



# Universidad Austral de Chile

---

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil Electrónica

## "NANOTUBOS DE CARBONO Y SUS APLICACIONES EN LA ELECTRÓNICA"

Tesis para optar al título de:  
Ingeniero Electrónico.

Profesor Patrocinante:  
Sr. Pedro Rey Clericus.  
Ingeniero Electrónico  
Licenciado en ciencias de la ingeniería  
Diplomado en ciencias de la ingeniería

HUMBERTO LEONARDO DE LA VEGA GRAMEGNA  
VALDIVIA - CHILE  
2009

**Profesor patrosinante**

**Sr. Pedro Rey Clericus**

**Profesores Informantes**

**Sr. Franklin Castro**

**Sr. Raúl Urrea**

## ÍNDICE

Resumen.....	X
Summary.....	XI
Objetivos.....	XII
Introducción.....	XIII
CAPITULO I.....	14
1.0 Reseña histórica.....	14
CAPITULO II.....	18
2.0 Propiedades de los nanotubos de carbono.....	18
2.1 propiedades químicas.....	18
2.1.1 El grafito.....	20
2.1.2 El diamante.....	22
2.1.3 Los fullerenos.....	23
2.1.4 Nanotubos de carbono.....	25
2.2 Propiedades físicas de los nanotubos de carbono.....	26
2.2.1 Clasificación de los nanotubos de carbono.....	26
2.2.1.1 Clasificación general.....	26
2.2.1.2 Clasificación específica.....	27
2.2.2 Geometría.....	27
2.2.2.1 Determinación del vector chiral.....	28
2.2.2.2 El vector de traslación.....	28

2.2.2.3 El vector de simetría.....	29
2.2.2.4 Determinación de la celda unitaria.....	29
2.2.2.5 Determinación del radio del nanotubo.....	30
2.2.2.6 Determinación del ángulo Chiral.....	31
2.2.2.7 Determinación del número de hexágonos por celda unitaria.....	32
2.2.2.8 Estructura en equilibrio de un SWNT.....	34
2.3 Propiedades eléctricas.....	34
2.3.1 Estructura de bandas del grafeno.....	35
2.3.2 Estructura de bandas de los nanotubos de carbono.....	37
2.3.3 Conducción eléctrica.....	41
2.4 Propiedades mecánicas.....	43
2.4.1 Propiedades elásticas.....	43
2.4.2 Propiedades térmicas.....	45
2.5 Síntesis.....	48
CAPITULO III.....	51
3.0 Síntesis de los nanotubos de carbono.....	51
3.1 Síntesis por el método de descarga de arco eléctrico.....	51
3.2 Síntesis por el método de vaporización laser.....	53
3.3 Método de deposición química en fase de vapor (CVD).....	55
CAPITULO IV.....	58
4.0 Aplicaciones de los nanotubos de carbono.....	58

4.1 Nanocables o nanoalambres.....	58
4.2 Nanodiodos.....	59
4.3 El transistor con nanotubos de carbono.....	61
4.4 Nanotubos de carbonos en forma de Y.....	65
4.5 Memorias de acceso aleatorio no volátiles (RAM) con nanotubos de carbono.....	66
4.6 Emisión de campo.....	68
4.6.1 Pantallas planas o de emisión de campos (FED).....	69
4.6.2 Fuente de rayos X.....	70
4.7 Sensores.....	71
4.7.1 Sensores químicos y biológicos.....	72
4.7.2 Sensores mecánicos.....	73
4.7.3 Sensores térmicos.....	74
4.8 Baterías con nanotubos de carbono.....	74
4.9 Nanomotores.....	76
4.10 El ascensor espacial.....	77
CAPITULO V.....	81
5.0 conclusiones.....	81
CAPITULO VI.....	83
6.0 Bibliografía.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: (a) Estructura cristalina del diamante.....	15
(b) Estructura cristalina del grafito	
(c) Estructura cristalina del fullereno	
Figura 1.2: Nanotubo de carbono.....	17
Figura 2.1: (a) El grafito en su forma bruta.....	21
(b) Estructura cristalina del grafito	
Figura 2.2: Disposición geométrica de los orbitales $sp^2$ .....	21
Figura 2.3: Disposición de los átomos de carbono del diamante.....	23
Figura 2.4: Disposición geométrica de los orbitales $sp^3$ .....	23
Figura 2.5: Fullerenos $C_{60}$ .....	25
Figura: 2.6 Esquema grafico de los nanotubos de carbono.....	25
Figura 2.7: Vista de un MWNT.....	26
Figura 2.8: Vista de un SWNT.....	27
Figura 2.9: Estructura geométrica de los nanotubos de carbono.....	28
Figura 2.10: Vector de simetría R.....	29
Figura 2.11: Celda unitaria.....	32
Figura 2.12: Estructura 2D de un nanotubo de carbono.....	34
Figura 2.13: Imagen de la estructura hexagonal, característica del grafeno.....	35
Figura 2.14: Estructura de bandas del grafeno.....	36
Figura 2.15: Estructura de las bandas en el grafeno, zona de brillouin.....	37

Figura 2.16: Descripción esquemática de la estructura metálica o semimetal.....	38
Figura 2.17: Estructura de bandas de los nanotubos.....	39
Figura 2.18: Configuración electrónica de los nanotubos de carbono.....	40
Figura 2.18: Configuración electrónica de los nanotubos de carbono.....	41
Figura 2.19: Movimiento de electrones en un material conductor como el cobre.....	42
Figura 2.20: Movimiento del electrón dentro de un nanotubo, conducción balística.....	42
Figura 2.21: Dependencia de la conductividad térmica ( $\lambda$ ).....	47
Figura 2.22: Conductividad térmica como función de la corriente.....	47
Figura 3.1: Diagrama del método de síntesis por descarga de arco eléctrico.....	52
Figura 3.2: Imágenes de los nanotubos (a) Vista de los nanotubos recién recogidos.....	53
(b) Los mismos nanotubos purificados con radiación	
Figura 3.3: Esquema de un dispositivo sintetizador por vaporización laser.....	54
Figura 3.4: Esquema representativo de un dispositivo sintetizador por CVD.....	55
Figura 3.5: nanotubos crecidos por CVD.....	56
Figura 4.1: Nanotubo enrollado.....	59
Figura 4.2: Configuración del dispositivo usando dopado.....	63
Figura 4.3: Esquema de un transistor de efecto de campo utilizando un nanotubo (CNTFET)....	63
Figura 4.4: Función característica de un CNTFET.....	64
Figura 4.5: Transistor de nanotubo puro.....	66
Figura 4.5: Memoria RAM no volátil basada en CNT.....	67
Figura 4.6: Esquema de una pantalla de emisor de campo con nanotubo.....	69

Figura 4.7: Pantalla 4,5" a color.....	70
Figura 4.8: Esquema de un sensor químico.....	72
Figura 4.9: Esquema de una batería de papel y una imagen real de estas baterías.....	75
Figura 4.10: Esquema de un nanomotor.....	76
Figura 4.11: Estructura básico del ascensor espacial.....	78
Figura 4.12: Esquema propuesto de una plataforma con el ascensor espacial.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla periódica del elemento carbono.....	18
Tabla 2: Parámetros de estructura de los SWNT calculados en condiciones de equilibrio.....	34
Tabla 3: Propiedades de los nanotubos de carbono.....	48
Tabla 4: Comparación de los distintos materiales con los nanotubos.....	50
Tabla 5: Comparación de los distintos métodos de producción de nanotubos de carbono.....	56
Tabla 6: Tabla comparativa de un transistor de silicio normal con uno con nanotubo.....	64

## **RESUMEN**

En la actualidad las tecnologías aplicadas en el área de la electrónica prácticamente se encuentran acabadas debido a que estas están llegando al límite de su velocidad y de su capacidad, y ello se debe a que los componentes utilizados no pueden trabajar a tan alta velocidad. Sin embargo el análisis debe ser más profundo y riguroso, ya que la razón principal del bajo rendimiento de estos componentes se debe a los materiales con los que están contruidos. Por ello, esta investigación pretende indagar e informar sobre una nueva tecnología: los nanotubos de carbono, un material que está siendo investigado y desarrollado por numerosos científicos en el mundo, en la búsqueda de sus distintas aplicaciones electrónicas.

Se denomina “nanotubos” a las estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden del nanómetro. Existen nanotubos de muchos materiales, tales como silicio o nitruro de boro, pero generalmente el término se aplica a los nanotubos de carbono.

Corría el año 1991, cuando en el laboratorio de Investigación Fundamental de NEC, ubicado en la ciudad japonesa de Tsukuba, el investigador Sumio Iijima usando su microscopio electrónico para observar unas extrañas fibras nanoscópicas depositadas sobre una mota de hollín, se dio cuenta de este nuevo material recibiendo el premio de príncipe de Asturias el año 2008.

Una vez superada la atracción debido a la novedad del descubrimiento, se comenzó a realizar diversos estudios, descubriendo propiedades extraordinarias como su superlativa elasticidad, resistencia a la tracción y estabilidad térmica. Sin embargo, quince años más tarde, los primeros productos que incorporan nanotubos no lo hacen en razón de tales atributos, sino en virtud de sus propiedades eléctricas. El gran impacto de los materiales nanoestructurados se debe a que su gran superficie mejora sus propiedades y abre caminos a una amplia diversidad de nuevas aplicaciones. Por eso, han atraído y están atrayendo un considerable interés como constituyentes de nuevos materiales y dispositivos nanoscópicos.

## SUMMARY

Nowadays, the technologies applied to the area of electronics are practically finished since these are reaching the limit of their speed capacity. This is because the components utilized cannot work at such high speed. Nevertheless, the analysis must be deeper and more rigorous since the main reason of these components' low performance lies in the materials they are made of. Based on the previous, this research will try to investigate and inform about a new technology: Carbon Nanotubes, a material currently under study and developed by numerous scientists around the globe in the seeking of their diverse electronic applications.

It is called "Nanotubes" to the tubular structures which diameters are in the order of nanometres. There exist Nanotubes made of many different materials, such as Silicon, Boron nitride, but generally speaking, the term is used for carbon Nanotubes.

It was 1991 when in NEC's Fundamental Investigation Laboratory, located in the Japanese city of Tsukuba, the researcher Sumio Iijima, looking through his electronic microscope, observed some nanoscopic fibres placed over a speck of soot, and took notice of this new material which won him the Prince of Asturias award in the year 2008.

Once the attraction due to the novelty of this discovery was over, diverse studies commenced, discovering on the way extraordinary properties such as its superlative elasticity, traction stamina and thermal stability. However, fifteen years later, the first products that incorporate Nanotubes do not do so because of the former attributes, but in virtue of their electric properties. The great impact of nanostructured materials can be explained because their large surfaces enhance their properties and open paths to a great variety of new applications. This is why they have attracted and still attract a considerable interest as constituents of new nanoscopic materials and devices.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivos Generales**

- Analizar la nueva tecnología de nanotubos de carbono
- Analizar y discutir los avances desde que se inventó o se descubrieron los nanotubos hasta el día de hoy.
- Incentivar el área de la investigación en la universidad.
- Proponer y difundir las distintas aplicaciones que existen para esta nueva tecnología en el área de la electrónica.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar los distintos tipos de nanotubos de carbono que existen y para qué sirve cada uno.
- Analizar las propiedades eléctricas tanto como conductor como de semiconductor.
- Explicar las aplicaciones en semiconductores como los nanodiodos, transistores con nanotubos de carbono, memorias de acceso aleatorio (RAM), etc.
- Explicar cómo estos nanotubos van a revolucionar lo que se conoce hoy por microelectrónica.
- Realizar una revisión bibliográfica respecto a un tema que no existe mucha información.

## INTRODUCCIÓN

Desde los años más remotos el hombre ha tratado de descubrir nuevos materiales en base a distintos componentes para distintas aplicaciones. Uno de los componentes que más llama la atención es el carbono y por eso se le ha tratado de dar múltiples aplicaciones. Dentro de esta búsqueda se ha descubierto numerosos inventos de suma relevancia como el acero componente que hoy en día es uno de los más importantes para la humanidad, este material es una aleación entre hierro y carbono pero yendo un poco más allá en el ámbito microscópico tenemos el descubrimiento en el año 1991 de un material que vendría a revolucionar el ambiente tecnológico esto se lo debemos a el señor Sumio Iijima científico japonés el cual descubrió por casualidad los nanotubos de carbono estos presentan una amplia gama de aplicaciones tanto en el área de la medicina hasta la electrónica pasando por la mecánica y la química debido a sus increíbles propiedades.

Electrónicamente pueden comportarse como metálicos, semimetálicos o aislantes dependiendo de su diámetro y helicidad. La elevada resistencia mecánica y mayor flexibilidad que las fibras de carbono, por lo que se podrían utilizar en materiales compuestos. Sus propiedades pueden modificarse encapsulando metales o gases en su interior, llegando a obtener nanocables eléctricos o magnéticos. Pueden ser empleados para el almacenamiento de hidrógeno o como sistemas de separación de gases. También pueden ser utilizados en pantallas planas por su buena capacidad como emisores de electrones.

En un futuro a mediano plazo viviremos la próxima revolución electrónica donde pasaremos de la microelectrónica a la nanoelectrónica donde la velocidad de procesamiento aumentará y el tamaño de los dispositivos disminuirá considerablemente En pocas palabras estamos a puertas de una nueva oportunidad, un BUM en la miniaturización, y por consiguiente en todos los sistemas de alto rendimiento y fidelidad; cuando el desarrollo de chips alcance la barrera física en que el silicio ya no pueda ser más pequeño. Es decir, un plazo aproximado de entre 10 a 15 años.

# **CAPITULO I**

## **1.0 Reseña histórica**

Hasta antes de 1985 solo se pensaba que solo habían dos formas ordenadas de carbono elemental: el grafito y el diamante ver figura 2.1 a y b

Pero en 1985 los químicos Harold Kroto, de la universidad de sussex (reino unido), James Heath, Sean O'brien, Robert Curl e Richard Smalley de la universidad de rice (Estados unidos), demostraron la existencia de una nueva familia de formas elementales de carbono, denominados fulerenos. Los fulerenos son moléculas "huecas" de carbono, ver figura 1.1 c que poseen anillos pentagonales y hexagonales [1] [2] [9].

La historia de los nanotubos de carbono es muy reciente. Pese a que ya tenemos indicios desde mediados del siglo XIX del descubrimiento de estos compuestos químicos, no sería hasta 1991 cuando fueron reconocidos mundialmente y se comenzó la investigación en profundidad por sus interesantes propiedades y aplicaciones.

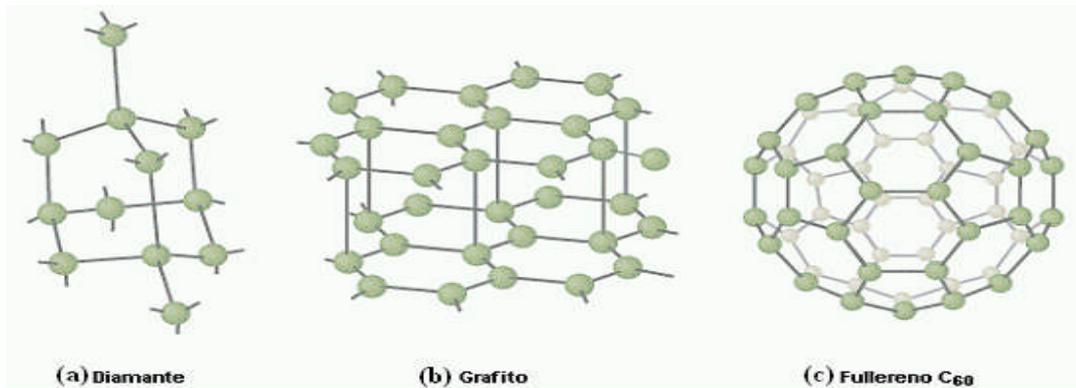
Aunque el ser humano a lo largo de la historia ha creado de forma inconsciente nanotubos de carbono en diversos procesos y actividades, no ha sido hasta época reciente cuando se han descubierto las propiedades de estos compuestos.

El primer antecedente descrito sobre la producción de filamentos carbonosos a partir de vapor se debe a Hugues y Chambers, que patentaron en EE.UU en 1889 un procedimiento para la fabricación de filamentos de carbono utilizando como gases precursores hidrógeno y metano en un crisol de hierro [1].

En 1952. Radushkevich y Lukyanovich, dos científicos rusos, realizaron un interesante trabajo y publicaron imágenes de 50 nanotubos de carbono. Sin embargo este descubrimiento pasó desapercibido por ser publicado en Rusia en plena Guerra Fría [1] [2].

A partir de este momento, numerosos grupos científicos publicaron por separado y sin aludir a los descubrimientos anteriores y contemporáneos, diferentes trabajos y material sobre estos compuestos aún desconocidos.

Desde hace varios años se ha aprendido bastante sobre la estructura y propiedades del carbono en sus formas alotrópicas conocidas: el grafito, el diamante y fullerenos.



**Figura 1.1** (a) estructura cristalina del diamante, donde se observa la estructura densamente empaquetada la cual provee de la dureza característica. (b) estructura cristalina del grafito, donde se observa las capas de grafito 2d hexagonales. (c) estructura cristalina del fullereno donde se observan 12 anillos pentagonales y 20 hexagonales.

Los fullerenos “primos hermanos” de los nanotubos son mucho más abundantes de lo que pensamos, incluso es posible que sean más abundantes que el grafito y el diamante; los podemos hallar en el humo y el hollín de combustiones, los hallamos al estudiar las estrellas y el espacio interestelar, o bien en las capas terrestres que nos muestran las eras geológicas del planeta, también se han hallado fullerenos en los meteoritos que caen a la tierra. Últimos estudios también señalan que cada organismo vivo presenta cierta cantidad de fullerenos en su composición, todos estos hechos, nos dan una noción del extenso campo de estudio y de las numerosas líneas de investigación que pueden nacer alrededor del estudio de los fullerenos.

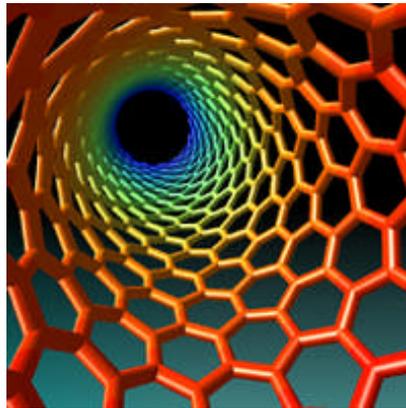
Los fullerenos son moléculas grandes como esferas. El más común es el  $C_{60}$ , pero hay de más carbonos como son,  $C_{70}$ ,  $C_{84}$ ,  $C_{240}$ ,  $C_{540}$ ..., y también los hay de menos, los cuales por lo general presentan un arreglo geométrico cuasi esférico o en forma de elipsoide. En 1991 se detectó una forma más de carbono, el “nanotubo”. Un nanotubo es un fullereno muy grande en forma lineal.

El Japón se incorpora en 1991 a los estudios de nanotubos de carbono con las aportaciones de Sumio Iijima, en su microscopio electrónico en el laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba [3], observaba unas extrañas fibras nanoscópicas depositadas sobre una mota de hollín. Constituidas por carbono, y de forma tan regular y simétrica como los cristales, estas macromoléculas de delicada finura e impresionante longitud no tardaron en llamarse nanotubos. Desde entonces han sido objeto de intensa investigación básica. Se ha dado un paso más. Ahora interesa también la ingeniería. Muchas de las propiedades extraordinarias de los nanotubos, superlativa elasticidad, resistencia a la tracción y estabilidad térmica, han desatado la imaginación, que sueña con robots microscópicos, carrocerías de automóviles resistentes a las abolladuras y edificios a prueba de terremotos. Sin embargo, los primeros productos que incorporan nanotubos no lo hacen en razón de tales atributos, sino en virtud de sus propiedades eléctricas.

A largo plazo, las aplicaciones más valiosas sacarán mayor partido de las singulares propiedades electrónicas de los nanotubos. En principio, los nanotubos de carbono pueden desempeñar el mismo papel que cumple el silicio en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular, donde el silicio y otros semiconductores dejan de funcionar. Aunque la industria electrónica está llevando a las dimensiones críticas de los transistores en los chips comerciales por debajo de 200 nanómetros, unos 400 átomos de anchura, los ingenieros se enfrentan con grandes obstáculos para avanzar en la miniaturización. De aquí a 10 años, los materiales y los procesos sobre los que se ha basado la revolución informática comenzarán alcanzar su límite físico impenetrable. Todavía hay enormes incentivos económicos para reducir aún más los dispositivos, porque la velocidad, la densidad y el rendimiento de los ingenios microeléctricos aumentarán con la reducción del tamaño mínimo de los componentes. Los experimentos de los últimos años han dado esperanzas a los investigadores de que podrían fabricarse con nanotubos las conexiones y los dispositivos activos de un tamaño de diez nanómetros o inferior. Incorporados los nanotubos en circuitos electrónicos, éstos operarían más deprisa y sin consumir tanta energía como los actuales.

