



*Diseño y Construcción de un Sintetizador de Nanotubos de Carbono de Bajo costo Mediante Descarga de Arco Eléctrico*

*Design and Construction of a Low Cost Carbon Nanotube Synthesizer Using Electric Arc Discharge*

*Projeto e construção de um sintetizador de nanotubo de carbono de baixo custo usando descarga de arco elétrico*

Diego Fernando Mayorga-Pérez <sup>I</sup>

[diego.mayorga@esPOCH.edu.ec](mailto:diego.mayorga@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-2727-942X>

Edwin Fernando Viteri-Núñez <sup>II</sup>

[eviteri@esPOCH.edu.ec](mailto:eviteri@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-3029-775X>

Enrique Javier Orna-Chávez <sup>III</sup>

[javier.orna@esPOCH.edu.ec](mailto:javier.orna@esPOCH.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0003-0601-1686>

Enya Isabel Caballero-Silva <sup>IV</sup>

[en\\_is@hotmail.es](mailto:en_is@hotmail.es)

<https://orcid.org/0000-0002-3263-9808>

**Correspondencia:** [diego.mayorga@esPOCH.edu.ec](mailto:diego.mayorga@esPOCH.edu.ec)

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de investigación

\***Recibido:** 30 de enero de 2021 \***Aceptado:** 15 de febrero de 2021 \***Publicado:** 11 de marzo de 2021

- I. Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magister en Gerencia de Proyectos de Ecoturismo, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- III. Ingeniero Mecánico, Magister en Diseño Producción y Automatización Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente, Ecuador.



## Resumen

Resumen: Para diseñar y construir un sintetizador de nanotubos de carbono (CNT) mediante descarga de arco eléctrico, se aplicaron métodos ingenieriles desarrollando un dispositivo capaz de generar un nanomaterial de estudio válido para investigación. Así que, para obtener una máquina que cumpla con los requisitos de síntesis de los CNT, se utilizó el diseño concurrente, en el que se combina el punto de vista de diseño, funcionalidad, construcción y mantenimiento. En este caso, en la revisión bibliográfica se determinaron las características de fuente de corriente continua, voltaje, amperaje, distancia entre electrodos, velocidad de giro del ánodo y hermeticidad bajo una presión de vacío, necesarios para la síntesis de CNT. El segundo paso fue el diseño conceptual, determinando las necesidades de los futuros usuarios: profesores, estudiantes y tesisistas, para realizar un Despliegue de Función de Calidad (QFD). Como tercer punto, se realizó un análisis funcional y modular, para determinar las acciones que requiere el sintetizador y seleccionar la mejor alternativa para cumplirlas; por medio del diseño de materialización, donde mediante el uso de bibliografía y softwares como ANSYS, se dimensionaron los componentes mecánicos del equipo. Finalmente, se construyó el sintetizador de CNT, capaz de cumplir con las condiciones de síntesis necesarias con componentes generados bajo criterios de diseño mecánico, obteniendo los primeros CNT y estudio de los mismos con un microscopio SEM.

**Palabras clave:** Descarga de arco eléctrico; diseño concurrente; Ingeniería Mecánica; nanomateriales; nanotubos de carbono; sintetizador.

## Abstract

Abstract: To design and build a carbon nanotube synthesizer (CNT) by electric arc discharge, engineering methods were applied developing a device capable of generating a study nanomaterial valid for research. So, to obtain a machine that meets the synthesis requirements of CNTs, concurrent design was used, which combines the point of view of design, functionality, construction and maintenance. In this case, the bibliographic review determined the characteristics of the direct current source, voltage, amperage, distance between electrodes, speed of rotation of the anode and tightness under vacuum pressure, necessary for the synthesis of CNT. The second step was the conceptual design, determining the needs of future users: professors, students and thesis students, to carry out a Quality Function Deployment (QFD). As a third point,

a functional and modular analysis was carried out to determine the actions required by the synthesizer and select the best alternative to fulfill them; Through the materialization design, where by using bibliography and software such as ANSYS, the mechanical components of the equipment were dimensioned. Finally, the CNT synthesizer was built, capable of meeting the necessary synthesis conditions with components generated under mechanical design criteria, obtaining the first CNTs and studying them with an SEM microscope.

**Keywords:** Electric arc discharge; concurrent design; Mechanical Engineering; nanomaterials; Carbon nanotubes; synthesizer.

## Resumo

Resumo: Para projetar e construir um sintetizador de nanotubos de carbono (CNT) por descarga de arco elétrico, foram aplicados métodos de engenharia desenvolvendo um dispositivo capaz de gerar um nanomaterial de estudo válido para pesquisa. Assim, para obter uma máquina que atendesse aos requisitos de síntese dos CNTs, foi utilizado o projeto concorrente, que combina o ponto de vista de projeto, funcionalidade, construção e manutenção. Nesse caso, a revisão bibliográfica determinou as características da fonte de corrente contínua, tensão, amperagem, distância entre eletrodos, velocidade de rotação do ânodo e estanqueidade sob pressão de vácuo, necessárias para a síntese do CNT. A segunda etapa foi o projeto conceitual, determinando as necessidades dos futuros usuários: professores, alunos e alunos de tese, para realizar um Desdobramento da Função Qualidade (QFD). Como terceiro ponto, foi realizada uma análise funcional e modular para determinar as ações requeridas pelo sintetizador e selecionar a melhor alternativa para cumpri-las; Através do projeto de materialização, onde por meio de bibliografia e softwares como o ANSYS, foram dimensionados os componentes mecânicos do equipamento. Por fim, foi construído o sintetizador CNT, capaz de atender às condições de síntese necessárias com componentes gerados sob critérios de projeto mecânico, obtendo os primeiros CNTs e estudando-os em microscópio MEV.

**Palavras-chave:** Descarga de arco elétrico; projeto concorrente; Engenharia Mecânica; nanomateriais; Nanotubos de carbono; sintetizador.

## Introducción

Los Nanotubos de Carbono (CNT) son estructuras huecas que se generan en el rango nano en diámetro, cuya longitud puede alcanzar varios centímetros y tienen múltiples propiedades atractivas que superan a muchos de los materiales comunes de uso en campos de estudio, como diferentes ingenierías, medicina o, incluso, el campo textil. Las propiedades de los CNT incluyen su alta área superficial, elevado módulo de Young, resistencia a la tracción, conductividad térmica y eléctrica, entre otras, las cuales pueden aplicarse en almacenamiento y transporte de materiales, diferentes dispositivos electrónicos, materiales compuestos, sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS), bioestructuras, entre muchas otras aplicaciones que lo hacen el material del futuro, siendo estudiado en el presente por comunidades científicas y tecnológicas, que día a día aumentan el número de trabajos de investigación alrededor del mundo (Devanathan, 2018; Roslan et al., 2018).

Por ello, esta forma alotrópica de Carbono es tan preciada en investigación en múltiples Universidades y centros de investigación, con el fin de descubrir los mejores usos aplicando sus elevadas propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas, sin importar si son Nanotubos de Una Capa SWNT o Multicapa MWNT. El método de síntesis de arco eléctrico fue elegido, debido a que genera nanotubos de manera económica, tanto en materiales como en proceso, es amigable con el ambiente, y genera un buen porcentaje de nanotubos de carbono de alta calidad en los productos de descomposición de los electrodos utilizados (Iijima, 1991; Devanathan, 2018).

Una vez desarrollado el estudio acerca de las máquinas de producción de Nanotubos de Carbono, en base a resultados de evolución histórica, se determinan las variables que condicionan un buen sintetizador y cómo se pueden cumplir generando varias alternativas y generar solución a las diferentes funciones que la máquina debe cumplir, todo lo que puede ser contrastado con diferentes autores. Tras analizar todas las alternativas que el sintetizador puede cumplir, se pasa a la construcción del prototipo. Posteriormente, es sometido a pruebas funcionales y verificación de las condiciones de síntesis para la producción de CNT con materia prima de bajo costo.

