como algunas de las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas que se tomarán en cuenta para un diseño de prótesis de mano.

El segundo capítulo hace un análisis tanto de las prótesis de mano que existen en el mercado como las que se usan para investigación y se muestran las principales limitantes que se refieren al peso, duración de baterías, mantenimiento, funcionalidad y costo.

El tercer capítulo hace una propuesta de cómo se podrían emplear las características mencionadas en el primer capítulo para mejorar los aspectos deficientes de las prótesis actuales.

Y finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegan tomando como base los capítulos anteriores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL GRAFENO

El grafeno es un material constituido por átomos de carbono dispuestos en una red de hexágonos fuertemente cohesionados por enlaces covalentes (ver figura 3), es fuertemente reactivo en la orilla [16,14]; tiene un 98 % de transparencia [3]. La principal característica es que tiene un grosor de un átomo de carbono aunque puede existir en dos o más capas imprimiéndole propiedades diferentes a medida que se agrega una variante en su estructura. Es debido a esta bidimensionalidad que se generan propiedades inigualables [23], pero éstas se empiezan a perder a partir de las diez capas. [14]

A continuación se presentan las características más relevantes y posteriormente se explicará la aplicación que tienen (sección 2.3).

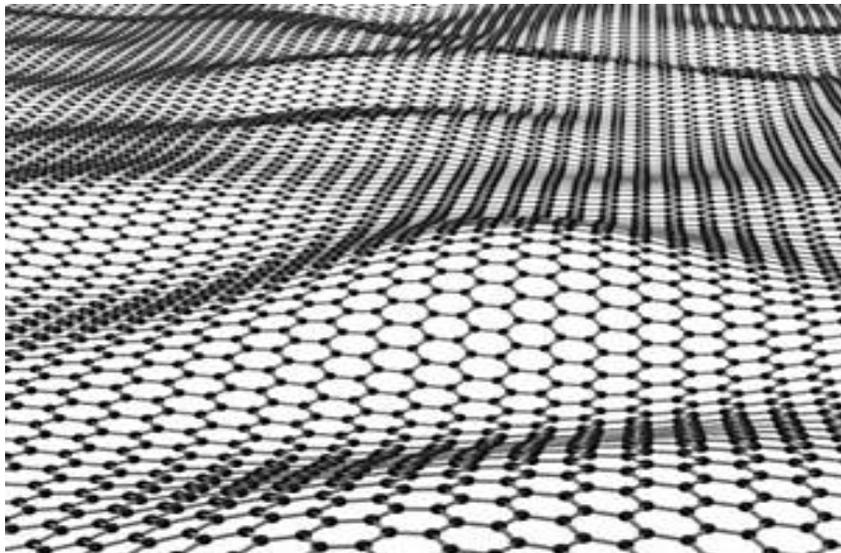


Fig. 3. Vista computarizada de la superficie del grafeno. Fuente: [48].

GENERADOR DE FORMAS GRAFÍTICAS

Dependiendo de cómo se corten algunas formas del grafeno se pueden crear fulerenos, o nanotubos de carbono, los cuales también tienen propiedades que se están estudiando ampliamente por ser muy prometedoras. Por otra parte, si apilamos grafeno, regresamos a su estado original: el grafito (figura 4). [14]

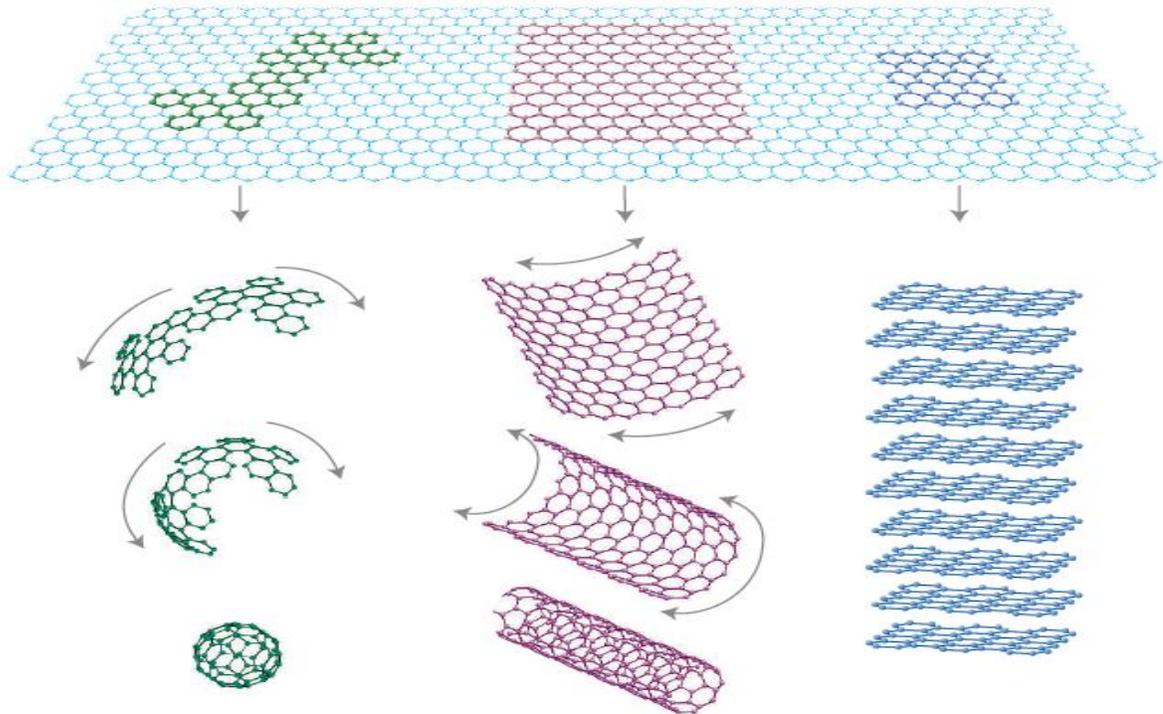


Fig. 4. A partir del grafeno se pueden crear fulerenos, nanotubos o grafito.
Fuente: [14].

ONDAS CUASI-SINUSOIDAL.

Las hojas de grafeno presentan ondas aleatorias a temperatura ambiente. Dichas ondas pueden ser observadas por diferentes métodos, que incluyen la microscopía de efecto túnel, usando un microscopio de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) (figura 5). Dichas ondas tienen un perfil casi sinusoidal.

Este corrugamiento es muy importante, ya que es el que permite la estabilidad que se creía imposible en un cristal bidimensional. [25]

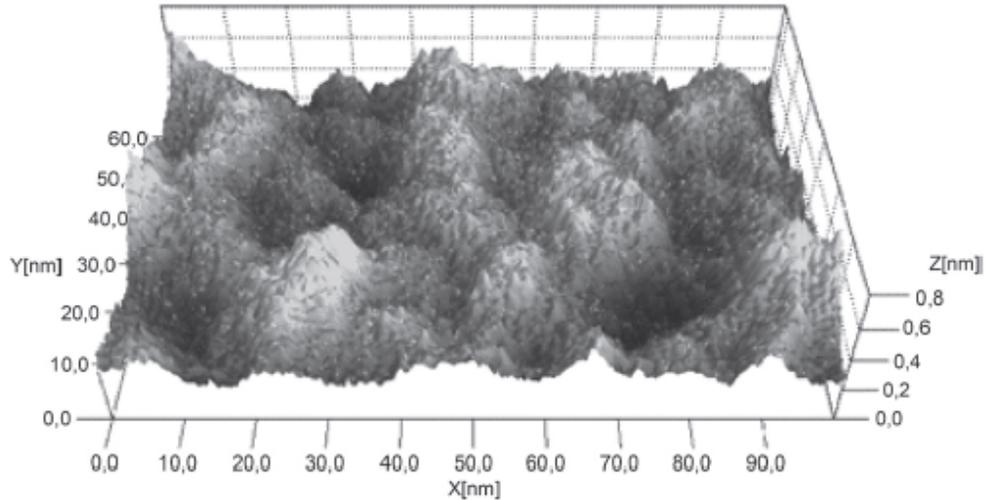


Fig. 5. Imagen en tres dimensiones obtenida por microscopía de efecto túnel de una monocapa de grafeno. Fuente: [2].

FORMAS DE APILAMIENTO

El grafeno puede ser clasificado mediante 3 tipos: monocapa (SLG del inglés *Single Layer Graphene*), bicapa (BLG, *Bilayer Graphene*) o tricapa (TLG, *Trilayer Graphene*) o superior a tres capas. [13]

Las propiedades del grafeno varían de acuerdo a las capas que tenga, una pequeñísima diferencia en el apilamiento, dará como resultado propiedades de transporte totalmente distintas.

Una hoja de grafeno de n capas puede tener $2n-2$ órdenes de apilamiento, lo que nos da muchas opciones para controlar las propiedades de sistemas basados en grafeno.

GRAFENO BLG

Un tipo de ordenamiento atómico se llama apilamiento Bernal (o apilamiento AB), en donde la mitad de los átomos de la capa superior se encuentran en los centros

de los hexágonos de la capa inferior. La figura 6 representa el apilamiento Bernal que es la única forma estable para una bicapa BLG.

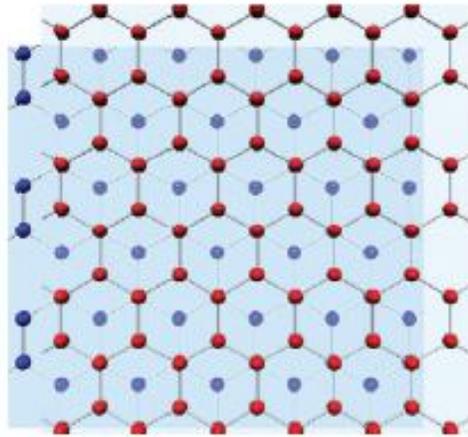


Fig. 6. Esquema de dos capas de grafeno superpuestas. Fuente: [3].

GRAFENO TLG

En comparación con el BLG que sólo tiene una configuración estable, la tricapa de grafeno TLG tiene dos alótopos estables naturales, apilamiento Bernal y romboédrico, que se distinguen uno de otro solamente por la posición relativa de la primera y última capa. Pueden tener una apilación tipo AA produciendo ABA (ver figura 7) o apilación Bernal (B-TLG) y a su vez puede tener una apilación tipo AB produciendo ABC o apilación romboédrica (r-TLG).

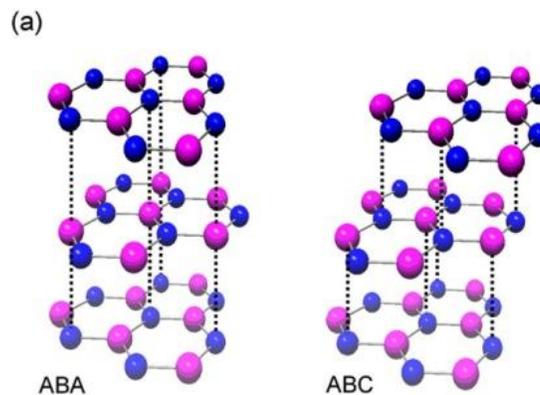


Fig. 7. Configuración de los tipos de apilamiento para TLG. Fuente: [49].

ORIENTACIÓN DEL EJE CRISTALOGRÁFICO

La orientación del eje cristalográfico se puede dar de dos formas, dando como resultado dos tipos de patrón en la forma de la orilla del grafeno: en Zigzag (*zGNR*) y con forma de sillón (*aGNR*). La figura 8 muestra las dos posibles formas de la orilla.

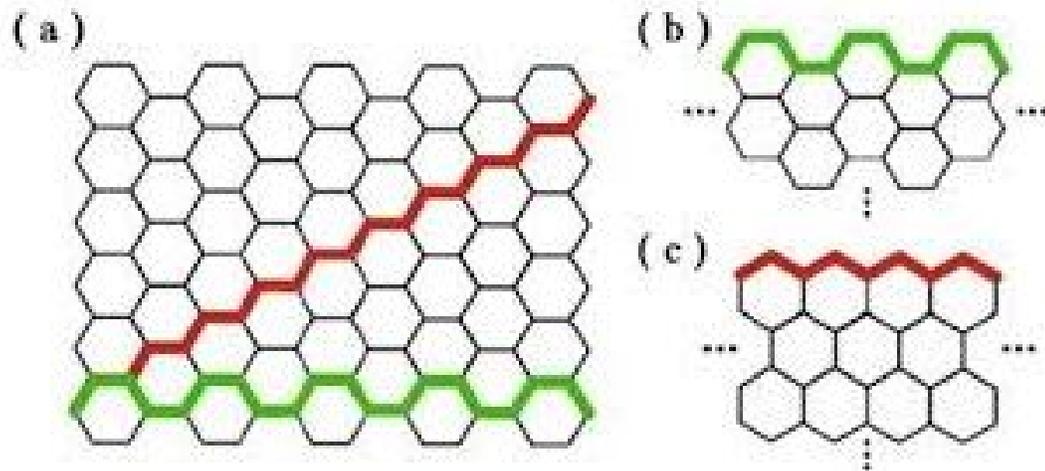


Fig. 8. (a) Tipos de orientación del eje cristalográfico del grafeno. (b) Forma de sillón. (c) Forma de Zigzag. Fuente: [50].

2.2 FORMAS DE OBTENCIÓN

EXFOLIACIÓN MICROMECAÁNICA

En 2004, Andrei K. Geim y Konstantin S. Novosiolov lograron aislar las primeras hojuelas de espesor atómico de carbono mediante una técnica poco usual, a pesar de que se había pronosticado que este tipo de cristales bidimensionales eran imposibles de conseguir debido a su inestabilidad termodinámica.[14]

Empezaron con grafito (tridimensional) y extrajeron una sola lámina (monolámina de átomos) usando una técnica llamada exfoliación micromecánica con ayuda de cinta adhesiva tipo diurex. El grafito es en realidad un material de varias capas de

grafeno las cuales están débilmente unidas entre sí (interacciones van der Waals). El procedimiento es simple: a la superficie lisa y limpia de un cristal de grafito se le pega cinta adhesiva (diurex) y después de removerlo se usa un segundo diurex para obtener capas más delgadas del primero. Después de repetir el proceso y calculando que se tendrá una sola capa, se disolvió el diurex en acetona para finalmente sedimentar las hojuelas de grafeno sobre una oblea de óxido de silicio - los cristales bidimensionales tienen la propiedad de ser visibles al ser contrastados con este material- para poder analizar su grosor por microscopía de fuerza atómica y microscopía electrónica de barrido (ver por ejemplo la figura 9).[13]

El proceso puede variar si en vez de usar diurex, el cristal se somete a un raspado fino usando cualquier objeto sólido adecuado para este fin.

Éste método es actualmente el más eficaz y fiable para producir láminas de grafeno de alta calidad porque no se contamina la muestra con residuos de sustancias como lo veremos más adelante. [2]

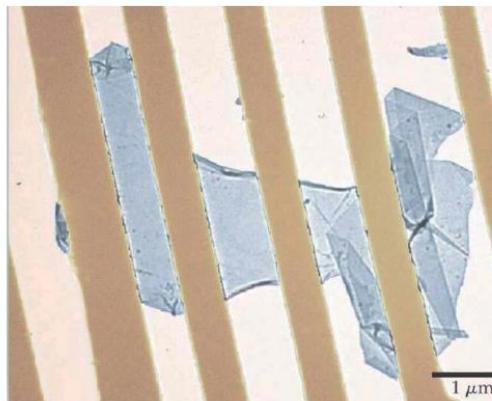


Fig. 9. Cristal de grafeno de un átomo de grosor suspendido en una estructura de alambres de oro, visto gracias a la microscopía de transmisión electrónica. Fuente: [13].

EXFOLIACIÓN QUÍMICA

Esta técnica consiste en insertar átomos, preferentemente de gran tamaño entre las capas del grafito para aumentar la distancia interplanar entre capas y facilitar la eventual separación (ver figura 10).

