



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN
SINTETIZADOR DE NANOTUBOS DE CARBONO MEDIANTE
ARCO ELÉCTRICO”**

Trabajo de titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA MECÁNICA

AUTOR: ENYA ISABEL CABALLERO SILVA

DIRECTOR: Ing. DIEGO FERNANDO MAYORGA PÉREZ

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Enya Isabel Caballero Silva

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Enya Isabel Caballero Silva, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 11 de diciembre de 2020.

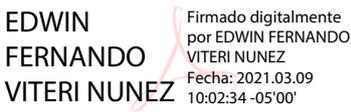


Enya Isabel Caballero Silva

0603750944

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Dispositivo Tecnológico, **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN SINTETIZADOR DE NANOTUBOS DE CARBONO MEDIANTE ARCO ELÉCTRICO**, realizado por la señorita: **ENYA ISABEL CABALLERO SILVA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2021.03.09 10:02:34 -05'00'	2020-12-11
Ing. Diego Fernando Mayorga Pérez DIRECTOR/A DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 DIEGO FERNANDO MAYORGA PEREZ Firmado digitalmente por DIEGO FERNANDO MAYORGA PEREZ Fecha: 2021.03.09 10:24:15 -05'00'	2020-12-11
Ing. Javier Enrique Orna Chávez MSc MIEMBRO DE TRIBUNAL	 JAVIER ENRIQUE ORNA CHAVEZ Firmado digitalmente por JAVIER ENRIQUE ORNA CHAVEZ Fecha: 2021.03.09 11:16:44 -05'00'	2020-12-11

DEDICATORIA

A la Fuerza Suprema que me ha guiado en mi vida hasta el día de hoy, presente en cada aliento y cada idea de inspiración para llegar hasta aquí.

A mis padres, por su infinita paciencia mientras crecía y me animaban a ser una niña rebelde capaz de ganar cualquier cosa que se propusiera. También por su infinito amor hacia mí y por no dejar que me rindiera cuando sentía que era imposible lograr mis objetivos.

A mis hermanos, Ethan y Emily, por su admiración y confianza que hicieron que lograra llegar al final.

A mis queridísimas amigas, Michelle Camacho y Estefanía Lovato; su confianza y ánimos fueron pilares fundamentales para lograr mis metas, además de su invaluable ayuda, me hacían darme cuenta de que no era tan grande ni tan pequeña como yo me creía por momentos.

A mis compañeros, Benny Quinancela y Marco Santillán, que me enseñaron que vale más la amistad y el apoyo, que una nota perfecta.

Por último, este trabajo se lo dedico a todos aquellos estudiantes que aparte de la Ingeniería Mecánica, tienen otro amor; en mi caso la Química.

Enya

AGRADECIMIENTO

A todos los profesores y profesoras que conforman la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarme sus conocimientos y guía en el camino para llegar a ser ingeniera, en especial a mis tutores Ing. John Vera e Ing. Diego Mayorga y mi asesor Ing. Javier Orna, por su paciencia para guiarme en el proceso de desarrollo de este trabajo de titulación y no dejar que me entretuviera, y a los ingenieros: Isaías Caicedo, Otto Balseca, Julio Villavicencio, Juan Pablo Chunquín, por la complementación del conocimiento que me faltaba y se ve reflejado en este trabajo.

Al doctor Marco Guevara y los estudiantes de AeroSpace: Ingrid, Vicente, Ángel, Víctor, Maxwell, David, por su amistad y apoyo en el proceso para diseñar y construir, y sobre todo, acabar este trabajo.

Enya

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.3 Justificación del proyecto.....	3
1.3.1 <i>Justificación Teórica</i>	3
1.3.2 <i>Justificación Metodológica</i>	4
1.4 Objetivo General.....	4
1.5 Objetivos Específicos.....	4
1.6 Alcance.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Comportamiento Químico del Carbono.....	6
2.2 Formas alotrópicas del Carbono.....	8
2.3 Estructura de los Nanotubos.....	10
2.4 Propiedades de los Nanotubos de Carbono.....	11
2.5 Aplicaciones de los Nanotubos de Carbono.....	13
2.6 Métodos de Síntesis.....	15
2.6.1 <i>Descarga de Arco Eléctrico</i>	15
2.6.2 <i>Deposición Química con Vapor</i>	16
2.6.3 <i>Ablación Láser</i>	16
2.6.4 <i>Pirólisis de Llama</i>	17
2.7 Parámetros de Arco Eléctrico Para Generación de los Nanotubos.....	17
2.8 Metodología para el Diseño del Sintetizador de Nanotubos de Carbono.....	19
2.8.1 <i>Diseño concurrente</i>	19

2.8.2	<i>Despliegue de la Función de Calidad</i>	20
2.8.3	<i>Diseño conceptual</i>	20
2.8.4	<i>Diseño de materialización</i>	20
2.8.5	<i>Diseño de detalle</i>	20
2.9	Desarrollo teórico para el diseño del sintetizador de Nanotubos de Carbono	21
2.9.1	<i>Determinación de la temperatura de diseño</i>	21
2.9.1.1	<i>Radiación</i>	21
2.9.1.2	<i>Convección</i>	22
2.9.2	<i>Cálculo del espesor de la cámara del sintetizador</i>	23
2.9.3	<i>Cálculo del diámetro de ejes</i>	24
2.9.3.1	<i>Eje sometido a velocidad</i>	24
2.9.3.2	<i>Tornillo de potencia</i>	25
2.9.4	<i>Cálculo del espesor de placas</i>	26
2.9.5	<i>Selección de pernos</i>	27
2.9.6	<i>Uniones soldadas</i>	30
2.9.7	<i>Selección de Rodamientos</i>	31
2.9.8	<i>Rigidez</i>	32
2.9.9	<i>Velocidades críticas</i>	32
2.10	Desarrollo teórico para la parte eléctrica y electrónica del sintetizador de Nanotubos de Carbono	33
2.10.1	<i>Convertidor AC/DC</i>	33
2.10.2	<i>PWM</i>	35
2.11	Protocolo de pruebas	35
3.	METODOLOGÍA	38
3.1	Definición del Producto	38
3.1.1	<i>Voz del Usuario</i>	38
3.1.2	<i>Voz del Ingeniero</i>	39
3.1.3	<i>Definición de la competencia</i>	39
3.1.4	<i>Despliegue de la Casa de la Calidad</i>	43
3.1.4.1	<i>Resultados de la Casa de la Calidad</i>	43
3.2	Diseño Conceptual	44
3.2.1	<i>Análisis Funcional</i>	44
3.2.2	<i>Matriz Morfológica por cada Módulo</i>	44
3.3	Diseño de Detalle	62
3.3.1	<i>Diseño Mecánico</i>	62

3.3.1.1	<i>Determinación de la Temperatura Crítica de Diseño</i>	62
3.3.1.1.1	<i>Radiación</i>	63
3.3.1.1.2	<i>Convección</i>	64
3.3.1.1.3	<i>Modelado</i>	65
3.3.1.2	<i>Cálculo del espesor de la cámara de síntesis</i>	69
3.3.1.3	<i>Cálculo del Diámetro del Eje de Velocidad</i>	70
3.3.1.3.1	<i>Diámetro de Eje de Rotación</i>	71
3.3.1.3.2	<i>Selección de Rodamiento</i>	77
3.3.1.3.3	<i>Deformación Máxima</i>	80
3.3.1.3.4	<i>Velocidad Crítica</i>	80
3.3.1.4	<i>Eje de avance</i>	81
3.3.1.4.1	<i>Diámetro del tornillo de potencia</i>	81
3.3.1.4.2	<i>Eje de avance</i>	84
3.3.1.4.3	<i>Selección del rodamiento de avance</i>	84
3.3.1.5	<i>Placas</i>	85
3.3.1.5.1	<i>Placa de Soporte</i>	85
3.3.1.5.2	<i>Placa de la Brida de Observación</i>	86
3.3.1.5.3	<i>Vidrio de Observación</i>	89
3.3.1.6	<i>Selección de los Pernos</i>	90
3.3.1.6.1	<i>Pernos para las Placas</i>	90
3.3.1.6.2	<i>Pernos para las Brida Extremas</i>	94
3.3.1.6.3	<i>Pernos para la Brida de Observación</i>	95
3.3.1.7	<i>Uniones Soldadas</i>	96
3.3.2	<i>Diseño Eléctrico</i>	98
3.3.3	<i>Diseño Neumático</i>	98
3.3.4	<i>Diseño Electrónico</i>	99
3.3.4.1	<i>Automatización flujograma</i>	101
3.3.4.2	<i>Selección del controlador</i>	101
3.3.4.3	<i>Circuito Electrónico</i>	103
4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	104
4.1	Construcción	104
4.2	Montaje	108
4.3	Operación	109
4.3.1	<i>Operación del Aparato de Control</i>	110
4.3.2	<i>Seguridad en la Operación del Sintetizador</i>	111

4.3.2.1	<i>Precauciones</i>	111
4.3.2.2	<i>Advertencias</i>	112
4.4	Protocolo de Pruebas	112
4.4.1	<i>Definición de objetivos</i>	112
4.4.2	<i>Diseño del ensayo</i>	113
4.4.3	<i>Planificación del ensayo</i>	113
4.4.4	<i>Organización de prototipo y medio del ensayo</i>	113
4.4.5	<i>Interpretación y validación de resultados</i>	113
4.4.5.1	<i>Análisis en el Microscopio SEM</i>	114
4.5	Mantenimiento	117
4.6	Recursos y materiales	118
4.6.1	<i>Costos directos</i>	118
4.6.2	<i>Costos Indirectos</i>	120
4.6.3	<i>Costos Totales</i>	120

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-2: Propiedades Físicas y Mecánicas de los CNT	12
Tabla 2-2: Propiedades Químicas de los CNT	12
Tabla 3-2: Propiedades Térmicas de los CNT	12
Tabla 4-2: Propiedades Eléctricas de los CNT	13
Tabla 5-2: Relaciones entre dimensiones de la placa rectangular	27
Tabla 1-3: Resultados de las Encuestas	38
Tabla 2-3: Especificaciones del Sintetizador de la Facultad de Ciencias, Equipo Propio	40
Tabla 3-3: Especificaciones del Sintetizador de CNT horizontal de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Competencia 1	41
Tabla 4-3: Especificaciones del Sintetizador de CNT vertical del Instituto Tecnológico de Toluca (ITESM), Competencia 2	42
Tabla 5-3: Características de los Controladores	56
Tabla 6-3: Modelado de las 3 Alternativas	57
Tabla 7-3: Peso Específico de Cada Criterio	59
Tabla 8-3: Peso Específico del criterio Pureza de la Atmósfera	59
Tabla 9-3: Peso Específico del criterio Variación de Parámetros	59
Tabla 10-3: Peso Específico del criterio Seguridad	59
Tabla 11-3: Peso Específico del criterio Manteneabilidad	60
Tabla 12-3: Peso Específico del criterio Precio	60
Tabla 13-3: Evaluación de la Alternativas por Criterios Ponderados	60
Tabla 14-3: Características de la máquina prediseñada	61
Tabla 15-3: Especificaciones técnicas del Sintetizador de CNT	62
Tabla 16-3: Valores para calcular el Factor de Emisión	64
Tabla 17-3: Valores para calcular el Coeficiente de Convección	65
Tabla 18-3: Pasos para la elaboración del análisis MEF de la temperatura del Sintetizador	67
Tabla 19-3: Características del Análisis de Temperatura	68
Tabla 20-3: Valores para calcular el espesor de la Cámara por Presión Externa	70
Tabla 21-3: Factor k_e de confiabilidad para el acero	74
Tabla 22-3: Valores para calcular el coeficiente de seguridad del eje por fatiga	77
Tabla 23-3: Valores para calcular la Deformación y la Velocidad Crítica	81
Tabla 24-3: Valores para calcular el factor de seguridad del Tornillo de Potencia	83
Tabla 25-3: Propiedades del Porcelanato	86
Tabla 26-3: Valores para calcular el Espesor Mínimo	86

Tabla 27-3:	Dimensiones de la Brida Rectangular	87
Tabla 28-3:	Verificación de espesor de la Brida de Observación	89
Tabla 29-3:	Verificación de espesor del Vidrio de Observación	90
Tabla 30-3:	Propiedades mecánicas de los pernos y fuerzas aplicadas.....	91
Tabla 31-3:	Cálculo de la constante elástica de la junta	92
Tabla 32-3:	Cálculo del coeficiente de seguridad con pernos M3-4.8.....	94
Tabla 33-3:	Cálculo del coeficiente de seguridad con pernos UNC 1/4-SAE5	96
Tabla 34-3:	Composición química y Cromo y Níquel equivalentes de los materiales	97
Tabla 35-3:	Características de la Soldadora Inverter PS-S250DV	98
Tabla 36-3:	Características de las bombas de Vacío.....	99
Tabla 37-3:	Criterios ponderados de las bombas de vacío.....	99
Tabla 1-4:	Proceso de construcción del sintetizador de CNT	104
Tabla 2-4:	Resultados del Protocolo de Pruebas del Sintetizador de CNT	114
Tabla 3-4:	Tiempos y actividades del mantenimiento preventivo del Sintetizador de CNT.....	118
Tabla 4-4:	Costos por materiales e insumos	118
Tabla 5-4:	Costos por maquinaria y equipos.....	119
Tabla 6-4:	Costos Indirectos del Trabajo de Titulación.....	120
Tabla 7-4:	Costos Totales del Trabajo de Titulación	120

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-2: Forma de los orbitales dependiendo del número de electrones presentes y los diferentes niveles que saturan.....	6
Figura 2-2: (a) Hibridación sp^1 , (b) Hibridación sp^2 , (c) Hibridación sp^3	8
Figura 3-2: Fullerene de Buckminster, C60.....	9
Figura 4-2: Primeros CNT fotografiados en 1952 (izq) y Micrografía de DWCNT y MWCNT presentadas por Iijima generados en una atmósfera de He a 500torr en 1991 (dcha).....	9
Figura 5-2: La forma alotrópica del carbono de 2D, Grafeno, puede ser transformada en formas de 0D Buckyballs, 1D Nanotubos o 3D grafito.....	10
Figura 6-2: Disposición Geométrica de SWNT, DWNT (double-wall nanotube) y MWNT.....	11
Figura 7-2: (a) Estructura de panal de abeja de una hoja de grafeno (b) SWNT con disposición de mecedora (c) SWNT con disposición zigzag (d) SWNT con disposición quiral.....	11
Figura 8-2: Sintetizador de CNT y Fullerenes por descarga de Arco Eléctrico de Corriente Continua en vertical y con Corriente Pulsátil en horizontal.....	16
Figura 9-2: Imágenes en SEM de diferentes mezclas de Ar y He.....	19
Figura 10-2: Partes de la Casa de la Calidad.....	21
Figura 11-2: Dimensiones necesarias para calcular el Factor de Forma de dos Cilindros Concéntricos.....	22
Figura 12-2: Partes de un tornillo de potencia y diagrama de fuerzas: a) para subida y b) para bajada de la carga.....	25
Figura 13-2: a) Fuerzas de corte primario producidas por una fuerza paralela al plano del tornillo, b) Fuerzas cortantes secundarias producidas por un momento paralelo al plano del tornillo.....	28
Figura 14-2: a) Fuerzas de tracción primaria producidas por una fuerza perpendicular al plano del tornillo, b) Fuerzas de tracción secundarias producidas por un momento perpendicular al plano del tornillo.....	29
Figura 15-2: Triángulos de esfuerzo en la sujeción de una unión de diferentes materiales.....	29
Figura 16-2: Esquema del circuito de la Soldadora Inverter.....	33
Figura 17-2: Conversión de la Energía en un Convertidor de Frecuencia.....	34
Figura 18-2: Corrección de Onda Completa con Diodos.....	35
Figura 19-2: Señales PWM con diferentes ciclos de trabajo.....	36

Figura 1-3:	Despliegue de la Casa de la Calidad en base a la información estudiada	43
Figura 2-3:	Nivel 0 del Diseño Funcional.....	44
Figura 3-3:	Nivel 1 del Diseño Funcional.....	45
Figura 4-3:	Nivel 2 del Diseño Funcional y Definición de los Módulos	45
Figura 5-3:	Cierre Brida, con Tornillo de Potencia y con Sello de Presión.....	47
Figura 6-3:	Tubería de Observación con brida Redonda y Cuadrada.....	47
Figura 7-3:	Mandril, Mini Mandril y Sujeta electrodo	49
Figura 8-3:	Acople Rápido y Uniones Roscadas	50
Figura 9-3:	Bomba de vacío de Refrigerador, de Aire Acondicionado y Sistema Pfeiffer ...	51
Figura 10-3:	Sellos Espirometálicos y Acrílico de Alta Temperatura	52
Figura 11-3:	Soldadora Inverter.....	53
Figura 12-3:	Mecanismos: Leva, Biela-Manivela, Piñón-Cremallera, Tornillo-Tuerca.....	54
Figura 13-3:	Motor DC, Servomotor y Paso a Paso	55
Figura 14-3:	PLC y Arduino	56
Figura 15-3:	Alternativas por Módulos	58
Figura 16-3:	Modelado del Sistema en ANSYS Space Claim Design Manager y Análisis de la Temperatura cuando el experimento se realiza en vertical en ANSYS Mechanical	66
Figura 17-3:	Esquema de medición del Torque necesario para mover el eje	71
Figura 18-3:	a) Esquema del eje de velocidad; b) Fuerzas en el eje; c) Diagrama de cortante; d) Diagrama de momento flector; e) Diagrama de momento torsor.....	72
Figura 19-3:	Esquema del eje de velocidad, mostrando que la única carga es axial y causada por el peso del eje	78
Figura 20-3:	Esquema del eje de avance y Torque generado en el tornillo	82
Figura 21-3:	Esquema del eje de avance	84
Figura 22-3:	Esquema del eje generando carga en el eje y, y se resalta la zona de esfuerzo en color naranja.....	86
Figura 23-3:	Ventana de Observación y fuerza cortante causada por el peso	87
Figura 24-3:	Distribución de Pernos: 2 internos y 2 externos. Peso (P), que causa tracción primaria y Momento (M_V) que causa corte secundario intermitente	91
Figura 25-3:	Esfuerzos en la brida superior.....	94
Figura 26-3:	Diagrama P&ID del sistema de vacío	100
Figura 27-3:	Circuito Electrónico	103
Figura 1-4:	Sintetizador de CNT ensamblado	110
Figura 2-4:	Dispositivo de Control	111
Figura 3-4:	Micrografía SEM 1 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar.....	115
Figura 4-4:	Micrografía SEM 2 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar.....	115