## Metodología

**Figura 1:** Recorrido Metodológico del Sintetizador de Nanotubos de Carbono



### *Recorrido Metodológico del Sintetizador de Nanotubos de Carbono*

Para el desarrollo del Sintetizador de CNT se realizó el recorrido de la Figura 1, de manera que el primer paso fue revisar información existente de formación de los CNT, propiedades y aplicaciones; los métodos de síntesis; y las condiciones de síntesis para establecer los parámetros de diseño de la cámara de síntesis.

### **Estudio del Arte**

Empezando por conocer el porqué de la importancia de los CNT que radica en sus propiedades, ya que, en base a investigaciones, se presumen como la sustancia más esbelta y resistente conocida, es muy buen conductor térmico y eléctrico, y es una sustancia inerte químicamente en su superficie (Corvillo y Gómez 2007; Harris 2009), lo que se traduce en aplicaciones sumamente interesantes como compuestos de alta resistencia, microelectrónica de vacío, almacenamiento de energía, nanosondas y sensores, compuestos rellenos, entre otros (Ajayan y Zhou 2001; Liu et al. 2009). A continuación, se muestran una serie de tablas que muestran las propiedades máximas y mínimas en los CNT de capa única y multicapa junto con las referencias consultadas.

**Tabla 1:** Propiedades Físicas y Mecánicas de los CNT

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Densidad	$d$	$g/cm^3$	0.006	1.12	1.3	1.34	[1,2,3]
Frecuencia Fundamental	$F$	THz	0.01	1.5	0.009	1.35	[1]
Módulo de Young	$E$	TPa	0.067	1.3	0.32	4.15	[4,5]
Módulo Cortante	$G$	TPa	0.7	6.5	0.436	0.541	[4,6]
Esfuerzo a la Tracción	$S_y$	GPa	10	52	11	63	[1]
Esfuerzo Último a la Tracción	$S_{ut}$	GPa	10.5	54.8	12.3	70.6	[1]
Alargamiento a la Ruptura	$e$	%	5.3	5.8	2.2	12	[1]

Fuente: [1] Liew, Jianwei and Zhang, 2016, [2] Wang et al., 2008, [3] Arnold et al., 2006, [4] Salvetat et al., 1999, [5] Coleman et al., 2006, [6] Lu, 1997. **Realizado por:** Caballero Silva, Enya, 2019.

**Tabla 2:** Propiedades Químicas de los CNT

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Potencial Hidrógeno	$PH$	-	Pueden soportar reacciones en el rango de PH de 0 a 14, sin dañar su estructura.				[1]
Reactividad	-	-	Cuanto menor es el diámetro, menor es la reactividad de los CNT, pudiendo ser inertes en una atmósfera de Ozono a altas temperaturas.				[2]
Superficie Específica	$S_e$	$m^2/g$	285	948	312	635	[3]
Toxicidad	-	-	Altamente tóxicos, con excepciones de inocuidad en algunos especímenes hidrófobos.				[4]

Fuente: [1] Zou et al., 2014, p.4, [2] Banerjee and Wong, 2004, p. 1449, [3] Bacsa et al., 2000, p. 569, [4] Harris, 2009, p. 219-220. **Realizado por:** Caballero Silva, Enya, 2019.

**Tabla 3:** Propiedades Térmicas de los CNT

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Calor Específico (300K)	$C$	$\frac{J}{KgK}$	375	410	415	450	[1,2]
Conductividad Térmica	$K$	$\frac{W}{mK}$	200	8000	500	6600	[3,4]
Conductancia Térmica	$G_p$	$\frac{W}{K}$	$0.7 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$0.6 \times 10^{-9}$	$1.14 \times 10^{-9}$	[3,5]
Mejora Conductiva	-	%	125	200	75	1200	[3,6]
Temperatura de Fusión	$T_f$	K	1000	2000	1000	2000	[7]

Fuente: [1] Yi et al., 1999, [2] Mizel et al., 1999, [3] Balandin, 2011, [4] Bandaru, 2007, [5] Mingo and Broido, 2005, p. 95, [6] Park et al., 2012, p. 2086, [7] Hojati Talemi, Kannan and Simon, 2012. **Realizado por:** Caballero Silva, Enya, 2019

**Tabla 4:** Propiedades Eléctricas de los CNT

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Resistencia Eléctrica	$R$	$k\Omega$	6.5	25.8	0.1	275	[1,2,3]
Densidad de Corriente	$j$	$\frac{A}{cm^2}$	0.4	4	$1 \times 10^6$	$1.8 \times 10^{10}$	[3,4]
Energía Potencial	$E_p$	$-eV$	1321.2	1309.9	50	900	[5,6]
Movilidad Portadora	$\mu$	$\frac{cm^2}{Vs}$	200	$1 \times 10^4$	2.59	5.42	[1,6]
Resistividad	$\rho$	$m\Omega.cm$	0.125	5	100	$2 \times 10^6$	[2,5]

Fuente: [1] Bandaru, 2007, [2] Yang et al., 2004, [3] Liew, Jianwei and Zhang, 2016, [4] Zhu et al., 1999, [5] Hone et al., 2000, [6] Kim and Park, 2010. **Realizado por:** Caballero Silva, Enya, 2019



Al ser tan versátiles y resistentes, es lógico que despierte gran interés su síntesis, la cual puede realizarse por varios procesos, los cuales se resumen en: deposición química con vapor (CVD), ablación láser, pirólisis de llama y descarga de arco eléctrico. En este caso se eligió descarga de arco eléctrico por su economía y los pocos defectos estructurales que presentan los CNT en comparación de los otros métodos. Es uno de los métodos que utiliza temperaturas más altas (más de 9000K) para la síntesis de CNT con la menor cantidad de defectos estructurales en comparación a los demás métodos. Se trata de dos electrodos conectados a una fuente de alimentación y separados unos milímetros. Estos electrodos, se introducen en una atmósfera de Helio, Argón y/o Nitrógeno a presiones subatmosféricas (13,5 PSI abs. como máximo), y se hace pasar una corriente muy alta (hasta 900A) para generar un plasma, mediante un ánodo que se evapora y se deposita en el cátodo. Los productos generados son nanotubos SWNT o MWNT, y otras formas alotrópicas de carbono. La principal ventaja de este método es su economía; sin embargo, el control de los parámetros de crecimiento es muy pobre y su conversión del Grafito en CNT es de aproximadamente 20% (Arora y Sharma 2014; Prasek et al. 2011; Devanathan 2018).