Generalmente se obtienen nuevos materiales, pero en algunos casos se logra aislar una capa de grafeno insertada en una matriz tridimensional.

Mediante una reacción química se separan los átomos que se insertaron y se obtiene un sedimento y hojas de grafeno enrolladas, pero los alcances de este proceso son cortos porque los sedimentos gráficos no se han podido controlar. El residuo consiste en hojas de múltiples capas enrolladas en lugar de mono capas y por lo tanto, este proceso ha llamado poco la atención. [14]

No obstante, es uno de los métodos-base predilectos para obtener un producto mejorado en una segunda etapa.

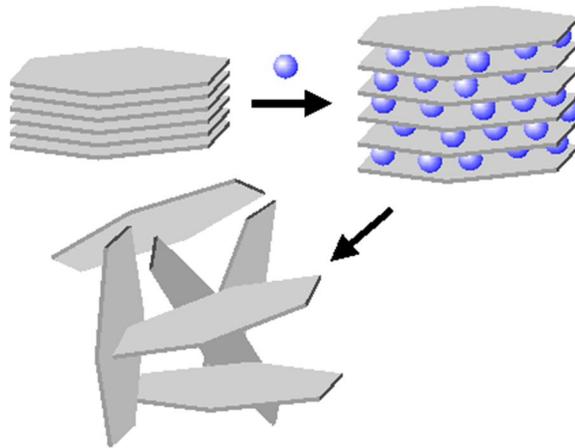


Fig. 10. Diagrama de la exfoliación química. Fuente: [51].

EPITAXIA DE HACES MOLECULARES

El método de epitaxia de haces moleculares o MBE (del inglés *molecular beam epitaxy*) es otro método para fabricar nanoestructuras en donde un haz de átomos o moléculas es dirigido hacia un sustrato, y con el choque los átomos o las moléculas se unen a la superficie para formar una nueva capa (ver figura 11).

Este proceso también se debe realizar en una cámara con un vacío casi total, para evitar que las moléculas del aire reaccionen con los haces moleculares.

A diferencia de otros métodos convencionales de crecimiento, el MBE permite que los átomos lleguen a la superficie y migren hacia el lugar adecuado para crear una nueva capa cristalina.

Por medio de hornos diminutos llamados celdas de evaporación, se producen haces de átomos o moléculas que luego se dejan caer en una superficie.

En lugar de utilizar celdas de evaporación para formar los haces moleculares, se puede emplear un láser muy potente. En este caso el procedimiento se llama crecimiento por ablación láser. [1]

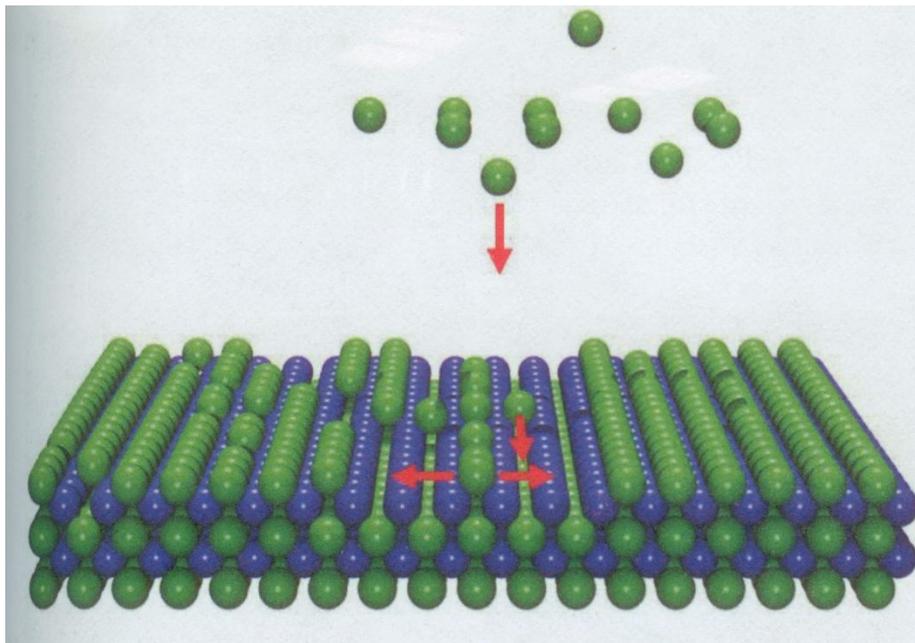


Fig. 11. Crecimiento de nanoestructuras utilizando el método de epitaxia de haces moleculares. Fuente: [1].

El único problema es que el equipo requerido es muy caro y las operaciones pueden llegar a ser muy lentas y complicadas.

El crecimiento epitaxial del grafeno probablemente ofrezca una ruta viable para la generación a gran escala para su uso en electrónica.

DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DEL CARBURO DE SILICIO (SiC)

La descomposición térmica auxiliada por un alto vacío permite extraer los compuestos volátiles de una muestra por calentamiento. A veces se usa el arrastre de un gas inerte para desplazarlo y decantarlo en otro sitio.

En éste método, las películas delgadas de grafeno son creadas de forma epitaxial sobre la cara de un cristal 6H-SiC. Después de la preparación de la superficie por oxidación, se calientan las muestras por bombardeo de electrones en condiciones de ultra alto vacío a 1000 °C para quitar el óxido. Después de comprobar por espectroscopia que el óxido fue removido, las muestras son calentadas a temperaturas que van de los 1250 a los 1450 °C y de uno a veinte minutos.

Bajo estas condiciones el carbono ya separado del silicio se deposita sobre la cara seleccionada del cristal y se crean capas de grafeno, donde el grosor de las muestras está determinado predominantemente por la temperatura. [16]

DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR

Para la Deposición Química de Vapor o CVD (por sus siglas en inglés: *Chemical Vapor Deposition*) existen variaciones de ejecución, ya que se pueden usar varios sustratos, como materia prima y tipos de horno.

El método más comúnmente empleado utiliza un horno de tubo de cuarzo con calentamiento de hasta 1100 °C. El tubo de cuarzo tiene un metro de longitud y 35 mm de diámetro interno y sirve como reactor (ver figura 12).

El grafeno crecerá sobre una lámina de acero inoxidable de 0.1 mm de espesor. La lámina se coloca sobre una base de alúmina (Al_2O_3).

Antes de efectuar la reacción de reducción del sustrato (etanol, por ejemplo) la cámara de reacción se lava abundantemente con hidrógeno (99,9 % de pureza) a una presión ligeramente superior a la atmosférica, durante 1 hora para crear el ambiente reductor.

La temperatura de la cámara se incrementa y gracias al flujo de hidrógeno los vapores de etanol son llevados al tubo de cuarzo. Después de 10 min de reacción, la cámara es enfriada a temperatura ambiente aún con flujo de H_2 . De esta manera se observan las muestras depositadas.

Cualquier hidrocarburo puede ser empleado como fuente de carbono; sin embargo, se prefiere emplear metano (CH_4). También se usa un horno de plasma de microondas o un horno de plasma de radio-frecuencia como fuente de calentamiento.

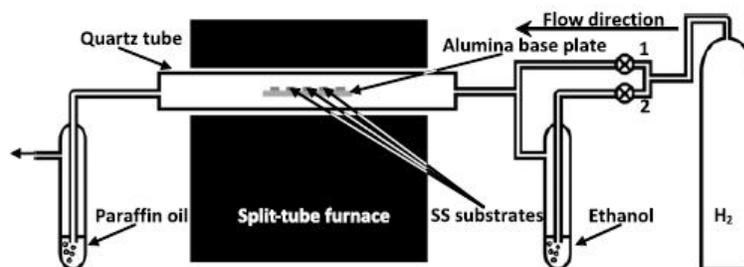


Fig. 12. Diagrama del método CVD usado para la síntesis de grafeno, La trampa de salida que contiene aceite de parafina actúa como un sello para evitar que el aire entre en el tubo de reacción. Fuente: [15].

Con éste método se hace crecer al grafeno de forma epitaxial pero ninguno de estas variaciones se han caracterizado bien y no dan mucho grafito además de que un inconveniente es el tiempo de generación si se piensa en gran escala. [15]

LIMPIADOR ULTRASÓNICO

Este método tiene como base el principio de la exfoliación química, que como ya describimos consiste en insertar átomos más grandes en la estructura del grafito para así aumentar la distancia interplanar.

El grafito expandido es creado a partir de hojuelas de grafito que ha sido sometido a un proceso de intercalación mediante oxidación y expansión por microondas. De

esta forma la distancia entre capas del grafito se incrementa más que si solamente se aplica la oxidación.

El polvo obtenido de este modo -óxido de grafito- se suspendió en agua posteriormente y se colocó en un limpiador ultrasónico. Las frecuencias de vibración ultrasónicas separaron las láminas oxidadas de grafeno unas de otras y se obtuvieron hojuelas de menos de 5 capas. [17]

POSIBLES TÉCNICAS

Existen varias herramientas para interactuar con el nanomundo. Algunas, a pesar de no ser utilizadas en este momento para experimentación o creación de material por una escasa relación costo-beneficio, no quiere decir que hayan sido descartadas por completo. La microscopía de efecto de túnel (STM, del inglés *scanning tunneling microscope*) presenta una gran ventaja porque a veces se necesita de manipulación de mucha precisión atómica.

El STM además de mostrar la topografía del paisaje atómico, también permite manipularlo o cambiarlo. Con el STM se pueden empujar, jalar y soltar átomos y moléculas (ver por ejemplo figura 13).

Para poder hacer esto, el microscopio debe operar dentro de una cámara a muy baja temperatura y en un ambiente de vacío casi total. Las bajas temperaturas se pueden mantener por medio de nitrógeno líquido si se quiere llegar a 210°C bajo cero, o con helio líquido para llegar a 270 °C bajo cero. El objetivo de bajar tanto la temperatura es poder estabilizar la punta del microscopio sobre un solo átomo por largos periodos de tiempo. [1]

Las condiciones de ultra-alto vacío limpian la cámara de oxígeno dióxido de carbono y otras moléculas que están en el aire y que podrían interferir con el funcionamiento del STM para la manipulación de átomos.

El STM también puede inducir reacciones químicas en las superficies: con la punta es posible romper enlaces entre átomos, reacomodarlos y formar nuevos compuestos. [1]

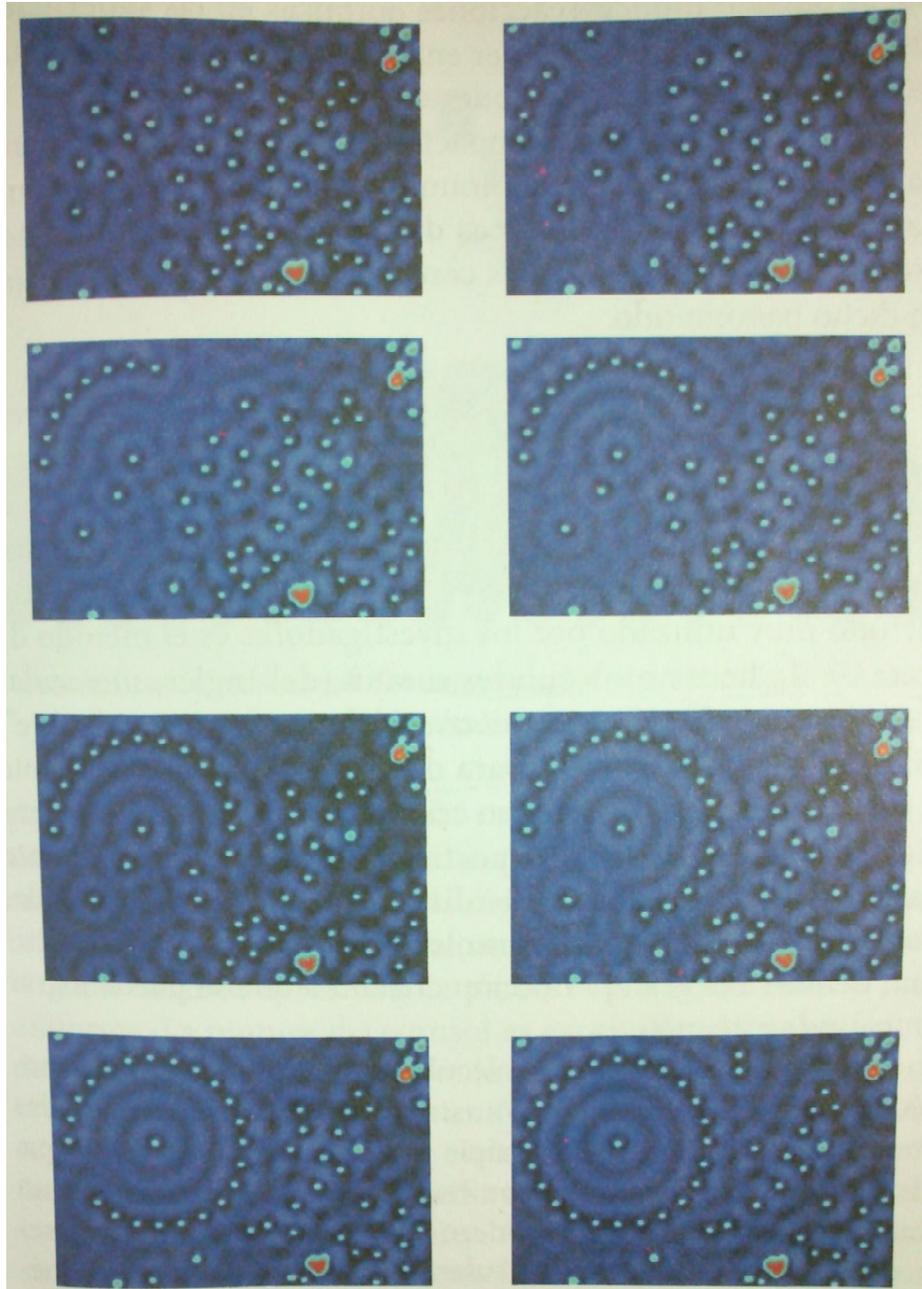


Fig. 13. Proceso de reacomodo atómico usando STM. Fuente: [1].

2.3 PROPIEDADES

Debido al tamaño del grafeno, algunas de sus propiedades son difíciles de encontrar experimentalmente.

Mediante la simulación se pueden calcular con detalle las propiedades físicas como las posiciones atómicas, la estructura electrónica, los modos vibracionales, etc. Debido a que no es necesario tener ningún conocimiento previo del material, como algún parámetro experimental, estos métodos no solamente se pueden utilizar como complemento de las técnicas experimentales, prediciendo teóricamente propiedades nuevas de materiales conocidos, sino que pueden predecir la existencia de nuevos materiales.[1]

Las mediciones experimentales de las propiedades mecánicas del grafeno es una tarea difícil por lo que se hace una predicción mediante simulación y técnicas de modelado, las cuales juegan un papel importante en cuanto a caracterizar sus propiedades y al entender su comportamiento mecánico.[5]

El grafeno es poco sensible a la presencia de un defecto en su estructura [18] por lo que haremos énfasis en ella dependiendo de lo relevante que sea.

2.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

MÓDULO DE YOUNG

La ley de Hooke establece que en los materiales sometidos a esfuerzos de tracción a niveles relativamente bajos, el esfuerzo y la deformación son proporcionales, es decir:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde σ es el esfuerzo, E es el módulo de elasticidad o módulo de Young y ε es la deformación.

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

En la mayoría de los metales comunes, la magnitud de este módulo está comprendida entre 45 GPa, para el magnesio, y 407 GPa, para el tungsteno.

La tabla 1 muestra los módulos de elasticidad para varios metales a temperatura ambiente. [6]

En el caso del grafeno es importante el estudio del módulo de Young porque nos habla implícitamente de las aplicaciones que se le pueden dar para efectos mecánicos.