Figura 5-4:	Micrografía SEM 3 de la ESPOCH, 60A y -0.25bar	116
Figura 6-4:	Escaneo SEM de MWCNT sintetizado a 50A y presión ambiental.....	116
Figura 7-4:	Escaneo SEM de un ramo de MWCNT	117

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1-2: Artículos publicados en base al campo amplio de los CNT	13
Gráfico 1-3: Indicación del valor del Factor de Forma de 2 Cilindros Concéntricos, en base a los datos obtenidos: $L/r_2 = 2,9$ y $r_1/r_2 = 0,057$	64
Gráfico 2-3: Convergencia de la Temperatura y la Calidad de Mallado en función de la Separación Mínima de Elementos	69
Gráfico 3-3: Factor k_a de superficie para el acero	73
Gráfico 4-3: Factor q , relacionando el $S_{ut} = 0,41\text{GPa}$ y el radio $r = 1\text{ mm}$ de redondeo del eje. $q = 0,65$	74
Gráfico 5-3: Factor q_s , relacionando el $S_{ut} = 0,41\text{GPa}$ y el radio $r = 1\text{ mm}$ de redondeo del eje. $q_s = 0,7$	75
Gráfico 6-3: Catálogo de Rodamientos SKF, Rodamientos de Bolas.....	78
Gráfico 7-3: Catálogo de Rodamientos SKF, Vida de la Grasa con 90% de confiabilidad ..	79
Gráfico 8-3: Nomenclatura para calcular deformaciones	80
Gráfico 9-3: Catálogo de Rodamientos NTN, Rodamientos de Bolas.....	85
Gráfico 10-3: Diagrama de Schaeffler de la suelda disímil de los materiales de la Tabla 17-4. que generan un cordón con 8% de Ferrita Delta.....	97
Gráfico 11-3: Diagrama de Schaeffler de la suelda disímil, siendo el Material 1 el AISI A304 y el Material 2 el electrodo E308L-16, que generan un cordón con 10% de Ferrita Delta	98
Gráfico 12-3: Flujograma del proceso del Sistema Electrónico	101
Gráfico 1-4: Flujograma de construcción del sintetizador	107
Gráfico 2-4: Flujograma del Sistema eléctrico	108
Gráfico 3-4: Flujograma del Sistema neumático	108
Gráfico 4-4: Flujograma del Sistema electrónico	109

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** RESULTADO DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A PROFESORES Y ESTUDIANTES DE LA ESPOCH
- ANEXO B:** TABLA DE PROPIEDADES DEL ARGÓN
- ANEXO C:** TABLAS USADAS PARA EL CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA CÁMARA BAJO ASME
- ANEXO D:** DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA EL SISTEMA DE CONTROL
- ANEXO E:** PROCESO DE RECOLECCIÓN DE MICROGRAFÍAS EN EL SEM
- ANEXO F:** PLANOS DE DETALLE DEL SINTETIZADOR DE NANOTUBOS DE CARBONO
- ANEXO G:** HOJAS WPS DEL SINTETIZADOR DE NANOTUBOS DE CARBONO

RESUMEN

Para diseñar, construir y automatizar un sintetizador de nanotubos de carbono (CNT) mediante descarga de arco eléctrico, se aplicaron métodos adecuados de ingeniería desarrollando un dispositivo capaz de generar un nanomaterial de estudio válido para la ESPOCH. 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, necesaria para la síntesis de CNT. El segundo paso fue el diseño conceptual, determinando las necesidades de los futuros usuarios: profesores, estudiantes y tesis, con encuestas utilizadas 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. En el penúltimo punto, se realiza el diseño de detalle donde se presentan los planos y la memoria de cálculo. 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 dejando paso a nuevas tesis como la implementación de un sistema de refrigeración o una automatización más avanzada.

Palabras clave: <MECÁNICA>, <NANOMATERIALES>, <NANOTUBOS DE CARBONO>, <DESCARGA DE ARCO ELÉCTRICO>, <DISEÑO CONCURRENTE>, <DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD>, <ANSYS (SOFTWARE)>.



Firmado electrónicamente por:
JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS



17/02/2021

0645-DBRAI-UPT-2021

ABSTRACT

To design, build and automate a carbon nanotube synthesizer (CNT) by electric arc discharge, suitable engineering methods were applied developing a device capable of generating a valid study nanomaterial for ESPOCH. So, to obtain a machine that meets the synthesis requirements of CNTs, concurrent design was used, in which the point of view of design, functionality, construction and maintenance. In this case. In the bibliographic review, the characteristics of the direct current source, voltage, amperage, distance between electrodes, rotation speed 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: teachers, students and thesis students, with surveys used 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 materialization design, where through the use of bibliography and software such as ANSYS, the mechanical components of the equipment were dimensioned. In the penultimate point, the detailed design is carried out where the plans and the calculation memory are presented. 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 giving way to new theses such as the implementation of a refrigeration system or more advanced automation.

KEY WORDS: <MECHANIC>, <NANOMATERIALS>, <CARBON NANOTUBES>, <SYNTHESIS BY ARC DISCHARGE>, <CONCURRENT DESIGN>, <QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT>, <ANSYS (SOFTWARE)>.

1. 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.

Tras analizar todas las alternativas que el sintetizador puede cumplir, se pasa a la construcción del prototipo y el control que requiere el mismo. Posteriormente, es sometido a pruebas funcionales y verificación de las condiciones de síntesis.

1.1 Antecedentes

El Carbono (C) es un elemento usado desde los principios de la humanidad, ya sea como fuente energética o como simple material de dibujo, pero lo interesante de este material son sus diferentes formas alotrópicas que ofrecían, cada vez que se descubrían, nuevas aplicaciones como: en 1772, Antoine Lavoisier, que demostró que los diamantes estaban hechos de C, siendo la sustancia natural más fuerte descubierta hasta mucho tiempo después; o en 1776, Carl Wilhem Scheele, hizo lo mismo con el grafito, demostrando que el C podía formar distintos compuestos sin la necesidad de añadir ningún otro elemento más. Durante los siglos siguientes, la combustión y la difracción de rayos X, demostraron la presencia de este elemento en múltiples sustancias, y el estudio de su aplicación en diferentes áreas (Harris 2009).

Los primeros Nanotubos de Carbono (CNT) de los cuales se tienen datos, son los fotografiados por Radushkevich y Lukianovich en 1952. Se sabe que los CNT existían desde mucho tiempo antes, sin embargo, no se tenía la tecnología necesaria de microscopía para identificarlos. Estos nanotubos fueron generados por deposición química, pero poco se puede llegar a conocer sobre su proceso, ya que por estar escrito en ruso y políticas, fueron ignorados junto con otros, como: Oberlin, Endo y Koyama en 1976, también generando CNT por deposición química; John Abrehmson en 1979, en la Universidad de Pensilvania, los produjo por descarga de arco eléctrico; en 1981, un grupo de científicos soviéticos, publicaron resultados de caracterización química y estructural de los CNT producidos por Disproporciónación química, que es una reacción, típicamente una Rédox, donde una molécula se transforma en dos o más productos diferentes (Helmenstine 2018). Howard Tennent usó la catálisis para generar su patente de producción de CNT en 1987; y no fue hasta 1991 con Ijima en el Nippon Electric Company que la investigación de los CNT tomó importancia (Kumar, 2018, p. 6,7).

Actualmente, la nanotecnología ha cobrado una relevancia muy fuerte en todo el mundo, generando nuevos reportes y aplicaciones a diario; incluso en las regiones de menos desarrollo tecnológico, entre las cuales, ya se puede identificar a Ecuador que tiene diversos laboratorios, como son la Escuela Politécnica Nacional (EPN) con sus seminarios; la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) con su laboratorio de caracterización de nanomateriales; la Universidad de Yachay con sus laboratorios; o la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), con sus cursos. Estos centros de educación superior, junto con otras instituciones privadas, siguen invirtiendo y mejorando día tras día haciendo que, en un futuro, esta tecnología sea aplicable y rentable en el país.

1.2 Planteamiento del Problema

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) que actualmente se encuentra en los primeros inicios del estudio y desarrollo de nanomateriales, busca el método de sintetizar CNT.

Existen equipos para síntesis de Nanotubos por descarga de arco eléctrico, el cual es el objeto de estudio; sin embargo, no tienen comercialización, la única disponibilidad sería posible solicitando planos a Universidades y no siempre cumplen con las características de síntesis a investigar de voltaje, corriente, presión, distancia entre electrodos y velocidad de rotación del electrodo, ya que cada institución maneja su propio diseño, planos y patentes, por no ser un proceso normalizado.

Esto hace que la inversión sea demasiado elevada para un equipo que no va a ser el óptimo para el proceso; por lo que se requiere la investigación de la síntesis de los CNT para hallar las condiciones máximas y mínimas, para pasar al diseño y construcción de una máquina capaz de variar las propiedades, mencionadas en el párrafo anterior, con el fin de generar un plasma controlado para generar nanotubos. Esto llevará a sintetizar un nanomaterial con el que se pueda investigar en las diferentes facultades y/o grupos de investigación presentes en la ESPOCH, para poder elevar el estatus y potencial investigativo que tiene la politécnica, dado que ya tiene proyectos previos de trabajo con otros nanomateriales como el grafeno y el alofán.

1.3 Justificación del proyecto

1.3.1 Justificación Teórica

Este trabajo busca proporcionar un Sintetizador de CNT mediante descarga de arco eléctrico confiable que genere un nanomaterial útil para aprendizaje e investigación por medio de una indagación aplicada en la que se pueda describir las características máximas, mínimas y de trabajo de la máquina con la comparación del estado del arte sobre la historia y teoría de síntesis y condiciones necesarias para obtener diferentes tipos de Nanotubos de Carbono, para una posterior aplicación del conocimiento adquirido en la Carrera de Ingeniería Mecánica en el diseño y construcción como: Diseño de Elementos de Máquinas, Automatización, Termodinámica, Transferencia de Calor, Química Aplicada, Dibujo Asistido por Computadora, Soldadura, Resistencia de Materiales e Ingeniería de Materiales.

Este proyecto también plantea, un modo de verificación de la teoría existente, ya que, en algunos casos la información sobre la generación de nanotubos es coincidente, y en otros, es totalmente

dispareja. Esto elevaría el estatus de la ESPOCH en lo que concierne a investigación, y podría convertirse en uno de los lugares a la cabeza de estos estudios en Sudamérica.

1.3.2 Justificación Metodológica

El presente trabajo de titulación presenta una metodología de Síntesis mediante descarga de arco eléctrico. Este proceso de síntesis debe ser ordenado y registrado correctamente, ya que la más mínima variación en las condiciones de generación del plasma crea nanotubos diferentes, los cuales deberán ser caracterizados en laboratorio por diferentes técnicas que muestren su calidad y propiedades, como la aplicación de micrografía SEM para determinación de las dimensiones de diámetro, las cuales deben estar en el rango de 1 a 100 nm (Badjian y Setoodeh 2017), para considerarse MWNT, que son los que se generan en Descarga de Arco Eléctrico.

Posteriormente, se recomienda el uso de técnicas de caracterización de nanomateriales como la micrografía de TEM para ver el número de capas; espectrografía Raman y espectrografía UV Visible para analizar su naturaleza y calidad. Los CNT sintetizados podrán ser usados en posteriores trabajos de investigación de la misma Facultad de Ingeniería Mecánica o en cualquiera de las existentes en la ESPOCH que busquen investigar las aplicaciones de estos productos generados como, por ejemplo, en los campos de electrónica como superconductores nanométricos, o materiales compuestos de alta resistencia; dentro las posibilidades más viables y aplicables, ya que no se requiere la adquisición de equipos de alto costo y preparación.

1.4 Objetivo General

Diseñar, construir y automatizar un sintetizador de nanotubos mediante descarga de arco eléctrico, aplicando los métodos adecuados de ingeniería tanto en diseño como en fabricación para generar un material de estudio válido para la ESPOCH.

1.5 Objetivos Específicos

- Analizar el estudio del estado del arte acerca del proceso de síntesis de Nanotubos de Carbono, sus características y propiedades.
- Desarrollar el diseño metodológico de un sintetizador de nanotubos de carbono.
- Diseñar y seleccionar los elementos que conforman la máquina sintetizadora de nanotubos de carbono.

- Construir el prototipo de la máquina sintetizadora de nanotubos de carbono.
- Seleccionar el método de automatización y control del proceso.
- Realizar pruebas de condiciones óptimas y máximas del equipo.
- Automatizar el proceso de movimiento de ejes en la producción de nanotubos de carbono.

1.6 Alcance

Este proyecto busca generar una máquina funcional para sintetizar CNT bajo diferentes parámetros de experimentación, para una posterior evaluación de las características y propiedades del nanomaterial generado, siendo los parámetros:

- 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.

El sintetizador se dará por finalizado, una vez que se verifique la presencia de CNT tras algunas pruebas de funcionamiento y cumpla con las propiedades requeridas en función de la variación de los parámetros que se desea modificar.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Comportamiento Químico del Carbono

El Carbono es el elemento químico con número atómico 6 y número de masa 12, ubicado en el grupo IV-A; esto quiere decir que posee: $6e^-$ que se encuentran rodeando al átomo y, generalmente, $6p^+$ y $6n^0$ en el núcleo, si se ignoran los isótopos. El comportamiento de un átomo queda determinado por la cantidad de e^- libres o de valencia, que son los que quedan cuando un nivel electrónico no se satura. Estos electrones orbitan alrededor del núcleo atómico con un movimiento descrito por las ecuaciones de onda, y su resolución da paso a una función de onda u orbital (ψ), que es la solución de una ecuación de onda de grado cuadrático cuyas soluciones genera una coordenada tridimensional (ψ^2) y tienen 4 formas dependiendo del número de e^- presentes (**Figura 1-2**), y son: s con $2e^-$; p con $6e^-$; d, con $10e^-$; y f, con $14e^-$ (McMurry, 2014, p. 3).

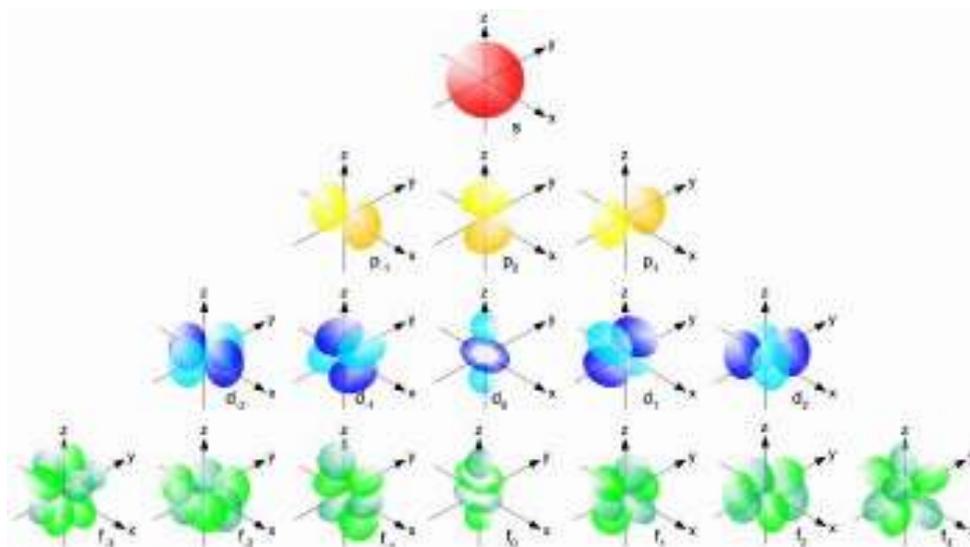


Figura 1-2: Forma de los orbitales dependiendo del número de electrones presentes y los diferentes niveles que saturan.

Fuente: Lange, 2018.

Realizando la distribución electrónica del átomo de C bajo el criterio de Aufbau, se tiene: $C: 1s^2, 2s^2, 2p^2$. De esta manera se puede observar que, de los $6e^-$, sólo 4 son los disponibles para formar enlaces químicos con otros átomos, debido a que el nivel 1 es el único saturado y necesita ganar o perder $4e^-$ para estabilizarse o disminuir su energía, y así llegar a la configuración de Neón ($2s^2, 2p^6$) o Helio ($1s^2$) (McMurry, 2014).

Sin embargo, hay un caso particular que se denomina estado excitado, donde un e^- se mueve a un nivel energético superior, quedando la distribución electrónica excitada de la siguiente manera: C: $1s^2, 2s^1, 2p_x^1, 2p_y^1, 2p_z^1$; a partir de esto, se genera un tipo especial de enlaces formulados por Linus Pauling en 1931, denominado híbridos, cuyos orbitales cambian totalmente de forma, generando enlaces geométricos mucho más fuertes y diferentes debido a la superposición de los orbitales (McMurry 2014; Devanathan 2018).

De esta manera, existen 3 tipos de hibridación para el C:

- **sp^1** .- Únicamente combina un orbital $\psi(p_x)$ con un $\psi(s)$, de donde se obtienen 2 orbitales híbridos y 2 orbitales p sin cambio, con forma lineal entre C separados 180° . Es la forma más fuerte, sin embargo, los compuestos generados son inestables, incluso en laboratorio. Ejemplo de este enlace es el Carbino o el Acetileno.
- **sp^2** .- La unión de 2 orbitales $\psi(p_{x,y})$, con un orbital $\psi(s)$, generan 3 híbridos y un orbital $2p$ sin cambio, con forma plana y separación de 120° . Un ejemplo de este enlace es el grafeno.
- **sp^3** .- Se genera cuando 3 orbitales $\psi(p_{x,y,z})$, se unen con orbital $\psi(s)$, generando así 4 híbridos con forma tetragonal ubicándose a $109,5^\circ$. Como ejemplo más claro, se tiene al diamante.

Esta característica hace que las formas del C sean tan diversas y se puedan explicar diferentes conexiones que no pueden explicarse con enlace-valencia, sino con la formación de enlaces σ y π (McMurry 2014; Devanathan 2018). Por consiguiente, es posible la formación de estructura como los nanotubos de C, generando propiedades muy elevadas, lo cual se puede entender mejor al comprender que son enlaces híbridos que proporcionan una unión muy fuerte en disposición de panal de abeja; pero esta hibridación es especial: sp^{2+n} donde $n \leq 1$, debido a que los átomos están ligeramente inclinados por el enrollamiento, lo que reduce el ángulo de 120° del panal de abeja (Hu et al. 2015; Devanathan 2018).