Entre sus derivaciones existen:

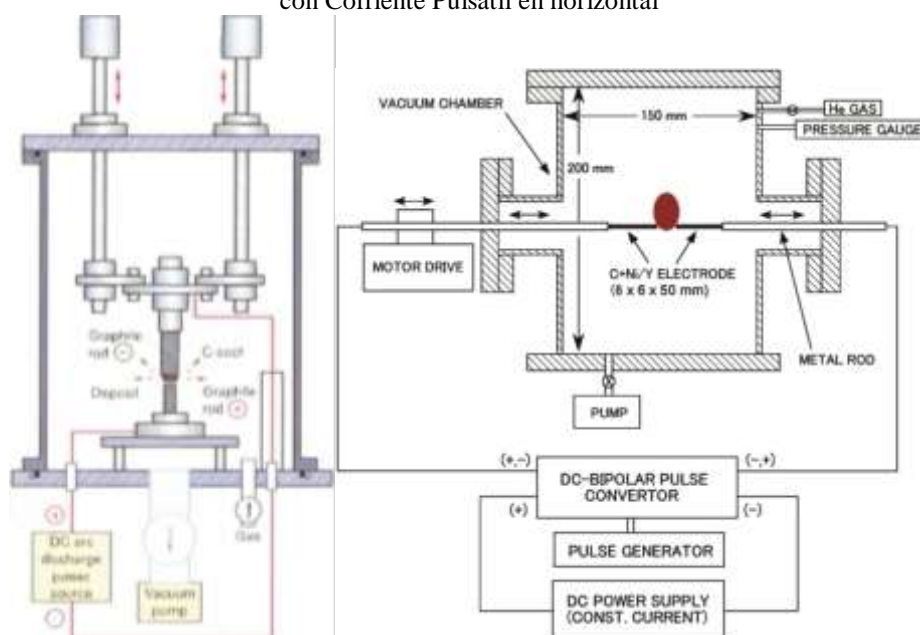
- Síntesis de Cámara Estática: Donde los electrodos no se desplazan y la síntesis se detiene cuando la distancia del arco es demasiado grande y se interrumpe el arco.
- Síntesis con Avance de un Electrodo: Es de las formas más comunes. Para evitar la interrupción del arco eléctrico, uno de los electrodos se desplaza (Ando 2010).
- Síntesis con adición de Catalizadores: En este método, el ánodo de grafito es vaciado por medios mecánicos, y relleno con sustancias dopantes como Y, Fe o Co, que facilitan la producción o aumentan la cantidad de SWNT (Ando 2010).
- Síntesis de Jet: El ánodo se inclina 30° con respecto a su posición original horizontal con el cátodo, esto hace que los SWNT aumenten en los depósitos (Ando 2010).
- Síntesis con Rotación de un Electrodo: Se afirma que mejora la uniformidad del plasma y, con ello, la calidad y uniformidad de los CNT (Lee et al. 2002).
- Síntesis por Descarga de Arco Eléctrico con Generación de Campo Magnético: Mediante un dispositivo situado fuera de la cámara, se genera un campo magnético, que según algunos



estudios, genera MWNT más cristalinos, ordenados y de mayor longitud (Roslan et al. 2018).

- Síntesis en Medio Acuoso: En vez de una atmósfera controlada con algún gas noble, se utiliza un medio de agua salina en la que se genera la descarga del arco y la generación del plasma (Parvez et al. 2014).
- Síntesis con Electrodos de Tungsteno: En una atmósfera de hidrocarburos, el plasma generado entre los electrodos de W es el encargado de generar los CNT.

**Figura 2:** Sintetizador de CNT y Fullerenes por descarga de Arco Eléctrico de Corriente Continua en vertical y con Corriente Pulsátil en horizontal



Fuente: Ando, 2010, Maria y Mieno, 2015

Independientemente de las modificaciones del proceso de síntesis, los valores para la descarga de arco eléctrico se pueden encontrar resumidas en la tabla 5.

**Tabla 5:** Parámetros de Arco Eléctrico Para Generación de los Nanotubos

CONDICIONES	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	VALOR ÓPTIMO	REFER.
Fuente de alimentación	Corriente continua (DC), corriente alterna (AC), bipolar o pulsátil		DC	[1,2]
Voltaje (V)	15	30	18-26V	[1,3]
Corriente (A)	2,5	900	50-80A	[1,3]
Precursores	Grafito, Grafeno, Hidrocarburos, Carbón, Fullerenes y Llantas pulverizadas.		Grafito	[1]

Catalizadores	Y, Ni, Fe, Co, Cr, entre otros.		Ninguno, para evitar defectos estructurales.	[1]
Atmósfera	Ar, He, N, H, aire purificado, soluciones acuosas o mezclas.		Gases nobles	[1]
Velocidad de giro (RPM)	0	10 000	-	[4]
Presión en la cámara (KPa)	-4	-120	La menor presión posible	[1,3]
Temperatura (K)	5 000	9 000	-	[1,5]

Fuente: [1] Arora y Sharma 2014, [2] María y Mieno 2015, [3] Raniszewski, 2017, [4] Lee et al. 2002, [5] Fang et al. 2016.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2019.

## Definición del Alcance

Una vez conocidas las condiciones de síntesis de los CNT en el proceso de descarga de arco eléctrico, se define el alcance del trabajo, el cual es el segundo punto del recorrido metodológico de la Figura 1 y se resume en los siguientes puntos de diseño y construcción, verificando la presencia de CNT y el correcto funcionamiento de:

- Velocidad de giro del electrodo.
- Capacidad de trabajar a vacío.
- Regulación de la distancia de los electrodos.
- Tolerancia de saturación de diferentes gases nobles o aire.
- Variación del Amperaje utilizado.

## Diseño Conceptual

El tercer punto del recorrido metodológico es el diseño concurrente y dentro de este, el diseño conceptual, en el cual se buscó diseñar la máquina cumpliendo los requisitos de los futuros usuarios (estudiantes, y docentes investigadores) junto a planos e información de máquinas encontradas. Toda la información se resume en el despliegue de la casa de la calidad de la figura 3.

Dentro del análisis funcional, se definieron los módulos de la figura 4:

- **Módulo 1.-** Acceso al interior de la máquina para manipulación de materia prima y producto final.
- **Módulo 2.-** Vaciado de aire y saturación de gas no reactivo.
- **Módulo 3.-** Regulación del Voltaje, Corriente, Distancia y Velocidad de Giro, Inicio y Apagado.



## Diseño de Detalle

### *Determinación de la temperatura crítica de diseño*

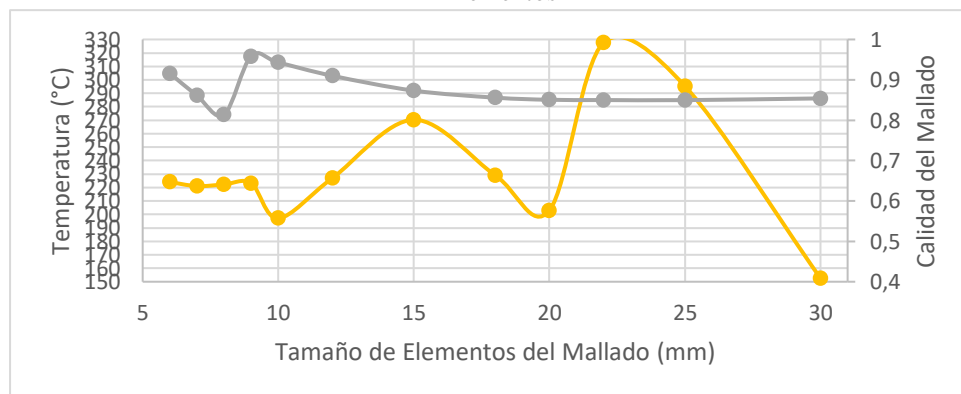
Debido al desconocimiento de la temperatura que hay en la cámara en la síntesis, hubo que determinar mediante un modelamiento de método de elemento finito (MEF), analizando el fenómeno de radiación y convección, resumiendo los parámetros en la tabla 6. Este era un paso crítico, ya que los cálculos y dimensiones se definen por las propiedades del material presentes en referencias de confianza como ASME VII Div. 2, que entrega valores de módulo de Young, resistencia a la tracción y resistencia última del acero AISI A-304 que fue el principal material utilizado.