Metal o aleación	Módulo de elasticidad [GPa]
Tungsteno	407
Acero 1020	207
Níquel	207
Cobre	110
Titanio	107
Latón	97
Aluminio	69
Magnesio	45

Tabla 1. Módulos de elasticidad para varios metales y aleaciones a temperatura ambiente.

En la tabla 2 se muestran los distintos valores calculados para el módulo de Young del grafeno de acuerdo a varios investigadores. [5]

Módulo de Young [TPa]	
Mahmood M. Shokrieh	1.04
Li & Chou	1.03
Lier et al.	1.11
Kudin et al.	1.03
Xiao et al.	1.06
Reddy et al.	1.11
Wu et al.	1.06
Natsuki et al.	1.06

Tabla 2. Variación del valor calculado del módulo de Young del grafeno.
Fuente: [5].

Como se puede observar, el valor mínimo es de 1.029 TPa y el máximo de 1.1 TPa. Aunque se trata de una proyección teórica, podemos ver que los valores son muy parecidos entre sí, pero sobre todo, que estos valores son superiores a los de materiales metálicos, por lo cual está latente su empleo como sustitutos. Si hacemos el promedio de estos valores obtenemos un módulo de Young:

$$E = 1.06275 \text{ TPa}$$

FUERZA DE RUPTURA E INTRÍNSECA

El esfuerzo máximo que puede soportar un material prístino, sin defectos antes de fallar se le conoce como esfuerzo último o esfuerzo intrínseco.

Debido a la presencia de defectos y límite de grano en muestras macroscópicas de grafeno, no se había podido obtener el esfuerzo intrínseco [18].

La forma en cómo se obtuvieron estos datos fue la siguiente:

Se hicieron pequeños huecos de $1.5\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$ de diámetro y $500\ \text{nm}$ de profundidad en un sustrato de $5\times 5\ \text{mm}$ de silicio, luego se colocó una hojuela de grafeno de tal modo que tapara algunos de estos agujeros circulares y se tensó.

A continuación, mediante un microscopio de efecto túnel con puntas de diamante se procedió a indentar el material hasta llegar a su ruptura.

Debido a la fuerza de las películas, se utilizaron efectores con puntas de diamante de 27.5 y $16.5\ \text{nm}$ de diámetro para la prueba.

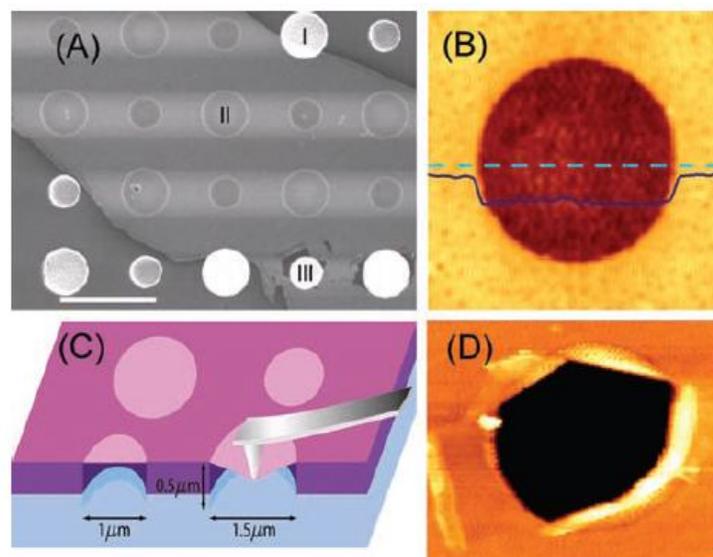


Fig. 14. (A) Micrografía electrónica de barrido de una hojuela de grafeno de gran tamaño que abarca una serie de orificios circulares $1\ \mu\text{m}$ y $1.5\ \mu\text{m}$ de diámetro. La zona I presenta un agujero parcialmente cubierta por el grafeno, la zona II está totalmente cubierta y zona III tiene un agujero por indentación. La barra de escala, $3\ \mu\text{m}$. (B) Una membrana de $1.5\ \mu\text{m}$ de diámetro. La línea azul es un perfil de altura a lo largo de la línea discontinua. La altura de paso

en el borde de la membrana es de aproximadamente 2.5 nm. (C) Esquema de nanoindentación sobre la membrana de grafeno suspendido. (D) Imagen de un microscopio de fuerza atómica (AFM) de una membrana fracturada. Fuente: [18].

Después de calibrar la constante elástica del efector con punta de diamante se indenta varias veces sin llegar a la ruptura y se comprueba que el grafeno no se mueve al realizar esta operación. Posteriormente se llega a la ruptura y se toman los datos.

Las películas de grafeno se rompen a una deflexión arriba de 100 nm y fuerzas de 1.8 μN y 2.9 μN para la punta pequeña y grande respectivamente.

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 3:

PROPIEDAD	VALOR
Fuerza de ruptura	1770, nN
Fuerza intrínseca	42 ± 4 , N/m
Esfuerzo intrínseco	130 ± 10 , GPa

Tabla 3. Valores de fuerza de ruptura, fuerza intrínseca y esfuerzo intrínseco para una hojuela de grafeno sin defectos.

PERMEABILIDAD SELECTIVA

Hojas de óxido de grafeno (GO) y su forma reducida (RGO) con diferentes proporciones carbón - oxígeno, 2.3:1 y 10.5:1 se recubrieron sobre electrodos de carbón vítreo (GCEs) para medir la cantidad de sustancia que podía atravesarlos.

Las películas de GO y RGO permiten la penetración de vapor de agua, ferrocenometanol neutro (FCOH) y $\text{Ru}(\text{NH}_3)_6^{3+}$ catiónico casi como si estuviera

abierto el recipiente, pero restringen la penetración de helio, $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ aniónico y otros gases a través de sus capas. [19]

TIPOS DE DEFECTOS Y AUTOREPARACIÓN

Como habíamos mencionado, el grafeno es un enrejado de átomos de carbono dispuestos en hexágonos, pero los defectos estructurales pueden ser fácilmente formados durante su síntesis o el proceso de post crecimiento.

En esencia son formaciones de otras formas geométricas en el enrejado que pueden ser pentágono, heptágono, octágono o sus agrupaciones. [20]

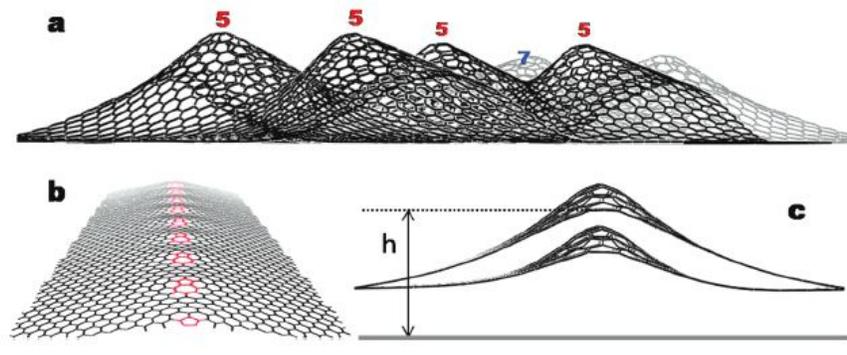


Fig. 15 (a) Corrugamiento de la red debido a cambios por defectos de pentágono-heptágono. (b) Elevación por una línea de pentágonos y heptágonos. (c) Altura de la deformación; inversamente proporcional al número de defectos. Fuente: [25].

Dichos defectos son importantes ya que el corrugamiento produce un cambio en la distancia entre los átomos de la red lo cual modifica a su vez la conductividad eléctrica. [25]

Para que la estructura se mantenga estable, se necesita un número par de átomos de carbono. Si falta uno el defecto se llama mono vacante (SV), y suele generar pentágonos que pueden curvar la superficie como media esfera [23].

Si faltan dos átomos, se llama de vacante doble (DV) y a pesar de que se mantiene la estructura de átomos par en el enrejado se pueden formar anomalías en forma de pentágono-octágono-pentágono (5|8|5) figura 15(a) o el conjunto de tres pentágonos y tres heptágonos figura 15(b). La repetición de este defecto en cadena (555-777) se llama formación haeckelitiana y ha demostrado ser muy estable.

La vacante múltiple (MV) puede ser creada removiendo varios átomos de carbono que a su vez generan distintos tipos de anomalías estructurales como las siguientes:

- i) Remover un patrón circular crea una formación en agujero (h), alrededor del cual, “cuelgan” átomos de carbono figura 15(c).
- ii) Quitar una cadena en zigzag (ZZ) de átomos de carbono deja un hueco unidimensional figura 15(e) y los enlaces de los carbonos se juntan de nuevo, sellando el hueco dejando sólo dos pentágonos y grupos de heptágonos (5|7s), a la cual se le llama núcleos de dislocación de borde (ED) figura 15(f). Dicho sellado tensa bastante el grafeno ya que jalan la estructura para cerrar los enlaces.
- iii) Es posible reducir la tensión añadiendo un átomo de carbono entre cada par de enlace de carbono, figura 15(g), así, el reacomodo, genera patrones de pentágono-pentágono-octágono (5/5|8). Esta cadena lineal de (5/5|8) es conocida como un límite específico de grano conocido como GBMV, figura 15(h).

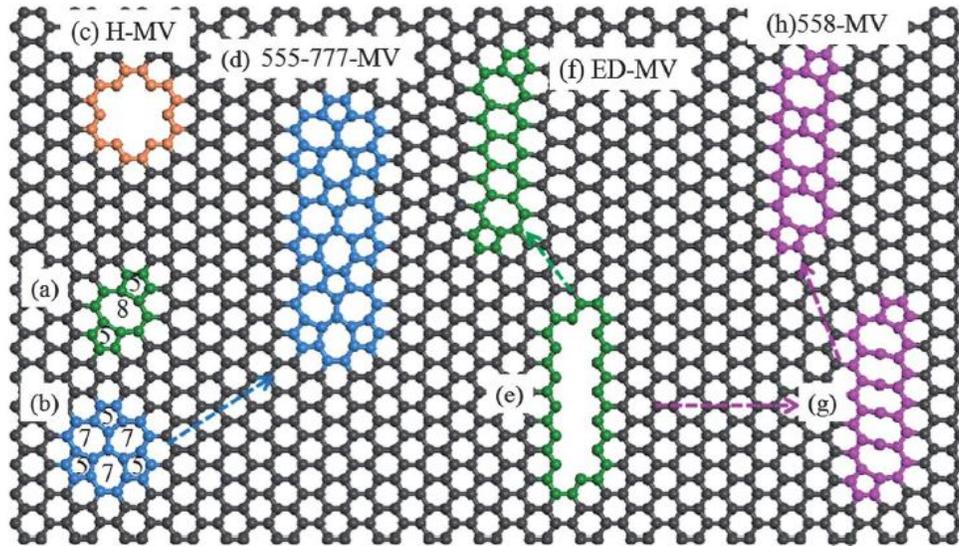


Fig. 16. Tipos de defectos en la estructura del grafeno. Fuente: [20].

La estabilidad de la estructura con los defectos multivacantes depende mucho del grosor de cuántas capas tiene el grafeno y es muy diferente del grafeno de un átomo de grosor.

Los defectos mono vacante y el multivacante en agujero (*h*) en hojuelas de grafeno son dependientes del tamaño y la hojuela puede “autorepararse” a altas temperaturas vía migración del defecto a un extremo del material. Los demás defectos sólo cambian la estructura del grafeno.

LUBRICACIÓN Y DESGASTE

Los métodos más tradicionales para controlar la fricción y desgaste involucran el uso de lubricantes sólidos y líquidos en las partes mecánicas en contacto, sin embargo, encontrar un lubricante que sea amigable con el ambiente y competitivo económicamente es difícil.

Lubricantes sólidos como MoS₂, Pb-Mo-S o grafito pueden proveer baja fricción y desgaste. Sin embargo, la mayoría de ellos requieren gran cantidad y en ocasiones recubrimiento total del material lubricante. [21]

De la misma forma sus procesamientos a altas temperaturas o “sputtering magnetrónico” (proceso mediante el cual, átomos de un objetivo sólido son eyectados debido a un bombardeo de partículas con cierta energía) limitan la aplicación de estos lubricantes.

Se prueba la capacidad de lubricación del grafeno:

En un ambiente de nitrógeno seco, a 900 mbar y a temperatura ambiente, se aplicó una solución de etanol con grafeno (Solution Processed Graphene Flakes SPGF) sobre superficies de acero inoxidable (AISI 440C, uno de los aceros más duros) deslizantes de tal forma que cuando el etanol se evaporó, sólo quedaron las capas de grafeno, en su mayoría de una sola capa. El grafeno ocupó no más allá del 25% de la superficie del acero. Se hace una prueba tribológica (figura 16) con una bola en disco de 9.5 mm de acero 440C a 600 ciclos a una carga de 2 N.

El coeficiente inicial de fricción entre aceros es variable y va de ≈ 0.3 a ≈ 1

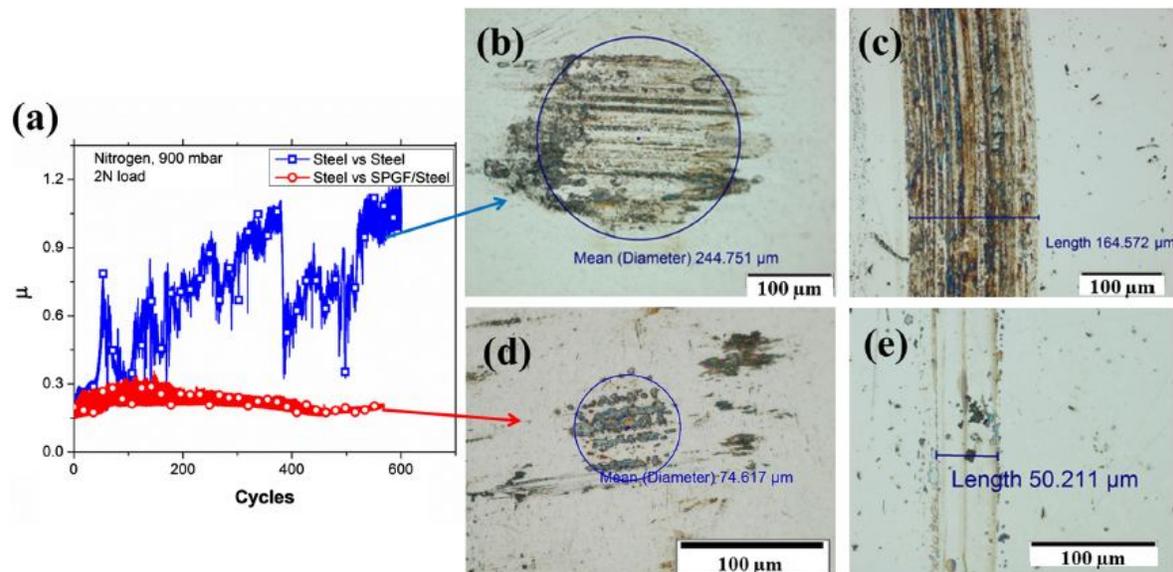


Fig. 17. Coeficiente de fricción del acero con y sin SPGF (a), desgaste en la prueba acero con acero (b y c) y contra SPGF/acero (d y e) en pruebas de 600 ciclos. Fuente: [21].

Se obtienen coeficientes de fricción μ del acero con SPGF, el cual logró reducirse casi seis veces que el máximo inicial y que van de 0.15 a 0.3.

Al hacer la comparación entre las figuras (a) y (d) se puede observar que la marca que deja la bola en la primera es de un diámetro de cerca de 245 μm mientras que en la segunda es de 75 μm .