Los primeros nanotubos de carbono que observó Iijima en 1991 [1], se denominaron **TUBOS DE PAREDES MÚLTIPLES (MWTN)** fueron descubiertos como producto de experimentos en un reactor de arco eléctrico; Cada uno contenía cierto número de cilindros

huecos de átomos de carbono anidados a la manera de una esponja. Dos años después Más tarde, en 1993, Iijima y Donald Bethune, éste de IBM, crearon cada uno por lado **NANOTUBOS DE PARED ÚNICA (SWTN)**, formados exclusivamente de una capa de átomos de carbono. Ambos tipos de tubos, fabricados de modo parecido, gozan de muchas propiedades similares; las obvias, su longitud y estrechez, enormes. El modelo de pared única, de un nanómetro aproximado de diámetro, puede abarcar miles de nanómetros de longitud.



**Figura 1.2** *nanotubo de carbonó*

Los que confiere a estos tubos su estabilidad notable es la intensidad con que se unen los átomos de carbono entre sí, propiedad que explica la dureza del diamante. En este mineral, los átomos de carbono se unen en un tetraedro de cuatro lados. Sin embargo, en los nanotubos los átomos se disponen en anillos hexagonales, la misma estructura que caracteriza al grafito; de hecho un nanotubo parece una lámina (o varias láminas apiladas) de grafito enrollada en un cilindro sin costuras. No se sabe a ciencia cierta por qué los átomos se condensan en tubos, pero parece que pueden crecer añadiendo átomos a sus extremos, igual que una tejedora va agregando puntos a la manga de un chaleco.

## CAPITULO II

### 2.0 PROPIEDADES DEL LOS NANOTUBOS DE CARBONO

Para partir este capítulo debemos mencionar la estructura del nuevo material, es importante, ya que su geometría y la mayoría de las propiedades de los nanotubos de carbono dependen de su diámetro y ángulo chiral, también llamada helicida. Estos dos parámetros, diámetro y helicida, resultan completamente definidos por los dos índices de hamada (n, m). Además veremos las propiedades del carbono, material del cual están hechos los nanotubos, para esto incluiremos las propiedades generales de este material, haciendo alusión a su alotropía y a su hibridación para entender de mejor manera la formación de los nanotubos de carbono.

Por otra parte, indicaremos las propiedades en distintos ámbitos, tanto en el área eléctrica como en la mecánica, ya que este nuevo material tiene distintas propiedades. En el área eléctrica mostraremos bajo qué condiciones el nuevo material se comporta como metálico o no metálico, y en la mecánica veremos su resistencia, por cierto, mecánica, pero también la térmica y su elasticidad. De esta manera podremos ver las distintas cualidades que tiene este material.

### 2.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CARBONO

El carbono es parte de los elementos del grupo IV A al igual que el silicio, el germanio, el estaño y el plomo.

A medida que se desciende en el grupo, aumenta el carácter metálico de sus componentes. El carbono y el silicio son no metales, el germanio es un semimetal y el estaño y el plomo son netamente metales.

El carbonó y el silicio tiende a formar uniones covalentes para completar su octeto electrónico, mientras que el estaño y el plomo, por su carácter metálico, tienden a cederlos.

Nombre	Carbono
Número atómico	6

Valencia	2,+4,-4
Estado de oxidación	+4
Electronegatividad	2,5
Radio covalente (Å)	0,77
Radio iónico (Å)	0,15
Radio atómico (Å)	0,914
Configuración electrónica	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>
Primer potencial de ionización (eV)	11,34
Masa atómica (g/mol)	12,01115
Densidad (g/ml)	2,26
Punto de ebullición (°C)	4830
Punto de fusión (°C)	3727

**Tabla 1** Tabla periódica del elemento periódico carbono [4]

Las propiedades físicas y químicas del carbono dependen de la estructura cristalina del elemento. La densidad fluctúa entre 2.25 g/cm<sup>3</sup> (1.30 onzas/in<sup>3</sup>) para el grafito y 3.51 g/cm<sup>3</sup> (2.03 onzas/in<sup>3</sup>) para el diamante. El punto de fusión del grafito es de 3500°C (6332°F) y el de ebullición es de 4830°C (8726°F). El carbono elemental es una sustancia inerte, insoluble en agua, ácidos y bases diluidas, así como disolventes orgánicos. A temperaturas elevadas se combina con el oxígeno para formar monóxido o dióxido de carbono. Con agentes oxidantes calientes, como ácido nítrico y nitrato de potasio, se obtiene ácido melítico [4]. De los halógenos sólo el flúor reacciona con el carbono elemental. Es decir, un gran número de metales se combinan con el elemento a temperaturas elevadas para formar carburos.

El carbono constituye el 0,032% de la corteza terrestre [6], no es muy abundante pero es muy relevante, por ser el componente universal de la materia viva se halla en todos los tejidos animales y vegetales, combinado con el hidrógeno y el oxígeno. Además, se presenta en forma de yacimiento de carbón, petróleo y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o piedra caliza. En la atmosfera se le encuentra bajo la forma de dióxido de carbono.

El carbono elemental se presenta en la naturaleza en cinco variedades alotrópicas como el carbón, el grafito, el diamante, los fullerenos y los nanotubos. Estos son materiales con propiedades muy diferentes, pero a nivel microscópico sólo difieren por las disposiciones geométricas de los átomos de carbono.

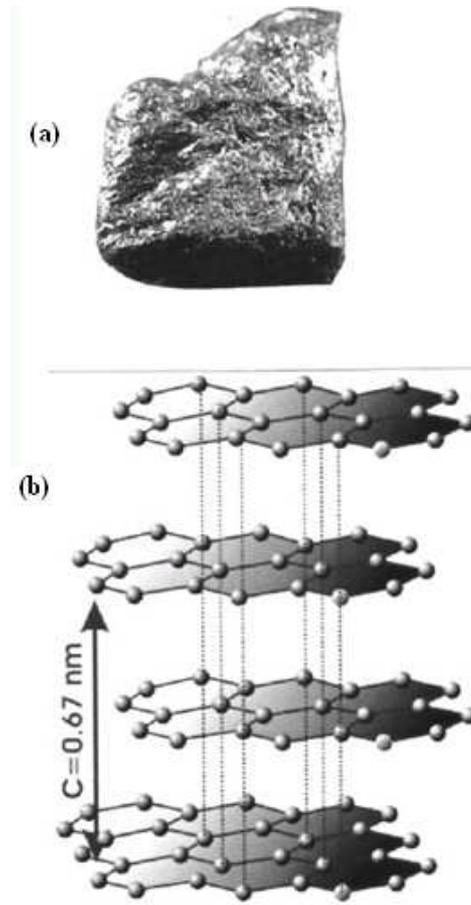
Otras formas con poca cristalinidad son el carbón vegetal, coque y negro de humo. El carbono químicamente puro se prepara por descomposición térmica del azúcar (sacarosa) en ausencia de aire.

La forma amorfa es esencialmente grafito, pero no llega a adoptar una estructura cristalina macroscópica. Esta es la forma presente en la mayoría de los carbones y en el hollín.

### **2.1.1 El grafito**

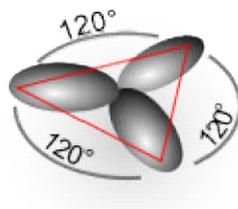
A presión normal, el carbono adopta la forma del grafito, en éste los átomos se disponen en planos superpuestos; en cada plano se distribuyen átomos en los vértices de hexágonos regulares. Cada átomo de carbono está unido a otros tres ubicados a igual distancia y en un mismo plano, y a un átomo del plano inmediato superior y a otro del plano inmediato inferior. La distancia entre átomos de un mismo plano es sensiblemente menor que la que separa dos planos consecutivos, lo cual explica, por ejemplo, la blandura del grafito, su poder lubricante y su alta conductividad eléctrica.

El grafito es sólido, blando, de color negro grisáceo, untuoso al tacto, de punto de fusión elevado. Ver figura 2.1 (a) Presenta brillo metálico y es buen conductor de la electricidad. Es la forma más estable del carbono a la temperatura ordinaria.



**Figura 2.1** (a) el grafito en su forma bruta (b) estructura cristalina del grafito

En el grafito cada átomo está unido a otros tres en un plano compuesto de celdas hexagonales; este estado se puede describir como: 3 electrones de valencia en orbitales híbridos planos  $sp^2$  y el cuarto en el orbital  $p$ . Ver figura 2.2



**Figura 2.2** Disposición geométrica de los orbitales  $sp^2$

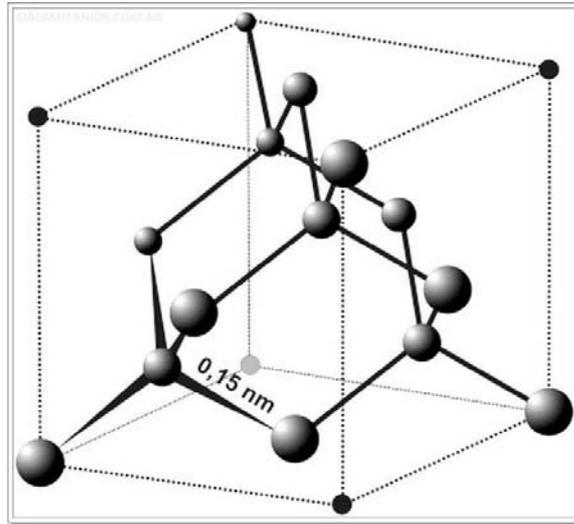
Las dos formas de grafito conocidas, alfa (hexagonal) y beta (romboédrica), tienen propiedades físicas idénticas. Los grafitos naturales contienen más del 30% de la forma beta, mientras que el grafito sintético contiene únicamente la forma alfa. La forma alfa puede transformarse en beta mediante procedimientos mecánicos, y ésta recrystalizar en forma alfa al calentarse por encima de 1000 °C.

Debido a la deslocalización de los electrones del orbital pi, el grafito es conductor de la electricidad, propiedad que permite su uso en procesos de electroerosión. El material es blando y las diferentes capas, a menudo separadas por átomos intercalados, se encuentran unidas por enlaces de Van de Waals, siendo relativamente fácil que unas deslicen respecto de otras, lo que le da utilidad como lubricante [6].

### **2.1.2 El Diamante**

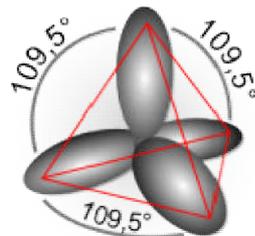
A muy altas presiones, el carbono adopta la forma del diamante, el cual presenta una estructura tridimensional donde cada átomo está unido mediante enlaces covalentes a otros cuatro átomos de carbono, encontrándose los 4 electrones en orbitales  $sp^3$  creando un tetraedro. Estos, a su vez se unen entre si en las tres dimensiones, formando cristales del sistema cúbico. Ciertas propiedades del diamante, como su dureza y alta densidad, se explican por la proximidad relativa de los átomos de carbono en esta estructura.

El diamante es un sólido incoloro y transparente. Su densidad es de  $3,5 \text{ g/cm}^3$ , siendo el más duro de todos los minerales (ocupa el décimo lugar en la escala de Mohs). No es conductor de la electricidad y presenta un índice de refracción muy elevado (igual a 2,42) que aumenta con el tallado.



**Figura 2.3** disposición de los átomos de carbono del diamante

Como en los hidrocarburos, el diamante presenta la misma estructura cúbica que el silicio y el germanio y, gracias a la resistencia del enlace químico carbono-carbono, es, junto con el nitruro de boro, la sustancia más dura conocida. La transición a grafito a temperatura ambiente es tan lenta que se vuelve indetectable. Bajo ciertas condiciones, el carbono cristaliza como lonsdaleíta, una forma similar al diamante pero hexagonal, ver figuras 2.3 y 2.4



**Figura 2.4** Disposición geométrica de los orbitales  $sp^3$

### **2.1.3 Los fullerenos**

Los fullerenos o fulerenos son la tercera forma más estable del carbono, luego del diamante y el grafito. Fueron descubiertos recientemente, y se han hecho muy populares entre los

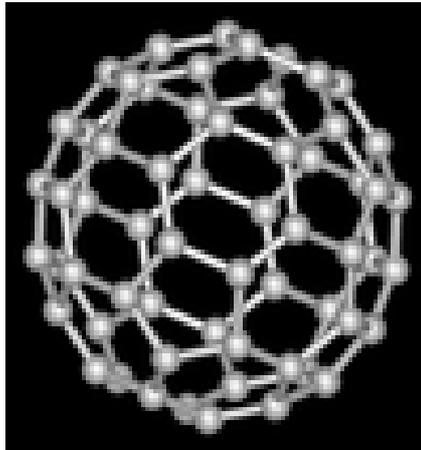
químicos, tanto por su belleza estructural como por su versatilidad para la síntesis de nuevos compuestos, ya que se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros.

A comienzos del siglo XXI las propiedades químicas y físicas de fullerenos se encontraban bajo intenso estudio en laboratorios de investigación pura y aplicada. En abril de 2003, se comenzó a indagar en el potencial uso medicinal de los fullerenos, fijando antibióticos específicos en su estructura para atacar bacterias resistentes y ciertas células cancerígenas, tales como el melanoma [7].

Los fullerenos no son muy reactivos debido a la estabilidad de los enlaces tipo grafito, y es también muy poco soluble en la mayoría de los disolventes, siendo los más comunes para los fullerenos el tolueno y el disulfuro de carbono; en el caso de las disoluciones de buckminsterfulereno puro, éstas tienen un color púrpura intenso. El fullereno es la única forma alotrópica del carbono que puede ser disuelta. Mientras los investigadores han podido aumentar su reactividad uniendo grupos activos a las superficies de los fullerenos, el buckminsterfulereno no presenta "superaromaticidad", es decir, los electrones de los anillos hexagonales no pueden deslocalizar en la molécula entera.

Los fullerenos tienen una estructura similar al grafito, pero el empaquetamiento hexagonal se combina con pentágonos (y en ciertos casos, heptágonos) lo que curva los planos y permite la aparición de estructuras de forma esférica, elipsoidal o cilíndrica. El constituido por 60 átomos de carbono (ver figura 2.5) que presenta una estructura tridimensional y geometría similar a un balón de fútbol, es especialmente estable. Los fullerenos en general, y los derivados del  $C_{60}$  en particular, son objeto de intensa investigación en química desde su descubrimiento a mediados de los 1980 [7].

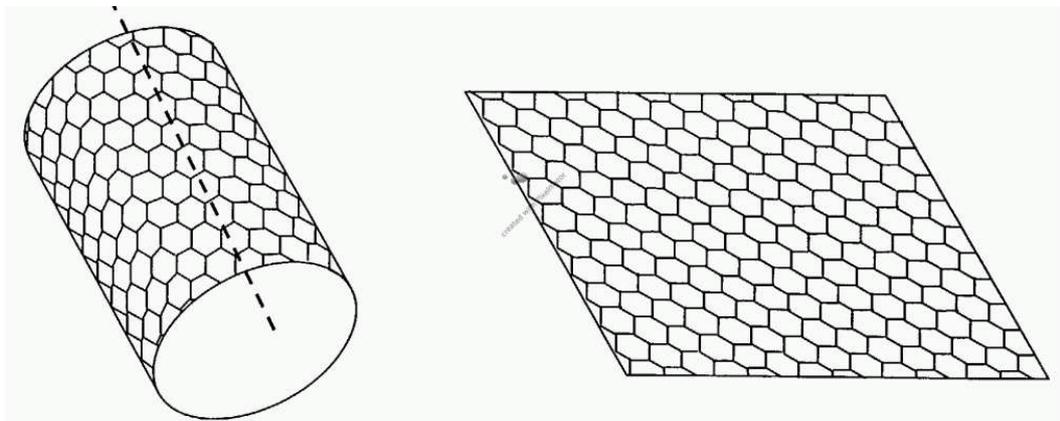
Un método habitual para producir fullerenos es hacer pasar una corriente eléctrica intensa entre dos electrodos de grafito próximos en atmósfera inerte. El arco resultante entre los dos electrodos produce un depósito de hollín del que se pueden aislar muchos fullerenos diferentes.



**Figura 2.5** Fullerenos  $C_{60}$

### **2.1.4 Nanotubos de Carbono**

Para entender qué es un nanotubo de carbono se toma una hoja de grafeno y se enrolla en forma cilíndrica como puede verse en la figura 2.6.



**Figura 2.6** esquema grafico de los nanotubos de carbono

El grafeno es una red hexagonal 2D de átomos de carbono. Cada átomo tiene enlaces con sus 3 vecinos, dos enlaces simples y un enlace doble. Este enlace doble se encuentra en resonancia química, es decir que sus electrones no están localizados. La distancia entre los átomos de carbono es de 1,425 Å.

Los nanotubos suelen tener diámetros típicos entre 0,4 y 2,5 nm. Por debajo de los 0,4 nm la tensión causada por la curvatura es muy fuerte y puede romper los enlaces y por encima de los 2,5 nm es energéticamente mejor no formar un tubo sino una cinta doble.

La densidad es 1,4 g/cm<sup>3</sup> y la longitud puede ser hasta varias micras (incluso centímetros si se trata de varios tubos paralelos). Es una relación longitud/diámetro de 1:1.000 - 1:1.000.000 [8].

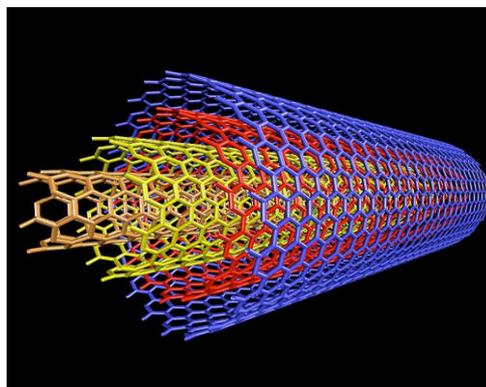
## **2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO**

Para entender aun más sobre este material desglosaremos la estructura además de la clasificación de estos, ya que tienen variables complejas en su estructura como su diámetro y el ángulo chiral, además las propiedades de este material dependen de su estructura.

### **2.2.1 Clasificación de los Nanotubos de Carbono**

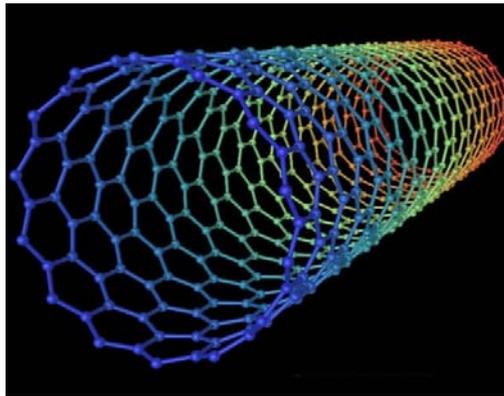
#### **2.2.1.1 clasificación general**

- Nanotubos de capa múltiple (MWNT): son aquellas formadas por capas concéntricas de estructura cilíndrica, y están separadas aproximadamente por una distancia similar a la distancia interplanar del grafito, o sea, nanotubos de diferentes diámetros, uno dentro del otro como lo demuestra la figura 2.7



**Figura 2.7** vista de MWNT (*multi walled nanotubes*) donde se aprecia las capas concéntricas

- Nanotubos de capa única (SWNT): como su sigla lo dice (single wall nanotubes) son los que se pueden describir como una capa bidimensional de grafito “enrollada” formando un cilindro de décimas de micrones de longitud y radio del orden de los nanómetros, los cuales además poseen en sus extremos semiestructuras de fullerenos, ver figura 2.8



**Figura 2.8** *vista de SWNT (single wall nanotubes) donde se aprecia la estructura única que forma el nanotubo*

#### **2.2.1.2 clasificación específica**

Nanotubos Armchair: los nanotubos tendrán esta denominación si  $(n=m)$  y si además posee una helicidad de  $\theta=0^\circ$ .

Nanotubos zigzag: se llaman así cuando  $(m=0)$  y posee además una helicidad de  $\theta = 30^\circ$ .

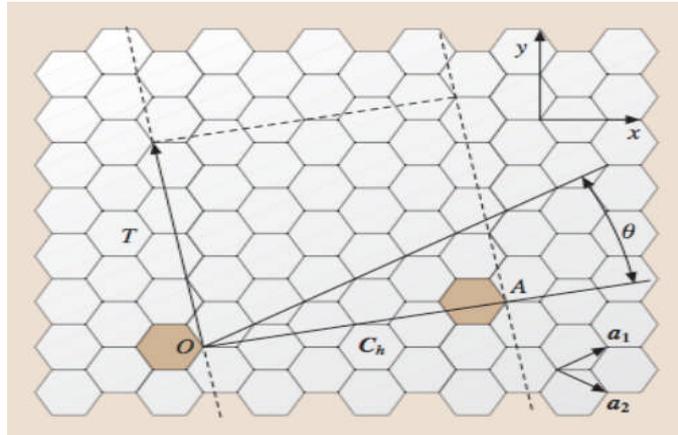
Nanotubos quirales (chiral): los nanotubos son tipo quiral si  $(n>m>0)$  y si además posee una helicidad de  $0^\circ < \theta < 30^\circ$

Ver figura 2.9

#### **2.2.2 Geometría**

Existen varias posibilidades de enrollar una hoja de grafeno. Una de ellas es cortando un rectángulo cuyas dimensiones vienen determinadas por el vector de chiralidad y el vector

perpendicular a éste. El vector de chiralidad en el nanotubo enrollado es paralelo al eje, mientras su vector perpendicular forma el perímetro. Se puede caracterizar a partir de los vectores base de la red de Bravais, ver figura 2.9.