**Tabla 6:** Características del Análisis de Temperatura

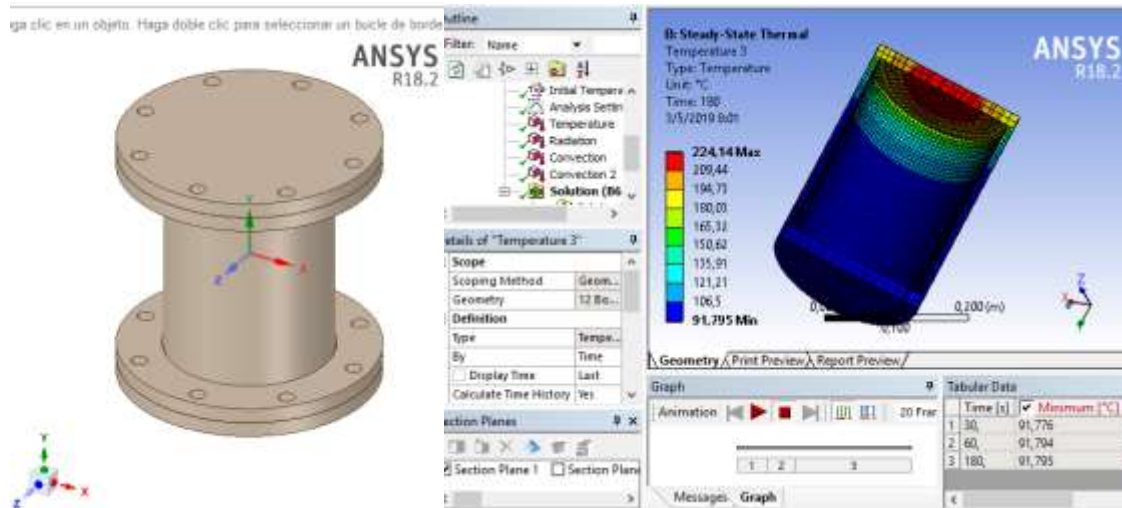
CARACTERÍSTICA	ARCO	CILINDRO	TAPAS
Tipo de Malla (Mayor valor)	Tetraedros	Cubos	Cubos
Temperatura inicial	9000 °C	19 °C	19 °C
Radiación	Emisividad = 0,022 Desde la pared externa del Arco hacia las paredes internas del cilindro y tapas.		
Convección interna	Transferencia de calor por convección = 73,3 w/m <sup>2</sup> °C En las paredes internas		
Convección externa	Transferencia de calor por convección = 5 w/m <sup>2</sup> °C En las paredes externas		
Tiempo de análisis	3 min		

Se puede destacar que la temperatura máxima arrojada es de 327,71°C, la temperatura mínima es de 197,18°C, y el promedio total de la temperatura analizada es de 232,75°C. Sin embargo, el valor de temperatura se estabiliza en los últimos 4 valores, y su promedio es de 222,67°C. Con esta referencia, se determina que la temperatura máxima de trabajo será de 250°C, por seguridad. Siendo por el momento, la temperatura de diseño.

**Figura 5:** Convergencia de la Temperatura y la Calidad de Mallado en función de la Separación Mínima de Elementos



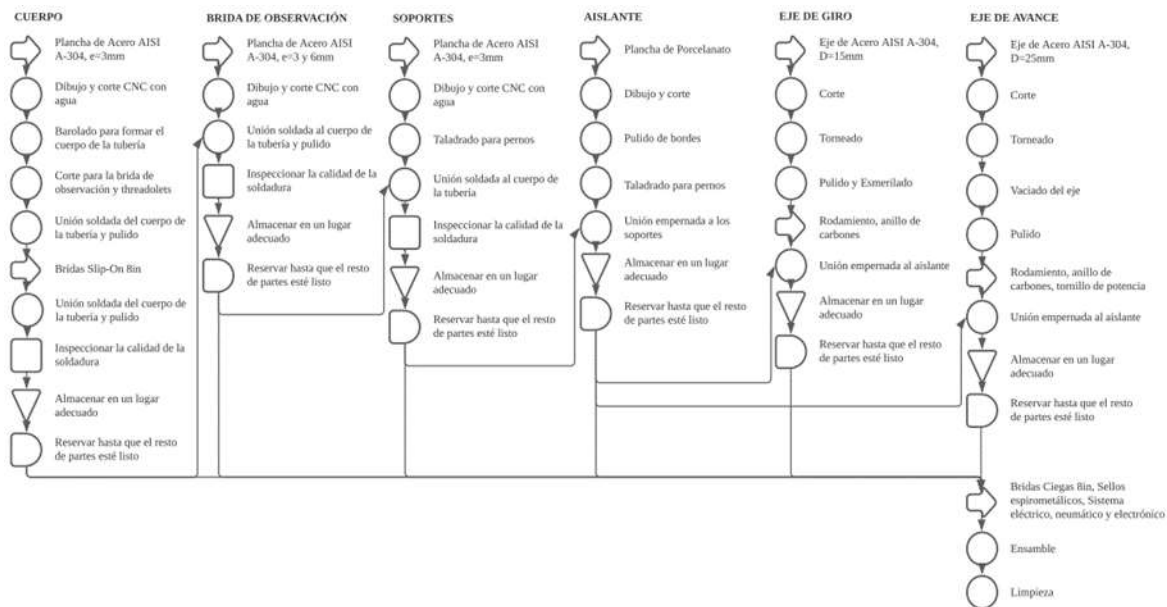
**Figura 6:** Modelado del Sistema en ANSYS Space Claim Design Manager y Análisis de la Temperatura cuando el experimento se realiza en vertical en ANSYS Mechanical. A partir de la temperatura, se generó una geometría que obedece a criterios de resistencia, deformación y funcionalidad, pasando al siguiente paso: la construcción



## Construcción

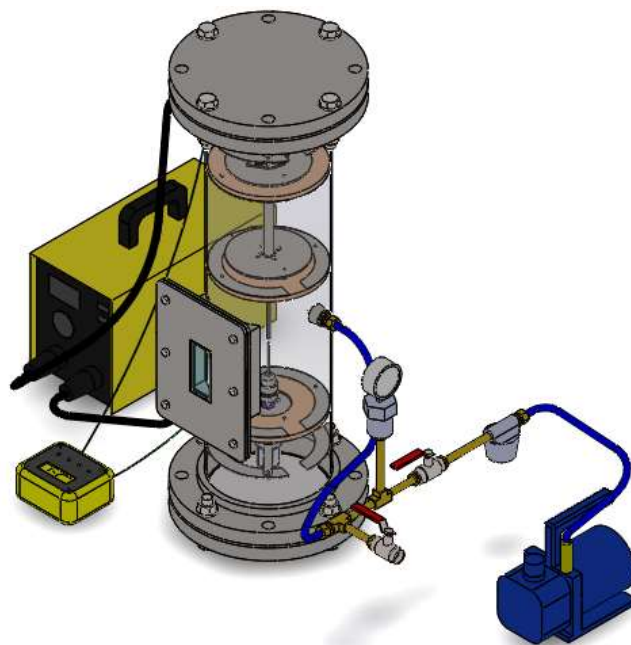
Para la construcción de la máquina se utilizaron materiales diferentes como: lámina de Acero AISI A-304, ejes de acero AISI A-304, Porcelanato, Sello de caucho, threadolets, entre otros; siguiendo el flujograma de la Figura 7 para construir el sintetizador de la Figura 8.

**Figura 7:** Flujograma de construcción del sintetizador





**Figura 8:** Sintetizador de CNT



### Protocolo de Pruebas

Para evaluar las condiciones máximas de operación del sintetizador, se establece un protocolo para definir el ensayo del sintetizador y ver las características máximas de operación del Sintetizador. La máquina se compone de diferentes módulos, los cuales se han nombrado durante todo el desarrollo de este trabajo y los cuales son: el mecanismo de avance, el mecanismo de giro, la cámara de presión, el sistema eléctrico, el sistema neumático y el electrónico. El principal objetivo de estos ensayos es garantizar el funcionamiento del Sintetizador en las condiciones de diseño.