Posteriormente se hace una prueba a 2000 ciclos bajo las mismas condiciones (figura 17) y vemos que en este caso, el coeficiente de fricción va en aumento a medida que los ciclos avanzan, lo cual nos habla de un desgaste del mismo grafeno, pero que aun así, disminuye bastante el coeficiente μ a comparación del caso acero/acero.

Posteriormente se hace una prueba variando la carga y se observa que el coeficiente de fricción aumenta al llegar a los 5 N, punto donde la lámina de grafeno desaparece casi inmediatamente.

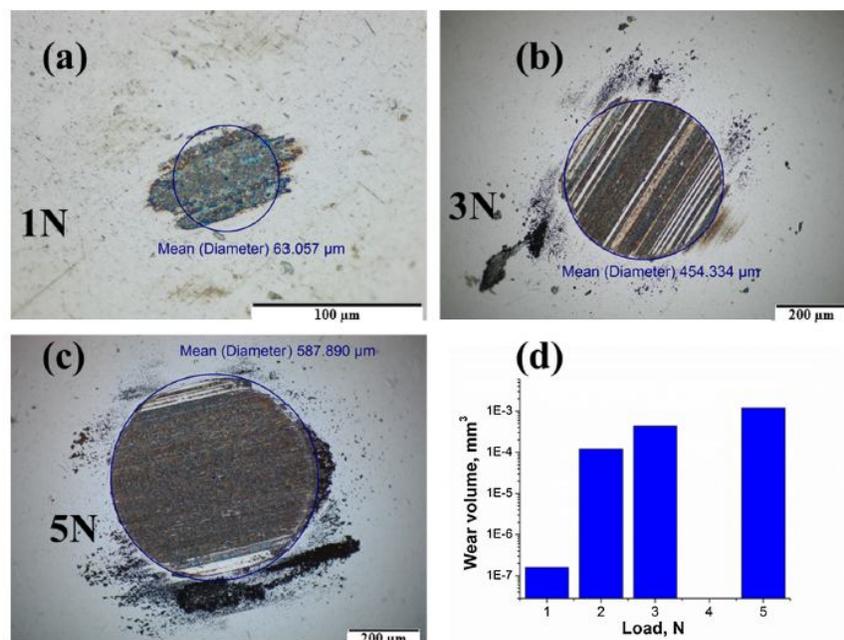


Fig. 18. Las marcas que deja la bola después de 2000 ciclos para SPGF/acero contra acero para: 1N de carga (a), 3N de carga (b) y 5N de carga. El volumen de desgaste a diferentes cargas está representado en (d). Fuente: [21].

Los valores de volumen y velocidad de desgaste a 600 y 2000 ciclos con carga de 2 N se muestran en la tabla 4:

Condiciones de prueba	Volumen calculado de desgaste. (600 ciclos) (mm ³)	Velocidad de desgaste (desgaste/carga-distancia) (600 ciclos) (mm ³ /N·m)	Volumen calculado de desgaste. (2000 ciclos) (mm ³)	Velocidad de desgaste (desgaste/carga-distancia) (2000 ciclos) (mm ³ /N·m)
Acero/Acero	3.7x10 ⁻⁵	3.28x10 ⁻⁷	4.9x10 ⁻⁴	13.05x10 ⁻⁷
Con SPGF	3.2x10 ⁻⁷	2.83x10 ⁻⁹	1.2x10 ⁻⁴	4.43x10 ⁻⁷
Mejora	99.13%	99.13%	75.51%	66.05%

Tabla 4. Valores de desgaste y velocidad de desgaste para diferentes ciclos.

El tiempo de vida del grafeno depende de los ciclos de trabajo y en gran parte de la carga a la que sea sometido, ya que bajo cargas de 5 N el grafeno es removido de la superficie deslizante instantáneamente, mientras que bajo carga de 1 N es capaz de aguantar hasta 2000 ciclos. [21]

En conclusión podemos decir que el grafeno ayuda bastante a disminuir el coeficiente de fricción, lo cual ayuda a disminuir a su vez el desgaste y por lo tanto a aumentar el tiempo de vida del material bajo condiciones de poca carga.

El grafeno inhibe también la tribocorrosión bajo condiciones de humedad, la oxidación y la formación de sales de nitruro.

2.3.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

MOVILIDAD ELECTRÓNICA

En física del estado sólido, es muy importante la movilidad electrónica, es decir, qué tan rápido se mueven los electrones a través de un metal o semiconductor cuando son atraídos por un campo eléctrico.

Esta propiedad es mucho más eficaz a la hora de tomar en cuenta qué tan bien conduce un material porque toma en cuenta la cantidad de portadores de carga de dicho material y el tiempo de colisiones entre átomos.

Cabe destacar que cualquier tipo de impureza en su estructura frena la movilidad electrónica en metales, semiconductores o en el grafeno, por lo que para los métodos de obtención definen qué tipo de aplicaciones se le dará al material.

La movilidad electrónica no es afectada fuertemente por la temperatura [14] a la que se encuentra sometido el material; sin embargo, esta movilidad se mejora mucho a temperaturas cercanas al cero absoluto.

En una capa de grafeno, la movilidad electrónica μ varía en el rango 2,000 – 15,000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ en dispositivos con soporte de Si/SiO₂. En la capa de grafeno suspendido (sin soporte) la movilidad se incrementa notablemente cuando se le aplica la técnica de “recocido por corriente”.

Cabe señalar que se ha encontrado que el recocido óptimo es alcanzado cerca de $0.2 \frac{\text{mA}}{\mu\text{m}}$ por cada capa, a una temperatura de 4 K. [13] Después del recocido, la movilidad del dispositivo a la temperatura inicial de 4 K alcanza un valor de 250,000 para una lámina monocapa (SLG) y de 350,000 – 500,000 para la bicapa (BLG) y la tricapa (TLG).

Se estima que la temperatura en el centro de la hoja de grafeno después del recocido alcanza un valor cercano a los 500 K lo cual es suficiente para efectuar la desorción de los residuos y adsorbatos volátiles.

Debido a la combinación entre movilidad electrónica y propiedades intrínsecas del grafeno (por su característica bidimensional), los electrones se comportan como partículas relativistas sin masa, en reposo y viajan a velocidades de 10^6 m/s [13].

COMPORTAMIENTO SEMICONDUCTOR

El grafeno presenta movilidad electrónica muy alta, por lo que para producir dispositivos electrónicos se necesita controlar su conductividad. A continuación se muestran cuatro maneras de crear la propiedad semiconductiva del grafeno:

1) BLG

El grafeno de dos capas, BLG es un semiconductor de “banda cero” [14] lo cual quiere decir que la energía que se necesita para pasar de la banda de valencia a la de conducción es prácticamente cero.

2) DOPADO

Es un método para crear materiales semiconductores extrínsecos en el que se agrega un elemento nuevo o “impureza” a un material base (semiconductor intrínseco) para darle nuevas propiedades eléctricas. De esta forma se convierten en materiales donadores o aceptores dependiendo del tipo de impureza que se inserte. [6]

Al igual que con el silicio, los elementos más empleados para dopar el grafeno son del grupo III-A y V-A de la tabla periódica, ya que son éstos tienen en su última capa de valencia 3 y 5 átomos respectivamente. Dado que el carbono se comporta como el silicio y tiene 4 electrones en su última capa de valencia se puede dopar al material con nitrógeno o boro para hacerlo de tipo N o P, como se aprecia en la figura 19. [23]

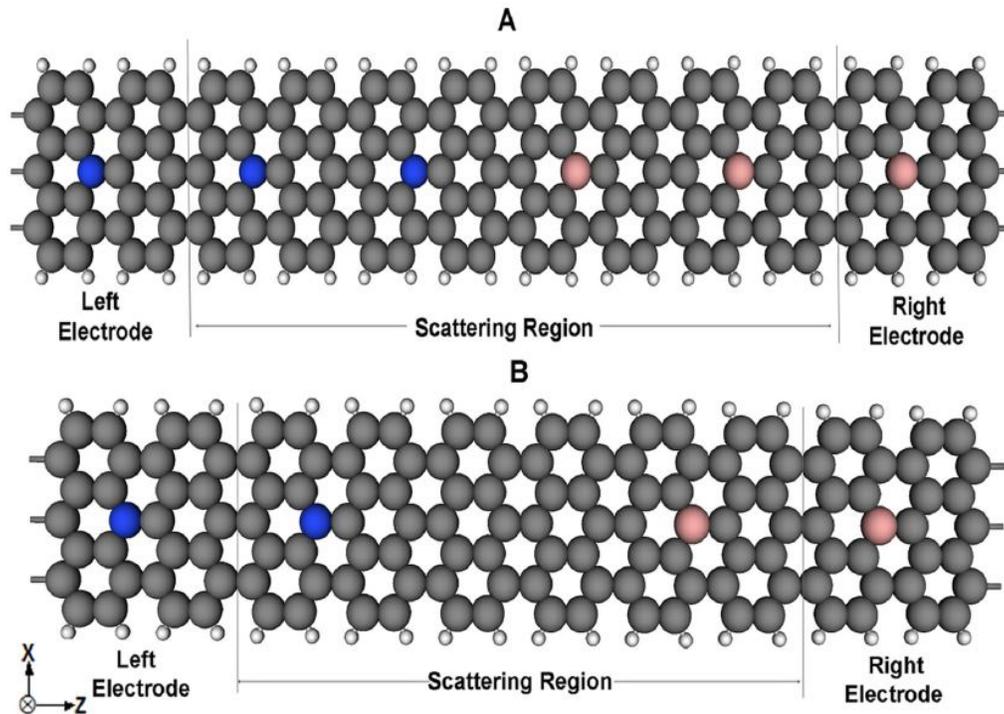


Fig. 19. Las posiciones de los átomos de impurezas se muestran en rosa para el boro y en azul para el nitrógeno. La unión A no tiene regiones separadas. La región B sí tiene regiones separadas. Fuente: [23].

Este tipo de uniones P-N pueden ser usadas para diseñar dispositivos electrónicos moleculares como nano-diodos y nano transistores.

3) MODIFICANDO EL EJE CRISTALOGRÁFICO DEL GRAFENO

Como se mostró en la sección 2.1, solamente existen dos formas de orientación del perímetro del grafeno sin defectos: en zig zag y en disposición de sillón.

Se demostró que cada una de ellas tiene propiedades eléctricas distintas y que si un pedazo de grafeno donde predomina la forma de zig-zag tiene un comportamiento metálico por poseer una banda prohibida muy pequeña, la cual es la transición entre la banda de valencia y la de conducción. A su vez, la forma de sillón en la orilla genera propiedades semiconductoras. [23]

4) VARIANDO EL ANCHO DEL GRAFENO

El grafeno puede comportarse como semiconductor o metal dependiendo de su ancho (átomos de carbono, como se presenta en la figura 20) con respecto a una referenciar. Al reunir varias secciones de grafeno se crea una puerta de un transistor y así se controla la conductividad. [22]

La figura 20 muestra la geometría propuesta para la puerta de un transistor tipo FET que es creada por tres secciones de “sillón”. La sección de en medio es elegida de tal forma que el número de átomos de carbono a través del ancho (denotado por W_2) está regido por la proporción $3p$ (p es un número entero).

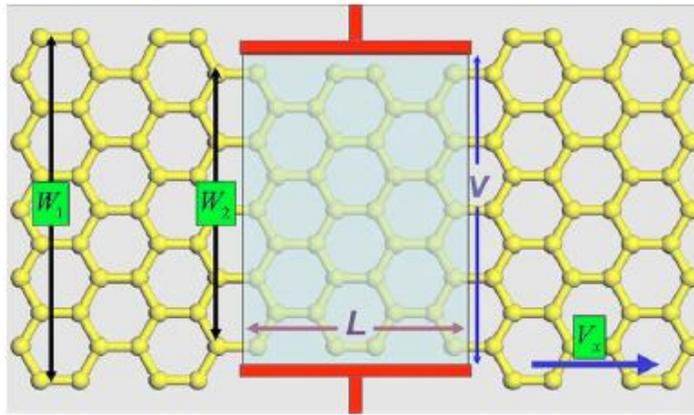


Fig. 20. Una puerta de largo L hecho de grafeno, con anchos W_1 y W_2 . Un potencial eléctrico V es aplicado para controlar la puerta. La corriente es producida por el potencial V_x en la dirección x . Fuente: [22].

Como resultado, la sección central exhibe una brecha de energía y se comporta de forma semiconductor. Esta nanocinta está conectada con las dos aledañas que contienen propiedades metálicas, mismas que obtienen al ajustar W_1 de tal forma que se tenga $3p + 1$ ó $3p + 2$ átomos de carbono. Un número $3p + 2$ de átomos de carbono, tiene comportamiento totalmente metálico.

Debido a la naturaleza semiconductor de la nanocinta central, la conductancia es muy pequeña. Sin embargo, cuando se aplica un potencial en la sección céntrica, la banda de energía en la parte central se mueve en cantidad eV , y la

conductividad se incrementa. De esta forma se puede inducir un comportamiento semiconductor para limitar la corriente.

En la figura 21 se observa una vista esquemática de la estructura de bandas para las tres secciones de la puerta.

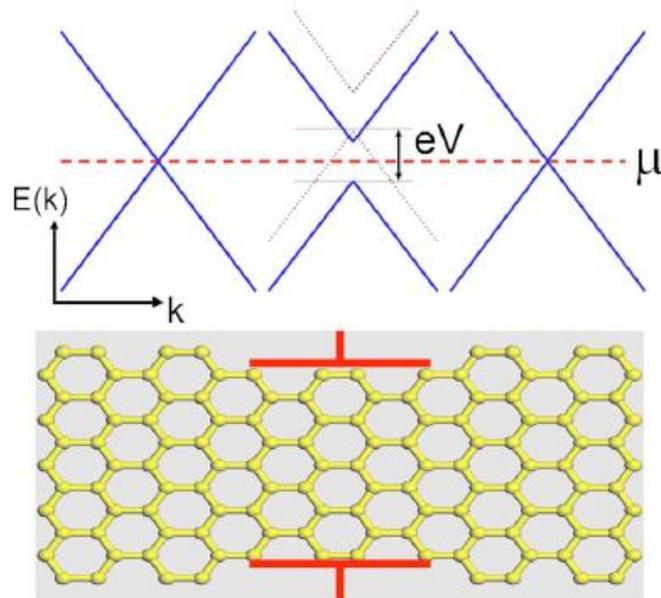


Fig. 21. Representación esquemática de las bandas en cada sección. La sección media presenta una brecha de energía, mientras que las otras secciones son metálicas. Fuente: [22].

COMPORTAMIENTO RESISTIVO

El comportamiento resistivo en el grafeno se puede lograr modificando el largo L de la puerta donde se aplicará el voltaje, ya que el número de átomos de carbono que conforman la anchura de la misma varía.

La figura 22 exhibe el comportamiento de la conductancia para tres diferentes largos centrales ($N_L = 8, 12$ y 16). Se observa una relación inversamente proporcional entre el largo de la sección central (N_L) y la conductancia pero solamente en la región de bajas energías (0.0 a 0.3 eV), mientras que la conductancia es muy similar cuando la puerta de control de voltaje aumenta.

De esta forma podemos crear diversas resistencias eléctricas variando el largo L de la puerta para voltajes bajos.