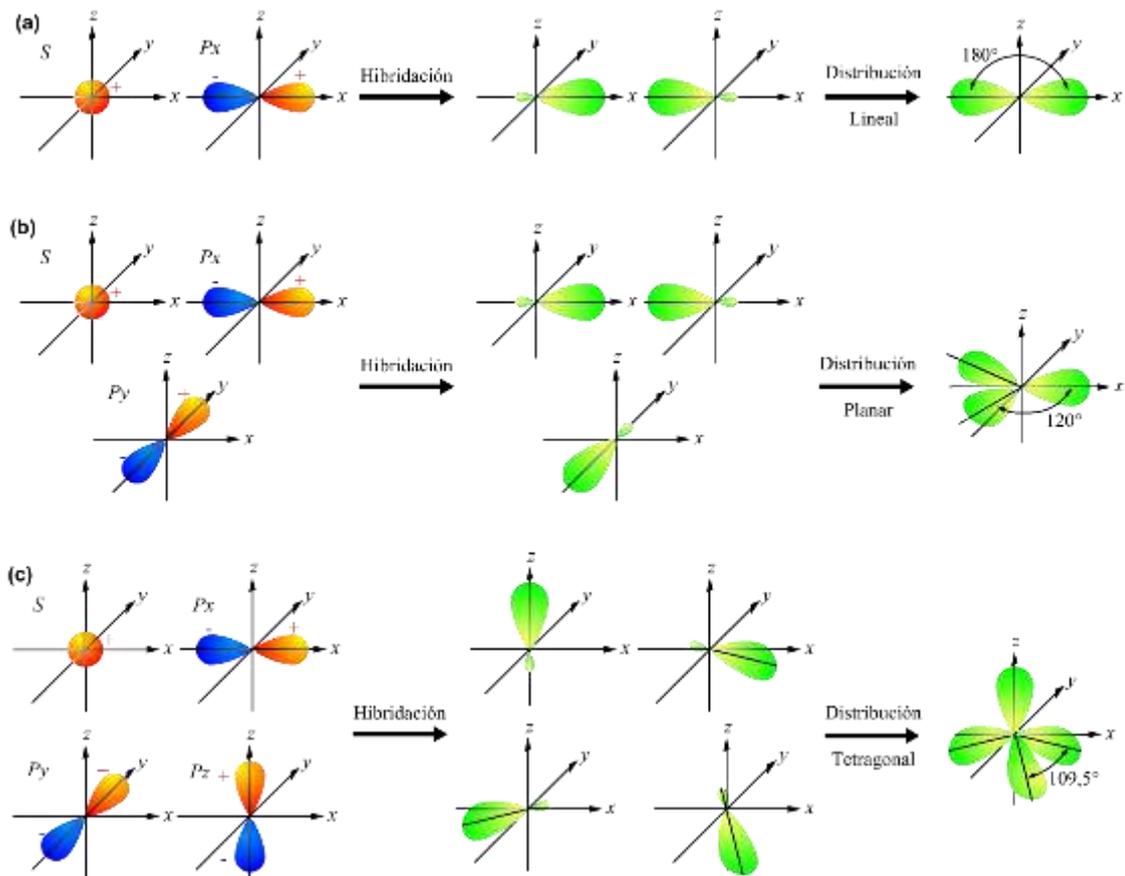


Figura 2-2: (a) Hibridación sp^1 , (b) Hibridación sp^2 , (c) Hibridación sp^3 .

Fuente: Devanathan, 2018.

Realizado por: Caballero, 2019.

2.2 Formas alotrópicas del Carbono

Hace aproximadamente 80 años, Landau y Peierls, discutieron y afirmaron que los cristales de 0D, 1D y 2D, no podían existir por su inestabilidad, esto fue afirmado por diversos experimentos que probaban que estos materiales se desintegraban en cuestión de segundos a su temperatura de formación (Geim y Novoselov, 2010). Sin embargo, esto fue contrariado varias veces, con el descubrimiento de los Fullerenes de 0D, el Grafeno de 2D y los Nanotubos de Carbono (CNT) de 1D.

Fue en 1985, donde el descubrimiento de los CNT comenzó, gracias a Harry Kroto, Richard Smalley y sus colegas, los cuales descubrieron el Fullerene, Buckyball o Carbono de Buckminster, que es una forma esférica de 60 átomos de C creado a partir de carbono gaseoso por descarga de arco eléctrico, aunque actualmente, existen Fullerenes más grandes y más procesos de síntesis (Harris, 2009, p. 2).

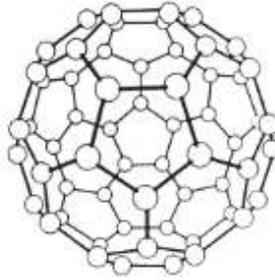


Figura 3-2: Fullerene de Buckminster, C₆₀.

Fuente: Harris, 2009.

Sumio Iijima, junto con Yoshinori Ando, en 1991, intentando generar Fullerenes por descarga de arco eléctrico de corriente directa, descubrió que en los “desechos” de hollín, no sólo había carbono amorfo, sino varias estructuras como grafeno, poliedros de C y, principalmente, fibras huecas tan delgadas y perfectas que llamaron la atención de todo el mundo científico, identificándolas por primera vez como Nanotubos de Carbono en su tercera publicación, ya que antes los denominaba Microtúbulos Helicoidales de C (Iijima, 1991; Ando and Iijima, 1993; Harris, 2009, p. 3).

A pesar de que los CNT ya habían sido descubiertos antes de 1991, fue gracias al reporte de Sumio Iijima que la comunidad científica se interesó verdaderamente en los CNT, dejando de lado los Fullerenes ya ampliamente desarrollados.

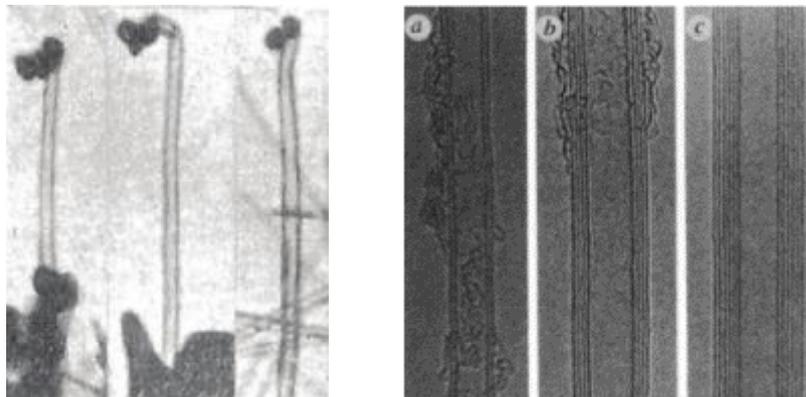


Figura 4-2: Primeros CNT fotografiados en 1952 (izquierda) y Micrografía de DWCNT y MWCNT presentadas por Iijima generados en una atmósfera de Helio a 500 torr en 1991 (derecha).

Fuente: Kumar, 2018 &, Ebbesen & Ajayan, 1992.

Los primeros CNT descubiertos poseían 2, 5 y 7 capas concéntricas de cilindros, así que eran Nanotubos de Doble Capa (DWCNT) y Nanotubos Multicapa (MWCNT). Varios métodos fueron desarrollados por el profesor Ando, buscando lograr la estructura “perfecta” del CNT o lo que

hoy se conoce como Nanotubo de Capa Única (SWCNT). Esta perfección actualmente es discutible, ya que dependiendo de su aplicación, las características que se buscan y la economía de su obtención, los MWNT pueden ser similares o superiores con menor costo de producción (Ebbesen y Ajayan 1992; Ando 2010; Hirlekar et al. 2009; Devanathan 2018).

En 2004, se volvió a refutar la inestabilidad de los cristales de 2D con el descubrimiento de Geim y Novoselov del Grafeno, otra estructura muy estable de un átomo de espesor con propiedades igualmente elevadas, y eso les valió para ganar el premio Nobel de Física en 2010. Con este descubrimiento se hizo mucho más fácil la comprensión de los cristales de 0 a 3 dimensiones de C, como se muestra desarrollado en la **Figura 5-2**.

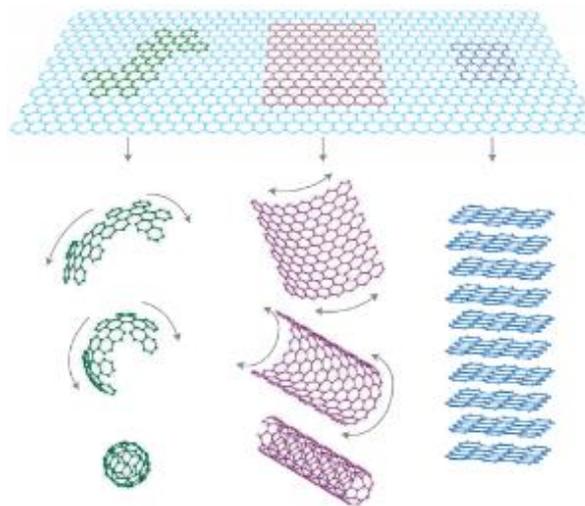


Figura 5-2: La forma alotrópica del carbono de 2D, Grafeno, puede ser transformada en formas de 0D Buckyballs, 1D Nanotubos o 3D grafito.

Fuente: Geim y Novoselov, 2007.

2.3 Estructura de los Nanotubos

Los Nanotubos son estructuras del rango de 1 a 100 nm en lo que respecta a su diámetro, y en ocasiones, llega a varios centímetros de longitud. Cabe destacar, la existencia de Nanotubos de elementos químicos como B, Ni o Si, entre otros, pero el término Nanotubo, se extiende en su mayoría a los fabricados en C. Dependiendo de su disposición de distribución, monocapa o multicapa; su diámetro; quiralidad; o si existen malformaciones estructurales, como pentágonos, heptágonos o extremo de Fulleren; las propiedades de los nanotubos cambian. Estas variaciones, se deben al proceso de síntesis que se usa, y pequeñas variaciones de presión, voltaje y amperaje

que existen durante el proceso y cambian las condiciones del plasma de formación (Badjian y Setoodeh 2017; Han et al. 1999).

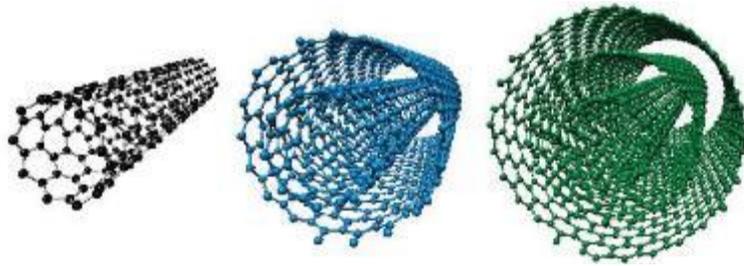


Figura 6-2: Disposición Geométrica de SWNT, DWNT (double-wall nanotube) y MWNT.

Fuente: Dumé, 2013

Un CNT puede entenderse como una hoja de Grafeno (Alótropo de 2D), que se dobla sobre sí misma en diferentes direcciones. Dependiendo de ésta, se define la quiralidad del CNT, propiedad de dos moléculas de superponerse girando y que no coincidan en su forma, lo que asegura que se trata de dos moléculas diferentes, y esta propiedad, junto al diámetro y el número de capas que posea, resulta en las características que obtendrá, por lo que esto resulta en un infinito de propiedades del CNT sintetizado (Dai 2002; Cruz et al. 2002).

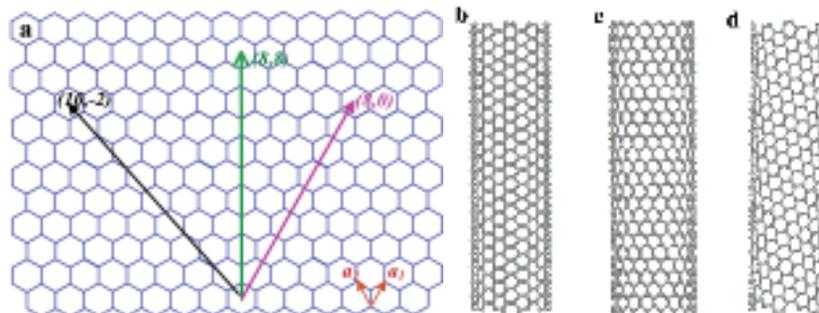


Figura 7-2: (a) Estructura de panal de abeja de una hoja de grafeno. (b) SWNT con disposición de mecedora. (c) SWNT con disposición zigzag. (d) SWNT con disposición quiral.

Fuente: Dai, 2002.

2.4 Propiedades de los Nanotubos de Carbono

La excelencia de los CNT 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 (**sección 2.7**). 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 1-2: Propiedades Físicas y Mecánicas de los CNT.

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Densidad	<i>d</i>	g/cm ³	0.006	1.12	1.3	1.34	[1,2,3]
Frecuencia Fundamental	<i>F</i>	THz	0.01	1.5	0.009	1.35	[1]
Módulo de Young	<i>E</i>	TPa	0.067	1.3	0.32	4.15	[4,5]
Módulo Cortante	<i>G</i>	TPa	0.7	6.5	0.436	0.541	[4,6]
Esfuerzo a la Tracción	<i>S_y</i>	GPa	10	52	11	63	[1]
Esfuerzo Último a la Tracción	<i>S_{ut}</i>	GPa	10.5	54.8	12.3	70.6	[1]
Alargamiento a la Ruptura	<i>e</i>	%	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, 2019.

Tabla 2-2: Propiedades Químicas de los CNT.

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Potencial Hidrógeno	<i>PH</i>	-	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	<i>S_e</i>	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] Bacsá et al., 2000, p. 569, [4] Harris, 2009, p. 219-220.

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 3-2: Propiedades Térmicas de los CNT.

Propiedad	Símb.	Unidad	SWNT		MWNT		Refer.
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Calor Específico (300K)	<i>C</i>	$\frac{J}{KgK}$	375	410	415	450	[1,2]
Conductividad Térmica	<i>K</i>	$\frac{W}{mK}$	200	8000	500	6600	[3,4]
Conductancia Térmica	<i>G_p</i>	$\frac{W}{K}$	0.7x10 ⁻⁹	3.8x10 ⁻⁹	0.6x10 ⁻⁹	1.14x10 ⁻⁹	[3,5]
Mejora Conductiva	-	%	125	200	75	1200	[3,6]
Temperatura de Fusión	<i>T_f</i>	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, 2019.

2.5 Aplicaciones de los Nanotubos de Carbono

Todos los que han trabajado con CNT desde su inicio, coinciden en que poseen impresionantes propiedades, y esto es demostrado por la gran cantidad de publicaciones. Estos trabajos fueron meramente académicos, y no fue hasta 2001, que apareció el primer trabajo aplicativo de las propiedades de los Nanotubos en circuitos electrónicos, por Cees Dekker, et al. y desde entonces, sus usos no han dejado de aumentar (Baughman, Zakhidov y De Heer 2002).

Tabla 4-2: 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	1×10^6	1.8×10^{10}	[3,4]
Energía Potencial	E_p	$-eV$	1321.2	1309.9	50	900	[5,6]
Movilidad Portadora	μ	$\frac{cm^2}{Vs}$	200	1×10^4	2.59	5.42	[1,6]
Resistividad	ρ	$m\Omega \cdot cm$	0.125	5	100	2×10^6	[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, 2019.

- **Compuestos de alta resistencia.** - Los CNT otorgan a los materiales compuestos de alta resistencia, peso ligero y alto rendimiento. Entre los elementos base se puede encontrar plástico, epoxi, metal o carbono, y dentro de sus aplicaciones se pueden encontrar desde raquetas de tenis hasta naves espaciales, incluso material para prótesis (Ajayan y Zhou 2001; Liu et al. 2009).

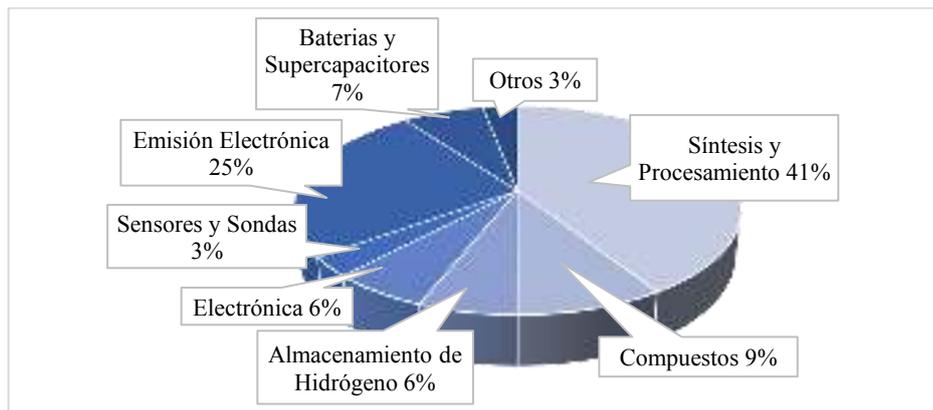


Gráfico 1-2: Artículos publicados en base al campo amplio de los CNT.

Hurtr: Baughman et al., 2002.

- **Microelectrónica de vacío.** - Poseen el tamaño, estructura, alta conductividad eléctrica y estabilidad química que hacen buenos emisores de electrones y se compara con emisores convencionales, los CNT exhiben un campo eléctrico de umbral más bajo, alta

capacidad de transporte de corriente y estabilidad de emisión que dependen de las propiedades de los CNT que varían considerablemente dependiendo del proceso de fabricación y las condiciones de síntesis (Ajayan y Zhou 2001).