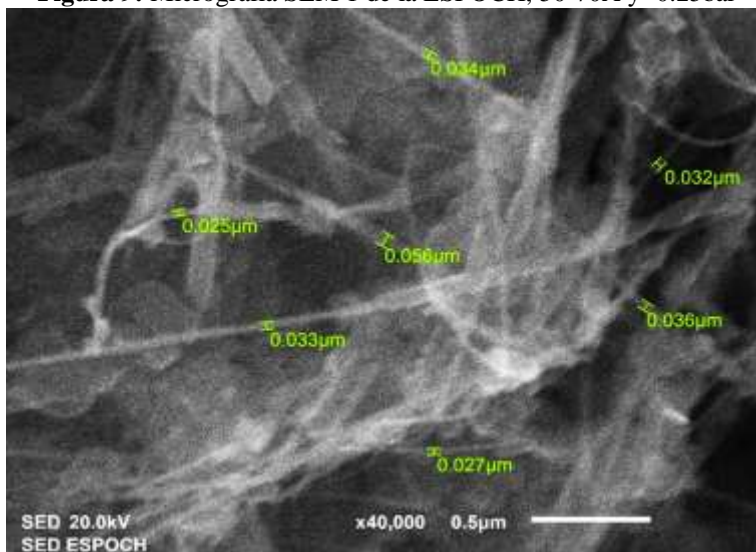
**Tabla 7:** Resultados del Protocolo de Pruebas del Sintetizador de CNT

	CONDICIONES	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO
MÓDULOS	Distancia de avance (mm)	158	0
	Desviación del eje de avance (mm)	0,2	0
	Velocidad de avance (cm/s)	9,96≈10	0
	Velocidad de giro (RPM)	28 807	0
	Presión en la cámara (bar <sub>g</sub> )	0	-0,5
	Voltaje (V)	26,57	26,34
	Corriente (A)	251	40
	Diámetro del eje (mm)	10	5
	Temperatura (°C)	163	68
	Tiempo de funcionamiento (min)	2	0

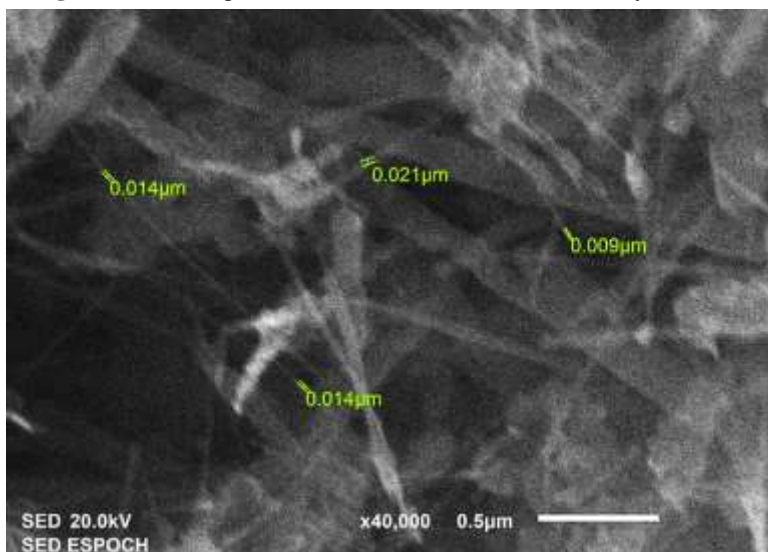
## Resultados

Para la validación del producto obtenido, se recurrió a un análisis visual con el microscopio electrónico de barrido y una posterior comparación con imágenes de CNT de diversas fuentes.

**Figura 9:** Micrografía SEM 1 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar

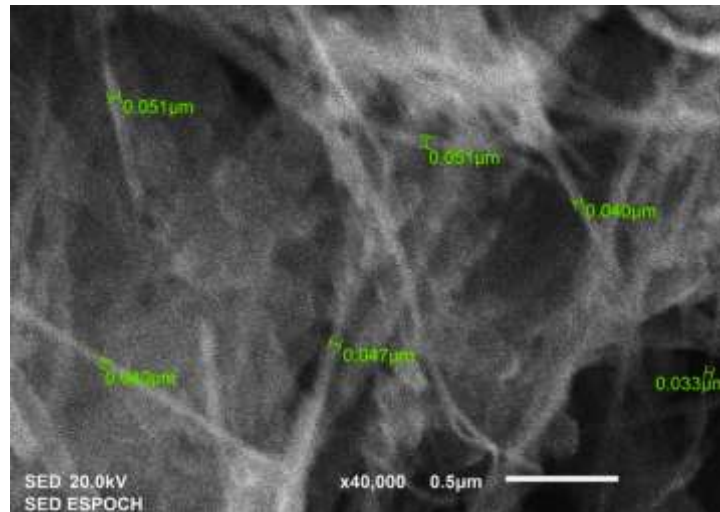


**Figura 10:** Micrografía SEM 2 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar

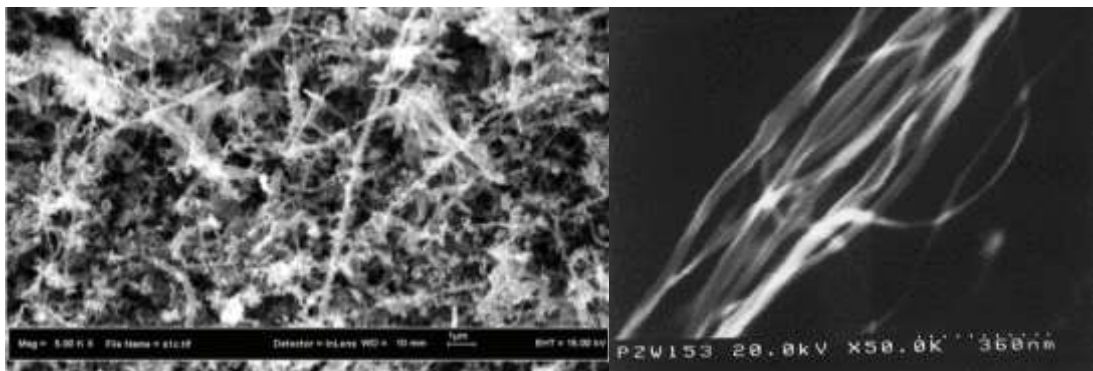




**Figura 11:** Micrografía SEM 3 de la ESPOCH, 60A y -0.25bar



**Figura 12:** a) Escaneo SEM de MWCNT sintetizado a 50A y presión ambiental; b) Escaneo SEM de un ramo de MWCNT



Si se compara las imágenes obtenidas en la ESPOCH con las de los artículos de Chaudhary et al. y Xie et al., se puede apreciar que los CNT obtenidos con este trabajo, son MWCNT dado que el diámetro es bastante amplio, y podría aproximarse en el más pequeño de 9 nm. La presencia de residuos puede deberse a la presencia de impurezas y la baja eficiencia de síntesis por descarga de arco eléctrico, que ronda el 20%.

## Discusión

Del trabajo, fue destacable que el experimento se realizó en un ambiente de aire purificado en vacío, y los electrodos utilizados se extrajeron del núcleo de pilas D, que fueron limpiados con alcohol industrial. Por esta razón, es posible obtener CNT con la máquina creada con el valor de

aproximadamente de 1USD (un dólar americano), teniendo en cuenta que presentan impurezas debido a la falta de pureza del ambiente y la calidad del electrodo de grafito.