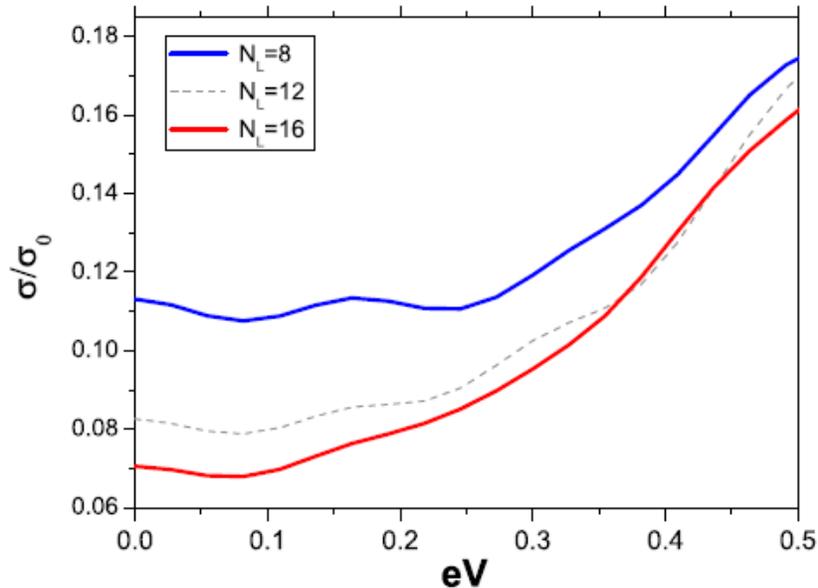


Fig. 22. Conductancia para tres diferentes largos (L) de la sección central, a $T = 30$ K, en dependencia del voltaje de la puerta. N_L es el número de columnas verticales de átomos en la sección central. Fuente: [22].

EFEECTO HALL CUÁNTICO A TEMPERATURA AMBIENTE

En un conductor por el cual circula una corriente I , al aplicarle un campo magnético perpendicular a su movimiento se genera una deflexión en la trayectoria de I . Este cambio de ruta de los electrones genera que los portadores de carga se separen y concentren a lados opuestos de dicho conductor generando un voltaje llamado voltaje de Hall (ver figura 23). A su vez, se puede medir la resistencia que hay entre los puntos donde se genera el voltaje de Hall.

El efecto Hall cuántico aparece en sistemas bidimensionales cuando los materiales se encuentran a temperaturas cercanas al cero absoluto y bajo fuertes campos magnéticos.

La relación que existe entre el voltaje de Hall y la corriente que circula por el conductor es un valor constante, múltiplo de $2.5812 \text{ K}\Omega$. Esta cuantización es muy exacta y permite calibrar sensores con una alta precisión.

En el grafeno esta propiedad se encuentra a temperatura ambiente. [14]

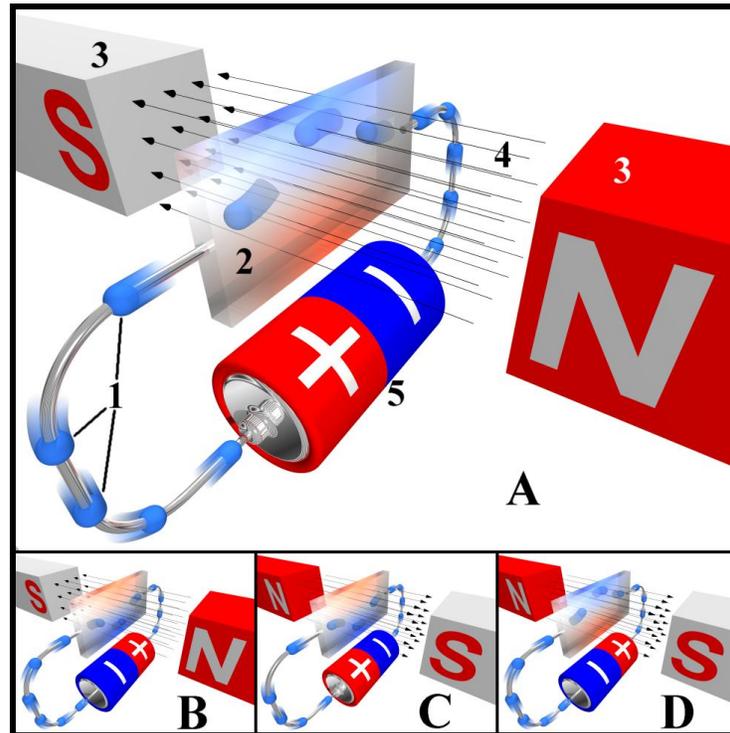


Fig. 23. Efecto Hall esquematizado. Fuente: [52].

EFEECTO TERMOELÉCTRICO

Es la conversión de la diferencia energética producida por temperatura a diferencia de potencial y viceversa.

En algunos materiales se presenta esta propiedad a temperaturas muy cercanas al cero absoluto, cuando son impactadas por energía de un láser de alta potencia. En el grafeno se encuentra esta propiedad en un rango de temperaturas entre 10 K y 300 K [28], bajo la acción de radiación electromagnética no más intensa que la solar. [27]

El coeficiente *Seebeck* es una medida de la magnitud de un voltaje termoeléctrico inducido en respuesta a una diferencia de temperatura a través de un material dado. Para el grafeno ese coeficiente es de $12 \mu\text{V/K}$ a una temperatura de 40 K.

En la tabla 5 se pueden apreciar los coeficientes *Seebeck* referenciados al platino para diferentes materiales. [29]

Material	Coeficiente <i>Seebeck</i> referido al platino ($\mu\text{V/K}$)
Selenio	900
Telurio	500
Silicio	440
Germanio	330
Oro, plata, cobre	6.5
Carbono	3.0
Platino	0 (referencia)
Niquel	-15
Bismuto	-72

Tabla 5. Valores de los coeficientes *Seebeck* para varios elementos. Fuente: [29].

2.3.3 PROPIEDADES TÉRMICAS

EXPANSIÓN TÉRMICA NEGATIVA

La mayoría de los materiales tienen coeficiente de expansión térmica (TEC por sus siglas en inglés) positiva, es decir que se expanden cuando se calientan y se contrae cuando se enfría. El grafeno posee un TEC negativo en el rango de 30 a 400 K. [3]

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El grafeno tiene una conductividad térmica muy alta a través de los enlaces carbono-carbono. La conductividad térmica del grafeno está aproximadamente entre los 2000 y los 5000 W/m·K en las cercanías de la temperatura ambiente y de aproximadamente 600 W/m·K a una temperatura de 600 K. La tabla 6 muestra una comparación entre algunos materiales a temperatura ambiente.[3]

Material	Conductividad térmica [W/m·K]
Grafeno	2000-5000
Plata	429
Cobre	400
Oro	317
Aluminio	209
Silicio	150

Tabla 6. Comparación de la conductividad térmica de algunos materiales.

Fuente: [3].

Cuando el grafeno se soporta sobre algunos sustratos, el valor K disminuye a cerca de $600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Aun así este valor de K es bastante favorable comparado con el cobre y el silicio, lo que lo hace un material muy atractivo para el manejo de la temperatura como en el caso de los disipadores de calor para la industria electrónica.

3. ESTUDIO DEL PROBLEMA

Una prótesis es un elemento desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente y en particular para el amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, dando una percepción de totalidad al recobrar movilidad y aspecto.



Fig. 24. Prótesis de dedo, empleado en Egipto hacia 600 A.C. Fuente: [10].

A lo largo de la historia, las prótesis han evolucionado a la par de la tecnología y de los conocimientos en materiales. Un ejemplo que data de aproximadamente 2500 años es el mostrado en la figura 24. Así pues, han pasado desde prótesis estéticas de madera o metal hasta algunas con mecanismos de sujeción, ganchos o accesorios como unidad terminal, tales como anillos, ganchos y otros instrumentos metálicos que brindaban la capacidad de realizar trabajo de fuerza o de precisión. En el siglo XIX se empiezan a usar nuevos materiales como polímeros naturales y se incluyen resortes que dan paso al desarrollo de nuevos mecanismos para la fabricación de transmisión de la fuerza. Es en Alemania donde las prótesis dan un gran salto evolutivo gracias al cirujano Ernst Ferdinand Sauerbruch. Su diseño logra conectar la musculatura flexora del antebrazo con el mecanismo de la mano artificial mediante varillas de marfil que hace pasar a través de túneles cutáneos y así moverla debido a la contracción muscular. [8]

Las prótesis mioeléctricas comienzan a surgir en 1960 en Rusia. Este tipo de prótesis funciona con los pequeños potenciales eléctricos producidos durante la contracción de las masas musculares del muñón siendo estos conducidos y amplificados para obtener el movimiento fino de la prótesis de mano. Las prótesis de mano han evolucionado favorablemente en tamaño, velocidad y acciones como puede apreciarse en la figura 25.

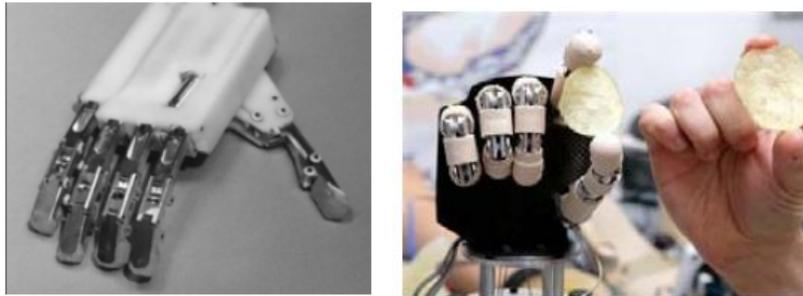


Fig. 25. Prótesis actuales a) Prótesis de Toronto, b) Mano *Cyberhand*. Fuente: [8].

La mano realiza principalmente dos funciones: táctil y presión. [8]

Los principales tipos de presión de la mano son (ver figura 26): presión en pinza fina con la punta de los dedos, presión en puño, gruesa o en superficie; presión en gancho y presión en llave. [8]

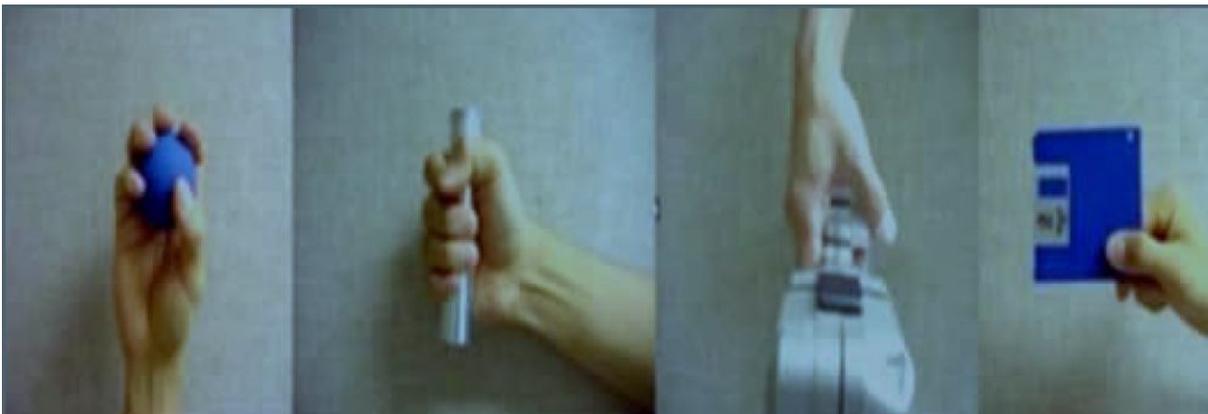


Fig. 26. Formas de presión de la mano. Fuente: [8].

El tacto desarrolla totalmente la capacidad de la mano para mejorar el control de posición fina, para medir la fuerza prensora, detectar textura de materiales, distinguir vibración, temperatura, presión, dolor, peligro.

El dedo pulgar representa el miembro más importante de la mano ya que sirve para completar la función de pinza, función de más uso en la mano. Sin el pulgar, la capacidad de la mano se reduce hasta en un 40%.

Toda prótesis activa necesita una fuente de energía, un sistema de transmisión de energía mecánica; un sistema de mando o acción y un dispositivo prensor o efector final. [8]

Las prótesis de mano se dividen por su función en pasivas y activas.

Las primeras, como su nombre lo indica, no tienen alguna función más allá de restablecer el aspecto exterior. No proveen funciones de agarre o movilidad.

Las prótesis activas se dividen en: [8]

- Mecánicas. Su funcionamiento se basa en la extensión de una liga por medio de un arnés y de la relajación del músculo para la apertura o el cierre.

Dado que estas prótesis son accionadas por el cuerpo, es necesario que el usuario posea al menos un movimiento general de expansión del pecho, depresión y elevación del hombro, abducción y aducción escapular y flexión glenohumeral.

- Eléctricas. Usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, muñeca o codo con batería recargable. Estas prótesis se controlan de varias formas, ya sea mediante un servo-control, control con botón pulsador o botón con interruptor de arnés.

Son más costosos en cuanto a adquisición, reparación y mantenimiento, además de que no se puede exponer a un medio húmedo.

- Neumáticas. La fuente de energía proviene de la producción de dióxido de carbono comprimido, que proporciona gran cantidad de energía, lo cual lo hace también peligroso.

- Híbridas. Combina la acción de la prótesis mecánica y la eléctrica. Usan con frecuencia un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado en forma mioeléctrica (gancho o mano). La mayor ventaja es la de controlar simultáneamente la flexión y la extensión del codo al abrir o cerrar la mano/ganchos eléctricos o mientras se gira la muñeca.

Pesa menos y es menos costosa que una prótesis similar con un codo y una mano accionados por electricidad

- Mioeléctricas. Son prótesis eléctricas basadas en el concepto de que siempre que un músculo en el cuerpo se contrae o se flexiona, se produce una pequeña señal eléctrica que es creada por la interacción química en el cuerpo. Esta señal es muy pequeña (5 a 20 μV) e interacciona con la prótesis a través de electrodos, la señal es amplificada, filtrada y procesada por un controlador que conmuta los motores encendiéndolos y apagándolos en la mano, muñeca o codo. Estas prótesis son hoy en día el tipo de miembro artificial con más alto grado de rehabilitación. Sintetizan el mejor aspecto estético, tienen gran fuerza y velocidad de prensión, así como muchas posibilidades de combinación y ampliación aunque debido al peso del sistema de batería y de los motores eléctricos, ésta opción suele ser más pesada que otra.

3.1 TIPOS DE PRÓTESIS EXISTENTES

La presente investigación hace énfasis en las prótesis más avanzadas por su complejidad y gran campo de aplicación del grafeno, ya que el objetivo no es regresar a un diseño primitivo de prótesis, sino ver hacia el futuro y mejorar las características de las actuales.

BEBIONIC3

El *bebionic 3* (ver figura 27) es una prótesis mioeléctrica multiarticulada, diseñada y manufacturada en el Reino Unido por la empresa RSLSteeper. Cada dedo es controlado por un motor, permitiendo a la mano moverse en 14 formas de sujeción

seleccionables; tiene control de velocidad para posicionamiento de precisión, dos posiciones seleccionables para el pulgar, sujeción automática con sensor de desliz y autocorrección [33]. Cuenta con un software que permite cambiar ajustes que dependerán de la respuesta del control de las señales musculares del usuario, las cuales están limitadas cuando hay amputaciones de mayor nivel.[34] De esta forma el usuario podrá ajustar el funcionamiento del electrodo, resetear las señales de co-contracción, cambiar las características de sincronización de señales, elegir entre uno o dos electrodos o control de transductor y habilitar la característica de auto agarre.



Fig. 27. *BeBionic 3*. Fuente: [33].

Cuenta además con un guante cosmético de 19 tonos de piel (ver figura 28) hecha de silicon para darle una apariencia humana.



Fig. 28. Guante cosmético. Fuente: [33].

Operada por contracción muscular, tiene cuatro formas de conexión de muñeca. Cuenta con un software llamado bebalance que permite al sistema de bebionic ser programado inalámbricamente con ajustes de control específicos para cada usuario. Datos interesantes de prótesis Bebionic 3 están señalados en la tabla 7. [33] Detecta señales de hasta 10 μV y su precio oscila entre los 25,000 y 35,000 dólares. Usa baterías de 2200 mAh y 1300 mAh de capacidad.