- **Prototipos de dispositivos de emisión de electrones.** - Basados en la alta conductividad de los CNT y su capacidad de funcionar como fuente de emisión electrónica, se han construido diferentes prototipos de pantalla plana usando bandas de CNT y epoxi como fuente de electrones, y bandas de In y P en el ánodo (tipo diodo), generando una resolución asombrosa debido a que cada cruce entre ánodo y cátodo genera un píxel. También se han generado dispositivos en redes de comunicaciones, siendo hasta 20 veces más fiable, disminuyendo las interrupciones o rupturas de señal (Ajayan y Zhou 2001).
- **Almacenamiento de energía.** - Los compuestos de C se han usado durante mucho tiempo como material para pilas, baterías y aplicaciones electroquímicas. Pero los CNT, por su estructura y superficie lisa, poseen una transferencia de electrones muy superior al de los electrodos convencionales de C (Ajayan and Zhou, 2001).
- **Almacenamiento de hidrógeno.** - Se conoce la inestabilidad y peligro del almacenamiento de H, pero los CNT podrían cambiar esto, ya que poseen una adsorción de H extraordinariamente alta y reversible, lo que podría cambiar la condición de inseguro de este medio de energía limpia, lo que ha aumentado considerablemente el interés tanto en investigaciones como en la industria (Ajayan y Zhou 2001).
- **Nanosondas y sensores.** - Debido a las propiedades ya destacadas de los CNT, pueden ser altamente funcionales debido a su deformación y posible movimiento con bajos voltajes. A parte, debido a su esbeltez, se pueden usar en la generación de imágenes de alta resolución en microscopios. Las puntas de MWNT y SWNT se usaron en un modo de golpeteo para obtener imágenes de moléculas biológicas tales como amiloide- β -protofibrillas (relacionadas con la enfermedad de Alzheimer), con una resolución nunca lograda antes, ya que, debido a la alta elasticidad de los nanotubos, los extremos no se dañan y el pandeo es reversible (Ajayan y Zhou 2001; Liu et al. 2009).
- **Compuestos rellenos.** - La aplicación de CNT como material para aplicación médica y biológica, está en discusión; ya que hay investigadores que sostienen que los CNT son altamente tóxicos por su diminuto tamaño que no puede ser filtrado por el cuerpo humano (Harris 2009). Pero por otro lado, la comunidad científica sostiene que unos CNT especiales hidrófobos pueden utilizarse como material de transporte de medicamento a una zona específica del cuerpo mediante electricidad y campos magnéticos, y liberación de compuestos altamente potentes; evitando los daños colaterales de, por ejemplo, la quimioterapia (Liu et al. 2009).

2.6 Métodos de Síntesis

Existen diversos métodos para sintetizar CNT y en varios artículos, se afirma que incluso en combustión simple de Hidrocarburos pueden encontrarse, sin embargo, del proceso de síntesis depende la calidad, estructura y longitud de los CNT. En general, son sólo 4 procesos básicos, desde los cuales se derivan muchos más con alguna modificación. En este caso particular, sólo se describirán las variaciones de síntesis por Arco Eléctrico encontradas, ya que es el método de generación de CNT escogido.

2.6.1 Descarga de Arco Eléctrico

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 Electrodo de Tungsteno:** En una atmósfera de hidrocarburos, el plasma generado entre los electrodos de W es el encargado de generar los CNT.

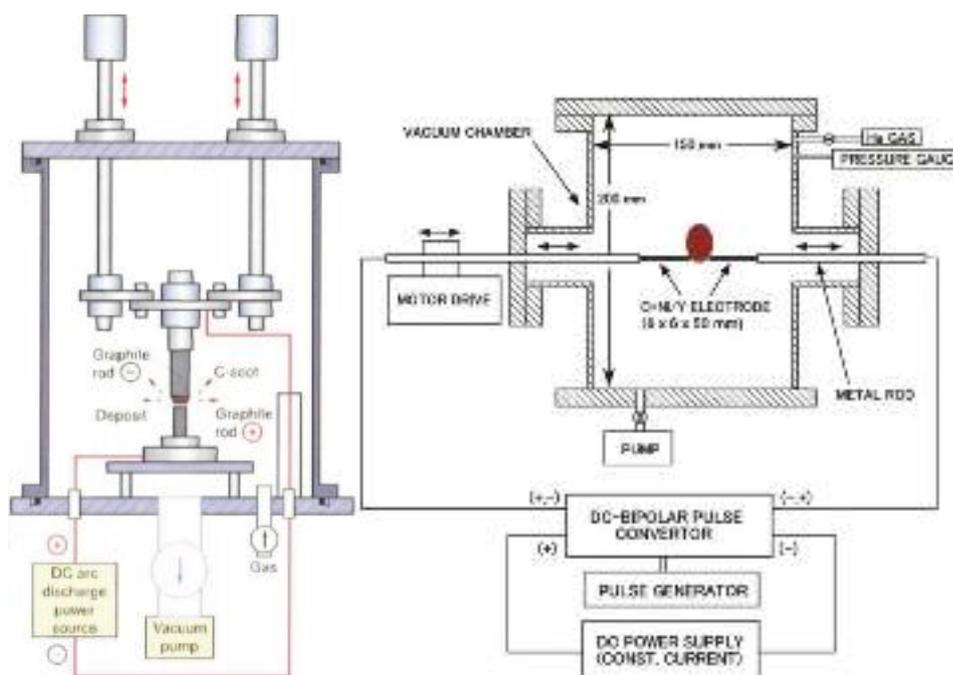


Figura 8-2: Sintetizador de CNT y Fullerenes por descarga de Arco Eléctrico de Corriente Continua en vertical y con Corriente Pulsátil en horizontal.

Fuente: Ando, 2010, Maria y Mieno, 2015.

2.6.2 Deposición Química con Vapor

Consiste en colocar en una cámara hermética, una placa con un metal catalítico que se calienta hasta aproximadamente 700°C, momento en el que se añade un hidrocarburo y se descompone por las altas temperaturas, formando los CNT alrededor del catalizador por deposición. Se considera un proceso económicamente viable para la producción de CNT a gran escala, incluso se considera para una producción industrial. El diámetro y disposición depende del tamaño y el catalizador, por lo que ofrece un control sobre el crecimiento; sin embargo, suelen presentar pared múltiple y gran cantidad de defectos. Las principales ventajas de la deposición química con vapor son el fácil control del curso de la reacción y la alta pureza del material obtenido (Prasek et al. 2011).

2.6.3 Ablación Láser

Se basa en someter a un precursor de C a radiación intensa, en un reactor con alta temperatura y con gas inerte; así se genera plasma de C que genera SWNT con amplia gama de diámetros diversos al enfriarse en las paredes del reactor. Es un método con alto rendimiento, pero muy costoso. Las propiedades de los CNT preparados por el proceso de deposición de láser pulsado (PLD) dependen en gran medida de muchos parámetros, como las propiedades del láser, la pureza del material objetivo, la presión de la cámara y la composición química de la atmósfera, la temperatura ambiente y la distancia entre el objetivo, pero se reporta una conversión de hasta el 90% en CNT (Prasek et al. 2011; Devanathan 2018).

2.6.4 Pirólisis de Llama

Para este método se necesita un catalizador en estado de vapor que puede ser un hidrocarburo o un producto de combustión que se ingresa a una cámara que se encuentra hasta 1200°C, momento en el que se piroliza. El siguiente paso es la mezcla del gas pirolizado con otros gases catalíticos que pueden tener otros elementos para el crecimiento de SWNT o MWNT; se mantiene la temperatura de 1200°C, hasta que se generan los CNT, proceso que puede durar entre 1 y 30 minutos. Entre sus ventajas se encuentra que es un método de gran producción, se puede favorecer el crecimiento de SWNT y sus temperaturas son mucho más manejables que en Descarga de Arco Eléctrico o Ablación Láser (Cheng et al. 1998).

2.7 Parámetros de Arco Eléctrico Para Generación de los Nanotubos

Como la sintetización de CNT se realizará por descarga de arco eléctrico, se va a tomar en cuenta los parámetros del plasma. El control del plasma en la formación de CNT es lo más importante, ya que, dependiendo de su estabilidad y características, se producirán unas propiedades u otras; la parte más importante del proceso viene a ser en qué condiciones se producirá este plasma, que se intentará controlar mediante la automatización del giro y avance, lo cual repercute en Voltaje, Corriente y Uniformidad de la Temperatura.

- **Fuente de Alimentación.** – Dependiendo de si es corriente continua (DC), corriente alterna (AC), bipolar o pulsátil, el movimiento de los electrones se ve afectado. La mayoría de estudios, se vale de DC como alimentación debido a que genera un flujo constante de electrones y una deposición uniforme de carbono en el cátodo de la soldadura, mientras que AC genera dispersión de C en la cámara y deposición de material

en ambos electrodos, lo que favorece la formación de SWNT (Arora y Sharma 2014; Maria y Mieno 2015).

- **Voltaje.** – Se aplica en los electrodos en medio del gas dieléctrico, cuanto más estable, más estable será el plasma. Se afirma el uso de voltajes entre 15 y 30V, con la mayor producción en el rango de 18-26V con electrodos puros (Raniszewski 2017; Arora y Sharma 2014).
- **Corriente.** – Afecta a la calidad, el rendimiento y el tamaño de los CNT sintetizados. Los rangos aplicados van desde 2,5 hasta 900A. La mayoría de experimentos, se encuentra en un rango de 50 a 300A. Se afirma también que el mejor rango es hallado entre 50 a 80A (Raniszewski 2017; Arora y Sharma 2014).
- **Precursores de Carbono.** – El proceso de formación de nanotubos se lleva a cabo por medio de la sublimación hasta el plasma de alguna forma de carbono. Las fuentes utilizadas son: Grafito, Grafeno, Hidrocarburos, Carbón, Fullerenes y Llantas pulverizadas incluso. Sin embargo, la forma más común es el grafito, ya que no tiene tantos elementos extraños como el carbón y es un material económico (Arora y Sharma 2014).
- **Catalizadores.** – En ocasiones, el ánodo es vaciado por medios físicos, y relleno con precursores que son metales en su mayoría como: Y, Ni, Fe, Co, Cr, entre otros. El efecto que tienen estos metales en el proceso es el favorecimiento del crecimiento de SWNT, disminuyendo los MWNT (Arora y Sharma 2014).
- **Gases que forman la Atmósfera.** – El gas que se introduce en la cámara, tiene efectos en el plasma, afectando a la temperatura de crecimiento y orden. Generalmente se utilizan gases nobles como Ar o He, pero en la actualidad se manejan otros fluidos con alta pureza como: N, H, aire purificado, soluciones acuosas o mezclas (Arora y Sharma 2014).
- **Presión.** – La presión busca proveer de energía a las moléculas del fluido y generar un flujo estable de electrones e iones de C. Las presiones utilizadas van desde los 4 hasta 120 KPa absolutos, pero lo recomendado en literatura es la menor presión posible dependiendo del gas, por lo que puede estrangular al plasma, es decir, disminuir su diámetro e incluso interrumpirlo (Raniszewski 2017; Arora y Sharma 2014).
- **Temperatura.** – La temperatura ioniza el material precursor hasta el estado de plasma, influyendo en la formación de iones y en la energía que estos tengan para desplazarse. El gradiente de temperatura en el plasma generado depende del diámetro de los electrodos. La máxima temperatura leída en el proceso de investigación indica valores de 9000K, con un valor promedio en experimentos de valores cercanos a los 5000K, con diámetros de 5mm. Este calor se transmite en su mayoría por radiación a la cámara de síntesis (Arora y Sharma 2014; Fang et al. 2016).
- **Velocidad de giro.** – La rotación del electrodo distribuye de mejor manera la descarga, haciendo un plasma homogéneo, y como consecuencia, se distribuye mejor la

temperatura y aumenta el volumen de este; de esta manera se aumenta la calidad de los CNT que se sintetizan por arco eléctrico. Las revoluciones de rotación que se estudian van desde 0 hasta 10 000 RPM (Lee et al. 2002).

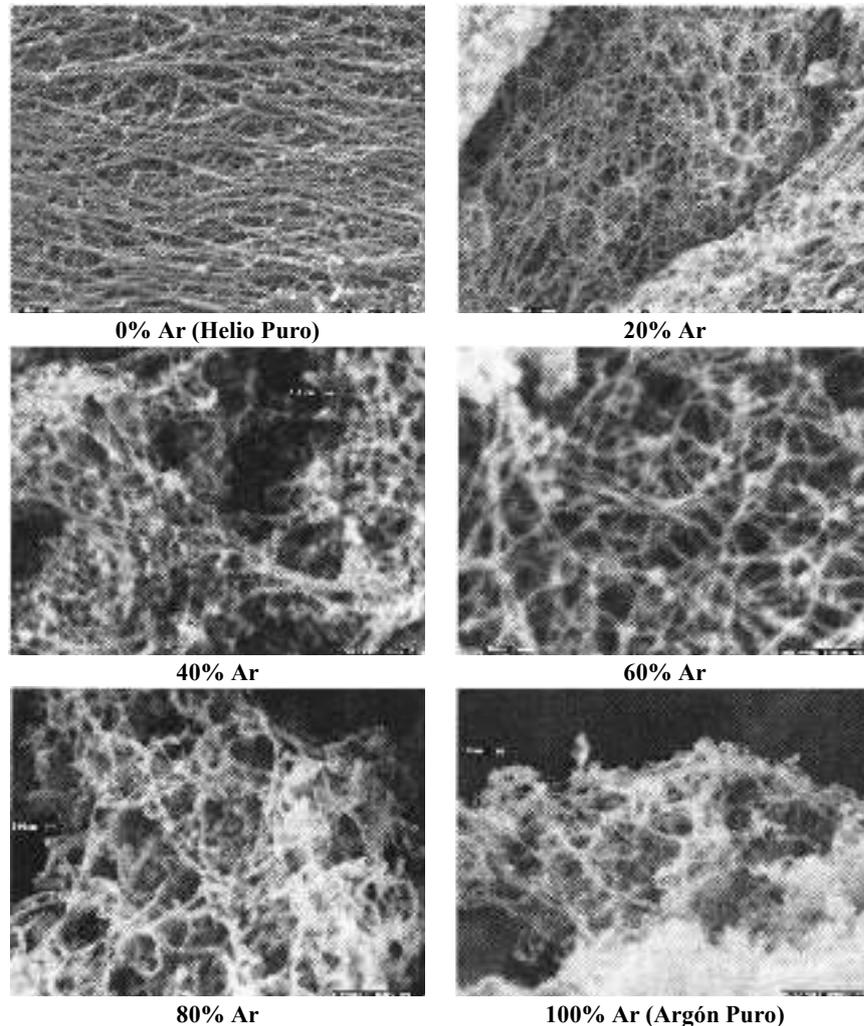


Figura 9-2: Imágenes en SEM de diferentes mezclas de Ar y He.

Fuente: Farhat et al., 2001

2.8 Metodología para el Diseño del Sintetizador de Nanotubos de Carbono

2.8.1 *Diseño concurrente*

Se utiliza el proceso de Diseño Concurrente, el cual se toma en consideración por unir puntos de vista diferentes en el diseño para satisfacer las necesidades del consumidor o usuario, la forma de producción, mantenimiento y desecho, y los criterios del diseñador para el producto (Riba Romeva 2002).

En la vida de un producto, se pueden destacar diferentes fases del ciclo de vida. En específico para este proyecto, se tiene:

1. Decisión y definición. – Se definen las especificaciones del producto y es la que debe revisarse con mayor detenimiento, ya que, a partir de ella, se derivarán diseño, manufactura y costos.
2. Diseño y desarrollo. – Incluye las actividades que hacen que un producto cumpla con las necesidades del cliente, cumpla un tiempo de vida útil y las actividades que intervienen en su manufactura.
3. Fabricación. – Actividades para la materialización del producto considerando costo y calidad.
4. Utilización y mantenimiento. – El producto realiza la función para la cual fue diseñado y construido. Si esto se ve interrumpido, se hace necesario un proceso de mantenimiento.

2.8.2 *Despliegue de la Función de Calidad*

En base a los requerimientos y especificaciones necesarias del producto, en este caso los parámetros descritos en la **Sección 2.7** se debe organizar toda la información disponible para generar las especificaciones de la máquina. Estas especificaciones se realizan en base a una Matriz de Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés).

2.8.3 *Diseño conceptual*

Es la etapa del diseño donde se plantean diferentes alternativas para la solución. Tras hacer un análisis de las posibilidades, se selecciona la solución óptima.

2.8.4 *Diseño de materialización*

La solución óptima se materializa en planos, donde se muestren las dimensiones, partes y piezas que constituyen la máquina a diseñar. Todas las partes, elementos, piezas y su unión se toman en cuenta en base a los materiales, dimensiones y formas que requiera la máquina.

2.8.5 *Diseño de detalle*

El prototipo se puede fabricar en base a los planos de detalle creados, es el paso final y debe especificarse dimensiones, materiales y características técnicas para la fabricación.

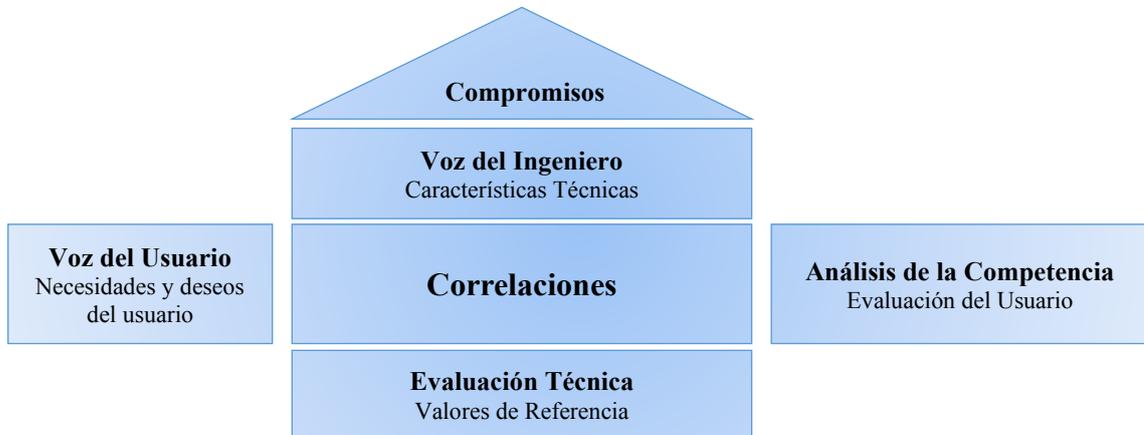


Figura 10-2: Partes de la Casa de la Calidad.

Fuente: Romeva, 2002.

2.9 Desarrollo teórico para el diseño del sintetizador de Nanotubos de Carbono

Para realizar un diseño correcto, se debe tomar en cuenta la teoría presente en libros, catálogos y normas disponibles para el correcto desarrollo de los elementos involucrados.