**Figura 2.9** Estructura geométrica de los nanotubos de carbono

### 2.2.2.1 Determinación del vector Chiral $\vec{C}_h$ :

El vector chiral define la posición relativa de dos sitios en la red de grafito 2D (O y A) esta definido mediante dos números enteros (n,m) y por los vectores unitarios de la red hexagonal  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  (ver figura 2.9), entonces el vector chiral se puede escribir como:

$$\vec{C}_h = n \cdot \vec{a}_1 + m \cdot \vec{a}_2 \quad (2.2.2.1)$$

n y m son números enteros.

$\vec{a}_1$  Y  $\vec{a}_2$  son vectores unitarios

### 2.2.2.2 El vector de traslación $\vec{T}$ :

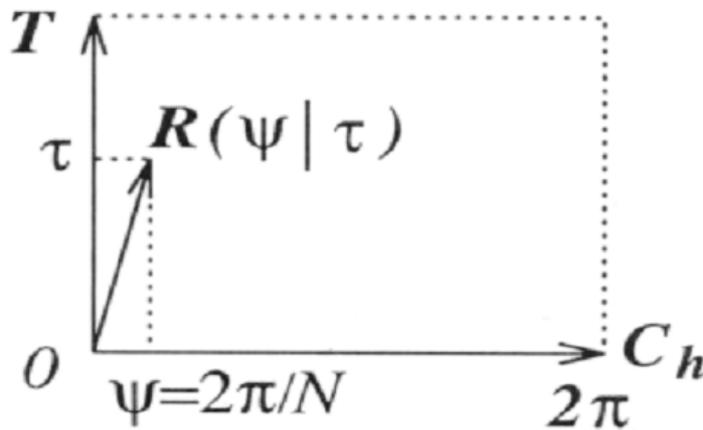
Es el vector unitario del nanotubo en una dimensión, y esta orientado en la dirección del eje del nanotubo, es decir, perpendicular al vector chiral.

El vector de traslación  $\vec{T}$  corresponde al primer punto de la red de grafito 2D que cubra a través de la línea normal al vector chiral los pasos de  $\vec{C}_h$  (ver figura 2.9).

### 2.2.2.3 El vector de simetría $\vec{R}$ :

Se define como el vector del sitio que tiene el componente más pequeño en la dirección de  $\vec{C}_h$  y es usado para determinar las coordenadas atómicas en un nanotubo [8][9].

Desde el punto de vista geométrico,  $\vec{R}$  es el vector que consiste en una rotación alrededor del eje del nanotubo por un ángulo  $\psi=2\pi/N$  (número de átomos de carbono en la dirección de  $\vec{C}_h$ ) combinado con una traslación  $\tau$  en la dirección de  $\vec{T}$ ; por consiguiente,  $\vec{R}$  puede ser denotado por  $\vec{R}=(\psi/\tau)$  (ver figura 2.10).



**Figura 2.10** vector de simetría  $R$

### 2.2.2.4 Determinación de la celda unitaria:

La celda unitaria en la red hexagonal real esta determinada por los vectores unitarios  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$ . Contiene dos átomos de carbono por celda unitaria [9].

Los vectores chiral  $\vec{C}_h$  y traslación  $\vec{T}$  son los vectores unitarios de la super-cell de la red real [9].

La celda unitaria del SWNT es el rectángulo definido por los vectores  $\vec{C}_h$  y  $\vec{T}$  mientras los vectores  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  definen el área de la celda unitaria del grafito 2D (ver figura 2.9)

### 2.2.2.5 Determinación del radio del Nanotubo ( $R_t$ )

De la figura 2.9 se observa que el perímetro de la base del nanotubo esta dado por el segmento OA, el cual coincide exactamente con el modulo del vector chiral, en consecuencia podemos tener la siguiente expresión para el radio del nanotubo:

$$R_t = \frac{|\vec{C}_h|}{2\pi} \quad (2.2.2.5.1)$$

Tenemos que:  $\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$  y el ángulo que forman los vectores  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  es de  $60^\circ$ , donde  $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a$

Entonces:

$$|\vec{C}_h| = \sqrt{n^2a^2 + m^2a^2 + 2nma^2 \cos 60^\circ}$$

$$|\vec{C}_h| = a\sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (2.2.2.5.2)$$

Remplazando (2.2.2.5.2) en (2.2.2.5.1)

$$R_t = \frac{|\vec{C}_h|}{2\pi} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (2.2.2.5.3)$$

Obtendremos la formula para determinar el radio de un nanotubo en condiciones de equilibrio

La longitud de enlace entre átomos de carbono es de  $1.42 \text{ \AA}$ . Fue medido por Spires y Brown en 1996, y posteriormente confirmado por Wilder en 1998 [11].

Usando esto tenemos  $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a = 2,46 \text{ \AA}$

Podemos además observar que se pueden diferenciar 3 tipos de nanotubos con respecto los índices de Hamada (n,m) tenemos  $n=m$ ,  $n \neq m$  y  $m=0$ .

Luego podemos obtener una expresión del radio para cada tipo de nanotubo:

- Nanotubo Chiral ( $n > m > 0$ ):

$$R_t = \frac{a}{2\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + nm}$$

- Nanotubo Armchair ( $n=m$ ):

$$R_t = \frac{a}{2\pi} n\sqrt{3}$$

- Nanotubo Zigzag ( $m=0$ ):

$$R_t = \frac{a}{2\pi} n$$

### **2.2.2.6 Determinación del ángulo chiral ( $\theta$ )**

Se llama ángulo chiral al ángulo comprendido entre los vectores  $\vec{C}_h$  y  $\vec{a}_1$  (ver figura 2.9)

De la definición del producto escalar tenemos:

$$\vec{C}_h \cdot \vec{a}_1 = |\vec{C}_h| |\vec{a}_1| \cos \theta$$

Obtenemos:

$$\cos \theta = \frac{\vec{C}_h \cdot \vec{a}_1}{|\vec{C}_h| |\vec{a}_1|} \quad (2.2.2.6.1)$$

De la figura 2.9 tenemos

$$\vec{a}_1 = a \cos 30^\circ \hat{i} + a \sin 30^\circ \hat{j} \quad (2.2.2.6.2)$$

$$\vec{a}_2 = a \cos 30^\circ \hat{i} - a \sin 30^\circ \hat{j} \quad (2.2.2.6.3)$$

Reemplazando (2.2.2.6.2) y (2.2.2.6.3) en (2.2.2.1) tenemos:

$$\vec{C}_h = n(a \cos 30^\circ \hat{i} + a \sin 30^\circ \hat{j}) + m(a \cos 30^\circ \hat{i} - a \sin 30^\circ \hat{j})$$

$$\vec{C}_h = (n + m)a \cos 30^\circ \hat{i} + (n - m)a \sin 30^\circ \hat{j} \quad (2.2.2.6.4)$$

Reemplazando (2.2.2.6.4) y (2.2.2.6.3) en (2.2.2.6.1) tenemos:

$$\cos \theta = \frac{(n+m)a^2 \cos^2 30^\circ + (n-m)a^2 \sin^2 30^\circ}{a^2 \sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$$

$$\cos \theta = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+m^2+nm}} \quad (2.2.2.6.5)$$

Se puede apreciar de la ecuación (2.2.2.6.5) que el ángulo chiral depende únicamente de los índices de Hamada (n,m).

Determinación del ángulo chiral para cada tipo de nanotubos:

- Nanotubo Chiral ( $n>m>0$ )

$$\cos \theta = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+m^2+nm}}; 0^\circ < \theta < 30^\circ$$

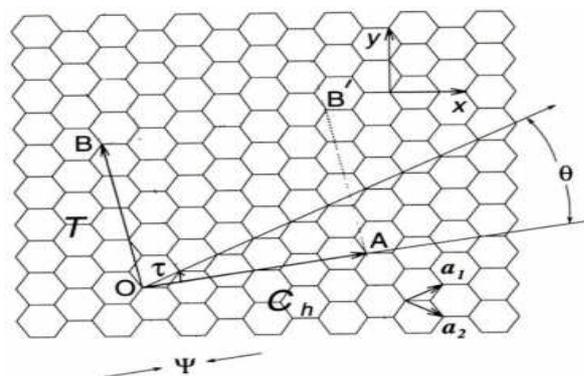
- Nanotubo Armchair ( $n=m$ ):

$$\cos \theta = \frac{3n}{2n\sqrt{3}}; \theta = 30^\circ$$

- Nanotubo Zigzag ( $m=0$ ):

$$\cos \theta = \frac{2n}{2n} = 1; \theta = 0^\circ$$

### 2.2.2.7 Determinación del número de hexágonos por celda unitaria:



**Figura 2.11** celda unitaria dada por el rectángulo O-B-B'-A

Como se muestra en la figura 2.11 podemos observar que la longitud del segmento OB coincide exactamente con el modulo del vector de traslación  $\vec{T}$ , el cual esta dado en forma general como [8]:

$$\vec{T} = \frac{2m+n}{N} \vec{a}_1 - \frac{2n+m}{N} \vec{a}_2 \quad (2.2.2.7.1)$$

Donde N es el máximo común divisor de (2m+n) y (2n+m) la cual es una condición muy importante para que el modulo del vector de traslación coincida con el primer punto de la red de grafito.

El modulo del vector de traslación es:

$$|\vec{T}| = \frac{a}{n} \sqrt{3} \sqrt{n^2 + m^2 + nm}$$

Además de la figura 2.11 se observa la celda unitaria del nanotubo es  $O-B-B'-A$  y a partir de la cual se puede hallar la expresión del numero de hexágonos por celda unitaria del SWNT, esta expresión es [9]:

$$N_{\text{hex}} = \frac{|\vec{C}_h| \cdot |\vec{T}|}{A_{\text{hex}}} \quad (2.2.2.7.2)$$

Donde  $A_{\text{hex}}$  es el área de un hexágono de la red 2D de grafito.

$$A_{\text{hex}} = \frac{a^2 \sqrt{3}}{2} \quad (2.2.2.7.3)$$

Finalmente reemplazando (2.2.2.1), (2.2.2.7.1) y (2.2.2.7.3) en (2.2.2.7.2) obtenemos la expresión final que nos permite calcular la cantidad de hexágonos por celda unitaria de SWNT [12].

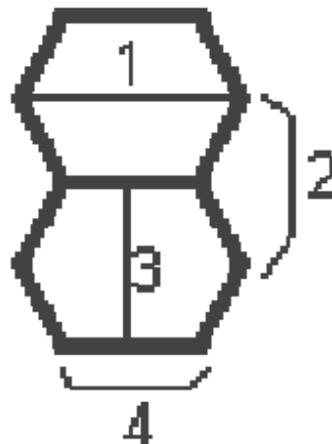
$$N_{\text{hex}} = \frac{2(n^2+m^2+nm)}{N} \quad (2.2.2.7.4)$$

### 2.2.2.8 Estructura en equilibrio de un SWNT

En esta sección se mostrará la estructura detallada de los SWNT en estado de equilibrio ideal, donde cabe mencionar que tales nanotubos pueden variar sus dimensiones.

<b>ESTRUCTURA EN EQUILIBRIO DE UN SWNT</b>	
Diámetro medio de SWNT	1.2-1-4 nm
Distancia de los átomos de carbono opuesto (línea 1)	2.83 Å
La separación de átomo de carbono análoga (línea 2)	2.456 Å
La separación de atadura de carbono paralela (línea 3)	2.45 Å
La longitud de atadura de carbono (línea 4)	1.42 Å

**Tabla 2** muestra los parámetros de estructura de los SWNT calculados en condiciones de equilibrio de la figura 3.12 [14]



**Figura 2.12** estructura 2D de un nanotubo de carbono, donde se muestran las líneas 1, 2, 3 y 4 cuyos valores se muestran en la tabla 1

## 2.3 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

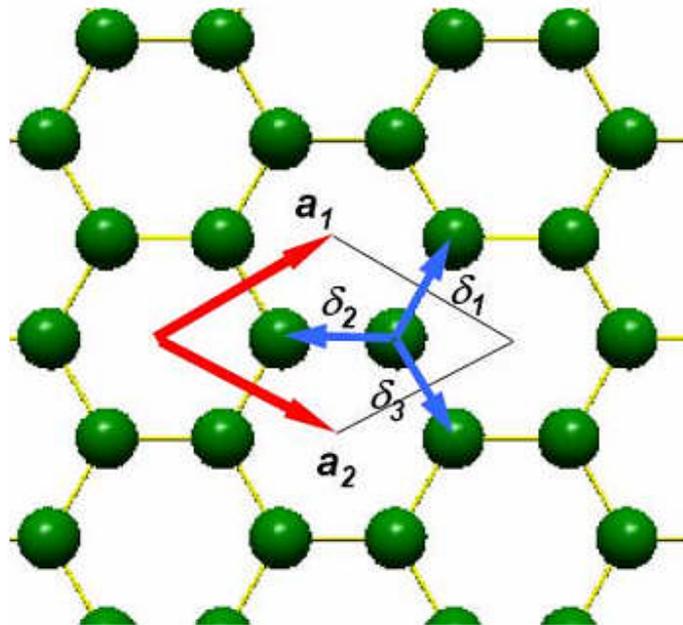
En general las propiedades dependen únicamente de su diámetro, la manera de enrollarse y el número de capas concéntricas, por lo que las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono son muy sensibles a su estructura geométrica. Las características electrónicas únicas de los nanotubos de carbono se deben al confinamiento de la cantidad de los electrones normales al

eje del nanotubo, poseen dos niveles disponibles para que los electrones se propaguen dentro de ellos, por lo que transportan electrones. Los nanotubos SWNT son materiales excepcionales, ya que pueden presentar características metálicas o semiconductoras.

### **2.3.1 Estructura de bandas del grafeno**

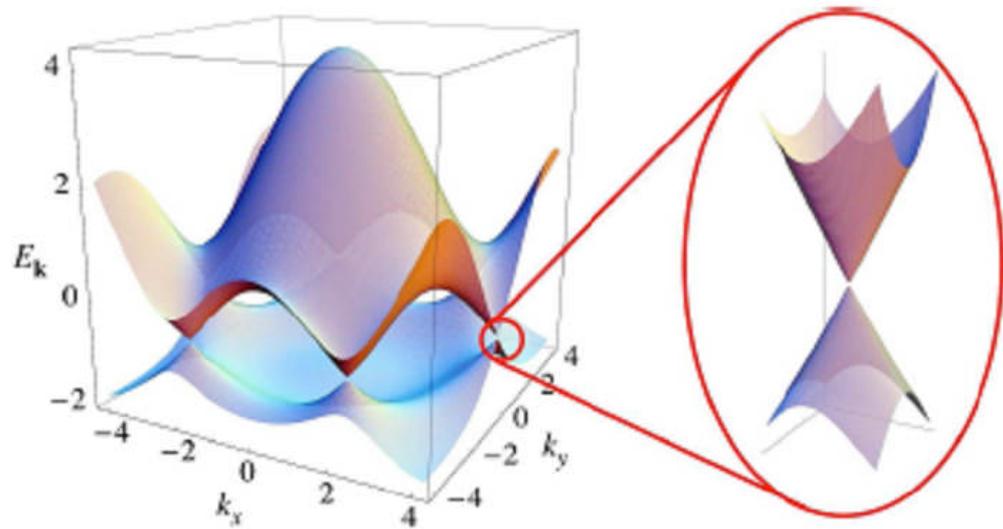
Si bien sabemos que los nanotubos tienen las mismas características que la lamina de grafeno pues los nanotubos se dice que son una lamina de grafeno enrollada en si mismo, por lo que empezaremos a analizar las propiedades de la lamina de grafeno.

La hibridación  $sp^2$  en los átomos de carbono genera una estructura bidimensional hexagonal que junto con otros carbonos forman la lámina de grafeno como se muestra en la figura 2.13.



**Figura 2.13** imagen de la estructura hexagonal, característica del grafeno

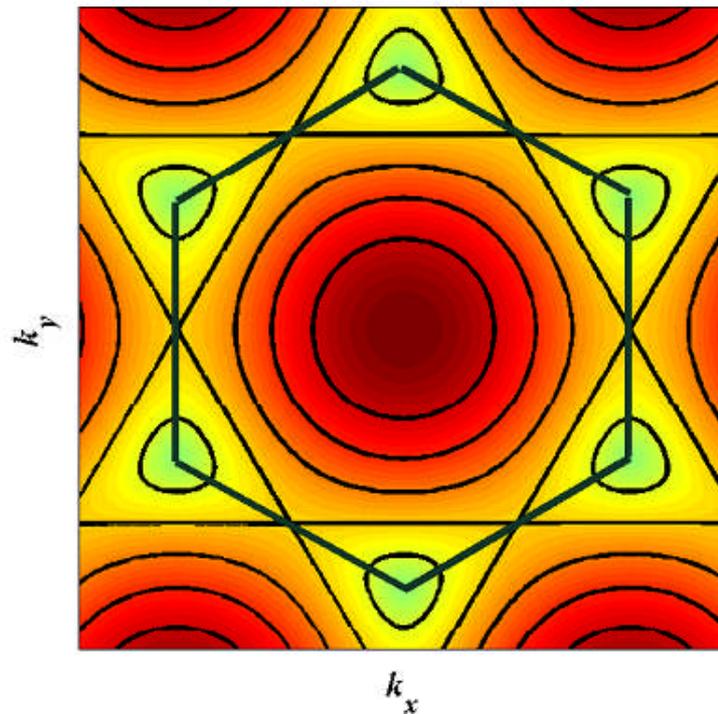
Esta estructura se suele decir que es un semiconductor de grafeno o un semimetal que presenta efecto de campo porque la banda de valencia y la banda de conducción se tocan en el punto  $K$  de la zona de Brillouin como se ve en la figura 2.14



**Figura 2.14** estructura de bandas del grafeno

$$E(k) = \varepsilon_0 \pm t \sqrt{1 + 4 \cos\left(\frac{3ak_x}{2}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}ak_y}{2}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{\sqrt{3}ak_y}{2}\right)} \quad (2.3.1.1)$$

La estructura de bandas se muestra en la figura 2.14. La zona de Brillouin en el grafeno resulta tener forma hexagonal Tal y como puede verse en la figura 2.15 las bandas de valencia y de conducción [16], representadas por las soluciones  $E(k) < 0$  y  $E(k) > 0$  respectivamente, se tocan en seis puntos, correspondientes a las esquinas de la zona de brillouin. Por la periodicidad de la red reciproca El número de puntos independientes se reduce a dos:  $K_1 = \frac{1}{a}\left(0, \frac{4\pi}{3}\right)$  y  $K_{-1} = \frac{1}{a}\left(0, -\frac{4\pi}{3}\right)$  Este par de puntos, en los cuales las bandas se tocan se conocen como puntos de Dirac. Puesto que cada átomo de carbono cede un electrón del orbital 2p a las bandas, tendremos que la banda de valencia se encuentra totalmente llena y la de conducción totalmente vacía, situándose el nivel de Fermi, para el material neutro, justamente en los puntos de Dirac, y las excitaciones electrónicas a baja energía se encontrarán en el entorno de dichos puntos.



**Figura 2.15** estructura de las bandas en el grafeno, la zona de brillouin hexagonal se muestra superpuesta

### 2.3.2 Estructura de bandas de los nanotubos de carbono

Como vimos anteriormente, los nanotubos son cilindros vacíos, considerados como una lámina de grafeno enrollada sobre un eje. Los dos tipos de nanotubos: de pared única y los multicapa, estos difieren uno del otro en sus propiedades físicas. Lo anterior debe tenerse en consideración a la hora de escoger el tipo de nanotubo para una cierta aplicación.