Máxima fuerza de empuñadura	140.1 N
Tiempo mínimo de apertura/cierre de empuñadura	1 s
Máxima carga estática de agarre en gancho	45 Kg
Máxima carga individual de dedo en gancho	25 Kg
Fuente de alimentación	7.4 V
Duración de batería	1 día
Peso	0.550 Kg - 0.598 Kg

Tabla 7. Características de la *bebionic 3*.

EH1 MILANO

La empresa italiana Prensilia, produjo un prototipo de prótesis de mano para fines de investigación. Tiene un tipo de comunicación RS232 a 115200 Baudios [31] con conexión a PC por medio de cable USB, no es a prueba de agua, tiene seis motores de corriente directa para articular los movimientos de flexión/extensión de los cinco dedos, además del movimiento de abducción/aducción del pulgar. El movimiento no es transmitido de los dedos a los motores para evitar que se abra la mano en caso de fallar el suministro de energía. Cada dedo está compuesto por dos falanges donde el más próximo a la palma o falange proximal está fabricado

de aluminio y la falange proximal es de caucho. La transmisión mecánica del movimiento en los dedos se realiza mediante cables *Bowden*. [30] En la figura 30 se puede observar una mano extendida en donde se aprecian las falanges. Si se desea se puede pedir con movimiento de la muñeca. Cuenta con 6 encoders para los motores y así medir la posición de los dedos, seis sensores para la corriente del motor, doce sensores de proximidad que detectan cuando el dedo está completamente flexionado/abducido o extendido/aducido; cinco sensores de tensión de tendones y un convertidor analógico a digital de 10 bits. [30] Las principales características de EH1 Milano están reflejadas en la tabla 8 y en la figura 30 se aprecia el articulado de los dedos y en particular, del movimiento de una falange y su correspondiente motor que le permitirá efectuar una correcta flexión/extensión.



Fig. 29. EH1 MILANO. Fuente: [30].

Máxima fuerza de empuñadura	50 N
Tiempo mínimo de apertura/cierre de empuñadura	1 s
Máxima carga estática de agarre en gancho	5 kg
Grados de libertad	16
Fuente de alimentación	8 V – 7 A
Peso: mano y muñeca	1.42 kg

Tabla 8 Características de EH1 Milano.

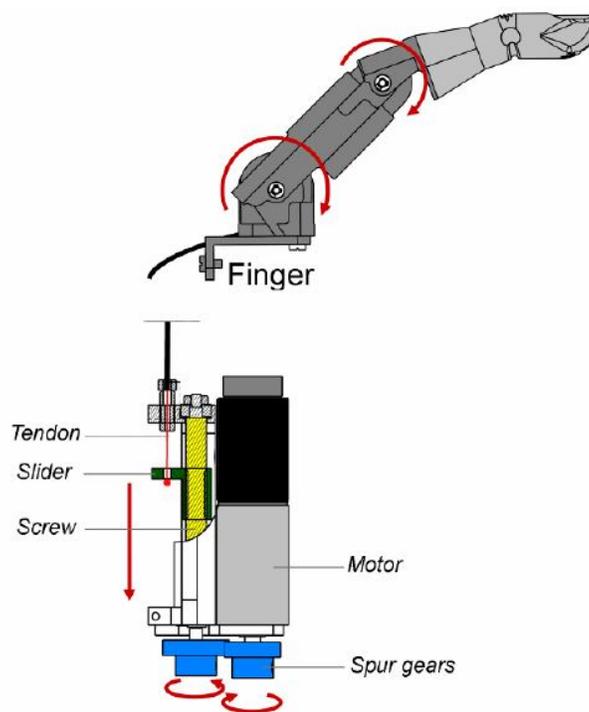


Fig. 30. GDL de los dedos y mecanismo usado para la flexión/extensión.

Fuente: [30]

En la figura 31 se muestra la utilidad en la prensión de cuatro formas diferentes de objetos pequeños y medianos:

- Agarre lateral.
- Agarre pulgar - índice (pellizco).
- Agarre tridigital
- Agarre cilíndrico.

Estos tipos de agarre pueden ser efectuados con tres niveles de fuerza: Bajo medio y alto.

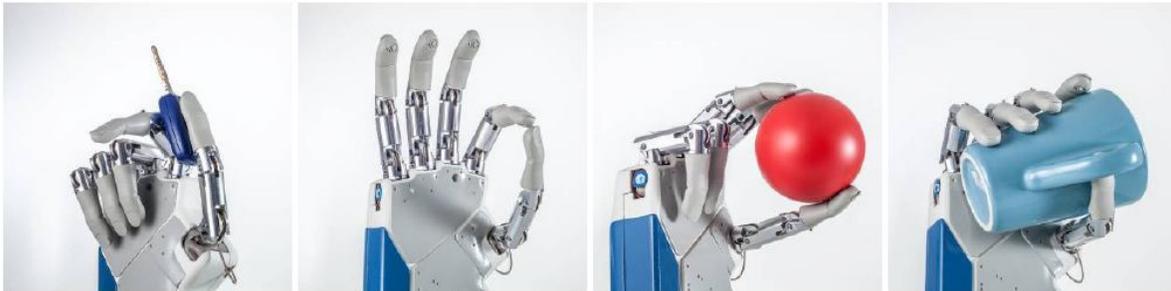


Fig. 31. Cuatro tipos de agarre de EH1 Milano. Fuente: [30].

En cuanto al mantenimiento, tiene la posibilidad de reemplazar los tendones, engrasar los engranes, reemplazar el sensor de tensión en los tendones.

IH2 AZZURRA

Este prototipo, desarrollado en 2011, es muy similar al EH1 Milano solamente que más liviano (ver tabla 9) lo que será benéfico para el usuario aunque tiene una menor fuerza de empuñadura (35 N), cuenta con cinco motores de corriente directa: uno para la flexión/extensión del pulgar, otro para el índice, otro para el medio y un solo motor para el mismo movimiento del anular y meñique juntos, además de tener otro motor para la aducción/abducción del pulgar.

En el año 2013 hizo una mejora sustancial dando al paciente la capacidad de sentir a través de la prótesis, lo cual puede mejorar el control y uso de la misma.



Fig.32. Mano IH2 Azzurra. Fuente: [32].

Máxima fuerza de empuñadura	35 N
Tiempo mínimo de apertura/cierre de empuñadura	1 s
Máxima carga estática de agarre en gancho	5 kg
Grados de libertad	11
Fuente de alimentación	8 V-5 A
Peso	0.640 kg

Tabla 9. Características del prototipo de mano IH2 Azzurra. Fuente: [32].

I-LIMB ULTRA REVOLUTION

Este prototipo fue desarrollado por Touch Bionics, tiene 24 posiciones pre programadas incluyendo una personalizada. Cada dedo tiene su propio motor y el pulgar tiene dos grados de libertad. Usa baterías de polímero de litio de 1,300 mAh y 2,000 mAh. [35]

A través de *biosim*, programa por el cual la prótesis se comunica por bluetooth a la computadora o i-pod se pueden seleccionar las características y patrones de

agarre deseadas. Se ofrece un entrenamiento para mejorar el control; posee un procedimiento para obtener el diagnóstico de funcionamiento de la mano.

Los 24 movimientos se activan a través de cuatro “disparadores musculares”:

Mantener abierto: Señal de apertura para un tiempo determinado (2-3 segundos)

Co-contracción: La señal de abrir y cerrar deben ser activadas al mismo tiempo

Doble impulso: Dos señales rápidas

Triple impulso: Tres señales rápidas



Fig. 32. Mano i-limb ultra revolution. Fuente: [35].

Máxima fuerza de empuñadura	100 N
Tiempo mínimo de apertura/cierre de empuñadura	1.2 s
Máxima carga estática de agarre en gancho	90 kg
Fuente de alimentación	7.4 V – 5 A
Peso	0.443 kg – 0.515 kg
Tiempo de recarga de batería	2 - 4 h

Tabla 10. Características del prototipo i-limb revolution.

Cuenta con un guante cosmético con 10 tonos de piel



Fig. 33. Guante cosmético. Fuente: [35].

Se puede añadir una muñeca multiflexora que puede ser usada en modo pasivo o modo bloqueado. El modo pasivo permite la flexión/extensión SPRINGLOADED y desviación lateral. El modo bloqueado permite la dorsiflexión a 30°, 0° neutral y flexión palmar a 30°



Fig. 34. muñeca multi flexora. Fuente: [35].

i-limb digits

Es una herramienta para mejorar las funciones individuales de manos con pérdida parcial o con deficiencias. Los candidatos a usar el i-limb digits presentan pérdida o deficiencia distal a la muñeca y proximal a la unión metacarpofalángica de 3, 4 ó 5 dedos, mientras que pacientes con pérdida de 1 ó 2 dedos son candidatos siempre y cuando los dedos sean el pulgar o índice y dedo medio.

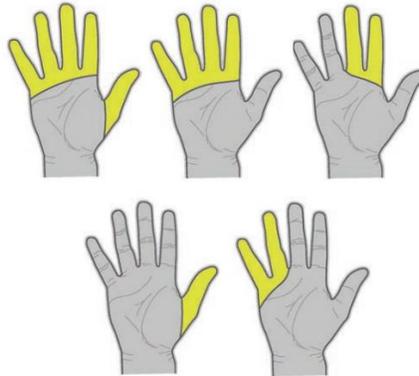


Fig. 35. Tipos de pérdida o deficiencia digital que son candidatos para usar i-limb digits. Fuente: [36].

Cada dedo tiene su propio motor. Incluye una muñequera que contiene el PCB y las baterías de 3.7 V.



Fig. 36. Prensado de un objeto con i-limb digits. Fuente: [36].

Los sensores usados son electrodos o un FSR que es activado por los movimientos de la mano residual. Se comunica vía Bluetooth con una aplicación de un i-pad o con la computadora. Viene con 14 movimientos [36]

Levantarse con toda la mano	80 kg
Levantarse con un dedo	20 kg
Cargar con toda la mano	100 kg
Cargar con un dedo	25 kg
Cargar con el pulgar	25 kg
Tiempo de recarga de la batería	2 h

Tabla. 11. Propiedades de i-limb digits [36].

Mano MICHELANGELO

El prototipo fue creado por la empresa Ottobock. Tiene un motor para cada dedo y el pulgar tiene dos grados de libertad que se ajustan manualmente o por señales mioeléctricas. Tiene articulación en la muñeca para flexión, extensión y rotación. Se comunica con la computadora a través de bluetooth. Usa baterías de Li-Ion de 1500 mAh de capacidad. Tiene 7 posiciones. Cuenta con la opción de un guante cosmético. [37]



Fig. 37. Michaelangelo Hand. Fuente: [37].

Máxima en agarre de oposición	70 N
Tiempo mínimo de apertura/cierre de empuñadura	0.36 s
Fuente de alimentación	11.1 V
Tiempo de recarga de batería	3.5 h
Peso de la mano	0.420 kg
Peso de la muñeca	0.180 kg
Peso del sistema de control	0.015 kg
Peso de una batería	0.140 kg

Tabla 12. Características de la mano Michaelangelo. Fuente: [37].

3.2 LIMITANTES

PESO

Un problema en general es la incompatibilidad de los tamaños y pesos de las prótesis, lo cual podría llegar a causar molestias musculares dependiendo de si la prótesis excede el peso que tendría normalmente la mano de un paciente.

La masa de la mano de una persona varía de acuerdo a su masa corporal; para el hombre el valor correspondiente es del 0.6% y para las mujeres es de 0.5% [39]. En la tabla 13 se muestran los valores de masa corporal y de mano para hombres y mujeres.

Rango de edad/sexo	Masa corporal	Masa de la mano
Hombres de 18 a 25 años	70.4 kg	0.422 kg
Mujeres de 18 a 25 años	62.9 kg	0.314 kg

Hombres de 40 a 50 años	77.3 kg	0.463 kg
Mujeres de 40 a 50 años	72.2 kg	0.361 kg

Tabla 13. Edades, masa corporal y de mano. Fuente: [38].

Haciendo un promedio tenemos que para el hombre el peso de la mano es de 0.4425 kg y para la mujer 0.3375 kg.

El peso de las prótesis de mano que se venden para consumidores varía entre 0.420 kg y 0.598 kg y en promedio tenemos un valor de 0.509 kg.

En el caso del hombre la prótesis excede en 66.5 g el peso ideal y en el caso de la mujer 171.5 g. En ambos casos, este excedente no es muy significativo pero podría crear tensión y dolor muscular un tiempo hasta que el paciente se acostumbre a la diferencia de peso.

BATERÍAS

Las baterías para prótesis actuales tienen en general un tiempo de vida cercano a las 12 h. Es claro que ese cálculo no es preciso, debido a que existen varios factores que pueden aumentar el consumo de energía.

En general, los proveedores de prótesis ofrecen dos tipos de baterías de acuerdo al tipo de uso: normal y alto, donde el máximo valor es de 2200 mAh. La batería se puede agotar aunque la prótesis no esté en funcionamiento porque en ocasiones, las señales mioeléctricas se hacen más potentes a medida que se tiene más experiencia, lo que motiva un mayor consumo de energía [35].

En ocasiones puede haber señales presentes incluso cuando no se utiliza la mano y se encuentra en *stand-by*, situación que merma el tiempo de actividad de la prótesis.

El tiempo de recarga de la batería es hasta de 3.5 h, situación que hace más conveniente tener dos juegos de baterías en caso de que una se acabe antes de finalizar el día.

En cuanto al tiempo de vida se tienen aproximadamente de 300 a 500 ciclos antes de que la capacidad máxima baje a un 80% y un promedio de 1000 recargas en total, [40] es decir, cerca de dos años y medio.

MANTENIMIENTO

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. En este proceso las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden.

El desgaste puede causar deformación de los elementos en contacto, vibración, grietas, cavidades, y fallas mecánicas. Los elementos móviles de las prótesis están expuestos a desgaste por fatiga, abrasión o corrosión.

Al ser la mano una extremidad de uso diario, el continuo uso genera desgaste en los elementos móviles y es necesario reemplazar las piezas periódicamente como mantenimiento preventivo, pero hay ocasiones que no se proveen los elementos necesarios para reemplazar todas las piezas por lo cual un mantenimiento correctivo es necesario.

FUNCIONALIDAD

Actualmente las funciones de las prótesis de mano ya no están limitadas al cierre y apertura de la pinza, la diferencia entre éstas radica en la cantidad de movimientos que tienen pre-programados. La mayor cantidad de posiciones que tiene una prótesis es de 24. Para el caso de la muñeca se tienen los dos grados de libertad que tiene una mano normal. Estas prótesis no tienen movimientos de abducción/aducción en sus dedos, la movilidad independiente de los dedos está restringida y en algunos casos hay que mover mecánicamente el pulgar para adoptar nuevas posiciones de agarre.

Las prótesis no absorben el impacto como una mano normal y no cierran el lazo de control a través del tacto sino que tienen sensores internos de los cuales la persona no puede saber qué tanto está apretando.

El tacto es un sentido muy útil para la supervivencia del hombre, pues actúa como un mecanismo de alarma en situaciones potencialmente peligrosas o anómalas. La falta de este sentido en la prótesis evita la detección de peligros para la persona y para la misma prótesis como son: fuentes de calor y de frío, objetos punzo cortantes, presión excesiva, sustancias corrosivas, etc.

Las nuevas modificaciones hechas a la mano IH2 Azzurra contienen un sensor que le permite a la persona sentir. Esta prótesis es para fines de investigación solamente.

COSTO

Los costos de las prótesis son muy elevados. Aproximadamente de 700,000 pesos que no incluyen la operación para insertar los electrodos, los accesorios ni la rehabilitación.

4. PROPUESTA DE DISEÑO

En la sección 2.2 se muestran las diversas formas de obtención del grafeno. Muchas de ellas son fáciles de lograr, con materiales encontrados fácilmente en los laboratorios y siendo la materia prima barata. Actualmente se están probando variantes a estos métodos que sirven para mejorar el procedimiento y elevar la calidad, el volumen, área, disminuir la cantidad de defectos, etc.