2.9.1 Determinación de la temperatura de diseño

Para determinar la temperatura de diseño, se estudia el fenómeno físico de transmisión de energía en el plasma generado por la descarga de arco eléctrico, donde en su mayoría se transmite por radiación y convección en un medio de gas noble.

2.9.1.1 Radiación

La radiación es una forma de transmisión de energía donde mediante ondas electromagnéticas, la energía interna de un cuerpo se transmite a otra, sin importar el medio en el que se encuentren, el cual puede ser el vacío (Çengel y Ghajar 2011, p. 684). El fenómeno se va a analizar por modelado, por lo que sólo hay que determinar las constantes, variables y condiciones del fenómeno para realizar un correcto modelado y obtener datos correctos, dentro de los cuales el factor de emisión se obtiene con las siguientes ecuaciones (López Velásquez 2011):

$$X = \frac{r_1}{r_2} \quad (1)$$

$$Y = \frac{L}{r_2} \quad (2)$$

$$A = Y^2 + X^2 - 1 \quad (3)$$

$$B = Y^2 - X^2 + 1 \quad (4)$$

$$\frac{1}{F_{1 \rightarrow 2}} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left(\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} \right) + B \sin^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] \quad (5)$$

$$A_1 * F_{1 \rightarrow 2} = A_2 * F_{2 \rightarrow 1} \quad \rightarrow \quad F_{2 \rightarrow 1} = \frac{2 * \pi * r_1 * L}{2 * \pi * r_2 * L} * F_{1 \rightarrow 2} = \frac{r_1}{r_2} * F_{1 \rightarrow 2} \quad (6)$$

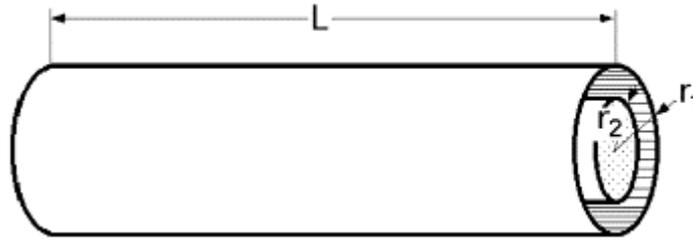


Figura 11-2: Dimensiones necesarias para calcular el Factor de Forma de dos Cilindros Concéntricos.

Fuente: López Velásquez, 2011, p. XIX - 326.

Donde:

- r_1 y r_2 son los radios presentes en la **Figura 11-2**.
- L la longitud del arco.
- X , Y , A y B son factores adimensionales.
- $F_{1 \rightarrow 2}$ y $F_{2 \rightarrow 1}$ es el factor de forma de 1 a 2 y de 2 a 1, respectivamente.
- A_1 y A_2 son áreas.

2.9.1.2 Convección

El vacío absoluto no es posible, y cabe la posibilidad de que el usuario quiera realizar el experimento a presión atmosférica, por lo que se hace necesario realizar el análisis de convección, que es el fenómeno de transmisión de energía utilizando el fluido del medio circundante y su movimiento (Çengel and Ghajar, 2011, p. 373, 555):

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (8)$$

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (9)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (10)$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (11)$$

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu \quad (12)$$

Donde:

- C_p es el calor específico del fluido a presión constante.
- μ y ν son las viscosidades dinámica y cinemática.
- k es la conductividad térmica.
- T_s , T_∞ y T_f son las temperaturas de la superficie, del fluido y filmica.
- β es la expansividad volumétrica.
- D es el diámetro interno de la cámara.
- g es el valor de la gravedad.
- Pr , Un , Ra son los números de Prandtl, Nusselt y Rayleigh.
- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

2.9.2 Cálculo del espesor de la cámara del sintetizador

Para el diseño de la cámara de síntesis, se utiliza el proceso de la norma ASME VIII División I: Reglas para la construcción de Recipientes a Presión, apartado UG-28: Espesor de Carcasas y Tubos Bajo Presión Externa, ya que, al trabajar a vacío, la presión puede ser interpretada como originada en el exterior, la cual si fuera extrema generaría una contracción del tubo. El apartado UG-28 puede ser aplicado teniendo en cuenta los apéndices G-2 y G-8, los cuales indican que el recipiente a presión puede tener elementos rotacionales conectados o en su interior, siempre y cuando, la vibración no alcance la frecuencia de resonancia del acero (Boiler y Code 2010b, p. 575, 576).

Lo primero que se requiere es definir el material y sus propiedades. Después de determinar estas propiedades, el segundo paso es asumir un espesor, por recomendación de ASME y el ingeniero miembro de la tesis, se definió que 3 mm era lo recomendable. Con este espesor, se definen las razones: L/D_o y D_o/t ; siendo L la longitud de la cámara o entre anillos rigidizantes, D_o el diámetro externo de la cámara, y t el espesor. Esto sirve para localizar los Factores adimensionales A y B de las gráficas G y $HA-1$, o a su vez en las tablas que contienen estos valores y se denominan

de la misma manera. Con el valor de B, se recurre a la siguiente fórmula (Boiler and Code, 2010b, p. 19, 20):

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} \quad (13)$$

Cuando la Presión de Trabajo Externa Máxima para el espesor seleccionado (P_a), es mayor que la Presión de Diseño (P) que es 1,5 veces la Presión de trabajo, el cálculo se da por terminado.

2.9.3 Cálculo del diámetro de ejes

2.9.3.1 Eje sometido a velocidad

Para diseñar un eje sometido a rotación, se pueden aplicar las siguientes ecuaciones basadas en el diseño de Shigley (Budynas, 2011, p. 287-295, 368):

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f * M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f * M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$S_e = S'_e * k \quad (15)$$

$$S'_e = 0,5 * S_{ut} \quad (16)$$

$$k = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f \quad (17)$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (18)$$

$$K_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) \quad (19)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f * M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f * M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (20)$$

$$k_b = 1,189 * d^{-0,097} \quad , \text{ cuando } 8\text{mm} < d < 250\text{mm} \quad (21)$$

$$M_a = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}}{2} \quad (22)$$

$$M_m = \frac{M_{\text{máx}} + M_{\text{mín}}}{2} \quad (23)$$

$$T_a = \frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}}{2} \quad (24)$$

$$T_m = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad (25)$$

Donde:

- S_{ut} y S_y son los límites de resistencia a la tensión.
- $k, k_a, k_b, k_c, k_d, k_e, k_f$ son factores de reducción de resistencia por estrés.

- S_e' y S_e son límites de fatiga.
- q , K_t y K_f son la sensibilidad del nodo, y los factores de concentración de fatiga y esfuerzo por flexión.
- q_s , K_{ts} y K_{fs} son la sensibilidad del nodo, y los factores de concentración de fatiga y esfuerzo por torsión.
- $T_{máx}$, $T_{mín}$, T_a y T_m son los torques máximo, mínimo, amplitud y medio.
- $M_{máx}$, $M_{mín}$, M_a y M_m son los momentos flexionantes máximo, mínimo, amplitud y medio.
- d y d' son los diámetros de diseño y mínimo.
- n y n' son los factores de seguridad de diseño y mínimo.

2.9.3.2 Tornillo de potencia

El tornillo de potencia es un mecanismo que transforma el movimiento rotatorio en lineal o viceversa. Para determinar sus dimensiones, se toma en cuenta las ecuaciones del libro de Shigley (Budynas, 2011, p. 416):

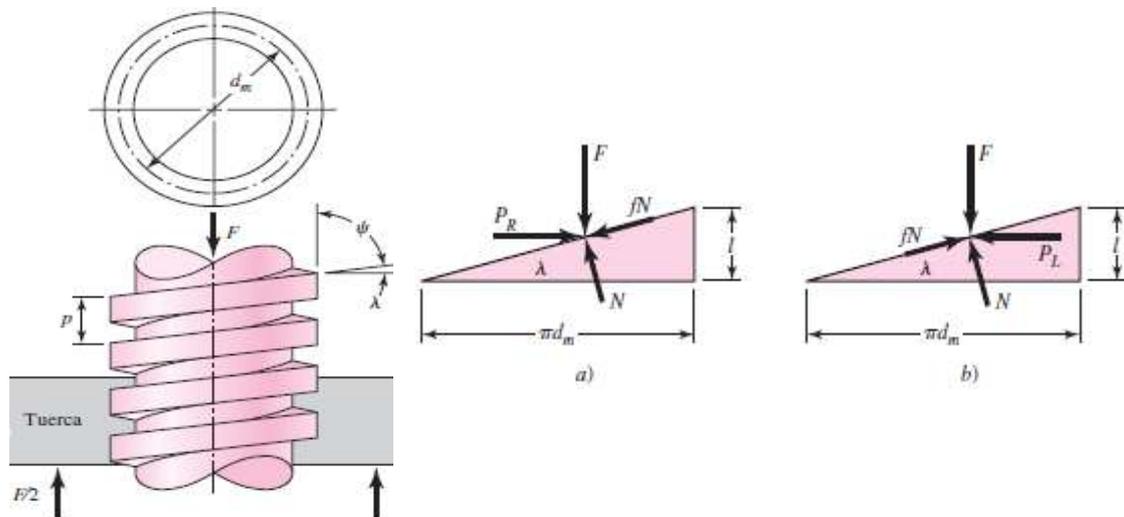


Figura 12-2: Partes de un tornillo de potencia y diagrama de fuerzas: a) para subida y b) para bajada de la carga.

Fuente: Budynas, 2011, p. 401.

$$T_s' = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{1 + \pi f d_m \sec(\alpha)}{\pi d_m - f l \sec(\alpha)} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (26)$$

$$T_b' = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m \sec(\alpha) - 1}{\pi d_m \sec(\alpha) + f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (27)$$

$$T_s = T_s' + T \quad T_b = T_b' + T \quad (28)$$

$$l = \frac{1}{A \cdot \text{hilos}} \quad (29)$$

$$d_m = \frac{d + d_r}{2} \quad (30)$$

$$\sigma_y = \frac{-4F}{\pi d_r^2} \quad (31)$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{16T_s}{\pi d_r^3} \quad \text{y} \quad \tau_{\text{mín}} = \frac{-16T_b}{\pi d_r^3} \quad (32)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{2} \quad \text{y} \quad \tau_a = \frac{\tau_{\text{máx}} + \tau_{\text{mín}}}{2} \quad (33)$$

$$\sigma_{a \text{ eq}} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad \text{y} \quad \sigma_{m \text{ eq}} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad (34)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_{a \text{ eq}}}{S_e} + \frac{\sigma_{m \text{ eq}}}{S_y} \quad (35)$$

Donde:

- d, dr, dm, dt y dc son los diámetros externos, de raíz, medio, de tracción y del collarín del tornillo.
- A es el avance por vuelta.
- h es el número de hilos.
- p es el paso.
- F es la carga.
- f y fc son los factores de fricción del tornillo y del collarín.
- α es el ángulo de hélice
- T, Ts, Ts', Tb y Tb' son los torques del motor, de subida, de subida de la carga únicamente, de bajada, de bajada de la carga únicamente.
- $\tau_{\text{máx}}$, $\tau_{\text{mín}}$, τ_a y τ_m son los esfuerzos cortantes máximo, mínimo, amplitud y medio.
- σ_y , $\sigma_{a \text{ eq}}$ y $\sigma_{m \text{ eq}}$ son los esfuerzos de aplastamiento, amplitud equivalente y medio equivalente.

2.9.4 Cálculo del espesor de placas

Para el diseño de placas por aplastamiento se toman en cuenta las ecuaciones de resistencia de materiales, ayudando al cálculo del espesor (Beer, Johnston y Dewolf 2007, p. 10).

$$\frac{\tau_T}{n} = \frac{F}{A} \quad (36)$$

$$A = \pi D e s \quad (37)$$

Donde:

- τ_T es el esfuerzo cortante teórico.

- n es el coeficiente de seguridad.
- F es la fuerza aplicada.
- A es el área necesaria para soportar la carga.
- De es el diámetro externo de la placa.
- s es el espesor mínimo requerido.

Y para analizar el esfuerzo y la deformación en otras geometrías, se opta por seguir el desarrollo de las fórmulas de Roark (Young et al. 2002, p. 506; Budynas 2011, p. 298):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{\beta q b^2}{t^2} \quad (38)$$

$$y_{\text{máx}} = \frac{\alpha q b^4}{E t^3} \quad (39)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} \quad (40)$$

Donde:

- a es la dimensión mayor de la placa rectangular.
- b es la dimensión menor de la placa rectangular.
- t es el espesor de la placa rectangular.
- q es la carga distribuida en la superficie.
- α y β son constantes de forma.

Tabla 5-2: Relaciones entre dimensiones de la placa rectangular.

a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2	∞
CON LOS LADOS MÁS LARGOS FIJOS							
β	0.4182	0.4626	0.4860	0.4968	0.4971	0.4973	0.500
α	0.0210	0.0243	0.0262	0.0273	0.0280	0.0283	0.0285
CON LOS LADOS SIMPLEMENTE APOYADOS							
β	0.2874	0.3762	0.4530	0.5172	0.5688	0.6102	0.7500
α	0.0444	0.0616	0.0770	0.0906	0.1017	0.1110	0.1421

Fuente: Young et al. 2002, p. 506, 507.

2.9.5 Selección de pernos

Para sujetar todo el conjunto de piezas dentro del tubo se recurre a pernos, ya que generan uniones desmontables y garantizan un fácil mantenimiento para montaje y desmontaje. Los pernos se diseñan bajo cargas de Tracción o Corte, y a su vez, se dividen en primarios o secundarios como indica la **Figura 13-2** y **14-2**. Dependiendo de la posición de anclaje, los tornillos se someten a diferentes esfuerzos, por lo que se calculan en las diferentes piezas que forman el sintetizador con ecuaciones para cizalla (V) y tracción (P) (Barrett 1990, p. 12-20):

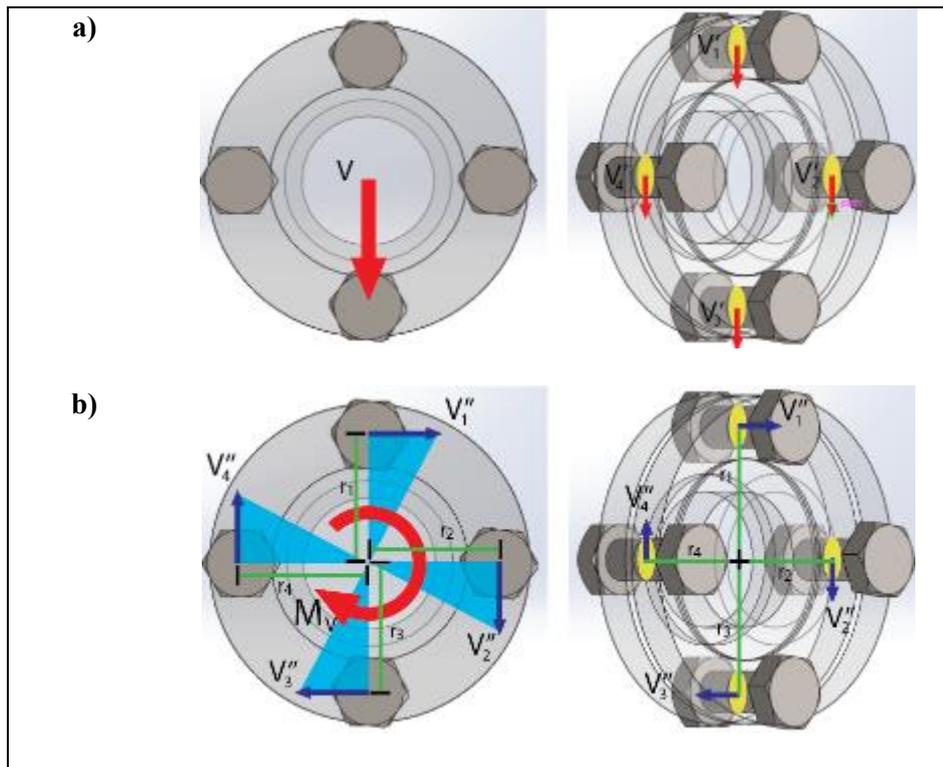


Figura 13-2: a) Fuerzas de corte primario producidas por una fuerza paralela al plano del tornillo, b) Fuerzas cortantes secundarias producidas por un momento paralelo al plano del tornillo.

Fuente: Barrett 1990, p. 20

Realizado por: Caballero, 2019.

$$V_i' = \frac{V}{\#Pernos} \quad (41)$$

$$V_i'' = \frac{M_V * r_i}{r_i^2 + r_{2i}^2 + r_{3i}^2 + r_{4i}^2} \quad (42)$$

$$P_i' = \frac{P}{\#Pernos} \quad (43)$$

$$P_i'' = \frac{M_P * r_i}{(r_i^2 + r_{2i}^2 + r_{3i}^2 + r_{4i}^2) * \#Pernos \text{ en la fila}} \quad (44)$$

$$F_i = 0,75 S_p A_t \quad (45)$$

Donde:

- V y M_v son la fuerza y el momento cortantes que actúan en el objeto.
- V_i' y V_i'' son las fuerzas cortantes primaria y secundaria que actúan en cada perno.
- P y M_p son la fuerza y el momento de tracción que actúan en el objeto.
- P_i' y P_i'' son las fuerzas de tracción primaria y secundaria que actúan en cada perno.
- r_i es la distancia desde el punto de análisis hacia el perno o fila de pernos.

- S_p es la resistencia de prueba mínima.
- A_t es el área de tracción del perno.