Cuando enrollamos la hoja de grafeno le imponemos una condición de contorno periódica (La función de onda de los electrones tiene que repetirse, cada vez que le damos una vuelta de  $360^\circ$  alrededor del perímetro), Eso hace que el vector de onda perpendicular al eje esté cuantizado, tiene que ser un múltiple entero del inverso del radio del tubo, o lo que es equivalente:

$$\pi D T_{\perp} = 2\pi N \quad (2.3.2.1)$$

*D: diámetro*

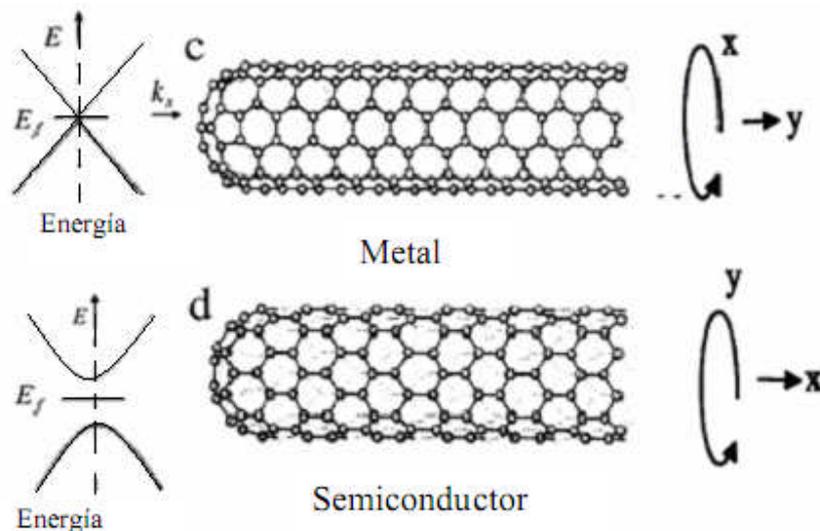
$T_{\perp}$ : La componente del vector de onda perpendicular al eje

$N$ : un número entero

(La componente paralela al eje no se cambia, sigue siendo continua)

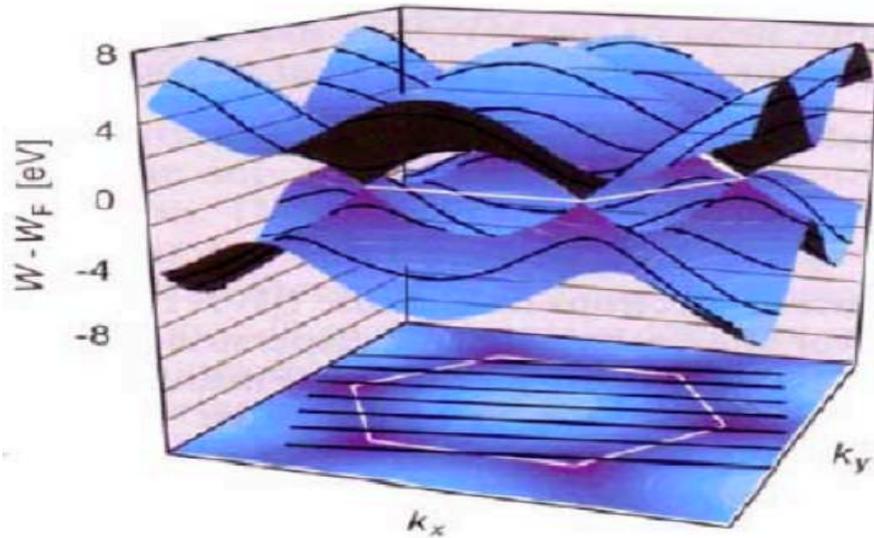
Dependiendo de como estén enrolladas la capa de grafeno, podemos conseguir nanotubos con una conducción metálica o semiconductor, este se puede observar en la figura 2.16, si el giro es entorno al eje X es un nanotubo semiconductor, si el giro es entorno al eje Y es metálico. Esta posibilidad notable de enrollarse en cualquier dirección (sea x o y), es única para cualquier material conocido. La manera en que una hoja se pliega se describe por dos parámetros: vector chiral ( $C_h$ ) y el ángulo chiral ( $\theta$ ). El par de números enteros ( $n,m$ ) describen completamente el carácter metálico o semiconductor de cualquier nanotubo. En general, un nanotubo es metálico si  $n = m$ , se transforman en semimetálicos si  $n$  no es igual a  $m$  [13].

En la mayoría de investigaciones se encontraron ( $n, m$ ) nanotubos metálicos los también llamados armchair, y los nanotubos caracterizados por ( $n,0$ ), los cuales son semiconductores y se los denomina nanotubos zigzag.



**Figura 2.16** descripción esquemática de la estructura metálica o semimetálica

La consecuencia es que ya no están permitidas todas las  $k$ 's de la estructura de bandas de la lamina de grafeno sino solo las que se ven como rayas negras en la figura 2.17.



**Figura 2.17** estructura de bandas de los nanotubos donde las rallas negras son los estados permitidos

Si los estados permitidos incluyen al punto “K” (donde se tocan la banda de valencia y la banda de conducción del grafeno), el nanotubo tiene un comportamiento metálico.

La amplitud de banda prohibida del nanotubo semiconductor esta dado por:

$$E_g = \frac{4\hbar v_f}{3d} \quad (2.3.2.2)$$

$E_g$  = energía de bangap

$\hbar$  = constante de planck

$d$  = diámetro del nanotubo

$v_f$  = velocidad de fermi

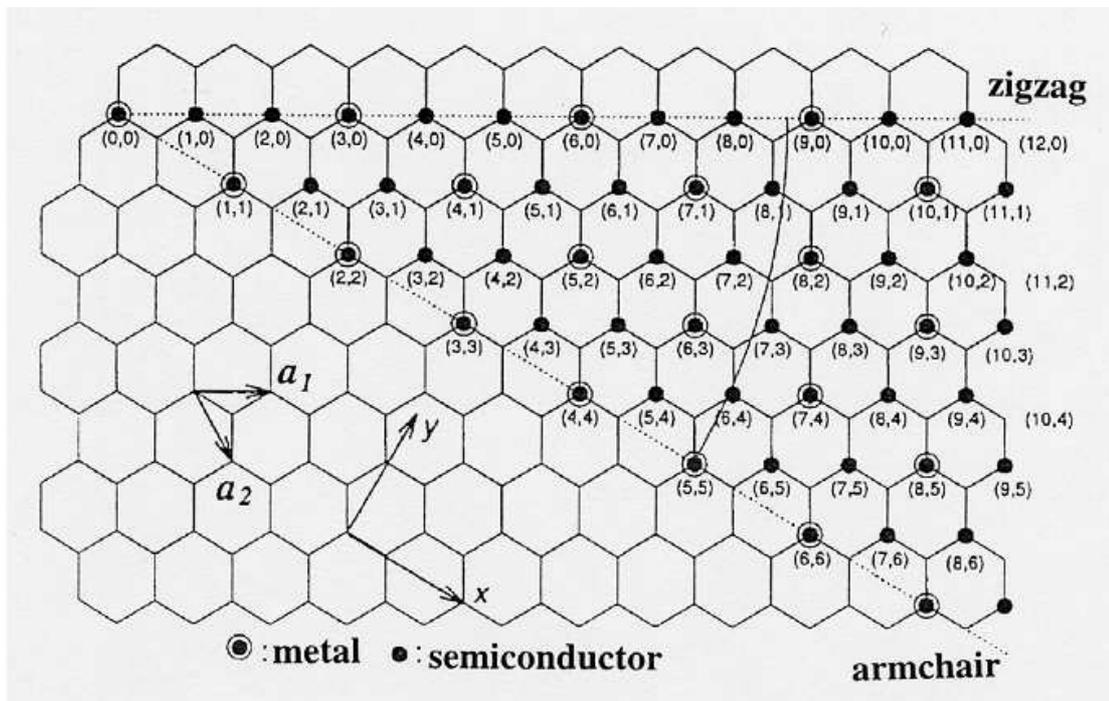
Para velocidades de fermi igual a  $8 \times 10^7$  m/s tenemos que  $E_g (ev) = \frac{0.9}{d}$  como los SWNT tienen diámetros pequeños del orden de una fracción de nanómetro a varios nanómetros los

nanotubos semiconductores tienen una amplitud de banda (bandgap) en el rango de 20 (mev) a 2 (ev) [13].

Teóricamente solo la configuración “armchair” (n,n) es un metal pero algunas otras configuraciones son prácticamente metálicos (a temperatura ambiente) por que sus estados permitidos están muy cerca del punto “K”. Se puede demostrar matemáticamente que eso es el caso cuando se cumple que la diferencia de n y m es un múltiple entero de 3[14]:

$$(n - m) = 3N \quad (2.3.2.2)$$

Estrictamente todos los que cumplen con la ecuación 2.3.2.2, deben ser semimetales, los tubos (n, n) o armchair, siempre poseen un carácter metálico, independiente de su curvatura debido a su simetría. En la figura 2.18 se presentan el rango de orientación del vector chiral y su respectiva propiedad eléctrica, extendida desde la dirección zigzag  $\theta = 0^\circ \leftarrow (n, 0)$  y la dirección armchair  $\theta = 30^\circ \leftarrow (n, n)$ .



**Figura 2.18** configuración electrónica de los nanotubos de carbono

En la figura se muestra el diagrama de un plano de grafito antes de ser enrollado. Los puntos negros con un círculo y los negros que toque la línea trazada para enrollar, definirán el carácter eléctrico. Así el zig-zag es 2/3 semiconductor 1/3 comportamiento metálico el gap de banda está alrededor de 0,5 eV aproximadamente y depende de varios factores (como del diámetro del tubo y de la temperatura); el armchair será 100% comportamiento metálico; los enrollamientos helicoidales podrán calcularse en el dibujo.

### **2.3.3 Conducción Eléctrica**

En 1998, Stephan Frank experimentó con la conductancia de los nanotubos. Usando un microscopio de sonda de barrido (SPM), comunicó cuidadosamente fibras de nanotubos con una superficie de mercurio. Dichos resultados revelaron que el nanotubo se comporta como un conductor balístico con comportamiento cuántico [11].

En un nanotubo estructuralmente perfecto, a baja temperatura y bajos voltajes los electrones se mueven libremente sin colisiones con los defectos, vibraciones de la red o con otros electrones del sistema. En este caso, un nanotubo metálico es un conductor ideal unidimensional y su régimen de conducción se denomina balístico ver figura 2.20 [18] (En un metal conductor normal como el cobre, los electrones de conducción son dispersados por las impurezas del cristal y la vibración térmica de los átomos del metal. Esta dispersión reduce la velocidad y el impulso de los electrones, dando lugar a lo que normalmente se denomina resistividad ver figura 2.19. En un nanotubo de carbono de gran calidad es raro que se produzca dicha dispersión. En algunos tubos, los electrones pueden ir de un extremo al otro sin sufrir dispersión. Este tipo de conducción se denomina conducción balística y da lugar al fenómeno de que la resistencia de un nanotubo puede ser independiente de la longitud del tubo [17]). En este régimen, la resistencia del nanotubo es la mínima permitida por la mecánica cuántica:

$$G = \frac{1}{2} G_o \quad (2.3.3.1)$$

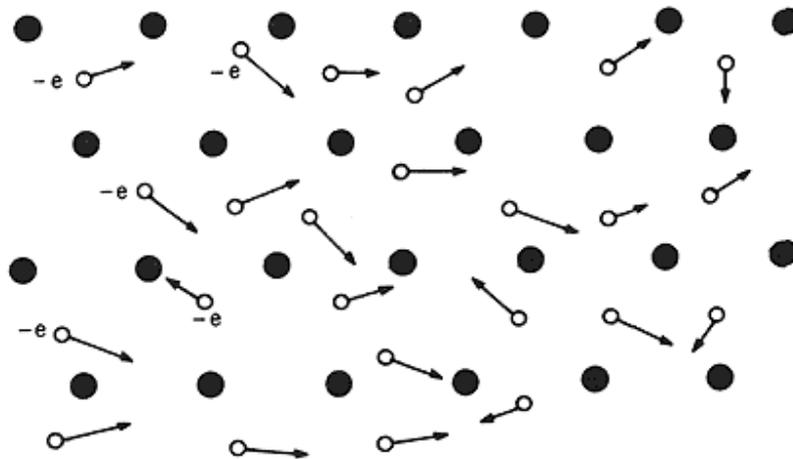
Donde:

$$G_o: \text{ es el cuanto de conductancia } (G_o = \frac{2e^2}{h} \approx 13k\Omega^{-1})$$

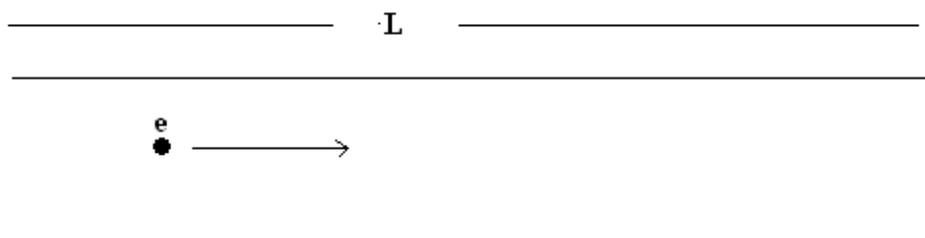
$\hbar$  : constante de planck's ( $6.63 \times 10^{-34} \text{J}$ )

$e$  : carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ )

El factor  $\frac{1}{2}$  indica que los nanotubos tienen dos canales de conducción en paralelo a lo largo de su eje y cada canal presenta la resistencia ideal  $G_0$ . Si el nanotubo no es perfecto su resistencia va siempre a aumentar, En este contexto, la resistencia del nanotubo no depende de la longitud si es un nanotubo perfecto [19].



**Figura 2.19** movimiento de los electrones en un material conductor como el cobre



**Figura 2.20** movimiento del electrón dentro de un nanotubo de carbono esto se denomina conducción balística

En 1999, Sanvito, Kwon, Tománek, y Lambert, usaron una técnica de dispersión para calcular la conductancia balística de los nanotubos multicapas. Encontraron que sus resultados explicaban estos valores inesperados encontrados por Frank en 1998. Sanvito declaró que algunos de los canales de conductancia cuántica fueron bloqueados por reacciones entre las paredes. También, se encontró que las reacciones entre las paredes de los nanotubos multicapas redistribuían la corriente entre los tubos de la estructura de forma no uniforme [11].

Al poco tiempo de haberse iniciado la investigación de los nanotubos, Thess calculó que la resistividad de las cuerdas de SWNTs era del orden de  $10^{-4}$   $\Omega$ -cm a 300K. Esto se hizo midiendo la resistividad directamente con una técnica de cuatro puntos. Uno de los valores que midieron fue  $0.34 \times 10^{-4}$ , la cual indica que las cuerdas son las fibras de carbono más conductivas que se conocen, incluso con el factor de error en la medición. En el mismo estudio de sus medidas de conductividad, Frank pudo alcanzar una densidad de corriente en el tubo mayor de  $107 \text{ A/cm}^2$ . Más tarde, Phaedon Avouris sugirió que las densidades de corriente estables de los nanotubos podrían ser llevadas a niveles tan altos como  $1013 \text{ A/cm}^2$  [25].

## **2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS**

La unión carbono-carbono en una capa de grafeno es la unión química más fuerte conocida en la naturaleza, por lo que se espera que las características mecánicas de los nanotubos tengan un gran potencial en las diferentes aplicaciones, en el aumento del esfuerzo de materiales compuestos. Algunos de los parámetros importantes que caracterizan las propiedades mecánicas de los nanotubos de carbono incluyen sus constantes elásticas, su módulo de Young, la proporción de Poisson, la dureza, la resistencia a la tensión y compresión.

### **2.4.1 Propiedades Elásticas**

Determinar las propiedades elásticas de los nanotubos ha sido una de las áreas más disputadas del estudio de los nanotubos en los últimos años. En general, los nanotubos son muy estables en dirección del eje, estos son más rígidos que el acero y son resistentes a daños de fuerzas físicas. Presionar la punta del nanotubo causará que este se doble sin dañar la punta o todo el nanotubo de carbono. Cuando la fuerza es removida, la punta del nanotubo recobrará su

estado original. Sin embargo, especificar numéricamente estos efectos es bastante difícil, por lo que no se ha podido acordar un valor [11].

El módulo de Young ( $E$ ) (es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza), está directamente relacionado a la cohesión de un sólido y por consiguiente, a la vinculación química de los átomos que lo constituyen, por lo que se relaciona con la fuerza de atadura  $sp^2$  [22]. Los cálculos para el módulo de Young de un nanotubo de carbono tipo SWNT, no dependen mucho del diámetro del nanotubo o de la chiralidad y tiene un valor aproximado de 1TPa (aprox. 1000 GPa), aunque un valor exacto no ha sido convenido.

Los resultados de varios estudios a través de los años han mostrado una gran variación en el valor reportado. En 1996, los investigadores de NEC en Princeton y en la Universidad de Illinois midieron que el módulo promedio es de 1.8 TPa [11] [14]. Esto fue medido primero permitiendo a un tubo permanecer libre y después tomando una imagen microscópica de su punta. El módulo es calculado de la cantidad de área borrosa vista en la fotografía a diferentes temperaturas. En 1997, G. Gao, T. Cagin, y W. Goddard III, reportaron tres variaciones en el módulo de Young a cinco lugares decimales que eran dependientes en el vector chiral. Ellos concluyeron que el nanotubo armchair (10,10) tiene un módulo de 640.30 GPa, un tubo de zigzag (17,0) tiene un módulo de 648.43 GPa, y un tubo (12,6) tiene un valor de 673.94 GPa. Estos Valores fueron calculados de las segundas derivadas del potencial. Al utilizar estos dos métodos diferentes, surge una discrepancia.

Más estudios se llevaron a cabo. En 1998, Treacy reportó un módulo elástico de 1.25 TPa utilizando el mismo método básico como se hizo dos años antes. Esto fue comparado con el módulo de los nanotubos multicapa (1.28 TPa), encontrado por Wong en 1997. Utilizando un microscopio de Fuerza Atómica (AFM), ellos movieron el extremo no anclado de un nanotubo fuera de su posición de equilibrio y registraron la fuerza que el nanotubo ejercía en la punta. En 1999, E. Hernández y Ángel Rubio mostraron usando cálculos de enlace fuerte, que el Módulo de Young era dependiente del tamaño y la chiralidad del SWNT, en un rango desde 1.22 TPa para los tubos (10,0) y (6,6) a 1.26 TPa para el SWNT (20,0). Sin embargo, utilizando los primeros cálculos principales, calcularon un valor de 1.09 TPa para un tubo genérico.

La evidencia previa podría llevar a asumir que el diámetro y la forma del nanotubo fue el factor determinante de su módulo elástico. Sin embargo, cuando trabajaba con diferentes MWNTs, Forró notó- en 1999- que sus mediciones del módulo de los MWNTs (utilizando AFM) no dependía fuertemente del diámetro, como se había sugerido recientemente. Ellos arguyeron que el módulo de los MWNTs correlaciona la cantidad de desorden en las paredes de los nanotubos. Sin embargo su evidencia mostraba que el valor para los SWNTs de hecho depende del diámetro; un tubo individual tiene un módulo de alrededor de 1 Tpa, mientras los manojos (o cuerdas) de 15 a 20 nm de diámetro tienen un módulo de alrededor de 100 GPa. Se ha sugerido que la controversia acerca del valor del módulo se debe a la interpretación del autor del grosor de las paredes del nanotubo. Si el tubo se considera como un cilindro sólido, entonces tendrá un menor módulo de Young. Si se considera que el tubo es hueco, el módulo se eleva, y entre más delgadas sean las paredes del nanotubo, crecerá el valor del módulo.

#### **2.4.2 Propiedades térmicas**

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de los materiales que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos. El valor de la conductividad varía en función de la temperatura a la que se encuentra la sustancia, por lo que suelen hacerse las mediciones a 300 K con el objeto de poder comparar unos elementos con otros [24].

Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, por lo que se denominan aislantes térmicos. Para que exista conducción térmica hace falta una sustancia, de ahí que es nula en el vacío ideal, y muy baja en ambientes donde se ha practicado un vacío elevado.

El coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ) representa la cantidad de calor (energía) necesaria por unidad de tiempo, medida en vatios por metro cuadrado de superficie que debe atravesar en forma perpendicular, para que durante la unidad de tiempo, de un espesor de 1 m de material homogéneo se obtenga una diferencia de 1 °C de temperatura entre sus dos caras. Todo ello en un sistema que se encuentra en estado estacionario, o sea, donde el campo de temperaturas no varía a lo largo del tiempo. La conductividad térmica se expresa en unidades de W/m·K [24].