## Conclusiones

Se diseñó una máquina que cumple con las características necesarias para la síntesis de CNT de: velocidad variable de un eje con valores entre 0 y 28 807 RPM; variación de la corriente de síntesis desde 40 a 251 A; voltaje bajo en corriente directa con un valor de 26,5 V; control de la distancia del arco eléctrico con el avance de un eje con un recorrido de 158 mm a una velocidad lineal de 0 a 10 cm/s y presión negativa en la cámara cercana a 0.5 bar. Para ello se utilizaron los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica y con ello se logró sintetizar los primeros Nanotubos de Carbono multicapa, cumpliendo con el alcance planteado.

Los Nanotubos de Carbono son estructuras alotrópicas del carbono que se estudian en numerosos trabajos de investigación. Su obtención se realiza mediante técnicas descarga eléctrica, deposición química, ablación láser y pirólisis de llama, y su importancia radica en las propiedades que tienen los CNT, entre las cuales se destacan: propiedades mecánicas superiores a las de cualquier metal utilizado en construcción de estructuras en la actualidad; estabilidad química en condiciones extremas de temperatura y PH; conductividad térmica y eléctrica elevada en condiciones donde otros materiales de uso común se fundirían. Con propiedades varias veces superiores a los materiales tradicionales, es un súper material con muchas aplicaciones como: supercapacitores; nanosistemas y nanorobots; nanosensores; materiales compuestos de propiedades elevadas; contenedores nanoscópicos de químicos para medicina y combustible hidrógeno, entre otros usos que aún están por descubrirse.

Para la realización del sintetizador, se utilizó el Diseño Concurrente, donde se crea la máquina teniendo en cuenta su uso y mantenimiento, donde se destacó los requerimientos del estudio del arte, criterio de profesores de las Facultades de Mecánica y Ciencias, y materiales disponibles en Ecuador. Se plantearon varias alternativas en base a todas las opciones de elementos y mecanismos, las cuales cumplen las necesidades de síntesis de los CNT, y se seleccionó la opción A, en base a los criterios del despliegue de la Casa de la Calidad, dividiendo en Módulos cada parte de la máquina.

Cada parte del sintetizador se diseñó y seleccionó en base a criterios ingenieriles. Se seleccionó la mayor cantidad de elementos posible: pernos, bridas, threadolets, conexiones eléctricas y elementos electrónicos, facilitando el repuesto y mantenimiento por ser elementos normados. Las partes diseñadas, se basaron en bibliografía y normas para garantizar su funcionalidad o verificar que cumplieran con los requisitos necesarios cuando se empezaba desde el criterio de disponibilidad.

La construcción del prototipo se realizó dividiéndolo en seis partes: la estructura, el eje de velocidad, el eje de avance, el circuito electrónico, las conexiones eléctricas y las conexiones neumáticas. En la estructura se realizó corte de agua, suelda GTAW en la parte inoxidable y SMAW en la mezcla de aceros del tubo principal con las bridas y threadolets. Ambos ejes necesitaron de soportes metálicos soldados, aislantes cerámicos torneados, placas inoxidables de sujeción torneadas y su montaje exigió de precisión para evitar vibraciones y desviaciones. El circuito electrónico fue ensamblado dentro de un depósito realizado en impresión 3D y se hicieron pruebas hasta que controlaba satisfactoriamente ambos ejes. Las conexiones eléctricas y neumáticas tuvieron la dificultad de que debieron ser comprobadas para garantizar la estanqueidad del sistema.

Se utilizó una programación de lazo abierto, donde el mecanismo y el sistema de control están conectados y la programación indica el movimiento que deben realizar los ejes, pero no existe un sistema de control que verifique que los ejes estén en la posición programada. Sin embargo, las diferentes pruebas de producción indican que la automatización es correcta.

Se realizaron pruebas de funcionamiento del sintetizador para evaluar las condiciones máximas de funcionamiento, garantizando su integridad futura. Dentro de las pruebas, se verificó que el arco eléctrico para generación de plasma se realiza de manera óptima con el voltaje de 26,5 V, de 50 a 70 A, una distancia de 1-3 mm, avanzando manualmente durante el desgaste del electrodo, y realizando la síntesis durante 2 minutos aproximadamente.

Deben ser un resultado lógico de sus metodología y datos.

Provee una cápsula resumida de las principales conclusiones y cualquier impacto práctico, así como, cualquier posible futura investigación.

Sea cuidadoso de no sobreestimar sus conclusiones.

Recuerde que todas las interpretaciones están basadas en hecho concretos y posibles nuevas ideas.

Provea un mensaje final que el lector recordará.

## Referencias

1. ABB COLOMBIA, 2014. ¿Qué es un Variador de Velocidad? [en línea]. Colombia: Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=163&v=z\\_6YIBjq04](https://www.youtube.com/watch?time_continue=163&v=z_6YIBjq04).
2. AJAYAN, P.M. y ZHOU, O.Z., 2001. Applications of carbon nanotubes. Carbon nanotubes. S.I.: Springer, pp. 391-425.
3. AMAZON INC., 2019. No Title. Amazon.com [en línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/>.
4. AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION, 2007. Bean Design Formulas with Shear and Moment Diagrams. Washington, DC: American Wood Council.
5. ANDO, Y., 2010. Carbon nanotube: the inside story. Journal of nanoscience and nanotechnology, vol. 10, no. 6, pp. 3726-3738.
6. ANDO, Y. y IJIMA, S., 1993. Preparation of carbon nanotubes by arc-discharge evaporation. Japanese Journal of Applied Physics Part 2 Letters, vol. 32, pp. L107--L107.
7. ARDUINO, 2018. Arduino NANO. [en línea]. Disponible en: <https://arduino.cl/arduino-nano/>.
8. ARNOLD, M.S., GREEN, A.A., HULVAT, J.F., STUPP, S.I. y HERSAM, M.C., 2006. Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation. Nature nanotechnology, vol. 1, no. 1, pp. 60.
9. ARORA, N. y SHARMA, N.N., 2014. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review. Diamond and Related Materials, vol. 50, pp. 135-150.
10. ASME, T.A.S. of M.E., 2003. ASME B16.5-2003 (Revision of ASME B16.5-1996) Pipe Flanges and Flanged Fittings. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://itok-co.com/uploads/images/standards/ASME B16.5 - 2003.pdf>.
11. BACSA, R.R., LAURENT, C., PEIGNEY, A., BACSA, W.S., VAUGIEN, T. y ROUSSET, A., 2000. High specific surface area carbon nanotubes from catalytic chemical vapor deposition process. Chemical Physics Letters [en línea], vol. 323, no. 5-6, pp. 566-571. ISSN 00092614. DOI 10.1016/S0009-2614(00)00558-3. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009261400005583>.
12. BADJIAN, H. y SETOODEH, A.R., 2017. Improved tensile and buckling behavior of defected carbon nanotubes utilizing boron nitride coating--A molecular dynamic study. Physica B: Condensed Matter, vol. 507, pp. 156-163.
13. BALANDIN, A.A., 2011. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. Nature materials, vol. 10, no. 8, pp. 569.