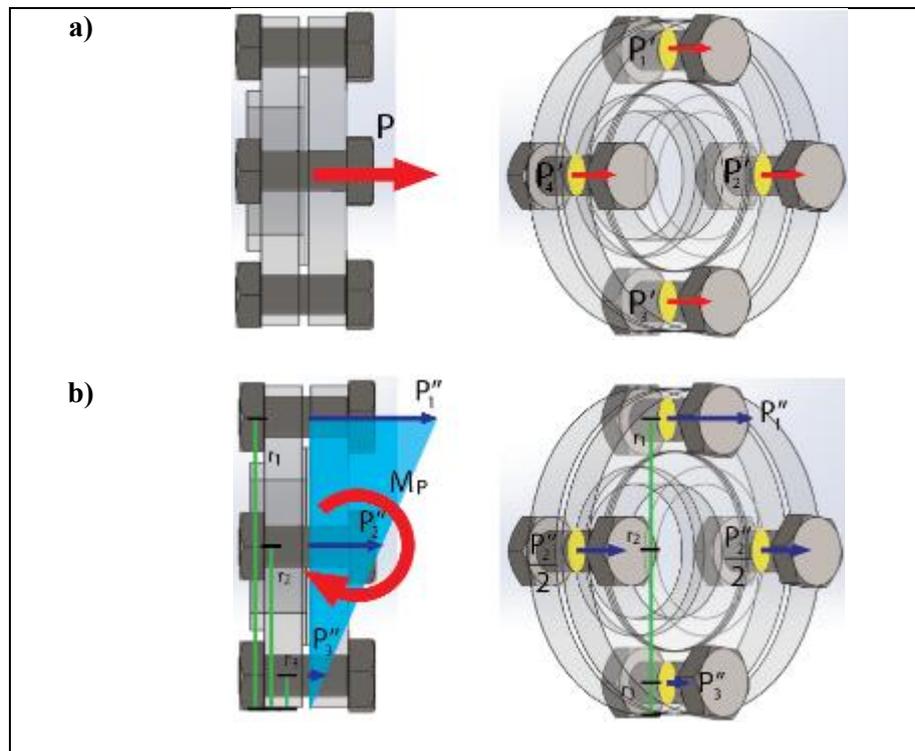


Figura 14-2: a) Fuerzas de tracción primaria producidas por una fuerza perpendicular al plano del tornillo, b) Fuerzas de tracción secundarias producidas por un momento perpendicular al plano del tornillo.

Fuente: Barrett 1990, p. 20

Realizado por: Caballero, 2019.

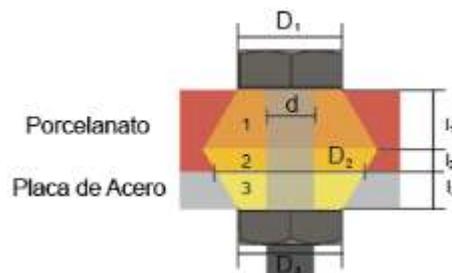


Figura 15-2: Triángulos de esfuerzo en la sujeción de una unión de diferentes materiales.

Realizado por: Caballero, 2019.

Para calcular el perno, también se calcula la constante elástica de la junta c , que representa el porcentaje de carga aplicada al perno. Para calcular la carga que soportan los materiales se aplica $(1 - c)$ (Budynas 2011, p. 425-429, 435, 436).

$$c = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (46)$$

$$P_b = c P \quad (47)$$

$$P_m = (1 - c) P \quad (48)$$

$$k_b = \frac{A_b E_b}{l_b} \quad (49)$$

$$k_{m_i} = \frac{0,5774 \pi E d}{\ln\left(\frac{(1,155 l + D - d)(D + d)}{(1,155 l + D + d)(D - d)}\right)} \quad (50)$$

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m_1}} + \frac{1}{k_{m_2}} + \frac{1}{k_{m_3}} + \dots + \frac{1}{k_{m_n}} \quad (51)$$

Donde:

- c es la constante de la junta.
- k_b, k_m son la rigidez del perno y del material de la junta.
- l_b, l son la longitud del perno y del material.
- D y d son los diámetros menor y mayor de los conos de la **Figura 15-2**.
- E_b, E son los módulos de Young del perno y del material.
- A_b es el área mínima del perno.

Para los esfuerzos producidos, se aplican:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{n V_{m\acute{a}x}}{A_m} \quad y \quad \tau_{m\acute{i}n} = \frac{n V_{m\acute{i}n}}{A_m} \quad (52)$$

$$\sigma_a = \frac{n c}{2 A_t} (P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}) \quad y \quad \sigma_m = \frac{F_i}{A_t} + \frac{n c}{2 A_t} (P_{m\acute{a}x} + P_{m\acute{i}n}) \quad (53)$$

$$1 = \frac{\sigma_{a \text{ eq}}}{S_e} + \frac{\sigma_{m \text{ eq}}}{S_y} \quad (54)$$

$$S_e = 0,45 * S_{ut} * \frac{k_c}{k_f} \quad (55)$$

Donde:

- A_t y A_m son las áreas de esfuerzo a la tracción y del diámetro menor o raíz.
- n es el factor de seguridad.
- k_c y k_f son los factores de confiabilidad y de la rosca.

2.9.6 Uniones soldadas

El proceso de soldadura tiene múltiples variables, y siendo el empirismo su base fundamental, hay diversas normas y criterios para evaluar la resistencia de los cordones, aunque tienen en

común 3 aspectos fundamentales: realizar un correcto proceso de soldadura respetando la buena práctica y seguridad; verificar las propiedades mecánicas de los diferentes metales, comprobando que el cordón obtenga propiedades, como mínimo, iguales a las del metal base; y evitar, mediante diseño y elección del material, la rotura frágil. Cuando la soldadura es a tope con penetración completa, no se requiere de cálculo si se verifica la calidad del cordón (Rodríguez 2019).

Hay un caso particular de la soldadura que se produce cuando se tiene dos materiales de aporte y se utiliza un diagrama de Shaffler, el cual requiere de dos variables para determinar los porcentajes de fase que tendrá la soldadura final (Indura S.A. Industria y Comercio 2007, p. 58, 59):

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb \quad (56)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * \%C + 0,5 * \%Mn \quad (57)$$

Donde la composición final, se recomienda que tenga un porcentaje de 5 a 10% de Ferrita para evitar la fisura en caliente.

2.9.7 Selección de Rodamientos

Para la selección de rodamientos, se requiere de las ecuaciones (SKF Group 2018, p. 246,254):

$$P_t = X * F_r + Y * F_a \quad (58)$$

$$C' = \frac{f_h}{f_n} p \quad (59)$$

$$f_n = \left(\frac{33,3}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (60)$$

$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad (61)$$

$$dm = \frac{D+d}{2} \quad (62)$$

Donde:

- Fa y Fr son las fuerzas axial y radial aplicadas.
- P es la fuerza equivalente.
- C son las fuerzas admisibles por el rodamiento en carga dinámica.
- Co es la capacidad de carga básica estática.
- n es el número de revoluciones.

- d_m , D y d son los diámetros medio, externo e interno del rodamiento.

2.9.8 Rigidez

Existen dos criterios dentro del diseño, uno es la resistencia que se evalúa en base a los esfuerzos soportados por los ejes, y el otro es la rigidez, o la resistencia a las deformaciones que puede tener un elemento de máquinas. Estas deformaciones pueden causar vibraciones y sobrecargar elementos conectados al eje. El valor recomendado para limitar las deflexiones es:

$$\delta_{MÁX} = 0,0003L \quad (63)$$

Donde:

- $\delta_{MÁX}$ es la deflexión máxima tolerable.
- L es la longitud efectiva del eje.

Las deflexiones dependen de los apoyos y cómo está aplicada la carga.

2.9.9 Velocidades críticas

Para cada sistema creado a partir de un eje con las masas de sus accesorios, existen frecuencias naturales, que son velocidades críticas en las que las vibraciones son excesivas y podrían colapsar el sistema. Existen 2 frecuencias principales: la velocidad crítica de Rayleigh-Ritz y la de Dunkerley:

$$n_C = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sum w_i \delta_i}{\sum w_i \delta_i^2}} \quad (64)$$

$$\frac{1}{n_C} = \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} + \dots + \frac{1}{n_i} \quad (65)$$

$$I = \pi * \frac{r^4}{64} \quad (66)$$

Donde:

- n_C , n_i es la primera velocidad crítica y la velocidad generada por cada masa individual.
- g es el valor de la gravedad.
- w_i es el peso del elemento.
- δ_i es la deformación causada por el elemento.
- I es el valor de la inercia.
- r es el radio del eje.

2.10 Desarrollo teórico para la parte eléctrica y electrónica del sintetizador de Nanotubos de Carbono

2.10.1 Convertidor AC/DC

Para transformar la corriente alterna en directa, existen algunas alternativas, siendo la más fácil la aplicación de una soldadora Inverter. Así que, se hace necesario entender cómo funciona, lo cual se explica en base a la **Figura 16-2**.

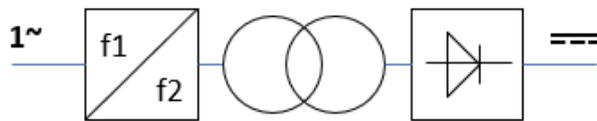
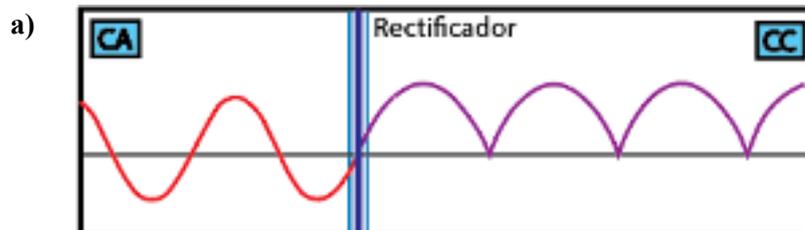


Figura 16-2: Esquema del circuito de la Soldadora Inverter.

Realizado por: Caballero, 2019.

En primer lugar, se observa la entrada de una señal analógica (corriente alterna monofásica); que luego pasa a un convertidor de frecuencia, el cual transforma la frecuencia 1 de 50 o 60 Hz en una segunda más elevada entre 20 y 50 kHz; tras esto, va a un transformador, una máquina eléctrica formada por dos devanados de cobre enrollados en un núcleo metálico, encargada de bajar el voltaje elevando la corriente, este aumento de frecuencia conlleva la posibilidad de un transformador de aluminio más pequeño y liviano; por último, pasa a un puente rectificador, el cual rectifica una onda alterna completa, convirtiendo la corriente alterna en continua estabilizando el arco y creando uniformidad (Porten Performance & Technology 2019; De Máquinas y Herramientas 2015).



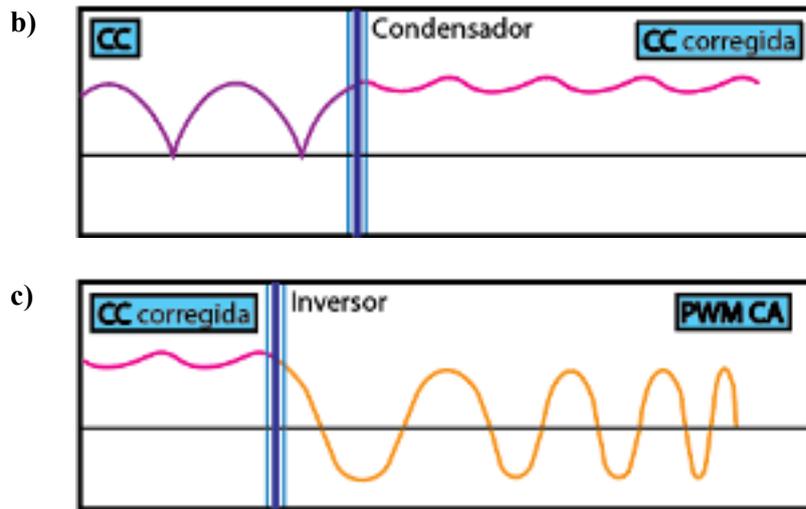


Figura 17-2: Conversión de la Energía en un Convertidor de Frecuencia.

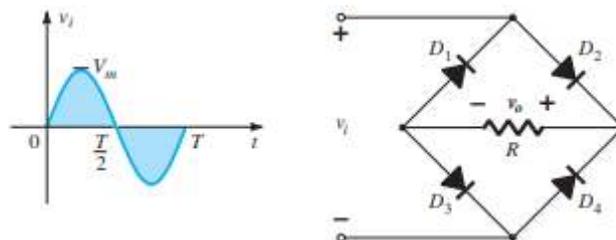
Fuente: ABB Colombia 2014.

Realizado por: Caballero, 2019.

Un convertidor de frecuencia, o variador de velocidad en motores, variadores o simplemente convertidores, son dispositivos que permiten aumentar la eficiencia de diversos equipos eléctricos, generando un ahorro eléctrico y de material significativo. Su funcionamiento empieza tras el ingreso de la energía eléctrica desde la fuente o red, donde la corriente alterna pasa a ser continua, mediante un rectificador (**Figura 17-2, a**), ésta pasa a cargar los capacitores del convertidor, rectificando la forma de la onda, generando una energía más uniforme (**Figura 17-2, b**). Después de los condensadores, la energía pasa a un inversor, que transforma la corriente continua en alterna mediante un control de modulación por ancho de pulsos, ajustando la frecuencia y la tensión (**Figura 17-2, c**) (ABB Colombia 2014).

Un rectificador de onda completa es un dispositivo compuesto por 4 diodos (**Figura 18-2, a**), que toman la onda total de la corriente alterna y la filtran, eliminando la parte negativa sólo usando la propiedad de flujo en un solo sentido de flujo de los diodos. Cuando la onda es positiva, D2 y D3 dejan pasar la energía y, D1 y D4 la bloquean (**Figura 18-2, b**); pero cuando cambia la polaridad, D1 y D4 son los que conducen, mientras que D2 y D3 obstruyen el paso (**Figura 18-2, c**) (Boylestad & Nashelsky 2003, p. 79, 80).

a)



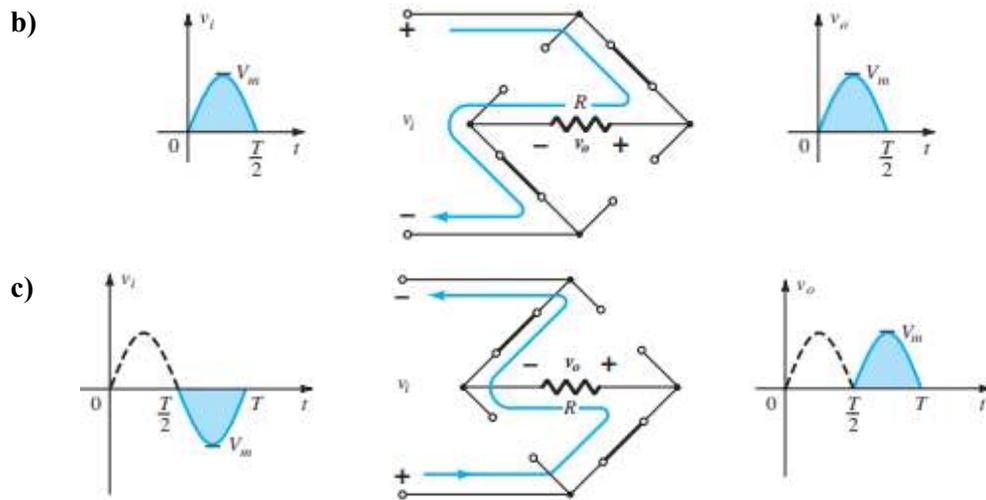


Figura 18-2: Corrección de Onda Completa con Diodos.

Fuente: Boylestad y Nashelsky 2003.

2.10.2 PWM

Un motor DC se compone de uno o varios bobinados y, en algunos casos, imanes, que funcionan a través de energía eléctrica, generando repulsión y atracción por el campo magnético producido y esto se convierte en energía mecánica al rotar. En ambos casos, se debe controlar la velocidad de giro mediante un circuito concreto. Una forma de controlar la velocidad en los motores es programando un dispositivo de Modulación por Ancho de Pulsos o PWM (Pulse Width Modulation) por sus siglas en inglés. Esto funciona variando el ciclo de trabajo como indica la **Figura 19-2**. Básicamente, el proceso puede resumirse como un apagado y encendido, donde el periodo de la señal $T = T_{on} + T_{off}$, siempre es el mismo. Lo que modifica el ancho de la onda variando el tiempo de encendido o T_{on} , haciendo que el ciclo de trabajo tenga un valor de: $CT = \frac{T_{on}}{T} * 100\%$ (Gómez 2017).

A partir de esto, el 100% representa el voltaje total de la fuente y se traduce al tope de las revoluciones descontando las pérdidas eléctricas y mecánicas, y el 0% sería el apagado. Todos los valores intermedios de velocidad se generan a partir del cálculo a partir de la relación:

$$\%_t = \frac{100\%}{\omega_{motor}} * \omega_t \quad (67)$$

2.11 Protocolo de pruebas

Dentro de la realización material de un dispositivo, la parte de las pruebas es fundamental, ya que se determinan los recursos y características de funcionamiento, y para que todo sea ordenado y accesible, se debe establecer un protocolo de pruebas o ensayos, el cual debe tener los siguientes pasos como mínimo (Riba Romeva 2002, p. 111,112):

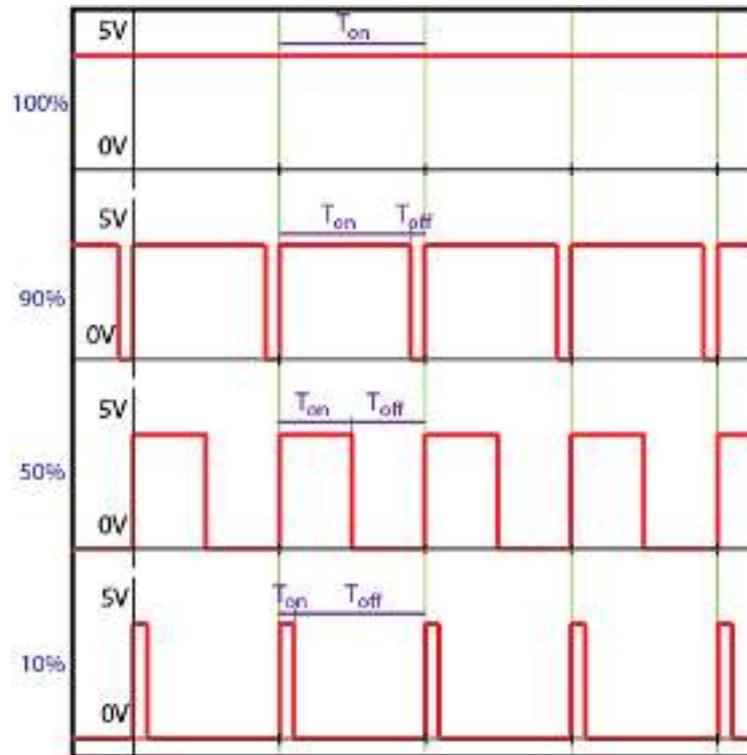


Figura 19-2: Señales PWM con diferentes ciclos de trabajo.