El diamante y el grafeno son los materiales con mayor conductividad térmica que se conoce, es probable que los nanotubos, también se consideren excelentes conductores de la temperatura. Estudios teóricos han demostrado, que la conductividad térmica, puede llegar a tener valores de hasta 6600 W/m K [14]. En 1999, J. Hone, M. Whitney, y A. Zettle encontraron que la conductividad térmica dependía de la temperatura, y que era casi una relación lineal. Ellos sugirieron que la conductividad era lineal en temperaturas de 7K a 25K. De 25K a 40K, la línea incrementa en pendiente y se eleva con la temperatura por encima de la temperatura ambiente [11]. Ellos propusieron un modelo para explicar el comportamiento a bajas temperaturas que es:

$$K_{zz} = \sum C v_z^2 \tau \quad (2.4.2.1)$$

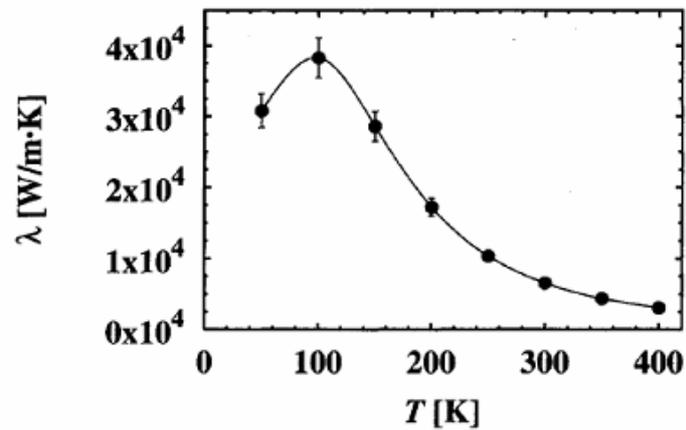
$K_{zz}$ : pendiente de la línea en la grafica

$C$ : capacidad de calor

$v$ : velocidad del sonido (Hone usó 1, 2, y  $0.8 \times 10^6$  cm/s)

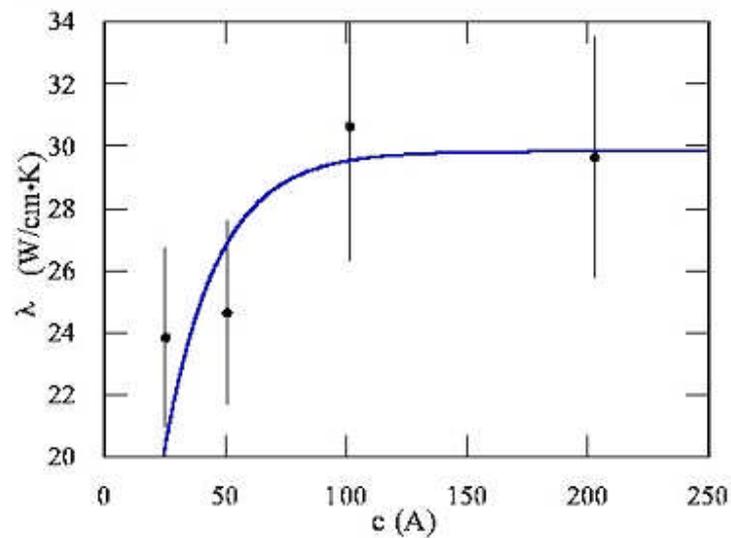
$\tau$ : es el tiempo de relajación, que es aproximadamente 10 – 11 s

En la figura 2.21, se muestran la representación de la conductividad térmica, con simulaciones de no-equilibrio de dinámica molecular, para nanotubos (10,10) alineados en el eje  $z$ . La razón para la conductividad térmica tan alta, se basa en la teoría cinética molecular y el módulo de Young muy alto. La conductividad térmica en comparación a las propiedades eléctricas, no dependen de la chiralidad o de su geometría atómica, a baja y normal temperatura [14].



**Figura 2.21** dependencia de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) de un nanotubo (10,10) para una temperatura debajo de 400K

Che, Cagin, y Goddard calcularon numéricamente la conductividad térmica de un nanotubo (10,10) la cual se aproxima a 29,8 W/cm-K mientras se incrementa la corriente aplicada a este ver figura 2.22 [21]



**Figura 2.22** conductividad térmica como función de la corriente que pasa a través del nanotubo

## 2.5 SÍNTESIS

<b>Propiedad</b>	<b>Nanotubo de carbono</b>	<b>Comparación</b>
Tamaño	0,6 a 1,8 nanómetros de diámetro (SWNT)	La litografía de haz electrónico puede crear líneas de 50nm de ancho
Densidad		El aluminio tiene una densidad de 2,7 g/cm <sup>3</sup>
(10,10) Armchair	1,33 g/cm <sup>3</sup>	
(17,0) Zigzag	1,34 g/cm <sup>3</sup>	
(12,6) chiral	1,40 g/cm <sup>3</sup>	
Punto de fusión	~3800← C	
<b>Propiedades mecánicas</b>		
Módulo de Young SWNT	~1000 GPa	El modulo de Young para el acero es 196 GPa
Fuerza de tensión máxima	~100 GPa	
Resiliencia	Puede doblarse a grandes ángulos y vuelve a su estado original, sin daño	Los metales y fibras de carbono, se fracturan ante similares esfuerzos
<b>Propiedades Eléctricas</b>		
Conductividad eléctrica	~ 10 <sup>9</sup> A/cm <sup>2</sup>	Los alambres de

		cobre se queman al conducir $10^6$ A/cm <sup>2</sup> , 1000 veces mayor que los metales nobles
Resistencia	$10^{-4}\Omega\text{-cm}$	
Espacios fundamentales		
Para (n, m); n-m es divisible entre 3 [Metales]	0eV	
Para (n, m); n-m no es divisible entre 3 [Semi-Conductores]	~0,5eV	
Propiedades Térmicas		
Conductividad Térmica	Se predice valores tan altos como 6600 W/m.K a temperatura ambiente	El doble, que la conductividad térmica, del máximo conocido, diamante
Estabilidad Térmica	Estable aún a 2800◀C, en el vacío y 750◀C en el aire	Los alambres metálicos en microchips funden entre 600 y 1000◀C

**Tabla 3** propiedades de los nanotubos de carbono [14]

	Ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Densidad (Kg/mm <sup>3</sup> )	Velocidad del sonido (m/s)
Acero	1-5	200	7900	5100
Fibra de boro	3,5	400	2450	12778
Fibra de carbono	2-5	250	1850	11600
Nanotubos	150	1000	1330	22014

**Tabla 4** comparación de los distintos materiales con los nanotubos

- 2 veces más ligero que el aluminio.
- 6 veces más ligero que el acero.
- Resistencia a la tracción más de 20 veces mayor que la de las aleaciones de acero de alta resistencia.
- Más elástico que los metales y las fibras de carbono.
- Soportan 1000 veces más corriente por cm<sup>2</sup> que el cobre, y más de 100 veces que los mejores conductores metálicos.
- Activan el fósforo con unas 40 veces menos tensión que las puntas de molibdeno, que además tienen vida muy limitada.
- Transmite casi el doble de calor que el diamante casi puro.

## **CAPITULO III**

### **3.0 SÍNTESIS DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO**

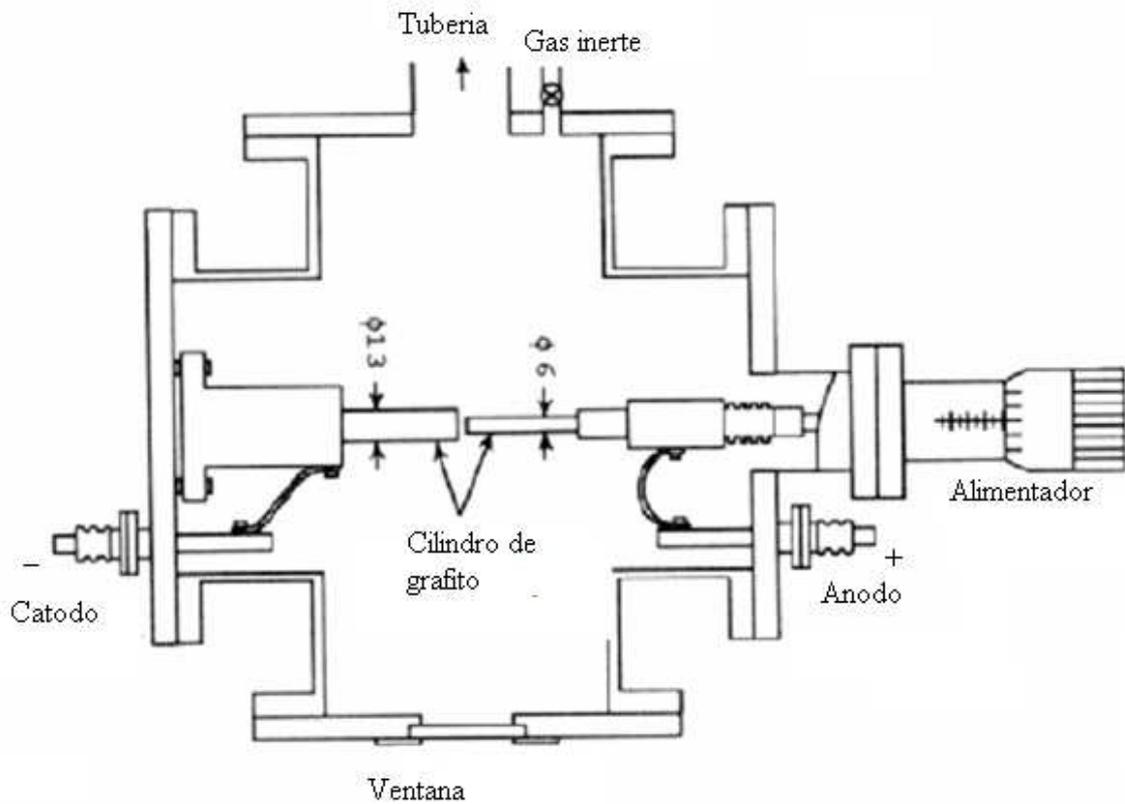
Hasta ahora hemos visto lo espectacular que son los nanotubos de carbono como nuevo material, sus increíbles propiedades eléctricas y mecánicas que hacen pensar en cómo es posible que este material sea tan perfecto y no tenga algún defecto, pues en este capítulo veremos el gran problema que existe con este material. Se trata de su fabricación.

La ciencia ha descubierto tres tipos de producción de hollín que contiene una proporción notable de nanotubos de carbono. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y sus desventajas, y aunque existen más métodos de producción, estos tres son los más usados y aceptados por la ciencia; estos son: la síntesis por método de descarga de arco eléctrico, síntesis por método de vaporización laser y el método de deposición química en fase de vapor.

Actualmente, los investigadores trabajan en encontrar técnicas más económicas y con mayor eficiencia. Los métodos de síntesis son de gran importancia, ya que algunas aplicaciones requieren gran cantidad de este material, y en otros casos, alta pureza, o una morfología especial.

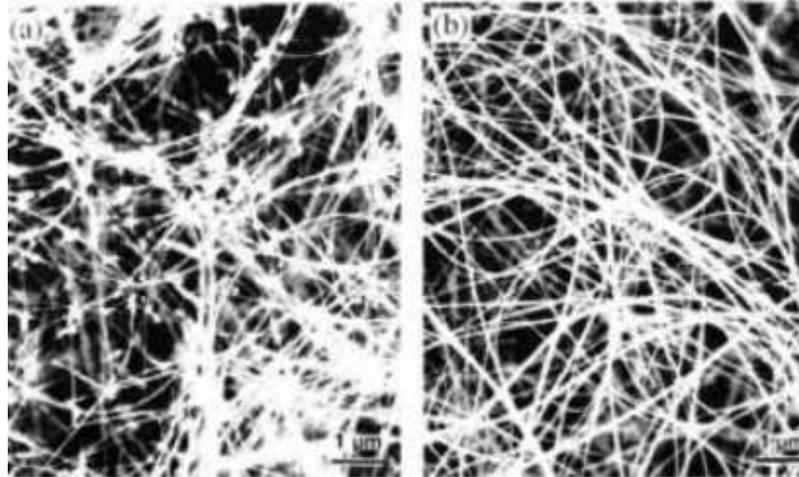
#### **3.1 SÍNTESIS POR EL MÉTODO DE DESCARGA DE ARCO ELÉCTRICO**

Este método primeramente fue utilizado para la fabricación de fullerenos, es el más sencillo y barato para producir nanotubos de carbono, sin embargo, es una técnica que produce una mezcla de componentes. Este método consiste en conectar dos barras de grafito con diámetros de 0,5 a 40 nm a una fuente de alimentación con voltaje de 20 – 50 V, separarlas unos milímetros y accionar un interruptor [9]. Al saltar una chispa de corriente DC de 50 – 120 A entre las barras y una presión entre 50 a 700 mbar proveniente de una atmosfera inerte (helio, argón), el carbón se evapora en un plasma caliente. Parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos [14]. Esto puede observarse en la figura 3.1 donde una cantidad de electrones choca en el ánodo y el carbono se condensa en la superficie del electrodo catódico.



**Figura 3.1** *diagrama del método de síntesis de nanotubos de carbono por descarga de arco eléctrico*

Este aparato se debe conectar a una canalización al vacío con una bomba de difusión y suministro de helio; para la alta producción de nanotubos con diámetros requeridos, se debe controlar el arco, lo que equivale directamente a controlar la temperatura del arco y la estabilidad del plasma formado entre los dos electrodos [14], además de la atmósfera inerte que puede ser una mezcla de helio y argón.



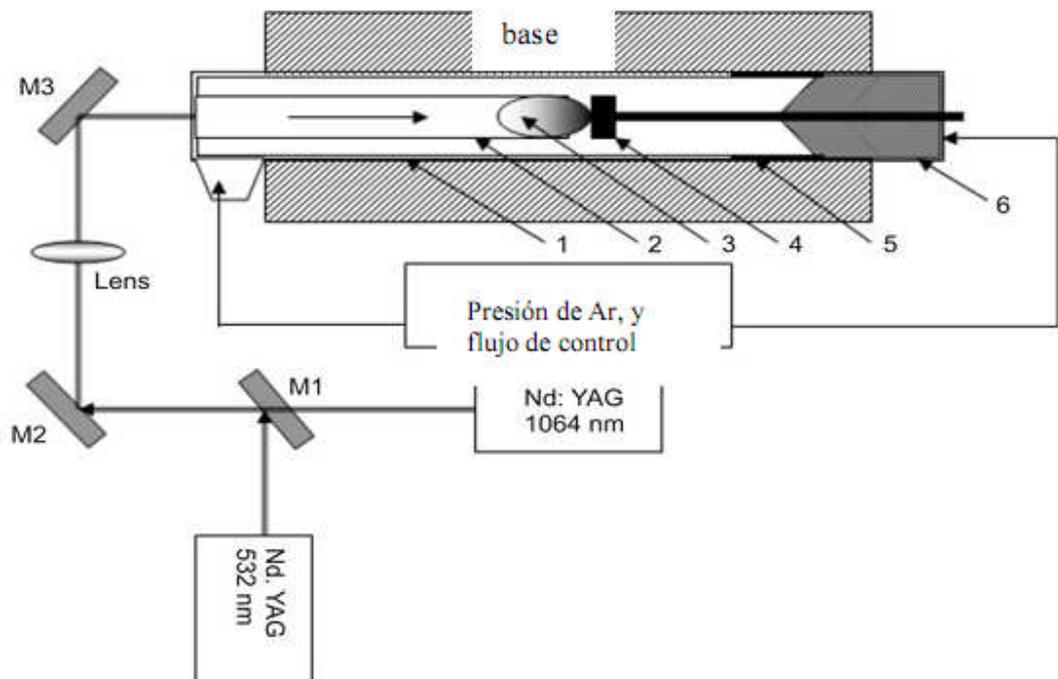
**Figura 3.2** imágenes de los nanotubos obtenidos por el método de descarga de arco eléctrico con un microscopio electrónico de barrido (SEM) (a) vista de los nanotubos recién recogidos. (b) los mismos nanotubos purificados con radiación.

Esta síntesis requiere la separación de nanotubos del hollín y de los metales catalíticos presentes en el producto, su rendimiento normal es hasta 30% en peso, puede ser para producir nanotubos de pared simple (SWNT) y múltiple (MWNT), esto depende de los electrodos que se utilicen. Para la síntesis de SWNT se utilizan ánodos que contengan metales (Fe, Ni, Co o Mo) y sus diámetros oscila entre 1,2 y 1,4 nm, mientras que para sintetizar MWNT se utilizan ambos ánodos de grafito solamente y su tamaño es aproximadamente 1,3 nm y un diámetro externo de 10nm [26]. Entre sus limitaciones se puede mencionar el tamaño corto de los nanotubos, además de depositarse en formas y tamaños aleatorios. Durante el proceso, se forma carbono amorfo y fullerenos.

### **3.2 SÍNTESIS POR EL MÉTODO DE VAPORIZACIÓN LASER**

Este método fue propuesto en 1995 por Smalley en la Universidad de Rice, en el se utiliza un dispositivo láser. Por medio de pulsos de láser en lugar de electricidad, se generan nanotubos de carbono, el láser utilizado vaporiza el grafito en un horno a altas temperaturas, en una atmósfera inerte [14]. Este método se puede realizar usando un láser continuo o pulsado de 100 a 1600 W con una longitud de onda de 10,6  $\mu\text{m}$ , además de poder utilizar un segundo láser, la principal diferencia es la intensidad de luz mucho más alta. En la figura 3.3 se observa un

esquema del dispositivo del láser, en ella se ve un tubo de cuarzo sellado (1), el flujo y la presión del gas argón son electrónicamente controlados por la instrumentación de MKS, el flujo de gas se confina en el tubo de cuarzo interno (2), antes que alcance el grafito compuesto (4), localizado centralmente en un horno de alta temperatura, en la pluma de plasma de carbono (3) se genera cuando el espejo M3 refleja las tramas del grafito (4), el material vaporizado se condensa en la parte de atrás (5) del horno donde se refresca por cobre enfriado por agua (6).



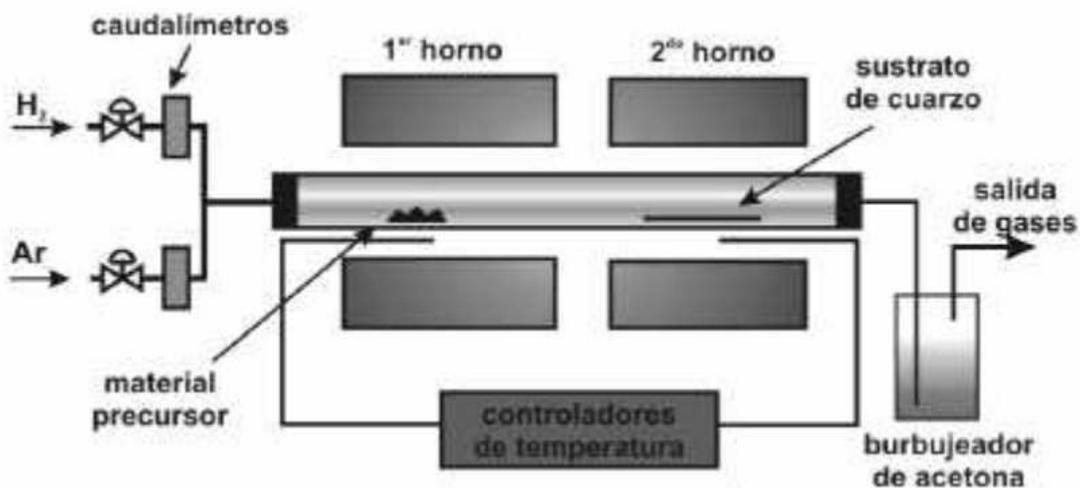
**Figura 3.3** *esquema de un dispositivo sintetizador por vaporización láser*

Como en el método de arco-descarga, se utiliza grafito puro para producir MWNT, la calidad depende de la temperatura de reacción (temperatura óptima de  $1200 \leftarrow C$ ), a más bajas temperaturas la calidad de los CNT empieza a descender y se observan defectos en su estructura; al agregar pequeñas cantidades de catalizadores, se generan SWNT, el rendimiento de la reacción depende de los metales utilizados y la temperatura del horno. Los SWNT sintetizados por este método, toman la forma de cuerdas, utilizando un láser dual la eficiencia es de aproximadamente 70% o mayor, los diámetros pueden controlarse variando la temperatura de reacción, su principal limitación es el costo que implica el láser y el proceso [9].

### 3.3 MÉTODO DE DEPOSICIÓN QUÍMICA EN FASE DE VAPOR (CVD)

El CVD por sus siglas en inglés (chemical vapor deposition) es un método muy diferente a los dos visto anteriormente, estos se clasifican en métodos de alta temperatura y corto tiempo de reacción, el CVD es de temperaturas medias y largo tiempo de reacción (algunos minutos u horas) [14].

Morinubo Endo, de la Universidad de Shinshu en Nagano, se introdujo en la fabricación de nanotubos. Este método consiste en colocar un sustrato que actúa como catalizador (Fe, Co, Ni), formando un filme fino de 1 a 50 nm de espesor en un horno de atmósfera inerte de helio de baja presión, se calienta a 600 grados centígrados y lentamente se añade gas de metano, acetileno o benceno, y se utiliza una fuente de energía (como un plasma o calor) para transferir energía a la molécula gaseosa de carbón, volviéndola reactiva, difundiéndose hacia el sustrato, que se calienta (aproximadamente entre 650 a 900  $^{\circ}\text{C}$ ), debido a las altas temperaturas del catalizador. Así, se aglutinan las nanopartículas que sirven como centros de crecimiento que forman la base de los nanotubos de carbono, esta partícula creada de base define el diámetro del nanotubo (ver figura 3.4 [26]).

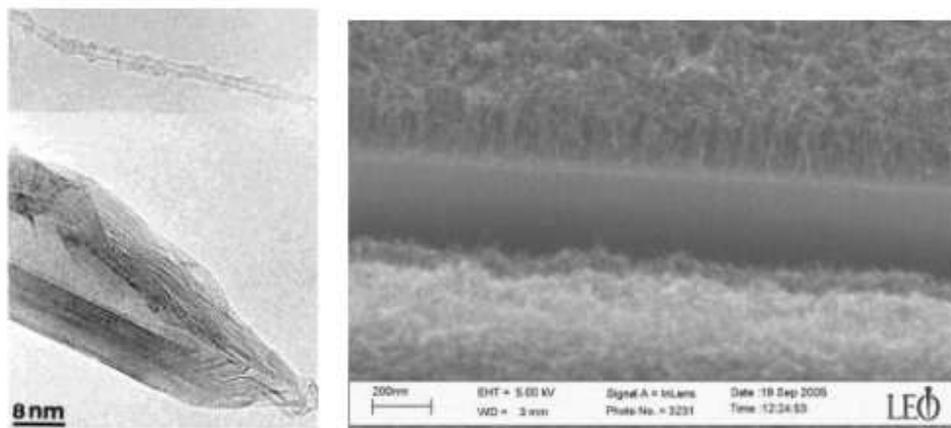


**Figura 3.4** *esquema representativo de un dispositivo sintetizador por CVD*

Este método presenta gran versatilidad, ya que puede producirse NTC, con gran variedad de precursores y catalizadores, además de crecimiento de NTC con morfologías iguales, se puede

utilizar a escala industrial, las producciones típicas del CVD, son de aproximadamente 30%. Entre las desventajas que presenta el método es el riesgo químico causado por el uso tóxico, corrosivo e inflamable de los gases del precursor [9] [14].