Por sí mismo el grafeno tiene propiedades superiores a las de otros materiales además de gran versatilidad de usos, pero la proyección de las propiedades de los materiales a través de la simulación nos deja ver que estas se pueden mejorar mucho más.

La figura 38 muestra la comparación de las propiedades del grafeno con otros materiales.

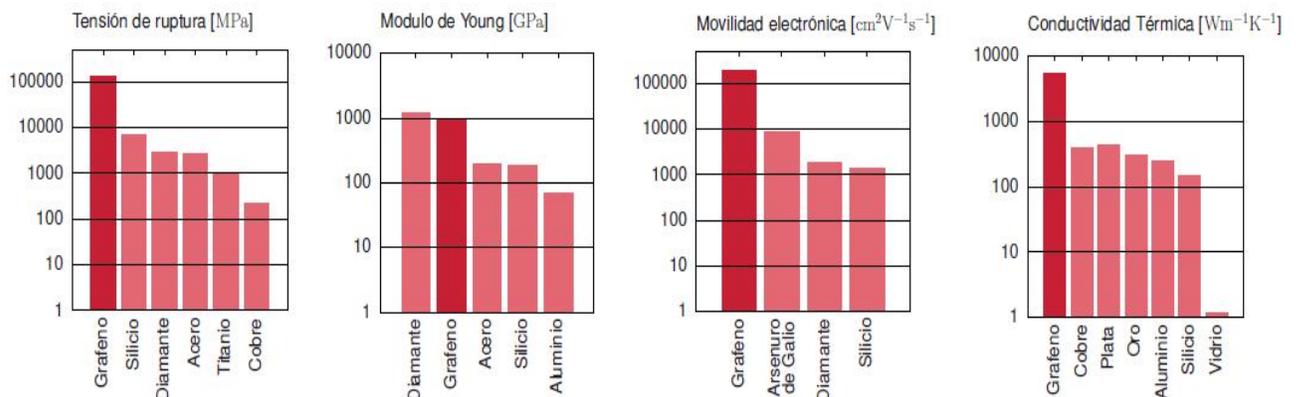


Fig. 38. El grafeno y sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, comparadas con otros materiales. Fuente: [41].

Debido al bajo costo que pueden llegar a tener los procesos de obtención, es factible pensar que los materiales basados en grafeno pueden tener fácil y relativamente rápida aplicación en varios campos de la ingeniería.

En cuanto al diseño de prótesis, las características del nuevo material pueden ser aplicadas en tres áreas del diseño principalmente, éstas son: electrónica, mecánica y térmica

ELECTRÓNICA

La base de la electrónica digital es el transistor. El tamaño actual es de 22 nm y los microprocesadores actuales tienen alrededor de 1.4×10^9 transistores con tecnología tri-puerta en una superficie de 160 mm^2 . [43]

Las posibilidades que existen de crear un transistor con grafeno son detalladas en la sección 2.3.2. Es precisamente la bidimensionalidad que tiene el material que permite meter más transistores por unidad de volumen, así como resistencias, capacitores y conectores entre dispositivos.

Tal crecimiento en la cantidad de elementos electrónicos, sobre todo en la cantidad de transistores, puede aumentar la capacidad de procesamiento del micro controlador, permitiendo movimientos más rápidos y precisos.

Los músculos son capaces de contraerse en tiempos muy cortos, hacia los 0.01 segundos [39], lo cual es 36 veces más veloz que una prótesis de mano con la apertura/cierre más rápida y 120 veces que la más lenta.

Usar transistores de grafeno en la PCB de la prótesis puede aumentar sustancialmente la velocidad de manipulación, haciendo más eficientes los movimientos.

La fuerza de agarre en la mano promedio para mujeres es de $245 \pm 49 \text{ N}$ y para hombres es de $445 \pm 67 \text{ N}$ [44]. Tomando en cuenta que la máxima fuerza de empuñadura de una mano protésica es de 140 N, vemos que hay limitaciones en cuanto a funcionalidad.

Existe un actuador hecho con un cristal de polidiacetileno (PDA) y una lámina de grafeno que puede solucionar este problema. Sus dimensiones son de 25 mm x 4 mm y 10-12 μm de grosor y con peso de 1 a 2 mg, genera mayor esfuerzo que los músculos naturales ($\sim 0.4 \text{ MPa}$) aplicando corriente directa, además no presenta

síntomas de desgaste o rotura después de cientos de ciclos y con ángulos de flexión no más allá de 90°. [45].

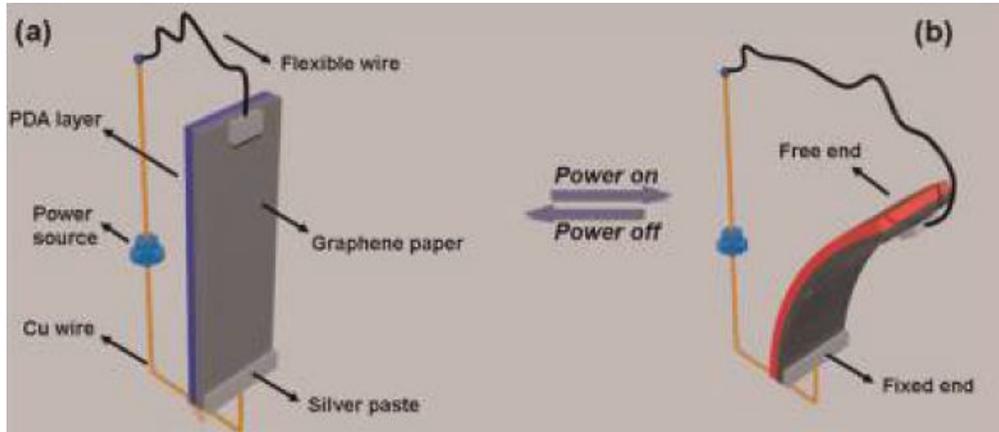


Fig. 39 Ilustración esquemática de la flexión del actuador de grafeno-PDA sin aplicar (a) y aplicando (b) corriente directa. Fuente: [45].

Sabemos que la capacitancia es directamente proporcional al área entre las placas e inversamente proporcional a la distancia que las separan

$$C = \varepsilon \varepsilon' \frac{A}{D} \quad (1)$$

Donde C es la capacitancia, ε es la permitividad del espacio libre y ε' es la constante dieléctrica del material, A es el área de las placas y D es la distancia entre ellas.

Los capacitores convencionales tienen relativamente alta densidad de potencia pero relativamente baja densidad de energía comparado con las baterías electroquímicas o pilas, eso significa que la batería puede almacenar más energía que el capacitor pero no es capaz de entregarla rápidamente.

Por otro lado, los capacitores almacenan relativamente menos energía por unidad de volumen pero la entregan de forma rápida, por lo que su densidad de potencia es alta.

Los super-capacitores están gobernados por los mismos principios que los capacitores ordinarios pero incorporan electrodos con áreas A de placas muy altas y dieléctricos muy delgados, que disminuyen la distancia D. Estas características pueden aumentar tanto la capacitancia como la energía porque la energía que puede almacenar un capacitor depende del voltaje según la siguiente relación:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

Donde V es el voltaje y E es la energía almacenada en el capacitor medida en Joules [J].

El área específica del grafeno oscila entre 2630 y 2675 m²/ g [12], [46] lo que lo convierte en un candidato perfecto para la creación de dichos super-capacitores con ventajas sobre las actuales como mayor capacitancia, mayor almacenamiento de energía, el tiempo de descarga es más lento, el tiempo de carga es menor y tiene una capacitancia específica de 550 F/g [46].

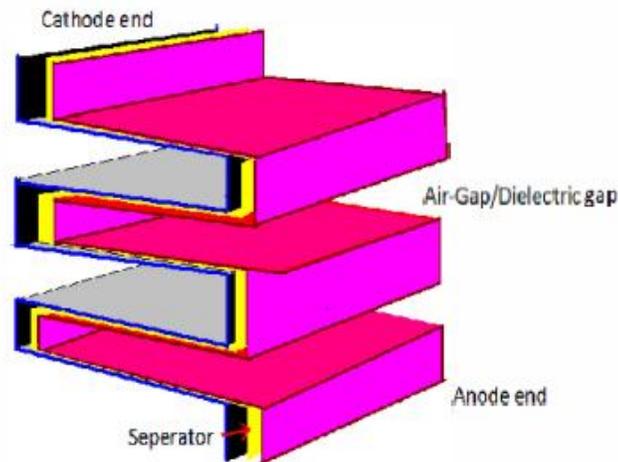


Fig. 40. Diseño propuesto de un super capacitor. Fuente: [46].

Actualmente se están estudiando las aplicaciones en el campo de almacenamiento de energía. Unas de las baterías más usadas son las de Iones de litio. La implementación del grafeno puede aumentar la capacidad, el tiempo de duración y ser más amigable con el ambiente.

El grafeno también puede ayudar a mejorar las baterías. Éstas requieren de un cátodo y un ánodo y existe una alternativa para fabricar ánodos de baterías que usen óxido de grafeno reducido (RGO) y $ZnMn_2O_4$. Éste último no tiene mucha conductividad eléctrica por sí mismo pero la combinación ofrece la oportunidad de crear baterías con efecto reversible estable y gran capacidad por 50 ciclos [47].

Existe también un ánodo hecho de Mn_3O_4 que por sí solo tiene una capacidad específica de 400 mAh/g y combinado con grafeno da cerca de 900 mAh/g. [42]

El efecto termoeléctrico mencionado en la sección 2.2.3 puede ser usado en sensores que provean un elemento de alarma en respuesta a una fuente de calor potencialmente dañina para la prótesis y a la persona que lo usa.

MECÁNICA

El mal funcionamiento de un dispositivo puede ser causado por la vibración de uno o varios elementos móviles problema que en su mayoría es provocado a su vez por la rotura, desgaste, picadura agrietamiento o gripaje del diente, de algún engrane o elemento de transmisión de potencia; por un mal reparto de temperaturas en un elemento o por lubricante contaminado.

Existen varios tratamientos para metales que aumentan la dureza externa y evitan la corrosión, estos son:

Tratamientos térmicos, como el recocido, revenido, temple, normalizado, etc.

Tratamientos termoquímicos, como el borurado, sulfinitación, cromado, nitruración, etc.

Estos procedimientos necesitan infraestructura especial y materiales controlados a ciertas temperaturas y tiempo de exposición específico, por lo que generan un alto valor agregado y un mayor tiempo de consolidación del material.

Como se pudo ver en la sección 2.3.1 una sola capa de grafeno esparcida en no más del 25% de la superficie del acero rociada con una solución de etanol es capaz de proveer suficiente lubricante para disminuir la velocidad y el volumen de

desgaste mecánico por fatiga, y aumentando la eficiencia a cargas de hasta 2 N en un 99% a 600 ciclos y en un 66% a 2000 ciclos.

La mayor fuerza de agarre de las prótesis comerciales es de 140 N y tomando en cuenta que debe haber una fuerza similar al momento de aplicar dicha fuerza, entre la carcasa de los dedos y todo el tren de distribución de potencia, ya sea por cable Bowden o engranes y contemplando que las pruebas tribológicas a 5 N eliminaron casi inmediatamente la lámina de grafeno se necesitaría de una solución que dejara capas de varios átomos de grosor en una mayor superficie para hacer más duraderos los elementos y postergar lo más posible el cambio de piezas, esto es posible mediante una aplicación en rocío. Hay una gran ventaja en este aspecto y es que, como se vio en la sección 2.1 las propiedades del grafeno disminuyen a medida que el grosor del grafeno aumenta pero el grafito también es un buen lubricante [21], por lo que el grosor no debería ser un problema, y por el contrario, ayudaría a hacer más duradera la lubricación y a tolerar más ciclos de trabajo.

Otra propiedad que puede ser aprovechada es la permeabilidad selectiva, ya que es útil para proteger la prótesis del desgaste por abrasión y corrosión, situaciones comunes para ambientes húmedos y ricos en sales como zonas costeras, frías o en época de lluvias; de contaminación y bacterias, manteniendo el ambiente aséptico que necesita la junta con el brazo.

Rociar elementos móviles constantemente con esta solución es fácil de hacer y puede alargar considerablemente el tiempo de vida de dichos elementos y de la prótesis en general.

También se puede disminuir el peso de algunos componentes ya que el grafeno tiene un coeficiente de elasticidad de 1 TPa y una fuerza de ruptura de 42 N/m, características que catalogan como el material más resistente [42], por lo que se pueden recubrir materiales menos densos que los que se ocupan para las prótesis convencionales y rociar grafeno a fin de que la capa de recubrimiento proteja de la indentación o rayaduras y aprovechando la migración de átomos cuando es indentado, esta auto reparación es de gran utilidad para aumentar la durabilidad.

De esta forma se puede personalizar el peso de la prótesis y así dar al paciente una mano del mismo peso que la tendría normalmente para evitar problemas musculares.

TÉRMICA

En los dispositivos electrónicos se suelen usar disipadores de calor para evitar un aumento de la temperatura en algunos componentes. Se emplean sobre transistores en circuitos de potencia para evitar que las altas temperaturas los dañen.

En general, todos los componentes electrónicos funcionan mejor a bajas temperaturas, por eso es indispensable tener disipadores de calor. El material más usado para este fin es aluminio aunque también se usa el cobre pero es más caro. Usar el grafeno como disipador de calor es muy útil ya que su conductividad térmica es de hasta 5000 W/mK, el del aluminio de 209 W/mK y el del cobre de 400 W/mK, por lo que se observa que es 12.5 y 24 veces más eficiente que el cobre y el aluminio respectivamente.

En el grafeno a comparación de otros materiales, el enfriamiento es superior a la acumulación de calor, lo que permitiría diseñar dispositivos que se auto enfríen sin ayuda externa lo que ayuda a disminuir el volumen y el peso de todo un sistema electrónico incluyendo actuadores.

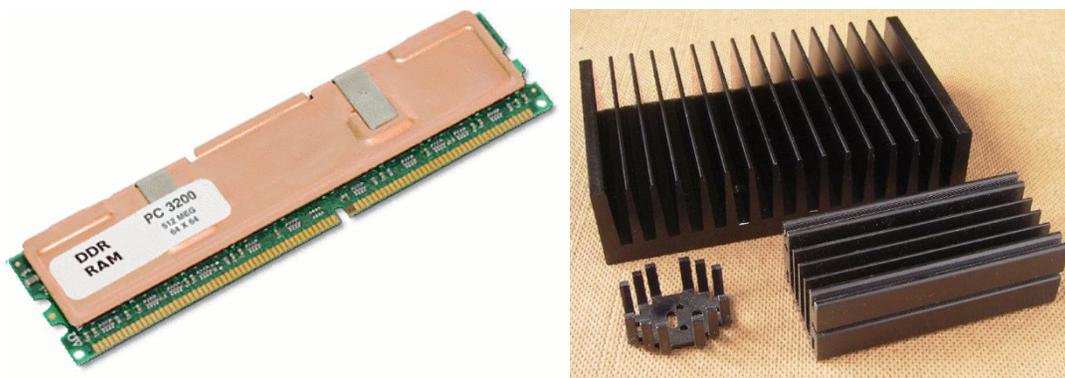


Fig. 41. Disipadores de calor de elementos electrónicos. Fuente: [11] y [4].

Por otra parte, el efecto termoeléctrico puede ser usado en sensores que provean un elemento de alarma en respuesta a una fuente de calor potencialmente dañina para la prótesis y a la persona que lo usa. Los nuevos materiales que incorporan grafeno pueden dar una respuesta a una velocidad como las respuestas que se producen en los organismos humanos.