Fuente: Gómez, 2017

Realizado por: Caballero, 2019.

1. Definición de objetivos. – Se debe determinar las propiedades que se quieren obtener como: fiabilidad, determinar las características reales y obtención de datos de funcionamiento real.
2. Diseño del ensayo. – Se tiene que determinar condiciones normales y extremas de trabajo, definiendo principios de prueba y de medición, los cuales deben ser representativos y realistas en el contexto de los recursos que se tiene.
3. Planificación del ensayo. – Es la definición de los medios para la realización de la prueba.
4. Organización de prototipo y medio del ensayo. – Se debe tener el prototipo completamente definido y, con una previa preparación, determinar los medios de medición y registro de datos.
5. Interpretación y validación de resultados. – La parte fundamental. Si se da el caso de la identificación de anomalías o incongruencias con lo previsto en el prediseño y diseño, se plantea

la verificación de las condiciones y revisión del modelo. En este paso se valida el prototipo, se sugiere revisión o corrección, o se da el descarte total del proyecto.

3. METODOLOGÍA

Los resultados del proceso de revisión bibliográfica se reflejan en los parámetros de diseño que se va a tener en cuenta para la definición de las características del producto, junto a los requerimientos de profesores y estudiantes de las facultades de Ciencias y Mecánica de la ESPOCH. Todo esto, se utiliza para generar la Casa de la Calidad.

3.1 Definición del Producto

3.1.1 Voz del Usuario

Tabla 1-3: Resultados de las Encuestas.

PREGUNTA	RESPUESTA
1. Tamaño Reducido	3
2. Acceso al Interior	4
3. Vaciado de Aire	5
4. Evitar fugas de gas y producto.	5
5. Variación de voltaje y corriente.	Valores variables entre un máximo y un mínimo
6. Variación de la velocidad de giro.	Valores variables entre un máximo y un mínimo
7. Evitar interrupción del arco.	4
8. Consumo de material.	20 mm
9 y 10. Tiempo de uso del equipo al día	50 min en experimentos de 2 min
11. Control sencillo.	4
12. Apagado de emergencia.	5
13. Material del equipo.	5
14. Peso del equipo.	3
15. Estética del equipo.	3
16. Otros parámetros.	Pureza y Presión

Realizado por: Caballero, 2019.

Requerimientos que desea el usuario con respecto a la máquina que se va a diseñar (Riba Romeva 2002). En este caso se tomó en cuenta a los profesores y alumnos de la ESPOCH, como usuarios que trabajarán con la máquina que se va a diseñar, esto se refleja en la **Tabla 1-3**, con valores escritos o calificación del 1 al 5 en importancia. De los valores de las encuestas formulados a los docentes y estudiantes interesados en la fabricación del sintetizador de nanotubos de carbono, se definieron los siguientes parámetros como voz del usuario:

- Fácil acceso al interior de la máquina.
- Vaciado de aire.

- Evitar fugas de gas y producto.
- Variación de voltaje y corriente.
- Variación de la velocidad de giro.
- Evitar interrupción del arco.
- Tiempo de ensayo.
- Control sencillo.
- Apagado de emergencia.
- Peso del equipo.
- Evitar desperdicios de material.
- Estética del equipo.

3.1.2 *Voz del Ingeniero*

Los requisitos del usuario deben traducirse a parámetros técnicos. Así se tienen las siguientes características:

- Accesibilidad.
- Potencia de la bomba de vacío.
- Hermeticidad.
- Potencia eléctrica y potenciómetro.
- Transmisión de velocidad.
- Tiempo de funcionamiento.
- Panel de control simple.
- Automatización.
- Seguridad.
- Tamaño compacto.
- Aspecto final.

3.1.3 *Definición de la competencia*

Son una fuente de información que entrega datos de posibles soluciones, materiales, funcionamiento y ensayos (Riba Romeva 2002).

Tabla 2-3: Especificaciones del Sintetizador de la Facultad de Ciencias, Equipo Propio.

Año: 2014	EQUIPO PROPIO	
	DATOS TÉCNICOS-PARTES PRINCIPALES	Ficha: 1
		Tipo: Sintetizador de CNT ESPOCH
		País: Ecuador
EQUIPO		DATOS TÉCNICOS
		Fuente: CD Dimensiones reactor Tiempo: 30 s Diámetro: 230 mm Distancia: 5 mm Longitud: 300 mm Voltaje: 45 V Corriente: 3 A Bomba de vacío: Vacuum refrigeradora Presión: 1 atm Electrodo: Grafito
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Descripción	Parámetros	
Rotación de los electrodos	No	
Diámetro del ánodo	5 mm	
Longitud del ánodo	60 mm	
Diámetro del cátodo	5 mm	
Longitud del cátodo	60 mm	
Catalizador	Ninguno	
Material del reactor	AISI/SAE 304	
Atmósfera	Ar	
Control del arco	No	
Aislante eléctrico	Nylon	
Temperatura	62°C	
Diámetro de nanotubos	215-400 nm	
Longitud de nanotubos	-	
Tipo de nanotubo	MWNT	

Realizado por: Caballero, 2019.

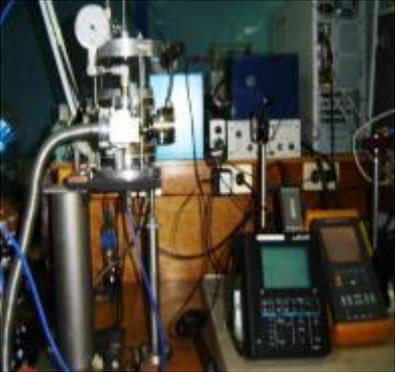
Tabla 3-3: Especificaciones del Sintetizador de CNT horizontal de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Competencia 1.

Año: 2006	COMPETENCIA 1	
	DATOS TÉCNICOS-PARTES PRINCIPALES	Ficha: 2
		Tipo: Sintetizador de CNT horizontal
		País: Colombia
EQUIPO		DATOS TÉCNICOS
		Fuente: CD Dimensiones reactor Tiempo: 1,5 - 20 s Diámetro: 220mm Distancia: 3mm Longitud: 250mm Voltaje: 200 - 230 V Corriente: 50 - 57 A Bomba de vacío: Sistema Pfeiffer TSH 071 E Presión: 50-210 mbar Electrodo: Grafito en barras de 96,42% y 98,36 % de pureza
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Descripción	Parámetros	
Rotación de los electrodos	No	
Diámetro del electrodo (ánodo)	4 mm	
Longitud del electrodo (ánodo)	50 mm	
Diámetro del electrodo (cátodo)	8 mm	
Longitud del electrodo (cátodo)	85 mm	
Catalizador	-	
Material del reactor	SAE 304	
Material de las tapas	SAE 304	
Gas	H ₂	
Control del arco	No	
Aislante eléctrico	-	
Temperatura	3000 - 4000 °C	
Diámetro de nanotubos	150 - 180 nm	
Longitud de nanotubos	3,5 µm	
Tipo de nanotubo	MWNT	

Fuente: Pérez Urbano, 2006.

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 4-3: Especificaciones del Sintetizador de CNT vertical del Instituto Tecnológico de Toluca (ITESM), Competencia 2.

Año: 2007	COMPETENCIA 3	Ficha: 3
	DATOS TÉCNICOS-PARTES PRINCIPALES	Tipo: Sintetizador de CNT vertical
		País: México
EQUIPO	DATOS TÉCNICOS	
	Fuente: CA Tiempo: 5 min Distancia: - Voltaje: 300 - 500 V Corriente: 9 - 1000 mA Frecuencia: 41 - 42 kHz Bomba de vacío: - Presión: 10 kPa Electrodo: Grafito y acero	Dimensiones reactor Diámetro: 150 mm Longitud: 250 mm
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Descripción	Parámetros	
Rotación de los electrodos	No	
Diámetro del electrodo superior (ánodo)	6 mm	
Longitud del electrodo superior (ánodo)	50 mm	
Diámetro del electrodo inferior (cátodo)	15 mm	
Longitud del electrodo inferior (cátodo)	50 mm	
Catalizador	34% atómico Ni y 10,32% atómico Y	
Material del reactor	Cerámico (Vidrio)	
Material de las tapas	Acero inoxidable	
Gas	He-CH ₄	
Control del arco	fotosensor	
Aislante eléctrico	Vidrio	
Temperatura	4830 K	
Diámetro de nanotubos	75 - 100 nm	
Longitud de nanotubos	-	
Tipo de nanotubo	MWNT	

Fuente: Jiménez López, 2007.

Realizado por: Caballero Siva, Enya, 2019.

3.1.4 Despliegue de la Casa de la Calidad

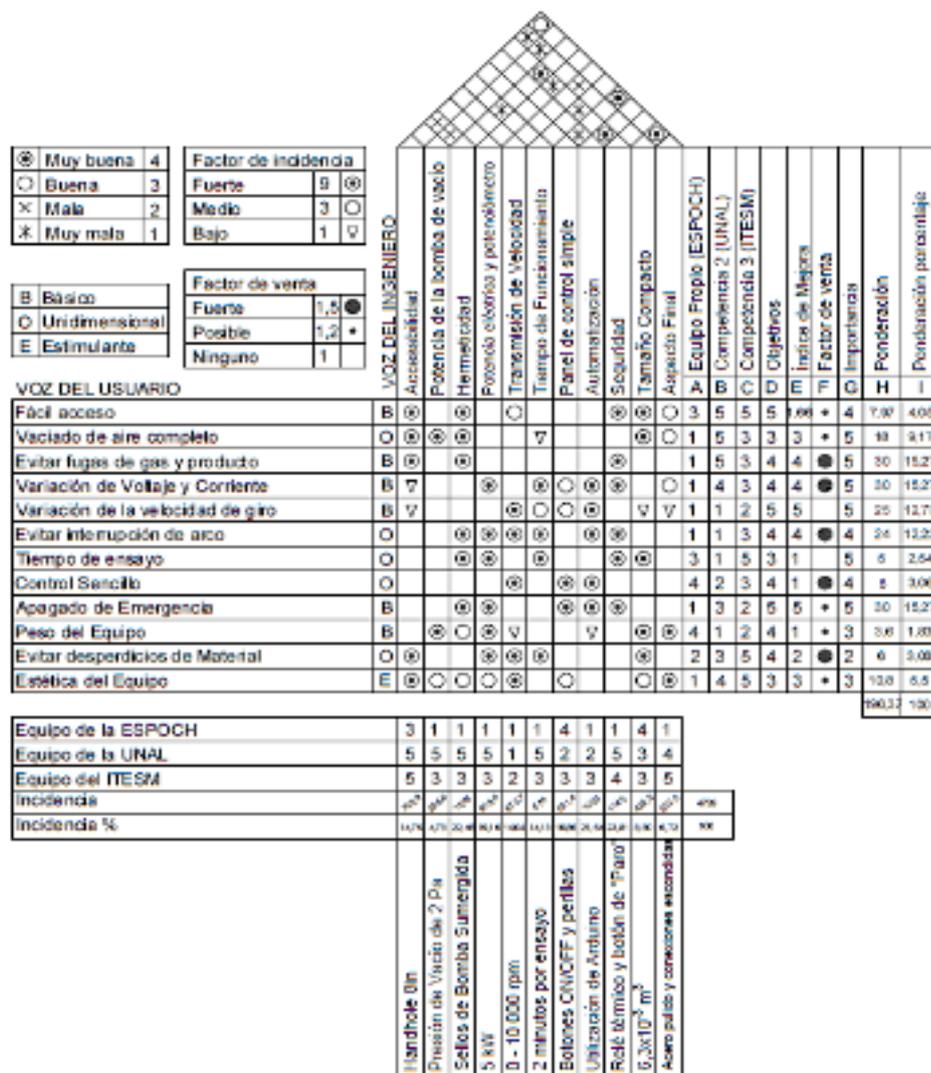


Figura 1-3: Despliegue de la Casa de la Calidad en base a la información estudiada.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.1.4.1 Resultados de la Casa de la Calidad

En base a la Casa de la Calidad, se pueden definir como de mayor importancia, las siguientes características:

- **Hermeticidad de la cámara o Pureza del Medio.** - Evitar fugas de producto y del gas inerte, de la misma manera; evitar que cualquier sustancia contaminante entre a la cámara de síntesis y estropee la formación del CNT.
- **Variación de los Parámetros de Control del Plasma.** - Ya sea voltaje, amperaje o giro para ver la estabilidad del plasma de síntesis.

- **Apagado de Emergencia.** - Junto con un sistema de emergencia que garantice la integridad del usuario y del equipo.
- **Evitar la Interrupción del Arco.** - Generar un plasma estable controlado mediante automatización de la presión, voltaje, amperaje, distancia entre electrodos y RPM.

3.2 Diseño Conceptual

3.2.1 Análisis Funcional

Se va a definir la función principal de la máquina de síntesis de CNT: “Sintetizar Nanotubos mediante arco eléctrico entre electrodos de Carbono”, la cual se indica en el nivel 0, donde se indica los recursos que se necesita para realizar esta función y los productos que se generan. También realiza varias funciones secundarias, las cuales permiten cumplir con su objetivo primario de una manera adecuada y se muestran en los niveles 1 y 2, que se muestran las **figuras 2-3, 3-3, 4-3**.

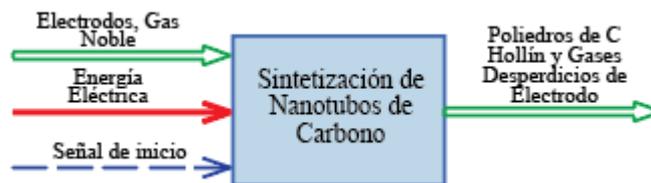


Figura 2-3: Nivel 0 del Diseño Funcional.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.2.2 Matriz Morfológica por cada Módulo

Los módulos establecidos son:

- **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.

Las funciones del módulo 1 son:

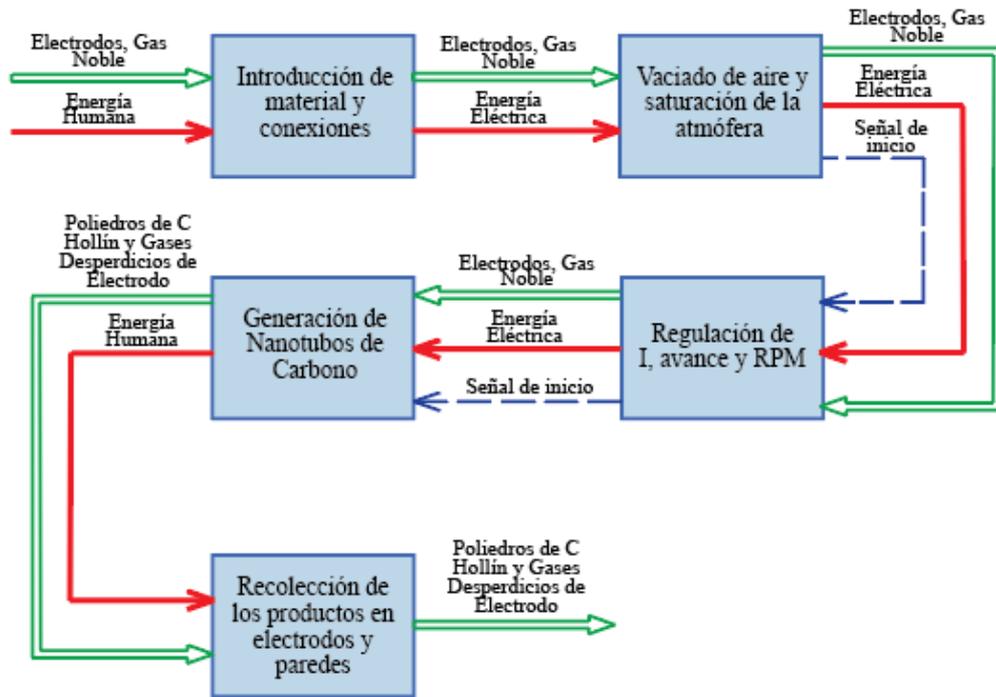


Figura 3-3: Nivel 1 del Diseño Funcional.

Realizado por: Caballero, 2019.

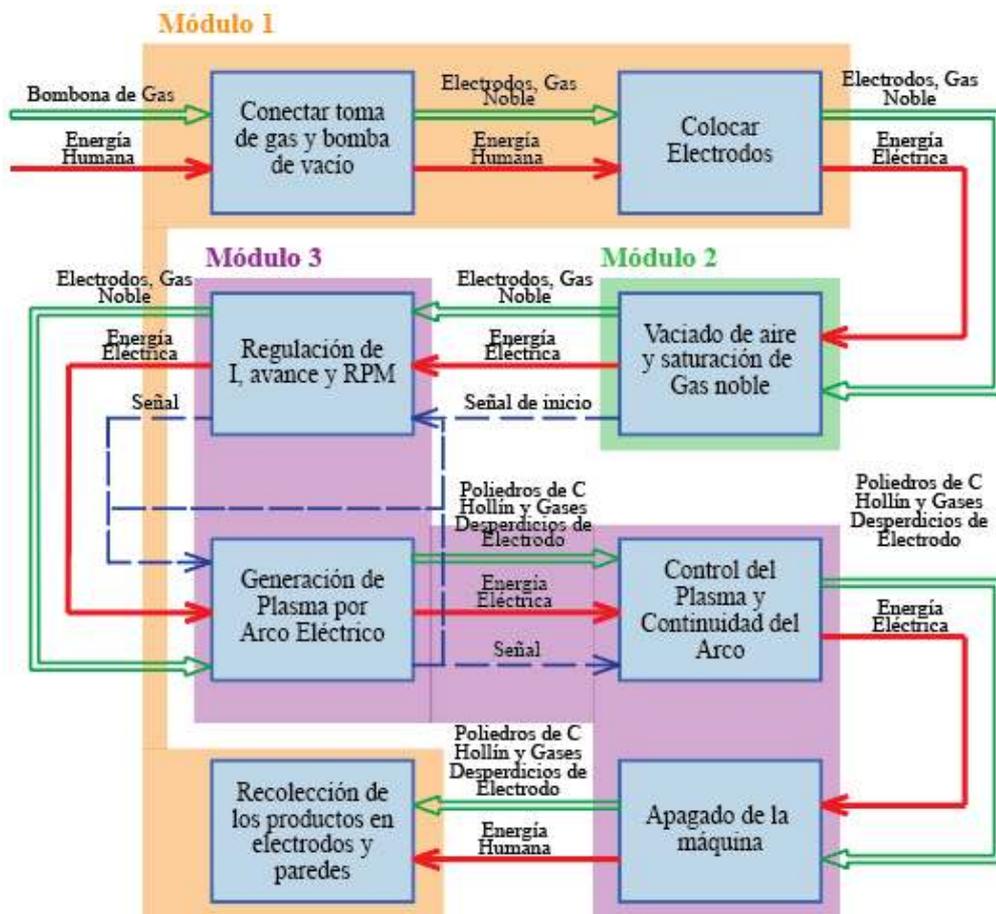


Figura 4-3: Nivel 2 del Diseño Funcional y Definición de los Módulos.