Los parámetros de esta técnica son el tipo de catalizador utilizado, los precursores de la reacción, el tiempo de reacción, la temperatura y la velocidad del flujo de gas. Actualmente, es posible producir nanotubos de carbono SWNT, y MWNT con muy buena calidad sin necesidad de una purificación extensa en la figura 3.5 se muestra los nanotubos obtenidos por medio de este método.



**Figura 3.5** a la izquierda *ejemplos de SWNT y MWNT* crecidos por CDV derecha depósitos de SWNT alineados crecidos por CVD.

	<b>Descarga de arco eléctrico</b>	<b>Vaporización laser</b>	<b>Deposición química en fase de vapor (CVD)</b>
Rendimiento	20 a 90%	Arriba de 70%	20 a 100%
SWNT	Nanotubos cortos Diámetros 0,6-1,4 nm	Nanotubos largos Diámetros 1-2 nm	Nanotubos largos con diámetros 0,6-4 nm
MWNT	Diámetro interior 1 a	No se produce,	Nanotubos largos

	3 nm diámetro exterior aprox. 10nm	debido al costo elevado.	con diámetros entre los rangos de 10-240 nm
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método mas sencillo, común y mas barato.</li> <li>-Diámetro controlado por transferencia y difusión termales.</li> <li>-Puede ser utilizado en presiones atmosféricas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método que permite producir nanotubos con alta pureza.</li> <li>-Fácil control del diámetro.</li> <li>-Pocos defectos en la estructura del nanotubo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método versátil (gran variedad de precursores y catalizadores).</li> <li>-Se puede crear nanotubos con morfología iguales.</li> <li>Mejor método adaptado para escala industrial.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Purificación costosa (debido a presencia de catalizadores).</li> <li>-Produce nanotubos con defectos estructurales.</li> <li>-Discontinuo, inestable.</li> <li>-Producción baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo demasiado costoso. (Láser y fuentes de energía).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Produce SWNT y MWNT con defectos.</li> </ul>

**Tabla 5** comparación de los distintos métodos de producción de nanotubos de carbono

## **CAPITULO IV**

### **4.0 APLICACIONES DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO**

Desde el descubrimiento de este nuevo material, se ha intentado darle distintos tipos de aplicaciones. Gracias a sus increíbles propiedades, el campo de la electrónica se ha convertido en su gran impulsor, donde es posible sacar el mayor provecho sin desmerecer las posibles aplicaciones en la mecánica o en el resto de las áreas. Sin lugar a dudas, la nanotecnología llegó para quedarse, para mejorar la hasta hoy día conocida “microelectrónica” disminuyendo a escala molecular los tamaños de los componentes hasta ahora conocidos en la electrónica, y puntualmente nos referimos a los transistores, ya que en la actualidad éstos son el corazón de cualquier artefacto, además, están en su límite de funcionamiento por las propiedades de los semiconductores, siendo los nanotubos de carbono la puerta de entrada a la nanoelectrónica, o la bien llamada “electrónica molecular”.

En este capítulo veremos las distintas aplicaciones que se le dan a los nanotubos como principal material de construcción en los dispositivos nanoelectrónicos como son los nanocables, nanodiodos, transistores con nanotubos, memorias, etc. Es decir los distintos tipos de elementos electrónicos para pasarlos a escala molecular.

#### **4.1 NANOCABLES O NANOALAMBRES**

Son estructuras moleculares de una dimensión con propiedades eléctricas, también son llamados alambres cuánticos (QWR). Entre las principales propiedades físicas de los nanoalambres deben tener un pequeño diámetro, deben tener una gran longitud, y deben estar orientados uniformemente [13]. Los nanoalambres no están constituidos por nanotubos, y el gran problema es que al reducir más su tamaño y al ser bombardeados por los electrones se produce mucho calor y estos se destruyen, sin embargo un nanotubo enrollado podría teóricamente permitir construir un nanoalambres por su cualidad de resistir el calor y ser un buen conductor eléctrico ver figura 4.1.



**Figura 4.1** *nanotubo enrollado.*

Los nanoalambres son considerados como componentes necesarios para la creación de chips electrónicos moleculares, éstos son la base de los circuitos lógicos a nivel de nanoescala. Los nanoalambres necesitan tener conexiones físicas capaces de terminar en conductores.

Los nanotubos de carbón son los candidatos a reemplazar a los alambres dentro de los chips soportan una temperatura de 1500°C. Estos conducen excelentemente la electricidad y son muy pequeños, permitiendo a los fabricantes desarrollar billones de transistores en un solo chip. Los nanotubos sin embargo solo pueden ser fabricados en un pequeño número en los actuales laboratorios.

Los nanoalambres tienen un ancho de 0,4 nm. Han sido desarrollados para mejorar elementos ferroeléctricos, dieléctricos o sensores en nanoelectrónica. Los nanoalambres semiconductores pueden transportar electrones y huecos, esto permite construir bloques (compuertas, mallas para chips) para electrónica a nanoescala [13].

Una nueva ciencia práctica de la nanoelectrónica está comenzando a emerger, donde los nanoalambres de una dimensión, conductores inorgánicos, semiconductores y dieléctricos son usados para crear nanocomponentes como transistores, diodos, capacitores y resistencias los cuales pueden ser colocados dentro de circuitos integrados muy densos.

## **4.2 NANODIODOS**

Un diodo es un dispositivo electrónico que sólo permite el paso de corriente en un sentido. Un diodo típico convencional es una unión p-n en la que un semiconductor extrínseco tipo p (dopado con aceptores – sustancias que aportan huecos) se une con un semiconductor extrínseco tipo n (dopado con donores – sustancias que aportan electrones), o mejor dicho, en un solo semiconductor un extremo se dopa con impurezas aceptoras y otra con donoras. A grandes

rasgos, el diodo sólo conducirá la electricidad cuando se conecte la parte p al polo positivo de una batería y la parte n al polo negativo (esta forma de polarización se llama “directa”), situación en la que los electrones pasan de la parte n, donde hay exceso de electrones, a la parte p donde hay exceso de huecos. Si se conecta la parte p al polo negativo y la parte n al polo positivo (“polarización inversa”) la corriente que atraviesa el diodo es prácticamente nula, aunque existe y se llama “corriente de saturación” [29].

El diodo de nanotubo de carbono, fue desarrollado por el Dr. Ji-Ung Lee, un científico del Nanotechnology AdvancedTechnologyProgram, del GEGlobalResearchCenter de Niskayuna, N.Y. [30].

El dopado tipo n de los nanotubos semiconductores, es crucial para la elaboración de dispositivos electrónicos como diodos o transistores. Fue establecido que el potasio (K) actúa como donador del electrón para los nanotubos, aumentando su conductancia significativamente.

Se pueden construir nanodiodos con nanotubos de carbono de múltiples formas. Algunas de ellas se exponen a continuación:

- Se ha comprobado que uniendo nanotubos metálicos y semiconductores dichas uniones se comportan como diodos permitiendo que la electricidad fluya sólo en una dirección [28].
- Se pueden construir diodos similares a las uniones P-N tradicionales utilizando campos eléctricos para conseguir regiones tipo p y otras tipo n, en lugar de dopar los nanotubos como se hace normalmente con los semiconductores normales. La unión p-n se consigue polarizando una mitad de un nanotubo con una tensión negativa y la otra mitad con una positiva. Además, al no tener un dopaje fijo, el diodo así construido puede cambiar dinámicamente de polaridad y pasar de ser p-n a n-p y viceversa. Polarizando de la misma forma ambas mitades se puede conseguir, un transistor de canal p (ambas mitades polarizadas negativamente) o de canal n (ambas polarizadas positivamente). Así es el diodo desarrollado por la empresa General Electric [13].
- Por último, y por la forma tradicional como se construyen los diodos de semiconductores normales dopando un nanotubo con aceptores en una mitad y con donores en la otra. De esta forma se tiene una unión p-n similar a las tradicionales pero con dimensiones nanoscópicas.

### **4.3 EL TRANSISTOR CON NANOTUBOS DE CARBONO**

El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término "transistor" es la contracción en inglés de transfer resistor ("resistencia de transferencia") [31]. Actualmente se los encuentra prácticamente en todos los artefactos domésticos de uso diario, básicamente, el transistor FET por sus siglas en inglés (Field effect transistor o transistor de efecto de campo) tiene tres conexiones: fuente ("source"), colector ("drain") y puerta ("gate"). Aplicando una corriente o una tensión, según los casos, a la puerta se controla la corriente que circula entre fuente y colector. Así, por ejemplo, en el transistor bipolar se aplica una corriente a la puerta, mientras que en el transistor de efecto campo lo que se aplica a la puerta es un voltaje. El primero se puede usar como amplificador (la pequeña corriente que se aplica a la puerta sale amplificada por el colector), mientras que un uso típico del segundo es como interruptor (con la tensión que se aplica a la puerta se pasa de conducción *on* a no conducción *off* entre fuente y colector) [31].

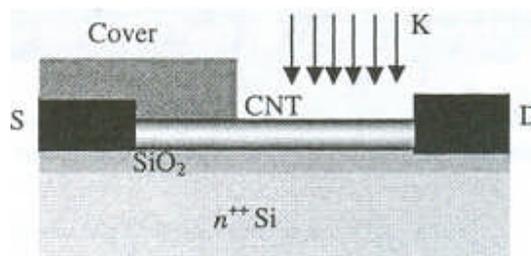
Las propiedades características de los nanotubos de carbono, hacen que éste sea el material ideal para muchas aplicaciones microelectrónicas, los nanotubos conducen corriente eléctrica prácticamente sin fricción, sobre la superficie gracias al transporte balístico de los electrones. Entre las aplicaciones más importantes en esta rama, se encuentran los transistores de efecto de campo, basados en Nanotubos (CNTFET). Casi todos los transistores con nanotubos son del tipo FET, aunque pueden crearse diferentes tipos de transistores con un nanotubo de pared única, los basados en efecto de campo, ha tendido a ser uno de los dispositivos eléctricos más importantes [23].

El dopado tipo n, el cual cambia el tipo de la mayoría de portadores en nanotubos semiconductores, de los huecos a los electrones esto se comprende en la geometría del dispositivo mostrada en la figura 4.2, en la que el nanotubo es modelado como dos electrodos metálicos, el drenaje y fuente, y está posicionado por encima de un substrato de Si/SiO<sub>2</sub> que juega el papel de barrera. La configuración en la figura 4.2 es conocida como CNT MOSFET (transistor metal-óxido de semiconductor campo efecto). El nanotubo dopado tipo n es colocado en una cámara de vacío que contiene vapores de potasio obtenidos por el calentamiento eléctrico de una fuente de potasio; sólo una parte del nanotubo puede exponerse al dopado de potasio, mientras que el resto del nanotubo se cubre con un material orgánico. Los niveles de dopado están en el rango  $n_k = 100-700 \text{ J}\mu\text{m}^{-1}$  que corresponden a unos pocos átomos de K por cada 1000 átomos de C [13]. El

transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término "transistor" es la contracción en inglés de transfer resistor ("resistencia de transferencia") [31]. Actualmente se los encuentra prácticamente en todos los artefactos domésticos de uso diario, básicamente, el transistor FET por sus siglas en inglés (Field effect transistor o transistor de efecto de campo) tiene tres conexiones: fuente ("source"), colector ("drain") y puerta ("gate"). Aplicando una corriente o una tensión, según los casos, a la puerta se controla la corriente que circula entre fuente y colector. Así, por ejemplo, en el transistor bipolar se aplica una corriente a la puerta, mientras que en el transistor de efecto campo lo que se aplica a la puerta es un voltaje. El primero se puede usar como amplificador (la pequeña corriente que se aplica a la puerta sale amplificada por el colector), mientras que un uso típico del segundo es como interruptor (con la tensión que se aplica a la puerta se pasa de conducción *on* a no conducción *off* entre fuente y colector) [31].

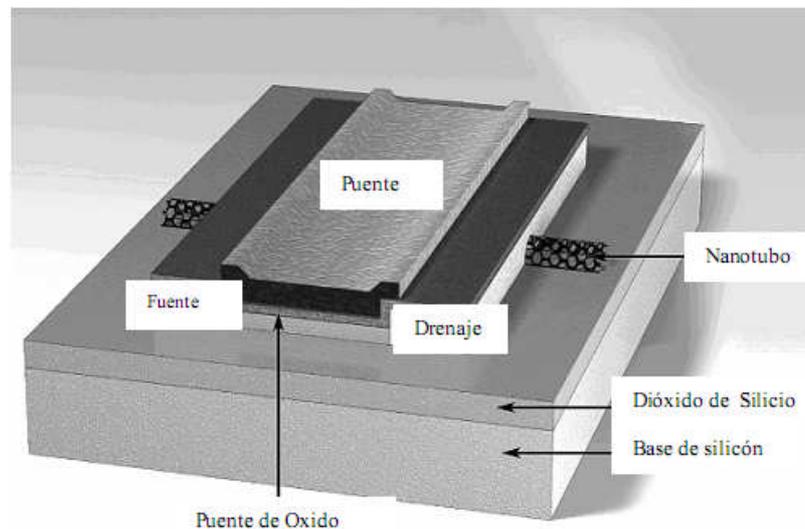
Las propiedades características de los nanotubos de carbono, hacen que éste sea el material ideal para muchas aplicaciones microelectrónicas, los nanotubos conducen corriente eléctrica prácticamente sin fricción, sobre la superficie gracias al transporte balístico de los electrones. Entre las aplicaciones más importantes en esta rama, se encuentran los transistores de efecto de campo, basados en Nanotubos (CNTFET). Casi todos los transistores con nanotubos son del tipo FET, aunque pueden crearse diferentes tipos de transistores con un nanotubo de pared única, los basados en efecto de campo, ha tendido a ser uno de los dispositivos eléctricos más importantes [23].

El dopado tipo n, el cual cambia el tipo de la mayoría de portadores en nanotubos semiconductores, de los huecos a los electrones esto se comprende en la geometría del dispositivo mostrada en la figura 4.2, en la que el nanotubo es modelado como dos electrodos metálicos, el drenaje y fuente, y está posicionado por encima de un sustrato de Si/SiO<sub>2</sub> que juega el papel de barrera. La configuración en la figura 4.2 es conocida como CNT MOSFET (transistor metal-óxido de semiconductor campo efecto). El nanotubo dopado tipo n es colocado en una cámara de vacío que contiene vapores de potasio obtenidos por el calentamiento eléctrico de una fuente de potasio; sólo una parte del nanotubo puede exponerse al dopado de potasio, mientras que el resto del nanotubo se cubre con un material orgánico. Los niveles de dopado están en el rango  $n_k = 100-700 \text{ J}\mu\text{m}^{-1}$  que corresponden a unos pocos átomos de K por cada 1000 átomos de C [13].



**Figura 4.2** configuración del dispositivo usando dopado.

Este transistor tiene dos electrodos de oro de un espesor entre 100 y 300 nm designados como fuente y drenaje, conectados entre sí, en los dispositivos convencionales se utiliza Silicio, pero en los CNTFET, éste se reemplaza por un Nanotubo (con un band gap de 0,6–0,8 eV). [14] Hay un tercer electrodo denominado, puerta. En un CNTFET, utilizan nanotubos semiconductores entre dos electrodos metálicos para crear un canal por donde circulan los electrones (ver figura 4.3) [14].

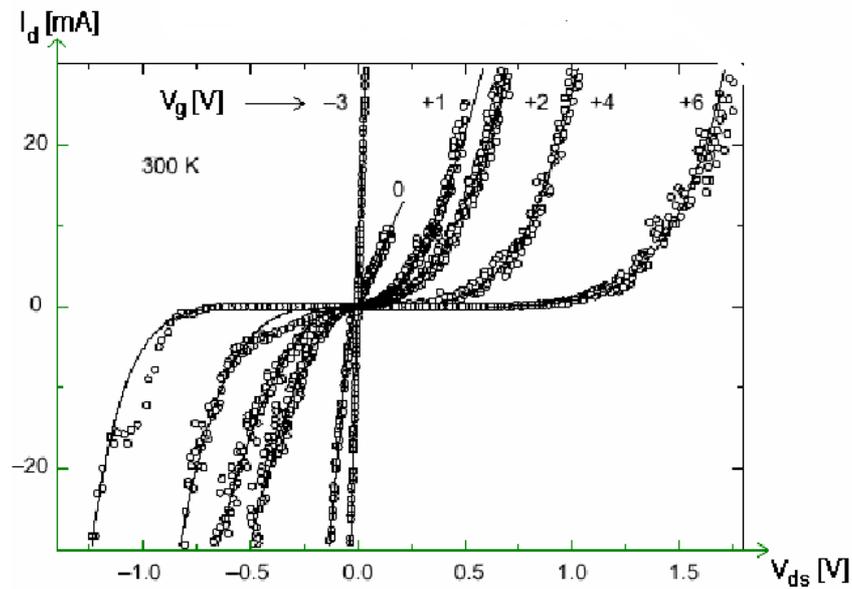


**Figura 4.3** esquema de un transistor de efecto de campo utilizando un nanotubo de carbono (CNTFET)

Cuando el voltaje de compuerta (gate) es negativo, la corriente fuente-drenaje es casi constante, la saturación indica que la resistencia del contacto de los dos electrodos prevalece por encima de la resistencia del CNT que depende del voltaje de compuerta (gate). Prácticamente, para  $V_G = 0$  el CNTFET está en el estado ON y la energía de Fermi se localiza cerca de la banda

de la valencia, si la longitud de enlace de banda es comparable a la longitud  $L$  de el CNT, y si la distancia de la compuerta (gate) CNT es más corta que la distancia entre los dos electrodos, una barrera se levanta en el medio del CNT para los voltajes de compuerta (gate) positivos [13].

Las curvas características de corriente de drenaje versus voltaje entre drenador y fuente de estos transistores se ven en la figura 4.4.



**Figura 4.4** función característica de un CNTFET

<b>Característica/Elemento</b>	<b>Transistor MOSFET</b>	<b>Transistor basado en nanotubos de carbono</b>
<b>Temperatura</b>	0-80°C	Desde temperatura ambiente hasta 1500°C
<b>Ancho de banda</b>	En microcircuitos hasta 3 GHz	En el orden decenas de Terahertz
<b>Formación de activación</b>	Mediante corriente y voltaje	Mediante la manipulación de la mecánica cuántica
<b>Tamaño</b>	40 millones por chip	1.4 gigas por chip

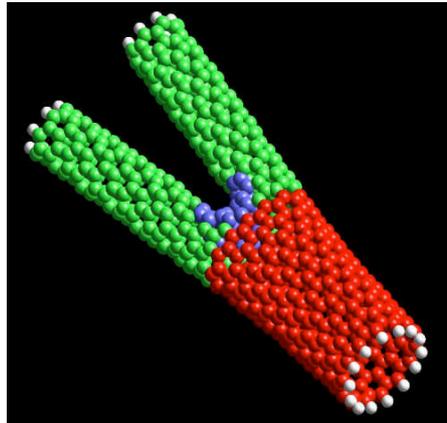
<b>Fuente mínima de alimentación</b>	1,5 voltios	0,5 voltios
<b>Se basa en partículas</b>	Silicio	Carbono

**Tabla 6** *tabla comparativa de un transistor de silicio normal con uno con nanotubo*

- Estos transistores gozan de una conductividad excelente, que dependerá del grado en que el nanotubo es semiconductor.
- Tienen también una estabilidad fuera de lo común. Los actuales MOSFETs soportan aproximadamente 650 A/m antes de romper, mientras que los CNTFET en las mismas condiciones, soportaran el orden de  $10^5$  A/m unas 150 veces más.
- Se puede llegar a reducir a 5nm la longitud del canal, distancia entre fuente y drenador. Esto conseguirá crear dispositivos de tamaño muy reducido.
- Son más rápidos que los mejores transistores actuales hasta el momento, trabajan a 1THz o más, unas 1000 veces más rápido que los actuales.
- El nanotubo de carbón es unidimensional, lo que reduce la probabilidad de dispersión, y permite operar en modo *balístico*.
- No es necesaria la pasivación de la interfaz nanotubo-dieléctrico de puerta, ya que el nanotubo conduce principalmente por la superficie donde las uniones químicas son estables.

#### **4.4 NANOTUBOS DE CARBONO CON FORMA DE Y**

Como vimos anteriormente los transistores que se construyen con nanotubos se podría decir que no son puros, ósea que no son construidos únicamente con nanotubos sino que tienen electrodos de metales de oro y una base de sustrato de silicio pero se están haciendo estudios de transistores puros como se observa en la figura 4.5.