14. BANDARU, P.R., 2007. Electrical properties and applications of carbon nanotube structures. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 7, no. 4-5, pp. 1239-1267.
15. BANERJEE, S. y WONG, S.S., 2004. Demonstration of Diameter-Selective Reactivity in the Sidewall Ozonation of SWNTs by Resonance Raman Spectroscopy. *Nano Letters* [en línea], vol. 4, no. 8, pp. 1445-1450. ISSN 1530-6984. DOI 10.1021/nl049261n. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl049261n>.
16. BARRETT, R.T., 1990. *Fastener Design Manual*. [en línea], Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19900009424>.
17. BAUGHMAN, R.H., ZAKHIDOV, A.A. y DE HEER, W.A., 2002. Carbon nanotubes--the route toward applications. *science*, vol. 297, no. 5582, pp. 787-792.
18. BEER, F.P., JOHNSTON, R.; y DEWOLF, J., 2007. *Mecánica de Materiales, Sexta Edición Edición*. 4th. S.I.: Mc Graw Hill México.
19. BOILER, A. y CODE, P.V., 2010a. Section II Part D. Properties, The American Society of Mechanical Engineers, New York,
20. BOILER, A. y CODE, P.V., 2010b. Section VIII Division 1. UG-126 Pressure Relief Valves to UG-129 Marking, ASME International, New York,
21. BOYLESTAD, R.L. y NASHESKY, L., 2003. *Electrónica teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 8th. Ciudad de México: Prentice Hall, INC.
22. BUDYNAS, R.G., 2011. *SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*. 9th. S.I.: McGraw-Hill Education.
23. ÇENGEL, Y.A. y GHAJAR, A.J., 2011. *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. 4th. S.I.: s.n.
24. CHAUDHARY, K.T., RIZVI, Z.H., BHATTI, K.A., ALI, J. y YUPAPIN, P.P., 2013. Multiwalled Carbon Nanotube Synthesis Using Arc Discharge with Hydrocarbon as Feedstock. *Journal of Nanomaterials* [en línea], vol. 2013, pp. 1-13. ISSN 1687-4110. DOI 10.1155/2013/105145. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2013/105145/>.
25. CHENG, H.M., LI, F., SU, G., PAN, H.Y., HE, L.L., SUN, X. y DRESSELHAUS, M.S., 1998. Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons. *Applied Physics Letters*, vol. 72, no. 25, pp. 3282-3284.
26. COLEMAN, J.N., KHAN, U., BLAU, W.J. y GUN♦KO, Y.K., 2006. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube--polymer composites. *Carbon*, vol. 44, no. 9, pp. 1624-1652.

27. CORVILLO, P.A. y GÓMEZ, H.G., 2007. SÍNTESIS, PROPIEDADES FOTOFÍSICAS Y APLICACIONES DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED ÚNICA FUNCIONALIZADOS. Instituto de tecnología química, departamento de química.(2007), 1, vol. 50.
28. CRUZ, A. y OTHERS, 2002. Química orgánica vivencial. S.l.: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
29. DAI, H., 2002. Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties. Accounts of chemical research, vol. 35, no. 12, pp. 1035-1044.
30. DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS, 2015. Introducción a la tecnología inversora para soldadura. [en línea]. [Consulta: 7 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tecnologia-inversora-inverter-para-soldadura>.
31. [DEVANATHAN, R., 2018. An Introduction to Graphene and Carbon Nanotubes John Edward Proctor, Daniel Alfonso Melendrez Armada, and Aravind Vijayaraghavan. MRS Bulletin, vol. 43, no. 02. DOI 10.1557/mrs.2018.25.
32. DIPAC, 2016. Planchas de acero inoxidable. [en línea], Disponible en: <http://www.dipacmanta.com/planchas-inoxidables>.
33. EBBESEN, T.W. y AJAYAN, P.M., 1992. Large-scale synthesis of carbon nanotubes. Nature, vol. 358, no. 6383, pp. 220.
34. EUROGLAS, 2001. Ficha Técnica Cristal Templado. [en línea]. Disponible en: <http://bus.euroglas.net/sites/bus.euroglas.net/files/descargas/fichaTEMPLADO3.pdf>.
35. FANG, X., SHASHURIN, A., TEEL, G. y KEIDAR, M., 2016. Determining synthesis region of the single wall carbon nanotubes in arc plasma volume. Carbon, vol. 107, pp. 273-280.
36. FARHAT, S., LAMY DE LA CHAPELLE, M., LOISEAU, A., SCOTT, C.D., LEFRANT, S., JOURNET, C. y BERNIER, P., 2001. Diameter control of single-walled carbon nanotubes using argon-helium mixture gases. The Journal of Chemical Physics [en línea], vol. 115, no. 14, pp. 6752-6759. ISSN 0021-9606. DOI 10.1063/1.1390526. Disponible en: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1390526>.
37. FERRARI, D. y DIAZ, F., 2018. METODO DEL ELEMENTO FINITO Y AutoFEM® [en línea]. 2018. S.l.: s.n. Disponible en: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m1/Elemento\\_finito\\_Autofem.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf).
38. GEIM, A.K. y NOVOSELOV, K.S., 2010. The rise of graphene. Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals. S.l.: World Scientific, pp. 11-19.



39. GOLATO, M., 2016. ACCIONES DE CONTROL [en línea]. 2016. Tucumán: s.n. Disponible en: [https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5\\_Acciones-de-control\\_2016.pdf](https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf).
40. GÓMEZ, E., 2017. Que es PWM y para que sirve. [en línea]. [Consulta: 28 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.rinconingenieril.es/que-es-pwm-y-para-que-sirve/>.
41. HAN, W., REDLICH, P., ERNST, F. y RÜHLE, M., 1999. Synthesizing boron nitride nanotubes filled with SiC nanowires by using carbon nanotubes as templates. *Applied physics letters*, vol. 75, no. 13, pp. 1875-1877.
42. HARRIS, P.J.F., 2009. *Carbon Nanotube Science. Synthesis, Properties and Applications*. 2009. S.I.: Cambridge.
43. HELMENSTINE, A.M., 2018. Disproportionation Definition in Chemistry. [en línea]. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://www.thoughtco.com/definition-of-disproportionation-605037>.
44. HIRLEKAR, R., YAMAGAR, M., GARSE, H., VIJ, M. y KADAM, V., 2009. Carbon nanotubes and its applications: a review. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, vol. 2, no. 4, pp. 17-27.
45. HOJATI TALEMI, P., KANNAN, A.G. y SIMON, G.P., 2012. Fusion of carbon nanotubes for fabrication of field emission cathodes. *Carbon*, vol. 50, no. 2, pp. 356-361.
46. HONE, J., LLAGUNO, M.C., NEMES, N.M., JOHNSON, A.T., FISCHER, J.E., WALTERS, D.A., CASAVANT, M.J., SCHMIDT, J. y SMALLEY, R.E., 2000. Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films. *Applied physics letters*, vol. 77, no. 5, pp. 666-668.
47. HU, Huawen, XIN, J.H., HU, Hong, WANG, X. y KONG, Y., 2015. Metal-free graphene-based catalyst-Insight into the catalytic activity: A short review. *Applied Catalysis A: General*, vol. 492, pp. 1-9.
48. IJIMA, S., 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56.
49. INDURA S.A. INDUSTRIA Y COMERCIO, 2007. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Cerrillos, Chile: s.n.
50. JIMÉNEZ LÓPEZ, M. de L., 2007. Síntesis de Nanoestructuras de carbono por descarga de plasma [en línea]. S.I.: Instituto Tecnológico de Toluca. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21013988>.
51. KIM, K.-S. y PARK, S.-J., 2010. Influence of enhanced dispersity of chemically treated MWNTs on physical properties of MWNTs/PVDF films. *Macromolecular research*, vol. 18, no. 10, pp. 981-985.
52. KUMAR, K., 2018. *Carbon Nanotube: A revolution in Science*. S.I.: Educreation Publishing.