Finalmente, otra propiedad importante que se debe considerar durante la creación de nuevos materiales es el coeficiente de expansión térmica (TEC), parámetro que tiene importantes implicaciones en la electrónica ya que el TEC en distintos materiales es el mecanismo más común que conduce a esfuerzos inducidos, y éstos a la ruptura o bien, a la eventualmente la falla del dispositivo, por lo que es crucial tomarlo en cuenta durante el diseño de nuevos dispositivos. En materiales que incorporan grafeno, como los “super” capacitores, el TEC es prácticamente nulo.

5. CONCLUSIONES

El grafeno es uno de los materiales más investigados actualmente y al respecto se presentan nuevas propiedades, extraordinarias, y a medida que se le conoce mejor, se le pueden dar más aplicaciones sobre todo en la creación de nuevos materiales. Por tanto, es importante hacer énfasis que la tecnología tiene un gran futuro en los materiales en los cuales interviene.

Ninguna nanoestructura está libre de defectos estructurales, los cuales son básicamente producidos durante el proceso de su creación. Los defectos estructurales pueden influenciar el rendimiento y propiedades del grafeno y de los materiales que lo contengan. Los defectos estructurales no son necesariamente indeseables ya que la calidad del material dependerá del uso que se le dará. Si acaso el grafeno es empleado como lubricante, los defectos no tienen gran importancia, pero si se va a diseñar un PCB que incluya elementos en los cuales participa el grafeno entonces sí se deben tomar en cuenta los defectos.

Las prótesis mioeléctricas son una solución para las personas que han perdido algún miembro o han nacido sin él, pero tienen ciertas limitantes, como el peso, el costo, duración de baterías y la limitación de funcionalidad. Actualmente sólo se fabrican con tres disparadores mioeléctricos que controlan el movimiento predeterminado de la prótesis y cada vez que se requiere hacer un movimiento diferente a los previamente programados, se necesita cambiar la configuración. Por lo anterior, existe actualmente una investigación para crear prótesis controladas por el cerebro, que requieren incluir más y más dispositivos y por tanto, se requiere proveer nuevos materiales para que se pueda obtener una prótesis que no difiera en mucho a la natural; este es un reto en el cual los materiales que incorporan grafeno tienen una gran perspectiva.

Los materiales basados en grafeno pueden disminuir el peso, mejorar los actuadores para aumentar la fuerza de prensión, hacer más rápidos los movimientos, dar el peso adecuado para evitar problemas musculares pero sus usos no acaban ahí. Al ser materiales basados en carbono son más amigables con el medio ambiente tanto por composición como porque requieren menos

recargas por unidad de tiempo como en el caso de las baterías, menos tiempo para la misma, e incluso pueden prescindir de una instalación eléctrica para la recarga, debido a la propiedad termoeléctrica ya que no se necesita luz más intensa que la solar a diferencia de otros materiales. En este sentido hay un gran optimismo ya que se piensa que la velocidad de recarga puede ser de segundos.

Esta misma propiedad lo hace buen material para sensores fotovoltaicos y potencial candidato para celdas solares, ya que algunas celdas fotovoltaicas están restringidas a un rango específico de longitud de onda

El área específica lo hace excelente para crear “super” capacitores y baterías no solamente para su empleo en prótesis sino también para su uso industrial, didáctico o doméstico a gran escala.

Un material que fue fabricado usando grafeno de pocas capas (FG) y poliuretano termoplástico (TPU) no sólo muestra propiedades mecánicas mejoradas sino que se repara constantemente por varios métodos incluyendo luz infrarroja, electricidad y ondas electromagnéticas con eficiencias más allá del 98% lo cual deja la posibilidad de crear materiales con “memoria” y capacidad auto regeneradora.

En la sección 4 se hace referencia a la posibilidad de aumentar la velocidad de los movimientos de la mano o la fuerza de prensión, pero hay que aclarar que estas nuevas características podrían dificultar la manipulación de la mano protésica con tareas de precisión, por lo cual es bastante útil un sistema de entrenamiento como el que provee el proyecto *Ixtli* de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, única en su tipo que permite al usuario saber si es candidato a usar una prótesis de mano y adiestrar de forma controlada los movimientos creados por los disparadores mioeléctricos.

Existen prótesis como las mencionadas en el capítulo 3.1, en específico, la mano EH1 Milano y IH2 AZZURRA que son prototipos para investigación pero hay investigación muy importante dentro de nuestro país, como la mano desarrollada en la UNAM CDMIT II que busca solucionar los problemas existentes en las comerciales.

Es complicado hacer un análisis económico de prótesis que basan sus materiales y componentes en grafeno porque como ya se mencionó antes, en este momento las formas de obtención se siguen modificando de acuerdo al uso que se le dará.

El precio actual de una lámina de grafeno depositada en un cuadro de cobre de 2” por 2” [55] es de 250 dólares lo que lo hace poco factible para las aplicaciones industriales, pero a medida que se tenga un método definido de obtención y exista infraestructura para ese fin, los precios bajarán y podrá ser usado para fines de mejora como los propuestos en el presente trabajo.

La tecnología electrónica actual basada en el silicio llegará a término algún día, aunque se puede aprovechar unos años más con una modificación que da como resultado el silicio estirado, que puede aumentar la velocidad de los dispositivos un 35% más sin necesidad de hacer más pequeños los transistores y reduciendo el consumo de energía[1].

La tecnología basada en grafeno es muy innovadora y detrás de cualquier innovación hay una investigación exhaustiva y un proceso de pruebas, por lo que tiene tiempo más que suficiente para que se perfeccionen los métodos de obtención y purificación (en caso de que se requiera) a niveles industriales.

A la par de la investigación en grafeno, existe un gran interés en los nanotubos de carbono y nanodiamante, aunque ninguno presenta características tan versátiles.

El presente trabajo tiene como fin mostrar las características del grafeno que pueden incorporarse en una prótesis de mano, y a su vez mostrar que puede mejorar también las propiedades de materiales existentes, de esta forma, se puede seleccionar el material adecuado.

REFERENCIAS

- [1] Naboru, T. Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mundo mejor átomo por átomo. FCE, CNYN-UNAM, SEP, CONACyT, Eds. México, 2009.
- [2] Méndez-Medrano, M. G. *et al.* Grafeno: el alótopo más prometedor del carbono. *Acta Universitaria* 2012, 22(3), 20.
- [3] Laul, C. N. *et al.* Properties of suspended graphene membranes. *Mater. Today*. 2012, 15 (6), 238.
- [4] Wikipedia, 2014, Disipador. Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Disipador> Consultado en junio de 2014.
- [5] Mahmood, M. S. *et al.* Prediction of Young's modulus of graphene sheets and carbon nanotubes using nanoscale continuum mechanics approach. *Mater. Design*. 2010, 31(2), 790.
- [6] Callister, W. D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Limusa Wiley 2ª ed. México, 2009.
- [7] Ramírez-Rocamora J. M. Sistema virtual para entrenamiento mioeléctrico de prótesis de miembro superior. Tesis de Licenciatura. UNAM. México 2011.
- [8] Dorador-González, J. M. *et al.* 2004 Robótica y prótesis inteligentes. *Revista Digital Universitaria*. 2004, 6(1), 1.
- [9] Ollero-Baturone, A. Robótica, manipuladores y robots móviles. Editorial Marcombo, España, 2001.
- [10] BBC News, 2012, "In pictures: Prosthetics through time", disponible en internet: <http://www.bbc.com/news/health-16599006> consultado en mayo del 2013.
- [11] wpclipart, heat spreader on ram. http://www.wpclipart.com/computer/hardware/memory/heat_spreader_on_ram.png.html Consultado en junio de 2014.
- [12] Huang, X. *et al.* Graphene-Based Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications. *Small* 2011, 14, 1876.
- [13] Rodríguez-González, C. *et al.* Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingenierías*. 2008, 11(38), 17.
- [14] Geim, A. K. *et al.* The Rise of Graphene. *Materials*. 2007, 6, 183.
- [15] Robin John^{1,3}, A. *et al.* Single- and Few-Layer Graphene Growth on Stainless Steel Substrates by Direct Thermal Chemical Vapor Deposition. *Nanotechnology* 2011, 22, 1.

- [16] Berger, C. et al. Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward grapheme based nanoelectronics. *Phys. Chem.* 2004, 108(52),19912 .
- [17] Guo, X. et al. Few-layer graphene nanosheets produced by ultrasonic exfoliation of secondary expanded graphite. *Gongneng Cailiao /J. Funct. Mater.* 2013, 44(12), 1800.
- [18] Changgu L. et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science* 2008, 321, 385.
- [19] Sanguansak, Y. et al. Permselective properties of graphene oxide and reduced graphene oxide electrodes. *Carbon* 2014, 68, 662.
- [20] Wang, L. et al. A structural stability diagram of multiple vacancies and defect self-healing in graphene. *Nanoscale* 2012, 4, 7489.
- [21] Diana Berman, et al. Reduced wear and friction enabled by graphene layers on sliding steel surfaces in dry nitrogen. *Carbon* 2013, 59, 167.
- [22] Naumis, G. G. et al. Design of graphene electronic devices using nanoribbons of different widths. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95, 182104.
- [23] Zhang, D. H. et al. The peculiar transport properties in p-n junctions of doped graphene nanoribbons. *J. Appl. Phys.* 2011, 110, 013718.
- [24] Shafranjuk, S. E. Directional photoelectric current across the bilayer graphene junction. *J. Phys. Condens. Matter* 2009, 21, 015301.
- [25] Barrios Vargas J. E. Transporte electrónico en grafeno con desorden. Tesis de Doctorado. UNAM. México 2012.
- [26] Y Chen et. al. Thermoelectric properties of grapheme nanoribbons, junctions and superlattices. *J. Phys. Condens. Matter* 2010, 22, 372202.
- [27] Chandler, D. L., 2011, "Graphene shows unusual thermoelectric response to light", disponible en internet: <http://newsoffice.mit.edu/2011/graphene-thermoelectric-1007> consultado en junio de 2014.
- [28] Gabor, N. M. et. al. Hot Carrier-Assisted Intrinsic Photoresponse in Graphene. *Science* 2011, 334, 648.
- [29] Electronics Cooling, 2006, "The Seebeck Coefficient", disponible en internet: <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/> consultado en junio de 2014.
- [30] EH1 Milano. *Basic user guide.*
- [31] EH1 Milano dasheet.
- [32] IH2 Azzurra. *Basic user guide.*

- [33] Bebionic 3. User guide.
- [34] Bebionic 3. Technical information.
- [35] i-limb ultra revolution. User manual.
- [36] i-limb digits. Clinician manual.
- [37] Michaelangelo technician product brochure.
- [38] El Universal, 2012, "El mexicano promedio mide 1.64 metros y pesa 74 kilos: estudio" Disponible en internet: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/828544.html> consultado en Julio de 2014.
- [39] Tözeren, A. Human Body Dynamics: Classical Mechanics and Human Movement. Springer-Verlag New York. E.U.A. 2000.
- [40] Moore, A. 2008, "Lithium Polymer (Lipo) Battery Guide". Disponible en internet: http://revolution-robotics.com/articles/lithium_polymer_lipo_battery_guide consultado en Julio de 2014.
- [41] Savage, N. Super Carbon. *Nature*. 2012, S30, 483.
- [42] Huang, X. Graphene-based composites. *Chem. Soc. Rev.* 2012, 41, 666.
- [43] Bohr, M. 2012, "Silicon Technology Leadership for the Mobility Era". Disponible en internet: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/presentation/silicon-technology-leadership-presentation.pdf> consultado en junio de 2014.
- [44] Muñoz-Jashimoto, L. *et al.* Fuerza máxima de agarre con mano dominante y no dominante. XV Congreso Internacional de Ergonomía SEMAC. 2009.
- [45] Liang, J. *et al.* Electromechanical actuator with controllable motion, fast response rate, and high-frequency resonance based on graphene and polydiacetylene. *Am. Chem. Soc. Nano* 2012, 6(5), 4508.
- [46] Dasl, S. *et al.* A novel design of super-capacitor used to enhance solar-energy restoration of photo-voltaic cells. Proceedings of 2014 1st International Conference on Non-Conventional Energy 2014.
- [47] Zheng Z. *et al.* Enhanced electrochemical properties of graphenewrapped ZnMn₂O₄ nanorods for lithium-ion. *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2, 149.
- [48] Guzmán, F. 2010, Grafeno: Un material de "otro mundo". Disponible en internet: <http://www.eluniversal.com.mx/cultura/64414.html> Consultado en junio de 2013.

- [49] Graphene-info.com, 2011, Trilayer graphene exhibits the quantum hall effect. Disponible en internet: <http://www.graphene-info.com/trilayer-graphene-exhibits-quantum-hall-effect> consultado en mayo de 2014
- [50] Computational Materials Science. Width-Dependent Conductance of Graphene Nanoribbons. Disponible en internet: <http://electronicstructure.wikidot.com/yasmin> consultado en mayo de 2014.
- [51] Nanoelectronics Laboratory, 2008, Chemical exfoliation method for graphene sheets. Disponible en internet: http://nanotube.korea.ac.kr/english/?page_id=479 Consultado en mayo de 2014.
- [52] Wikipedia, 2014, Efecto Hall. Disponible en internet: http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Hall Consultado en junio de 2014.
- [53] Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-1993. Sistema general de unidades de medida.
- [54] Boletín UNAM-DGCS-694, Diseñan en la UNAM nuevas prótesis para mano. Disponible en internet: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2011_694.html Consultado en septiembre de 2014.
- [55] Graphene supermarket. Disponible en internet: <https://graphene-supermarket.com/CVD-Graphene-on-Metals/> Consultado en septiembre de 2014.

TABLA DE NOMENCLATURA

A	área
A	ampere
AA	apilamiento paralelo
AB	apilamiento Bernal
ABA	apilamiento Bernal de tres capas
ABC	apilamiento romboédrico
ADN	ácido desoxirribonucleico
AGNR	orientación cristalográfico con forma de sillón
AISI	instituto americano del hierro y el acero
Al ₂ O ₃	óxido de aluminio
AFM	microscopio de fuerza atómica
bar	unidad de presión
BLG	grafeno bicapa
C	carbono
C	capacitancia
CH ₄	metano
CVD	deposición química de vapor
D	distancia
DV	vacante doble
E	módulo de Young
E	energía
ED	dislocación de borde
eV	electronvolt
F	faradios
FCOH	ferrocenometanol neutro
Fe(CN) ₆ ⁴⁻	tetraanión de ferrocianuro
FG	grafeno de pocas capas

FSR	sensor de fuerza resistivo
g	gramo
GBMV	tipo específico de límite de grano
GCEs	electrodos de carbón vítreo
GO	óxido de grafeno
h	hora
<i>h</i>	agujero
H ₂	molécula de hidrógeno
J	joule
K	grados Kelvin
kg	kilogramo
m	metro
mAh	unidad de capacidad de las baterías
MBE	epitaxia de haces moleculares
Mn ₃ O ₄	óxido mangánico
Mo	Molibdeno
MoS ₂	Disulfuro de molibdeno
MV	vacante múltiple
N	newton
N _L	Largo de sección central
Pa	pascal
Pb	plomo
PCB	tarjeta de circuito impreso
PDA	polidiacetileno
PVC	policloruro de vinilo
RGO	óxido de grafeno reducido
Ru(NH ₃) ₆ ³⁺	tricación de rutenuro de amoniaco
s	segundo

S	azufre
Si	silicio
SiC	carburo de silicio
SiO ₂	dióxido de silicio
SLG	grafeno monocapa
SPGF	solución con hojas de grafeno
STM	microscopía de efecto túnel
SV	mono vacante
TEC	coeficiente de expansión térmica
TLG	grafeno tricapa
TPU	poliuretano termoplástico
V	Volt
W	watt
ZnMn ₂ O ₄	Tetróxido de dimanganeso zinc
zGNR	orientación cristalográfico con forma de zig zag
ZZ	zig-zag
ε	deformación
ε	permitividad del espacio libre
ε'	constante dieléctrica
σ	esfuerzo
Ω	Ohm