**Figura 4.5** *transistor de nanotubo puro*

Estos se pueden conseguir controlando adecuadamente el proceso de crecimiento. Por ejemplo, en la Universidad de South California lo consiguen mediante el procedimiento de “chemical vapour deposition”; añadiendo partículas de hierro-titanio consiguen que salgan dos ramas a partir de otra principal, quedando las partículas en el interior de los nanotubos justo en el punto donde se unen las tres ramas [23].

Se ha comprobado que la corriente de electrones que circula entre las dos ramas secundarias puede ser controlada aplicando un voltaje a la rama principal. O sea, que el nanotubo se comportaría como un transistor y podría usarse como un interruptor lógico con características muy similares a los de silicio, pero con un tamaño mucho menor.

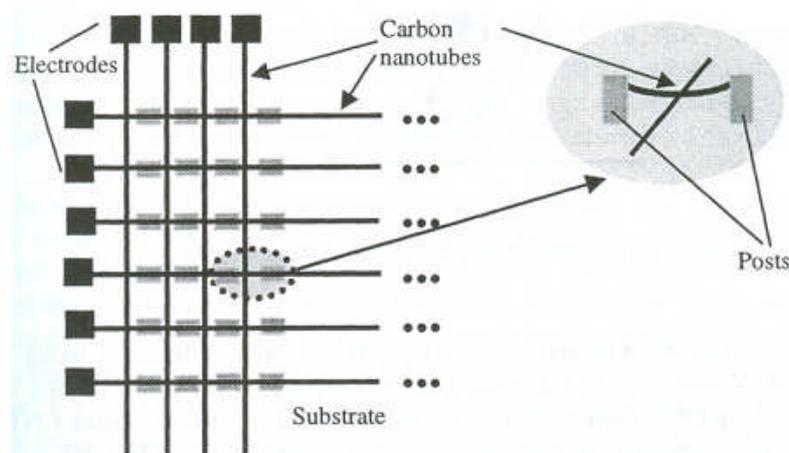
Estos transistores tienen una ventaja importante: no necesitan integrar nanotubos y silicio en el mismo dispositivo, lo cual presenta numerosas complicaciones, sino que están constituidos por sólo un nanotubo.

#### **4.5 MEMORIAS DE ACCESO ALEATORIO NO VOLATILES (RAM) CON NANOTUBOS DE CARBONO**

Con lo visto anteriormente, sobre transistores construidos con nanotubos de carbono, que son la base de cualquier componente electrónico, podemos decir que se puede mejorar cualquier componente existente en la electrónica actual, como las memorias de acceso aleatorio (RAM).

Estas memorias serían no volátiles, más baratas, mucho más rápidas, con una capacidad de almacenamiento mucho mayor a las actuales y con menor consumo.

La primera propuesta de una memoria de acceso aleatorio no volátil basada en CNT involucró una serie de transistores con nanotubos, cada elemento visible de la memoria es representado por CNT suspendidos y cruzados, los cuales se cambian eléctricamente al estado ON u OFF; tal configuración se muestra en la figura 4.5 [13].



**Figura 4.5** memoria RAM no volátil basada en CNT

La memoria de nanotubos consiste en un juego de CNT metálico paralelos en un sustrato y otro juego de CNT metálicos perpendiculares suspendidos en una serie periódica de postes. Cuando se aplica un campo eléctrico adecuado al nanotubo mediante una diferencia de potencial entre el electrodo y los interconectores, algunos de los átomos del nanotubo se mueven y éste se curva de forma similar a una catenaria, como lo muestra la figura 4.5, debido a fuerzas electrostáticas hasta que su parte central toca el electrodo inferior cerrando el circuito. El nanotubo suspendido representa el estado OFF o el 0 lógico, y el nanotubo en contacto con el electrodo, el estado ON o 1 lógico. Una vez que el nanotubo está en contacto con el electrodo, las fuerzas de Van der Waals prevalecen sobre las elásticas y mantienen el contacto incluso cuando el campo eléctrico desaparece, lo que permite que estas memorias sean no volátiles [34]. Esta memoria puede lograr el teranivel de integración (e.j., podrían integrarse  $10^{12}$  elementos en un centímetro cuadrado) usando elementos de dispositivos de 5nm de longitud hechos con

nanotubos metálicos y con distancias de 5 nm de longitud. Para un elemento de 5nm de largo el tiempo de cambio de valores (de uno a cero o viceversa) de esta memoria de nanotubos elemental es aproximadamente 5 ps, correspondiente a una frecuencia de funcionamiento de 200 GHz, más de 60 veces superior que la frecuencia de funcionamiento de computadoras actuales que ligeramente exceden a 3 GHz [23].

#### **4.6 EMISIÓN DE CAMPO**

La emisión de campo es una forma de arrancar electrones de un sólido mediante la aplicación de un campo eléctrico suficientemente fuerte. Para conseguir que los electrones escapen de la superficie del sólido es necesario aplicarles energía. Hay diversas formas de suministrar esa energía. Así, por ejemplo, en la emisión termoiónica la energía proviene del calor y los electrones se emiten desde un material incandescente; en el efecto fotoeléctrico es una radiación electromagnética incidente sobre el emisor la que proporciona a los electrones la energía necesaria para escapar. En la emisión de campo, sin embargo, al aplicar un campo eléctrico suficientemente elevado al emisor, los electrones escapan hacia el exterior mediante la formación de túneles cuánticos que les permiten atravesar la barrera de potencial de la superficie. Los túneles cuánticos permiten que partículas con energía insuficiente para atravesar una barrera de potencial la atraviesen debido a la probabilidad no nula de que se encuentren al otro lado. En la emisión de campo, el campo eléctrico propicia la aparición del efecto túnel. La emisión de campo depende de las propiedades del material emisor y de su forma; así para un material y un campo eléctrico dados, cuanto más alargado y estrecho sea el emisor mayor será la corriente de electrones obtenida.

Los nanotubos de carbono son excelentes emisores de campo, presentando ciertas ventajas frente a otros materiales. En primer lugar, emiten electrones a voltajes más bajos que otros electrodos debido a su forma alargada casi unidimensional. Además, debido a la fuerza con que los átomos de carbono se unen entre sí, tienen una vida útil mucho mayor, ya que son muy estables ante corrientes elevadas. El principal inconveniente del uso de los nanotubos de carbono como emisores de campo es que sus propiedades emisoras dependen totalmente de su estructura y, por tanto, del proceso de síntesis utilizado.

La corriente de electrones emitida por un nanotubo de carbono puede verse modificada por la adsorción de moléculas de diferentes sustancias en su superficie y por la presión de la cámara en la que se encuentra; esto último puede utilizarse para desarrollar sensores. También los defectos en los nanotubos producen cambios en la emisión de electrones.

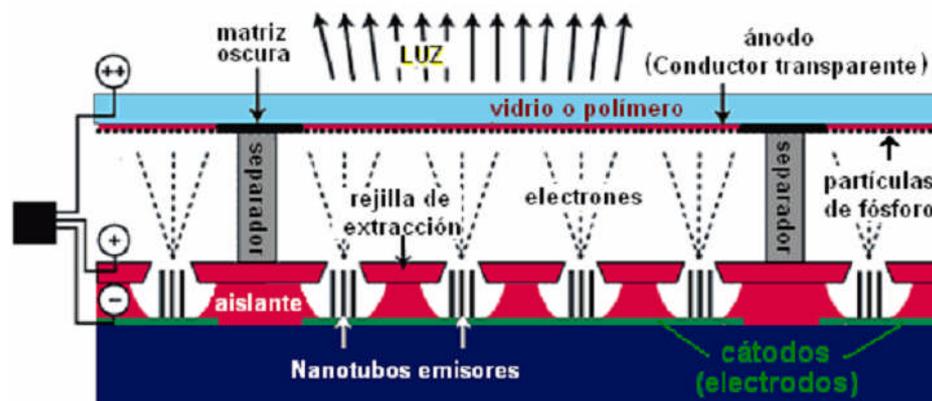
Hay múltiples aplicaciones posibles en las que se pueden emplear los nanotubos de carbono como fuentes de electrones. El término “electron gun” (traducido frecuentemente como “cañón de electrones”) es ampliamente utilizado en la literatura para referirse a las fuentes de electrones.

#### **4.6.1 PANTALLAS PLANAS O DE EMISIÓN DE CAMPO (FED)**

Las pantallas de emisión de campo (FED – field emission displays) constituyen una de las más interesantes aplicaciones de los nanotubos como emisión de campo.

Como ya se mencionó en las propiedades, los nanotubos, gracias a que es un excelente conductor y a sus características, son capaces de emitir electrones con tensión muy pequeña, entre 1 y 3 voltios, con una separación entre ánodo y cátodo de tan solo  $1\mu\text{m}$ .

Con esta pequeña tensión, se consigue un alto campo eléctrico en el extremo del nanotubo, lo que hace pasar corriente eléctrica por efecto túnel hacia el ánodo, que es la pantalla de fósforo. Esta emite luz al recibir el impacto de los electrones. El esquema se muestra en la figura 4.6 [35].



**Figura 4.6** esquema de una pantalla de emisor de campo con nanotubos

Las puntas de molibdeno que se usan actualmente, requieren campos de entre 50 y 100 V/m, y tienen tiempos de vida muy limitados.

La imagen será más nítida, gracias a las pequeñas dimensiones que requieren los nanotubos para emitir electrones que iluminen el fósforo. Si se reemplaza el vidrio por algún polímero vítreo, y los contactos metálicos por polímeros conductores, se conseguirán pantallas que además de ultraplanas, serán flexibles, capaces de doblarse como la portada de una revista.

Esta pantalla gastaran mucha menos energía que las actuales pantallas LCD o de plasma y disipan mucho menos calor, de ahí que también sean conocidas como pantallas frías. Además, tendrán una vida más larga que las pantallas actuales gracias a las propiedades de los nanotubos.

Samsung mostró un prototipo de una pantalla de 4,5" a color hecha de nanotubos de carbono con una resolución de 546 x 242 como se muestra en la figura 4.7 [35].



**Figura 4.7** *pantalla 4,5" a color*

#### **4.6.2 FUENTE DE RAYOS X**

Cuando se bombardea un metal con electrones, el metal emite rayos X. Por tanto, se puede fabricar una fuente de rayos X con un cátodo emisor de electrones que bombardean un ánodo metálico. El mecanismo es similar al ya descrito en el caso de las pantallas planas, pero sustituyendo el material luminiscente del ánodo por un metal. Las fuentes de rayos X convencionales usan emisores termoiónicos que alcanzan temperaturas de hasta 2000 °C. Los nanotubos de carbono, usando su propiedad de ser emisores de campo, pueden reemplazar a los

emisores termoiónicos en esta aplicación. Las ventajas que ofrecen son: mayor vida útil (los emisores termoiónicos funcionan durante tiempos relativamente cortos debido a las altas temperaturas que alcanzan), y mayor eficiencia energética. Además, al trabajar a temperatura ambiente, permiten construir fuentes de rayos X portátiles que podrán usarse en ambulancias, para detectores de seguridad en aeropuertos y otros edificios, etc. [23].

#### **4.7 SENSORES**

Un sensor es un aparato capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor, estas pueden ser, por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica obtenida puede ser una resistencia eléctrica, una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como un fototransistor), etc. [36].

Entonces, un sensor es un dispositivo que detecta cierta característica del medio externo, la transforma en otra que pueda ser fácilmente transmisible, medible y procesable, y transmite ésta última al dispositivo de control correspondiente. Realiza, por tanto, dos labores fundamentales: detección y transducción. El detector y el transductor pueden ser elementos separados o estar ambos integrados en el transductor. Es muy habitual que la característica a medir se transforme en magnitudes eléctricas, ya que éstas son fácilmente manipulables.

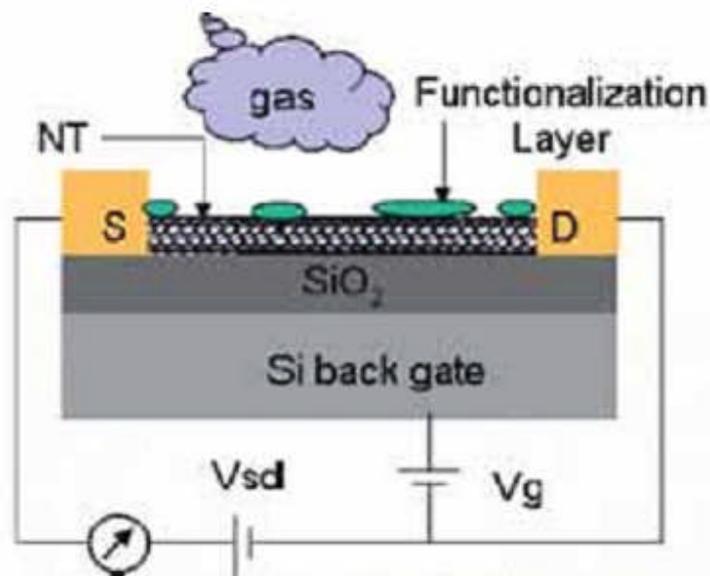
Los nanotubos de carbono se presentan como una opción interesante para la fabricación de sensores de pequeño tamaño, portátiles, rápidos y de bajo consumo.

En muchos casos, aunque no siempre, se aprovecha la circunstancia de las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono, las que dependen fuertemente de su estructura atómica y electrónica, y cualquier modificación de origen físico o químico que se produzca en ésta provocará un cambio en dichas propiedades. Midiendo el cambio tendremos un reflejo de la característica que lo provocó [23].

#### 4.7.1 SENSORES QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.

Los sensores químicos que se utilizan en entornos biológicos y los usados para la detección de contaminantes despiertan gran interés en la comunidad científica por sus potenciales beneficios para la salud y el medioambiente.

En muchas ocasiones los sensores químicos desarrollados a partir de nanotubos de carbono basan su funcionamiento en la facultad que tienen estos de cambiar sus propiedades eléctricas, en concreto, su resistencia y su capacidad al reaccionar químicamente con las sustancias que se pretende detectar, como se muestra en la figura 4.8. Pueden existir diferentes mecanismos de reacción. Una posibilidad es utilizar nanotubos con defectos de forma que las moléculas a detectar ocupen los huecos. Incluso se producen cambios en la capacidad del nanotubo si éste se recubre con otra sustancia que, de alguna manera, atrape a las moléculas a detectar, de forma que éstas se queden en la superficie del nanotubo, pero sin interaccionar directamente con este.



**Figura 4.8** *esquema de un sensor químico*

Los nanotubos de carbono también pueden detectar la presencia de sustancias que tengan cierta carga, basándose en que la resistencia de los nanotubos depende del número de cargas

libres en su interior y éste número se puede alterar mediante fuerzas electrostáticas que proceden del exterior.

En ocasiones, la función de los nanotubos de carbono en los sensores no es ser el detector, sino mejorar las prestaciones de ciertos materiales que se usan para realizar dicha función. Así, por ejemplo, en la reacción química que tiene lugar entre el analito y el electrodo del detector en sensores electroquímicos pueden hacer de catalizadores o facilitar el intercambio de electrones en una reacción de oxidación-reducción.

Los sensores químicos de nanotubos de carbono son rápidos y, a temperatura ambiente, mucho más sensibles que otros tipos de sensores usados actualmente. Debido a su pequeño tamaño y rapidez tendrán un papel muy importante en redes de seguridad y en control medioambiental.

### **5.7.2 SENSORES MECÁNICOS.**

Se utilizan para detectar fuerzas de todo tipo, y medir así dichas fuerzas, o bien la multitud de parámetros que se asocian a ellas. Se pueden citar como ejemplos los sensores acústicos, de flujo, de velocidad y de masa.

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados como sensores mecánicos, ya que al ser sometidos a una fuerza se producen pequeños desplazamientos en su estructura atómica y se alteran así sus propiedades eléctricas. Así, al presionar, retorcer o curvar un nanotubo se producen cambios en su resistencia, o sea, son piezorresistivos.

Los sensores mecánicos también se pueden construir con dispositivos resonantes: un cantilever que vibra puede medir la fuerza que se le aplica en su extremo libre por los cambios que se producen en la frecuencia, amplitud o fase de la vibración. Se puede utilizar un nanotubo de carbono como elemento vibrante. Así, por ejemplo, podrían fabricarse sensores de masa con resolución de 1 attogramo. La vibración del nanotubo puede ser conseguida mediante la aplicación de un voltaje variable adecuado que produzca las atracciones y repulsiones correspondientes.

### **4.7.3 SENSORES TÉRMICOS.**

Se utilizan para medir la temperatura o los cambios que se producen en ésta.

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados como sensores térmicos gracias a que su resistencia cambia con la temperatura. De hecho la resistencia aumenta prácticamente de forma lineal con la temperatura debido a que el calor crea vibraciones atómicas en el nanotubo y éstas hacen que se produzcan más colisiones con los electrones, dificultando su movimiento.

Otra propiedad de los nanotubos de carbono en la que se pueden basar los sensores térmicos es que para determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo presentan piroelectricidad (producción de electricidad cuando son calentados).

### **4.8 BATERÍAS CON NANOTUBOS DE CARBONO.**

Actualmente muchos pequeños dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles, entre otros, funcionan con baterías de ión litio. El Litio es un material interesante, ya que es un elemento que posee mayor potencial electroquímico, lo que indica que, teóricamente, es el mejor candidato para almacenar energía.

En las baterías de ión Litio básicamente lo que se produce es el tránsito, en función de un potencial externo aplicado de iones Li entre el cátodo (normalmente de  $\text{LiCO}_2$ ) y el ánodo de carbono (y a la inversa cuando se carga). La aplicación de los nanotubos en este caso, se produce en el ánodo de la pila, debido a su elevada superficie específica que permite aumentar la reacción con el electrolito y a su elevada conductividad. El ánodo se puede construir únicamente con nanotubos pero lo habitual es usar los nanotubos como aditivos en grafito. Se han realizado estudios con diferentes valores de % en peso de nanotubos y se obtiene una correlación entre el aumento del porcentaje y la mejora de la eficiencia de la batería en función del número de ciclos de carga. Hay una eficiencia del 100% de la batería tras 50 ciclos de carga con un % en peso de nanotubos del 10%. Según se piensa, las mejoras que introducen los nanotubos en esta aplicación son debidas a la mayor superficie de contacto que ofrecen los nanotubos con el electrolito y al aumento de la conductividad que ofrece la presencia de los nanotubos en el ánodo. Se muestran además otras ventajas como una mayor vida de la pila y unos electrodos mecánicamente más robustos. [37].

Estas baterías de ión litio mejoradas con nanotubos de carbono no son la gran revolución en cuanto a almacenamiento de energía, sino que es el nuevo y revolucionario método, lo que parece ser un descubrimiento sumamente importante. Científicos del Rensselaer Polytechnic Institute (RSI), crearon una batería con nanotecnología, la cual es 90 por ciento celulosa, o como lo conocemos, papel, común y corriente; dentro de ese papel, sin embargo, hay unos nanotubos de carbón que actúan como electrodos y se encargan de transmitir corriente [38].

Como cualquier otro dispositivo acumulador, la batería en la versión de papel comprende electrodos, electrolitos y un separador. La alineación vertical de los nanohilos de carbono constituyen el primer electrodo, y son depositados sobre un sustrato de Silicio usando un método de deposición vapor como se observa en la figura 4.9. Estos nanotubos dan al papel un aspecto oscuro como se ve en la figura 4.9. La celulosa vegetal es depositada entonces sobre esta distribución de nanotubos, solidificándose al secarse, formando el separador. Esta hoja de papel así preparada es impregnada con un líquido iónico (una sal orgánica líquida a temperatura ambiente) que proporciona el electrolito. Puesto que el líquido orgánico no contiene agua, no hay nada en la batería que pueda congelarse o evaporarse, por lo cual permite ser utilizada en zonas con temperaturas extremas dentro del rango de los 195-450K ( -200 °C hasta 180 °C).

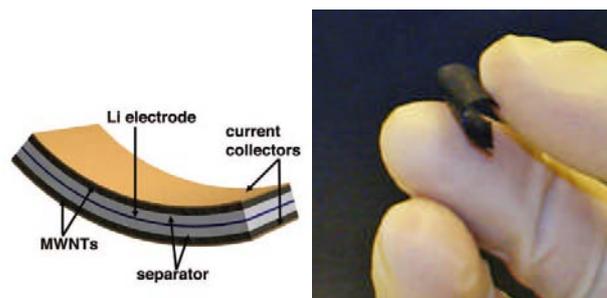


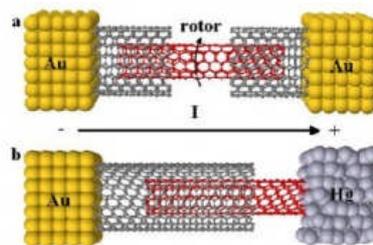
Figura 4.9 *esquema de una batería de papel y una imagen real de estas baterías*

La capacidad de generar electricidad es alta ya que una batería del tamaño de un sello de correos es capaz de generar un voltaje de aproximadamente 2.5V. Debido a que la celulosa es extremadamente biocompatible, este tipo de dispositivos se convierte en una gran alternativa como fuentes de energía para dispositivos implantados en el cuerpo. Los investigadores han

demostrado que las propias sustancias del cuerpo humano como la sangre, la orina o el azúcar pueden actuar como electrolito en este dispositivo evitando la falta de biocompatibilidad del electrolito original [39].