53. LACANTERA, 2017. Porcelanato Ficha Técnica. [en línea]. [Consulta: 16 julio 2019]. Disponible en: <http://www.piedraslacantera.cl/wp-content/uploads/2017/04/Ficha-técnica-Borde-y-Palmetas-Porcelanato1.pdf>.
54. LEE, S.J., BAIK, H.K., YOO, J. y HAN, J.H., 2002. Large scale synthesis of carbon nanotubes by plasma rotating arc discharge technique. *Diamond and Related Materials*, vol. 11, no. 3-6, pp. 914-917.
55. LIEW, K.M., JIANWEI, Y. y ZHANG, L.-W., 2016. *Mechanical Behaviors of Carbon Nanotubes: Theoretical and Numerical Approaches*. S.I.: William Andrew.
56. LIU, Z., TABAKMAN, S., WELSHER, K. y DAI, H., 2009. Carbon nanotubes in biology and medicine: in vitro and in vivo detection, imaging and drug delivery. *Nano research*, vol. 2, no. 2, pp. 85-120.
57. LÓPEZ VELÁSQUEZ, A., 2011. XIX.- RADIACIÓN TÉRMICA FUNDAMENTOS Y FACTORES DE FORMA. [en línea]. Disponible en: <https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/cap19.pdf>.
58. LU, J.P., 1997. Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes. *Physical Review Letters*, vol. 79, no. 7, pp. 1297.
59. MARIA, K.H. y MIENO, T., 2015. Synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-frequency bipolar pulsed arc discharge method. *Vacuum*, vol. 113, pp. 11-18.
60. MARTÍNEZ, E., 2013. Controladores Automáticos [en línea]. 2013. MATURIN: INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITECNICO "SANTIAGO MARIÑO". Disponible en: [https://es.slideshare.net/martinezeduardo/controladores-teoria-de-control-24587590?from\\_action=save](https://es.slideshare.net/martinezeduardo/controladores-teoria-de-control-24587590?from_action=save).
61. MCMURRY, J.E., 2014. *Organic Chemistry with Biological Applications*. S.I.: Cengage Learning.
62. METCALFE, J.C. y QUIGLEY, M.B.C., 1975. Heat transfer in plasma-arc welding. *Welding journal*, vol. 54, no. 3, pp. 99-103.
63. MIGAL.COM, 2019. Schaeffler diagramm. [en línea]. Disponible en: <https://www.migal.co/english/service/welding-stainless-steels/schaeffler-diagram-with-different-base-materials/>.
64. MINGO, N. y BROIDO, D.A., 2005. Carbon Nanotube Ballistic Thermal Conductance and Its Limits. *Physical Review Letters* [en línea], vol. 95, no. 9, pp. 096105. ISSN 0031-9007. DOI 10.1103/PhysRevLett.95.096105. Disponible en: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.096105>.

65. MIZEL, A., BENEDICT, L.X., COHEN, M.L., LOUIE, S.G., ZETTL, A., BUDRAA, N.K. y BEYERMANN, W.P., 1999. Analysis of the low-temperature specific heat of multiwalled carbon nanotubes and carbon nanotube ropes. *Physical Review B*, vol. 60, no. 5, pp. 3264.
66. NTN-SNR, 2015. NTN-SNR LINEAR MOTION: RODAMIENTOS LINEALES DE BOLAS. [en línea]. [Consulta: 12 julio 2019]. Disponible en: [https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-04/ball\\_bushings\\_es.pdf](https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-04/ball_bushings_es.pdf).
67. PARK, J.G., CHENG, Q., LU, J., BAO, J., LI, S., TIAN, Y., LIANG, Z., ZHANG, C. y WANG, B., 2012. Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization. *Carbon* [en línea], vol. 50, no. 6, pp. 2083-2090. ISSN 00086223. DOI 10.1016/j.carbon.2011.12.046. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622311009924>.
68. PARVEZ, K., WU, Z.-S., LI, R., LIU, X., GRAF, R., FENG, X. y MÜLLEN, K., 2014. Exfoliation of Graphite into Graphene in Aqueous Solutions of Inorganic Salts. *Journal of the American Chemical Society* [en línea], vol. 136, no. 16, pp. 6083-6091. ISSN 0002-7863. DOI 10.1021/ja5017156. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja5017156>.
69. PÉREZ URBANO, W., 2006. Fabricación y caracterización de nanotubos de carbono de multicapa producidos por PAPVD [en línea]. S.l.: Universidad Central de Colombia. Disponible en: [www.bdigital.unal.edu.co/3511/](http://www.bdigital.unal.edu.co/3511/).
70. PORTEN PERFORMANCE & TECHNOLOGY, 2019. Soldadora Inverter Porten PS-S250DS. 2019. S.l.: s.n.
71. PRASEK, J., DRBOHLAVOVA, J., CHOMOUCKA, J., HUBALEK, J., JASEK, O., ADAM, V. y KIZEK, R., 2011. Methods for carbon nanotubes synthesis. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 40, pp. 15872-15884.
72. PULIDO, A., 2008. Mecanismos de transformación del movimiento. [en línea]. [Consulta: 7 abril 2019]. Disponible en: <https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/>.
73. RANISZEWSKI, G., 2017. Parameters of the electric arc in plasma systems to materials conversion. *Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), 2017 International Conference on*. S.l.: s.n., pp. 1-4.
74. RIBA ROMEVA, C., 2002. Diseño concurrente. S.l.: Univ. Politèc. de Catalunya.
75. RODRÍGUEZ, H., 2019. CÁLCULO MECÁNICO DE LAS UNIONES SOLDADAS. [www.ingemecanica.com](http://www.ingemecanica.com) [en línea], Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial46.pdf>.

76. ROSLAN, M.S., CHAUDHARY, K.T., DOYLEND, N., AGAM, A., KAMARULZAMAN, R., HAIDER, Z., MAZALAN, E. y ALI, J., 2018. Growth of Wall-controlled MWCNTs by Magnetic Field Assisted Arc Discharge Plasma. *Journal of Saudi Chemical Society* [en línea], Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.06.003>.
77. SALVETAT, J.-P., BRIGGS, G.A.D., BONARD, J.-M., BACSA, R.R., KULIK, A.J., STÖCKLI, T., BURNHAM, N.A. y FORRÓ, L., 1999. Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes. *Physical review letters*, vol. 82, no. 5, pp. 944.
78. SKF GROUP, 2018. Rolling bearings. [en línea]. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: <https://www.skf.com/binary/21-121486/Rolling-bearings---17000-EN.pdf>.
79. WANG, D., SONG, P., LIU, C., WU, W. y FAN, S., 2008. Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes. *Nanotechnology*, vol. 19, no. 7, pp. 75609.
80. XIE, S., LI, W., PAN, Z., CHANG, B. y SUN, L., 2000. Mechanical and physical properties on carbon nanotube. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [en línea], vol. 61, no. 7, pp. 1153-1158. ISSN 00223697. DOI 10.1016/S0022-3697(99)00376-5. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022369799003765>.
81. YANG, D.J., WANG, S.G., ZHANG, Q., SELLIN, P.J. y CHEN, G., 2004. Thermal and electrical transport in multi-walled carbon nanotubes. *Physics Letters A*, vol. 329, no. 3, pp. 207-213.
82. YI, W., LU, L., DIAN-LIN, Z., PAN, Z.W. y XIE, S.S., 1999. Linear specific heat of carbon nanotubes. *Physical Review B*, vol. 59, no. 14, pp. R9015.
83. YOUNG, W.C., BUDYNAS, R.G., SADEGH, A.M. y OTHERS, 2002. *Roark's formulas for stress and strain*. S.I.: McGraw-Hill New York.
84. ZENY, 2019. *Vacuum Pump*. 2019. S.I.: s.n.
85. ZHU, W., BOWER, C., ZHOU, O., KOCHANSKI, G. y JIN, S., 1999. Large current density from carbon nanotube field emitters. *Applied Physics Letters*, vol. 75, no. 6, pp. 873-875.
86. ZOU, X., HUANG, X., GOSWAMI, A., SILVA, R., SATHE, B.R., MIKMEKOVÁ, E. y ASEFA, T., 2014. Cobalt-embedded nitrogen-rich carbon nanotubes efficiently catalyze hydrogen evolution reaction at all pH values. *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 53, no. 17, pp. 4372-4376. ISSN 15213773. DOI 10.1002/anie.201311111.