#### **4.9 NANOMOTORES**

Los investigadores describen el nanomotor propuesto como un molino de viento, aunque el dispositivo se parece más a un telescopio convencional. Se compone de un nanotubo de doble pared, donde el tubo exterior se sujeta a dos electrodos externos de oro, y el tubo interno es libre de moverse y girar. El otro modelo llamado nanodrill, es un tubo exterior que se sujeta a un solo electrodo de oro, mientras que en el otro extremo está en contacto con un electrodo de mercurio, pero todavía está libre de girar. Los dispositivos son llamados molinos de viento porque está alimentado por una tensión continua aplicada entre los electrodos, que produce un "viento" de los electrones como se muestra en la figura 4.10.



**Figura 4.10** *esquema de un nanomotor*

El flujo de electrones adquiere el momento angular, que produce una fuerza tangencial que hace que el nanotubo interior gire. Los investigadores calcularon que el viento de electrones puede producir una fuerza que supera considerablemente la fricción entre la pared - a veces hasta en tres veces su magnitud. Dependiendo de la tensión aplicada, la cámara de aire giratoria puede llegar a velocidades de hasta 8.000 metros por segundo [40].

Entre los posibles usos de este dispositivo se incluyen bombas de fluido a micro escala, e interruptores de memoria controlados magnéticamente. Una de las grandes ventajas de este dispositivo es que no requiere la presencia de un substrato metálico, (limitación que aquejaba a la

generación anterior de nanomotores) por lo que existen buenas perspectivas para ampliar el número de aplicaciones posibles.

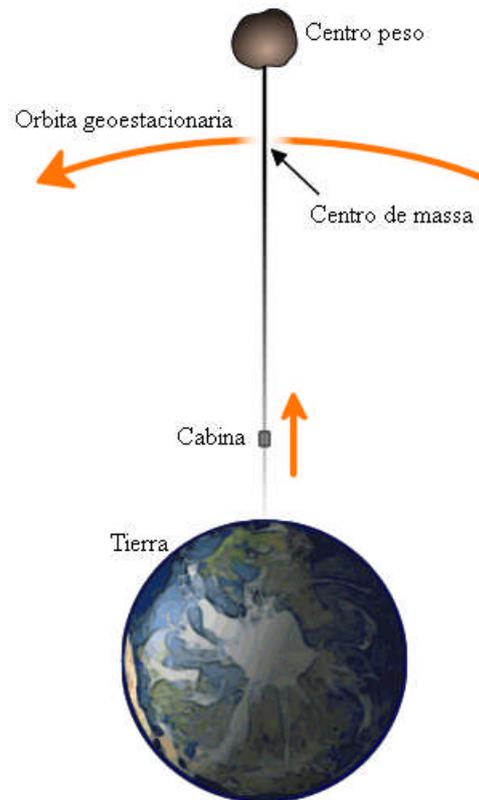
#### **4.10 EL ASCENSOR ESPACIAL**

Aunque esta no sea netamente una aplicación electrónica no cabe duda que es la idea más prometedora para la humanidad por el anhelo de conquistar el espacio.

El concepto fue formulado, tal y como se conoce hoy día, por el ingeniero ruso Yuri Artsutanov en 1960, dentro de un artículo del diario Pravda aunque reconocía que la resistencia a la tracción necesaria para construir el cable no podía obtenerse con ningún material conocido en ese momento.

Los ascensores espaciales eran hasta hace muy poco materia de ficción pura, pues ningún material conocido podía soportar la enorme tensión producida por su propio peso. Actualmente ciertos materiales comienzan a parecer viables como materia prima: los expertos en nuevos materiales consideran que teóricamente los nanotubos de carbono pueden soportar la tensión presente en un ascensor espacial. Debido a este avance en la resistencia de los nuevos materiales, varias agencias están estudiando la viabilidad de un futuro ascensor espacial [41].

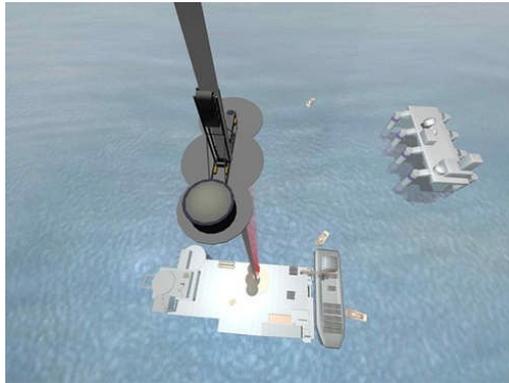
El concepto se refiere a una estructura que se extiende desde la superficie de la Tierra cerca del Ecuador a la órbita geoestacionaria (GSO) La fuerza centrífuga de la rotación de la Tierra es el principio fundamental detrás del ascensor como se ve en la figura 4.11. Como la Tierra gira, la fuerza centrífuga tiende a alinear los nanotubos de forma estirada. Hay una gran cantidad de diseños, pero en lo que todos concuerdan es en la estación base, la cinta de nanotubos y un contrapeso.



**Figura 4.11** estructura básica del ascensor espacial

La estación base caen en dos categorías móviles y fijas. Las estaciones móviles son típicamente grandes buques transatlánticos. Las plataformas fijas en general se encuentra en las localidades de altitud, como en la cima de las montañas, o incluso, potencialmente, sobre las altas torres.

Las plataformas móviles tienen la ventaja de ser capaz de maniobrar y evitar los fuertes vientos, tormentas, y los desechos espaciales. Aun cuando las plataformas fijas no tienen estas ventajas, se puede decir que tendrían acceso a energía más barata y fiable además que se requeriría un cable más corto. Si bien la disminución de la longitud del cable puede parecer mínima (no más de unos pocos kilómetros), el grosor del cable podría reducirse en toda su longitud, reduciendo significativamente el peso total.



**Figura 4.12** *esquema propuesto de una plataforma con el ascensor*

El cable en todos los diseños propuestos siempre es de nanotubos de carbono, ya que se necesita una resistencia a la tracción de 65 a 120 GPa y la resistencia a la tracción de los nanotubos de carbono teórico se ha estimado entre 140 y 177 GPa (dependiendo de la forma), y su resistencia a la tensión observada ha sido de 63 a 150 GPa, cerca de las necesidades de las estructuras del ascensor espacial. Nihon profesor de la Universidad de ingeniería Yoshio Aoki, director de la Asociación de Ascensor Espacial de Japón, ha declarado que el cable tendría que ser cuatro veces más fuerte que el más fuerte de la fibra de nanotubos de carbono, o aproximadamente 180 veces más fuerte que el acero [42].

En comparación, la mayoría de los aceros tienen una resistencia a la tracción de 2 GPa, y el más fuerte del acero resiste no más de 5,5 GPa. El material más ligero el Kevlar tiene una resistencia a la tracción de 2.6-4.1 GPa, mientras que la fibra de cuarzo y los nanotubos de carbono puede llegar a más de 20 GPa.

Por el momento el gran tope es el costo de producir nanotubos de carbono, ya que saldrían alrededor de \$25 dólares el gramo. Pero se espera que la producción a gran escala disminuya el costo de estos [43].

En Estados Unidos, un antiguo ingeniero de la NASA llamado Bradley C. Edwards ha elaborado un proyecto preliminar que también están estudiando científicos de la NASA. Edwards afirma que ya existe la tecnología necesaria, que se necesitarían 20 años para construirlo y que su costo sería 10 veces menor que el de la Estación Espacial Internacional. El ascensor espacial de

Edwards no se parece a los presentes en las obras de ficción, al ser mucho más modesto y a la vez innovador en lo que concierne a su eventual método de construcción.

Edwards propone que el ascensor espacial se construya de manera análoga a como se construían los puentes en tiempos pasados: tendiendo una cuerda entre ambos extremos del obstáculo natural, y reforzar progresivamente la cuerda inicial con tramos cada vez más gruesos y resistentes. El elevador de Edwards sería una cinta extremadamente fina (unos cuantos nanómetros) de nanotubos de carbono, que sería lanzada al espacio de manera convencional. Una vez en órbita geosíncrona, la cinta sería descendida a la Tierra con la ayuda de un peso. La cinta sería tan ligera que la nave en la que fue lanzada serviría de contrapeso.

El cable sería recuperado al llegar a la superficie terrestre y anclado en una plataforma flotante en algún punto del ecuador. Con eso se terminaría la construcción del primer elevador espacial. Pese a su finura, la cinta de nanotubos de carbono sería lo suficientemente resistente para soportar el ascenso de un vehículo eléctrico de un centenar de kilogramos.

Edwards también propone utilizar tal capacidad de carga inicial no para carga, sino para reforzar el cable añadiendo más cintas a la primera, utilizando un vehículo eléctrico que montaría el cable sujetándose de él, tal proceso se repetiría hasta lograr construir un cable compuesto capaz de llevar a órbita geosíncrona la capacidad de carga deseada.

También las agencias europeas y japonesas están trabajando en sus propios diseños. Asimismo, la Spaceward Foundation ha establecido diversos concursos y premios para quienes aporten mejoras para la construcción de dicho ascensor [41].

## CAPITULO V

### 5.0 CONCLUSIONES

- Desde principios de la historia, que la humanidad ha intentado descubrir nuevos materiales para distintas aplicaciones, y muchas veces estos fueron descubiertos por mera casualidad. Justamente de esa manera fue que el científico Sumio Iijima en el año 1991 descubrió los nanotubos de carbono, material que vino a revolucionar las ciencias de la electrónica, mecánica, química, etc.
- Con la aparición de la nueva forma alotrópica del carbono como los fullerenos y los nanotubos nace la inquietante necesidad de descubrir sus propiedades, y aprovechar sus diversas dimensiones en las distintas disciplinas de la ciencia.
- Con el estudio químico y físico de este material se ha demostrado que las propiedades de los nanotubos dependen únicamente de su forma física, el cual le da la característica de material metálico o semimetálico debido a su helicidad que viene dado por los índices de hamada (n,m) y su ángulo chiral, que también depende de estos índices.
- Es posible asegurar que 2/3 de los nanotubos zigzag, tienen comportamiento semiconductor y el resto metálicos; el 100% de los nanotubos armchair son metálicos debido a su simetría; y los nanotubos chiral pueden ser de los dos tipos, ya que su índice hamada cabe en todas las posibilidades. Los nanotubos son semiconductores, en la medida en que todos estos cumplan con la propiedades de  $n-m=3N$ .
- La nanotecnología presenta un gran desafío científico, con nuevas propiedades de materiales por descubrir al nivel nanométrico.
- En materia de producción, se puede decir que el método para obtener nanotubos de carbono más utilizado es el de deposición química en fase de vapor (CVD), ya que es el que tiene mayor rendimiento. Sin embargo, los nanotubos no son de muy buena calidad, por ello debe considerarse siempre el uso que se le dará a estos nanotubos, ya que cada método entrega distintos nanotubos, unos largos, otros cortos, algunos perfectos u otros con demasiadas imperfecciones. Además, se debe considerar que cada método tiene diferentes costos, que varían en sus rangos.

- A medida que esta tecnología se masifique los costos disminuirán, permitiendo su llegada al mercado, lo que ha sido su gran piedra de tope.
- Existen múltiples aplicaciones de los nanotubos y sin lugar a duda que en la rama de la electrónica es donde se le puede sacar mayor provecho teniendo en cuenta que con este nuevo material se podrán disminuir aún más los componentes de los dispositivos electrónicos, en especial el transistor, y aumentar significativamente la velocidad de trabajo.
- Aunque son muchas las aplicaciones que se le puede dar a este material, hay que tener en cuenta que a medida que se cree la necesidad seremos capaces de aumentar los usos de esta nueva tecnología, o bien, podrá adecuarse ideas ya existentes y combinarlas con los nanotubos para mejorarlas, disminuyendo su tamaño o aumentando su efectividad.
- Aunque todavía las aplicaciones de los nanotubos de carbono se encuentran en un punto intermedio, entre su producción artesanal en los laboratorios y la producción industrial, se prevé que el día que irrumpen en el mercado producirán en él una verdadera revolución.
- Se logró realizar una compilación bibliográfica en materia de nanotubos de carbono, mediante tres formas, relevamiento de información por medio de revistas científicas, consulta a expertos e información en sitios web.
- La finalidad de esta revisión bibliográfica es dar a conocer la relevancia de los nanotubos de carbono en el área de la electrónica y así incentivar la realización a nuevas investigaciones que conlleve a descubrimientos de modernas aplicaciones
- En la actualidad los nanotubos de carbono son altamente estudiados por investigadores en todas partes del mundo, por lo cual, el presente trabajo puede dar inicio a futuras investigaciones, debido a que aún la bibliografía y material de consulta son escasos.
- Por último se puede decir que gracias a este nuevo material la electrónica o microelectrónica tal y como se conoce hoy en día migrará a la nanoelectrónica tal como lo hizo alguna vez la electrónica con la llegada del transistor.

## CAPITULO VI

### 6.0 BIBLIOGRAFÍA

- [1]<http://mardolin.blogspot.com/2008/02/trabajo-nanotubos-de-carbono.html>
- [2]<http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/diccionario/nanotubos.htm>
- [3]<http://www.rediris.es/list/info/nanotubos.es.html>
- [4]<http://www.periodni.com/es/c.html>
- [5]<http://es.wikipedia.org/wiki/Nanotubo>
- [6]Gladys D.A. De Biasioli, Catalina D.S. DE Weitz, con el asesoramiento didactico de Beatriz B. De Diaz Sarubbi, "Química General e Inorgánica", 2d ed., kapelusz, Buenos Aires, Argentina, 1981
- [7]<http://es.wikipedia.org/wiki/Fulereno>
- [8]<http://www.uam.es/departamentos/ciencias/quimica/>
- [9]Alcca Qispe Fernando, "Estructura y Síntesis de nanotubos de carbono", Lima, Peru, 2005.  
[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/Basic/alcca\\_qf/](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/Basic/alcca_qf/)
- [10]<http://www.jcrystal.com/>
- [11] Giovanni Alberto García Rodríguez, Yesid Gabriel Jarma Aliz, Diego Alejandro Pulido Olaya, David Eduardo Vargas Sarmiento, "Los Nanotubos De Carbono".  
[html.rincondelvago.com/nanotubos-del-carbono.html](http://html.rincondelvago.com/nanotubos-del-carbono.html)
- [12] Oxana Vasilievna Kharissova, "Estudio Estructural Y Mecanismo De Crecimiento De Los Nanotubos Alineados De Carbono Procesados Mediante Calentamiento Por Irradiación De Microondas", Monterrey, México.  
[http://www.cio.mx/3\\_enc\\_mujer/files/extensos/Sesion%203/S3-FMCT11.doc](http://www.cio.mx/3_enc_mujer/files/extensos/Sesion%203/S3-FMCT11.doc)

[13] Chamorro Bayas Giomaria Maribel, “Planteamiento De Una Metodología De Análisis De Dispositivos Electrónicos Mediante Nanotecnología”, Quito, Ecuador, 2008.

<http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1199/2/T%2011064%20CAPITULO%203.pdf>

[14] Andrea Eunice Rodas Morán, “Compilación Monográfica De Información Acerca De Un Proyecto De Desarrollo Científico Y Tecnológico De La Nanotecnología En Guatemala”, Guatemala, 2008.

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_8547.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_8547.pdf)

[15][http://es.wikipedia.org/wiki/Redes\\_de\\_Bravais](http://es.wikipedia.org/wiki/Redes_de_Bravais)

[16] Alberto Cortijo Fernández, “Propiedades físicas de grafeno en presencia de desorden topológico”, Leganés, Madrid, 2007.

[http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2370/6/Tesis\\_AlbertoCortijo.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2370/6/Tesis_AlbertoCortijo.pdf)

[17] Thomas Liljenberg, Olof Hjortstam, Silvia Volponi, “Nanotecnología: De Las Pequeñas Dimensiones A Un Gran negocio”, ABB Service srlI-20099 Sesto, pp. 49-53, San Giovanni (MI), Italia, febrero, 2003

[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/6363792673E11E79C1256DDD00347004/\\$File/49-53%20M810.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/6363792673E11E79C1256DDD00347004/$File/49-53%20M810.pdf)

[18]<http://www.madrimasd.org/revista/revista34/tribuna/tribuna1.asp>

[19] Federico Muñoz Rojas, “Electronic Transport Through Graphene Nanoribbons”, Universidad de Alicante diciembre 2007

<http://federico.munoz.googlepages.com/dea.pdf>

[20] Balandran Quintana, René R, Romero Villegas, Gabriel Iván, Mendoza-Wilson, Ana M *et al.* “Nanotubos de carbono y bionanotecnología”. *INCI*, mayo 2008, vol.33, no.5, p.331-336. ISSN 0378-1844.

[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0378-8442008000500005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0378-8442008000500005&script=sci_arttext)

[21] **Jianwei Che\***, **Tahir Cagin**, and **William A. Goddard III**, “Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes” California, Estados Unidos, 2005.

<http://www.nanodot.org/Conferences/MNT7/Papers/Che/index.html>

[22][http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo\\_de\\_elasticidad](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_elasticidad)

[23] María Jesús Rivas Martínez, José Román Ganzer, María Luisa Cosme Huertas, “Nanotubos De Carbono: Aplicaciones”, Madrid, España, Julio 2007.

[http://www.madrimasd.org/cimtan/Informes/Informes\\_GetFile.aspx](http://www.madrimasd.org/cimtan/Informes/Informes_GetFile.aspx)

[24][http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor)

[25]<http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=2176#1>

[26] D. Zilli, P. Bozzano, S.N Goyanes, G.H. Rubiolo, A.L. Cukierman, “Síntesis De Nanotubos De Carbono Mediante Un Proceso De Deposición Química En Fase De Vapor”, Jornadas Sam, Conamet, Simposio Materia, PP.866-869, Buenos Aires, Argentina, 2003

[http://www.javeriana.edu.co/universitas\\_scientiarum/universitas\\_docs/vol\\_13\\_3/258-266.pdf](http://www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum/universitas_docs/vol_13_3/258-266.pdf)

[27] A. Chávez, F. Quistiano, H. Martínez, A. Rodríguez, F. Tristan3, M. Terrones, “Síntesis y Caracterización De Nanotubos Por El Método De Deposición de Vapor, Decoración Con Alúmina y Dispersión En Una Matriz Polimérica”, Universidad Autónoma de Zacatecas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Potosí, Bolivia, 2006.

<http://www.coecytcoah.gob.mx/206%5C1%5C350%5C2009%5C2%5C23%5CUASLP%20Quistiano%20V%C3%A1zquez%2017%20p%C3%A1ginas.pdf>

[28] Philip G. Collins and Phaedon Avouris, “Nanotubes for Electronics”, Scientific American, pp. 62-69, Diciembre 2000.

[http://researchweb.watson.ibm.com/nanoscience/NTs\\_SciAm\\_2000.pdf](http://researchweb.watson.ibm.com/nanoscience/NTs_SciAm_2000.pdf)

[29]<http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo>

[30][http://www.accesomedia.com/display\\_release.html?id=19595](http://www.accesomedia.com/display_release.html?id=19595)

[31] <http://es.wikipedia.org/wiki/Transistor>

[32] Enrique Barajas Ojeda, “Nuevas Estructuras y su Aplicación a RF”, enero, 2004.

[www-eel.upc.es/limits/quiquepaper.doc](http://www-eel.upc.es/limits/quiquepaper.doc)

[33] Chamorro Bayas Giomaria Maribel, “Planteamiento De Una Metodología De Análisis De Dispositivos Electrónicos Mediante Nanotecnología”, Quito, Ecuador, 2008.

[http://74.125.113.132/search?q=cache:hSCAu6ee\\_0oJ:bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1199/4/T%252011064%2520CAPITULO%25201.pdf+funcion+caracteristica+de+un+CNTFET&cd=13&hl=es&ct=clnk&gl=cl](http://74.125.113.132/search?q=cache:hSCAu6ee_0oJ:bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1199/4/T%252011064%2520CAPITULO%25201.pdf+funcion+caracteristica+de+un+CNTFET&cd=13&hl=es&ct=clnk&gl=cl)

[34]<http://www.nantero.com/mission.html>

[35] Eduardo Tamargo Zaragocí, “Estudio De Los Nanotubos Aplicaciones”, 2004

<http://www.scribd.com/doc/6883848/nanotecnologia-teleco>

[36]<http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>

[37] Alejandro Ansón Casaos, “Nanotubos De Carbono: Estructura Porosa Y Sus Implicaciones En El Campo De La Energía” Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2005.

<http://digital.csic.es/bitstream/10261/4108/1/Tesis.pdf>

[38]<http://www.orlandoalonzo.com.mx/tecnologia/la-bateria-del-futuro-de-nanotubos-de-carbono-y-papel/>

[39][http://nativadigital.blogspot.com/2007\\_09\\_30\\_archive.html](http://nativadigital.blogspot.com/2007_09_30_archive.html)

[40]<http://www.physorg.com/news134742910.html>

[41][http://es.wikipedia.org/wiki/Ascensor\\_espacial](http://es.wikipedia.org/wiki/Ascensor_espacial)

[42][http://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_elevator](http://en.wikipedia.org/wiki/Space_elevator)

[43]<http://www.laflecha.net/canales/ciencia/200407282>