Realizado por: Caballero, 2019.

- Ingreso al interior de la cámara del sintetizador: Brida, Sello con Tornillo de Potencia, Sello de Presión.

Brida: El mecanismo de Brida es usado en múltiples campos de trabajo, generando finales de tubería o uniones entre las mismas, mediante pernos.

Ventajas: *Elemento Normalizado.*
 Facilidad de Montaje.
 Bajo costo.
 Soportan altas presiones.

Desventajas: *Sólo poseen diámetros estándares.*
 Elementos muy pesados.

Tornillo de Potencia: Elemento cilíndrico con rosca externa que permite la transformación del movimiento rotatorio en lineal, con el fin de aplicar fuerza.

Ventajas: *Fácil uso.*
 Soporta la presión para la que se diseñe sin problemas.
 Económico.

Desventajas: *Debe maquinarse para cumplir con las condiciones de diseño.*
 No existen recambios.

Sello de Presión: Elemento de cierre elaborado en polímero, que se sujeta aplicando presión.

Ventajas: *Económico.*
 Fácil uso.
 Elementos comerciales.

Desventajas: *Debería reducirse el volumen de la cámara, lo que podría aumentar la temperatura.*
 Necesita mayor trabajo de maquinado y suelda.
 No existen recambios, debe hacerse a medida.

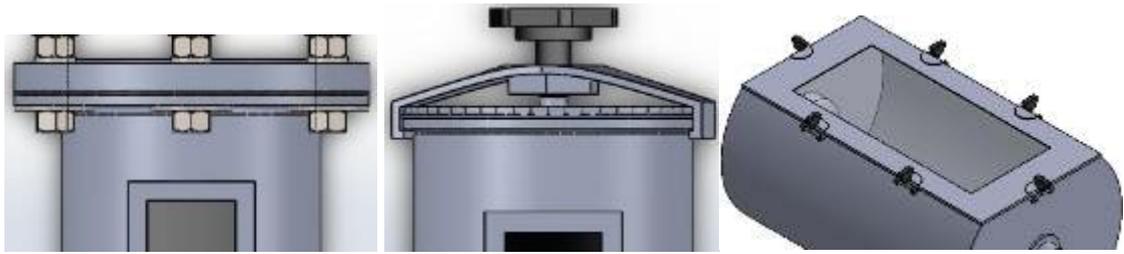


Figura 5-3: Cierre Brida, con Tornillo de Potencia y con Sello de Presión.

Realizado por: Caballero, 2019.

- Observación del experimento: Ramificación en el cuerpo, Brida Cuadrada, Ventana en la Tapa.

Ramificación: Se genera una abertura alejada del plasma, puede ser redonda o cuadrada.

- Ventajas:* Elemento Normalizado.
Disminución del impacto de la temperatura.
- Desventajas:* Sólo poseen diámetros estándares.
Aumenta el peso.
Dificultad para limpiar.

Ventana de observación: Se genera una ventana de observación en la tapa de acceso, este elemento sería el necesario con el sello de presión.

- Ventajas:* Amplio campo de visión.
Facilidad de limpieza y mantenimiento.
- Desventajas:* Se debe buscar un vidrio de soldadura de gran tamaño, lo que implica un costo superior.
Disminuye el volumen de la cámara, y habría que modificar el cuerpo principal.

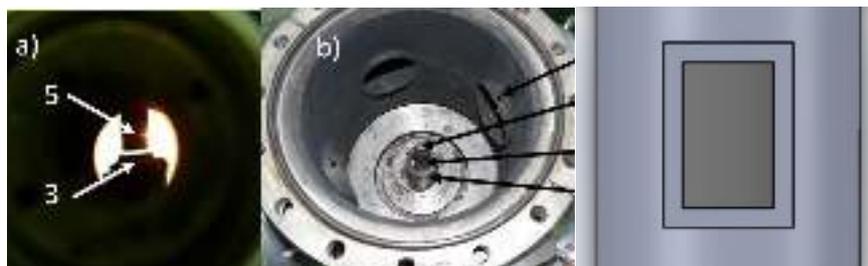


Figura 6-3: Tubería de Observación con brida Redonda y Cuadrada.

Fuente: Raniszewski, 2017, Caballero, 2019.

- Material de la cámara del sintetizador: Acero ASTM A304, Acero API 5L80, Vidrio.

Acero ASTM A304: Acero de propiedades muy elevadas ante altas temperaturas y corrosión, aplicado a industrias de alimentos, petróleo, químicos, etc. Es un material muy resistente cuya información se encuentra bien definida.

Ventajas: *Excelentes propiedades de soldabilidad.*
Valores de diseño claramente definidos y accesibles en norma.
Facilidad de obtención bajo catálogo.
Soportan altas presiones a altas temperaturas.

Desventajas: *Costoso.*
Para nuestra aplicación se ve la necesidad de realizar un cordón de soldadura para obtener una cámara cilíndrica, lo que ocasiona concentradores de esfuerzos reduciendo así su resistencia mecánica.
Elementos muy pesados.

Acero API 5L80: Acero muy utilizado en construcciones petroleras

Ventajas: *Excelentes propiedades de soldabilidad.*
Excelentes propiedades mecánicas.
Soportan altas presiones y temperaturas de trabajo.

Desventajas: *Costosa.*
Susceptible a pérdidas de espesor por corrosión y pitting.
Sólo poseen diámetros estándares.
Elementos muy pesados.

Vidrio: Es un material muy útil para observación del experimento.

Ventajas: *Posee transparencia.*
Aislante eléctrico.
Impermeable a los gases.
Limpieza fácil y rápida.

Desventajas: *Costoso.*
Frágil.
Resiste bajas temperaturas.

- Fijación de los electrodos: Mandriles de sujeción de taladro, Portabrocas con ajuste de tuerca, Ajuste con Tornillo.

Mandriles de Taladro: Elemento de sujeción en ejes para sostener una pieza mientras se la máquina.

Ventajas: *Elemento comercial.*
 Económico.
 Puede sujetar diferentes diámetros.

Desventajas: *Elevado peso.*

Mini Mandril de Taladro: Elemento que sirve para la sujeción de la broca o destornillador.

Ventajas: *Muy ligero.*
 Elemento comercial.
 Precio muy bajo.

Desventajas: *Tolera pequeños cambios de diámetro.*
 Sólo puede girar en un sentido.

Sujeta-electrodo: Es un mecanismo que se desarrollaría por los estudiantes, el cual se fija al electrodo por la presión de un resorte, y ajusta al eje por tornillos.

Ventajas: *Muy ligero.*
 Permite grandes variaciones de diámetro.
 Hecho a medida, bajo las necesidades de la máquina.

Desventajas: *Requiere fabricación a medida.*
 Tiene que calcularse correctamente para evitar desequilibrios que provoquen aceleración centrífuga.



Figura 7-3: Mandril, Mini Mandril y Sujeta electrodo.

Fuente: Amazon Inc., 2019, Caballero, 2019.

- Entrada de gas y Salida de aire: Acoples rápidos, Uniones Roscadas.

Acople Rápido: Elementos de unión de mangueras y tuberías.

Ventajas: *Uso muy fácil y rápido.*
 Elemento comercial y normalizado.
 Económico.
 Bajo nivel de pérdidas del gas.

Desventajas: *Fácil desgaste.*

Unión Roscada: Elementos de unión de mangueras y tuberías.

Ventajas: *Elemento comercial y normalizado.*
 Económico.
 Bajo nivel de pérdidas del gas.

Desventajas: *Es más complejo su manejo.*



Figura 8-3: Acople Rápido y Uniones Roscadas.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

Las funciones del módulo 2 son:

- Generar un vacío dentro del reactor previo al ingreso del gas noble: Vacuum laboratorio, Bomba de vacío, Sistema Pfeiffer TSH 071.

Vacuum laboratorio: Bomba de vacío de baja potencia para aplicaciones experimentales.

Ventajas: *Es compacta y ligera.*
 Genera poco calor.
 Libre de aceite.

Desventajas: *Ruidosa.*
 Costosa.

Bomba De Vacío.

- Ventajas:* *Es compacta.*
 Genera poco calor.
 Permite generar vacío rápidamente.
- Desventajas:* *Presión de vacío limitada.*
 Costosa.

Sistema Pfeiffer para vacío.

- Ventajas:* *Altas presiones de vacío.*
 Genera poco calor.
 Permite generar vacío rápidamente.
- Desventajas:* *Es pesada.*
 Poco compacta.
 Ruido de trabajo fuerte.
 Muy costosa.
 Traída bajo pedido.



Figura 9-3: Bomba de vacío de Laboratorio, de Aire Acondicionado y Sistema Pfeiffer.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

- Lograr una completa hermeticidad en el reactor con el fin de impedir fugas e ingreso de aire contaminado. Esto se lo realiza mediante Empaques, Sellos de Epóxico de alta temperatura.

Empaques

- Ventajas:* *Fácil mantenimiento.*
 Fácil adquisición.

Instalación sencilla.
Costo bajo.
Desventajas: Poca durabilidad.
Resistencia a temperaturas altas limitada.

Sellos de Resina Epóxica de Alta Temperatura

Ventajas: Alta durabilidad.
Resistente a altas temperaturas.
Pasta que puede llenar diferentes formas complejas.
Desventajas: Material frágil.
Difícil adquisición.



Figura 10-3: Sellos Espirometálicos y Acrílico de Alta Temperatura.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

Las funciones del módulo 3 son:

- Control del voltaje y la corriente suministrados por una fuente.

Fuente de Soldadora Inverter 110-220v a 30V-250A.

Ventajas: Disposición de corrientes variables.
Manipulación sencilla.
Fácil adquisición.
Desventajas: Costosa.
Tamaño elevado.
Genera calor.

- Material del eje y aislamiento eléctrico. Utilización de acero inoxidable AISI/SAE A304, polímero acrílico para aislamiento, Cerámico.



Figura 11-3: Soldadora Inverter.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

Acrílico.

Ventajas: Alta resistencia Eléctrica.

Fácilmente Maquinable.

Económico.

Desventajas: Baja resistencia a altas temperaturas.

Difícil adquisición.

Cerámico.

Ventajas: Alta resistencia Eléctrica.

Alta resistencia a altas temperaturas.

Fácil adquisición.

Económico.

Desventajas: Difícil de maquinar.

Muy frágil.

- Avance del electrodo. Es la transformación de un movimiento rotatorio a movimiento lineal, existen 4 mecanismos, de los cuales se descartan el mecanismo de leva y el de biela-manivela por su tamaño demasiado abultado que reduciría la capacidad del sintetizador de ser compacto.

Piñón-Cremallera: Mecanismo de engranajes donde la conductora proporciona la fuerza para el desplazamiento a un perfil o eje dentado.

Ventajas: El área de contacto es reducida y podría ser compacto.

Manipulación sencilla.

Desventajas: Se tiene que maquinar a medida.

Necesita tratamiento térmico de endurecimiento.
Necesita apoyos que generarían mayor gasto.
Necesita cambio de dirección de movimiento.

Tornillo-Tuerca: Mecanismo de rosca, donde debido al movimiento circular del tornillo, la tuerca avanza o retrocede.

Ventajas: *El área de contacto es reducida y podría ser compacto.*
Manipulación sencilla.
El movimiento se produce en el mismo eje.

Desventajas: *Se tiene que maquinar a medida.*
Necesita apoyos que generarían mayor gasto.



Figura 12-3: Mecanismos: Leva, Biela-Manivela, Piñón-Cremallera, Tornillo-Tuerca.

Fuente: Pulido, 2008.

- Movimiento de giro y avance de los electrodos. Esto se puede realizar mediante: Motor eléctrico DC, Servomotor o Motor Paso a Paso.

Motor eléctrico DC

Ventajas: *Buen rendimiento energético.*
Alto torque de trabajo.
Fácil adquisición.

Desventajas: *Limitación de temperatura de trabajo.*
Estabilidad de la velocidad.
Necesita de un buen mantenimiento para trabajar en óptimas condiciones.

Servomotor

Ventajas: *Proporciona elevados torques de trabajo.*

Su potencia es proporcional a las cargas.

Consume poca energía.

Alta precisión.

Desventajas: Limitado por su circuito de control.

Construcción costosa.

Motor Paso a Paso (PAP)

Ventajas: Estable a diferentes cargas.

Fácil de configurar y usar.

Larga vida de trabajo.

Puede trabajar con varias cargas sin engrane.

Desventajas: Baja eficiencia.

Torque se reduce al aumentar la velocidad.

Propenso a resonancia.

Recalentamiento del motor.



Figura 13-3: Motor DC, Servomotor y Paso a Paso.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

- Control de las variables del proceso: PLC, Arduino UNO, NANO y Raspberry.

PLC

Ventajas: Reducción de mano de obra.

Instalación sencilla.

Ocupa poco espacio.

Control de múltiples procesos de manera simultánea.

Desventajas: Personal calificado para su programación.

Costo elevado.

Arduino UNO y NANO

- Ventajas:* Simplifica el proceso de trabajo.
 Bajo costo.
 Multiplataforma.
- Desventajas:* Costo para el uso de librerías alto.
 Poca flexibilidad.
 Poca memoria.

Raspberry Pi

- Ventajas:* Simplifica el proceso de trabajo.
 Bajo costo.
 Puede funcionar como un sistema independiente del código C.
- Desventajas:* Costo para el uso de librerías alto.
 Poca flexibilidad.
 Restricción de aplicaciones.

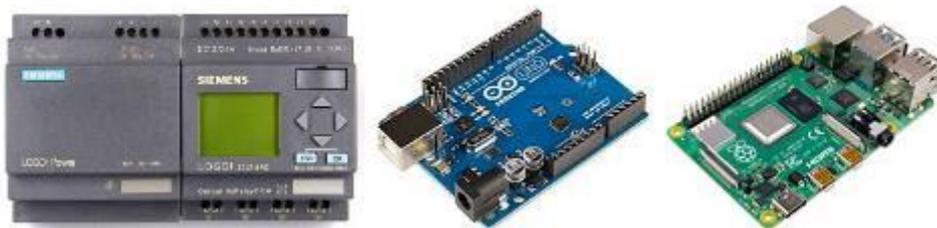


Figura 14-3: PLC, Arduino UNO y Raspberry Pi 4.

Fuente: Amazon Inc., 2019.

Tabla 5-3: Características de los Controladores.

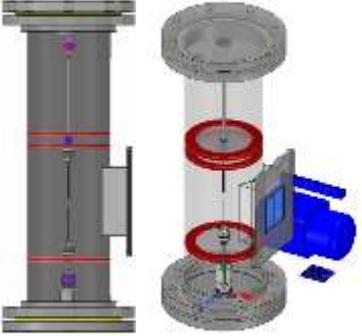
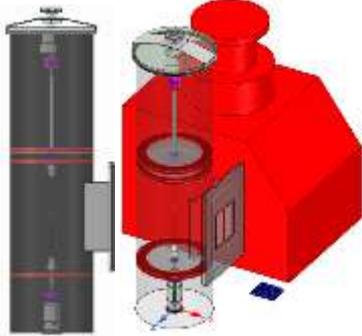
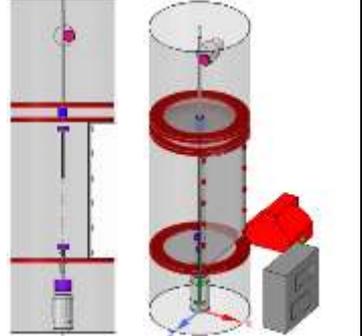
	Arduino UNO	Arduino NANO	PLC S7-1200 1214C DC/DC/DC LOGO V8	Raspberry PI 3
PROCESADOR	ATmega328 16MHz	ATmega328 /168 16MHz	1214C	24RCE
E/S DIGITALES	14	14	14E Y 10S	8E Y 4S RLY
E/S ANALOGICAS	6	8	2E	
MEMORIA	32 KB	32 KB	75 KB	31X31 bloques
FUENTE DE ENERGIA	7 a 12VDC	7 a 12VDC	24 VDC	24VDC
PRECIO	\$8~\$36	\$7~\$8	\$566	\$205~\$270

Realizado por: Caballero, 2019.

3.2.3 Selección de la Mejor Alternativa

En base a todos los elementos mostrados en la sección anterior como una posible solución, se elaboran 3 alternativas como se muestra en la **Figura 15-3** y la **Tabla 5-3**, cuyas ventajas y desventajas ya fueron mostradas individualmente.

Tabla 6-3: Modelado de las 3 Alternativas.

ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B	ALTERNATIVA C
		
ELEMENTOS DE CADA ALTERNATIVA		
Brida Acero AISI/SAE A-304 Ramificación Mandril de taladro Acople rápido Bomba de vacío Motor DC Tornillo-tuerca Arduino	Tornillo de potencia API 5L80 Ramificación Mini Mandril Acople rápido Sistema Pfeiffer Motor PAP Tornillo-tuerca Raspberry	Sello de presión Vidrio Ventana Sujeta electrodo Unión roscada Vacuum Servomotor Piñón-cremallera PLC

Realizado por: Caballero, 2019.

Mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados, se evaluarán las 3 alternativas posibles, en base a los criterios evaluados en la casa de la calidad QFD de la **Sección 3.1.4.1**, añadiendo el de precio debido a los limitados fondos como estudiante.

- **Pureza de la atmósfera interna.** – Ya que se necesita una atmósfera inerte que no contamine los CNT, a parte de la necesidad de evitar la fuga del gas inerte y producto, que perjudica la eficiencia y genera desperdicios.
- **Variación de los parámetros de control del plasma.** – Ya que, con esto varían las propiedades de los CNT: voltaje, corriente y velocidad de giro. Por otro lado, también hay que mantener una continuidad en el arco de descarga para generar CNT con alta calidad y propiedades similares.

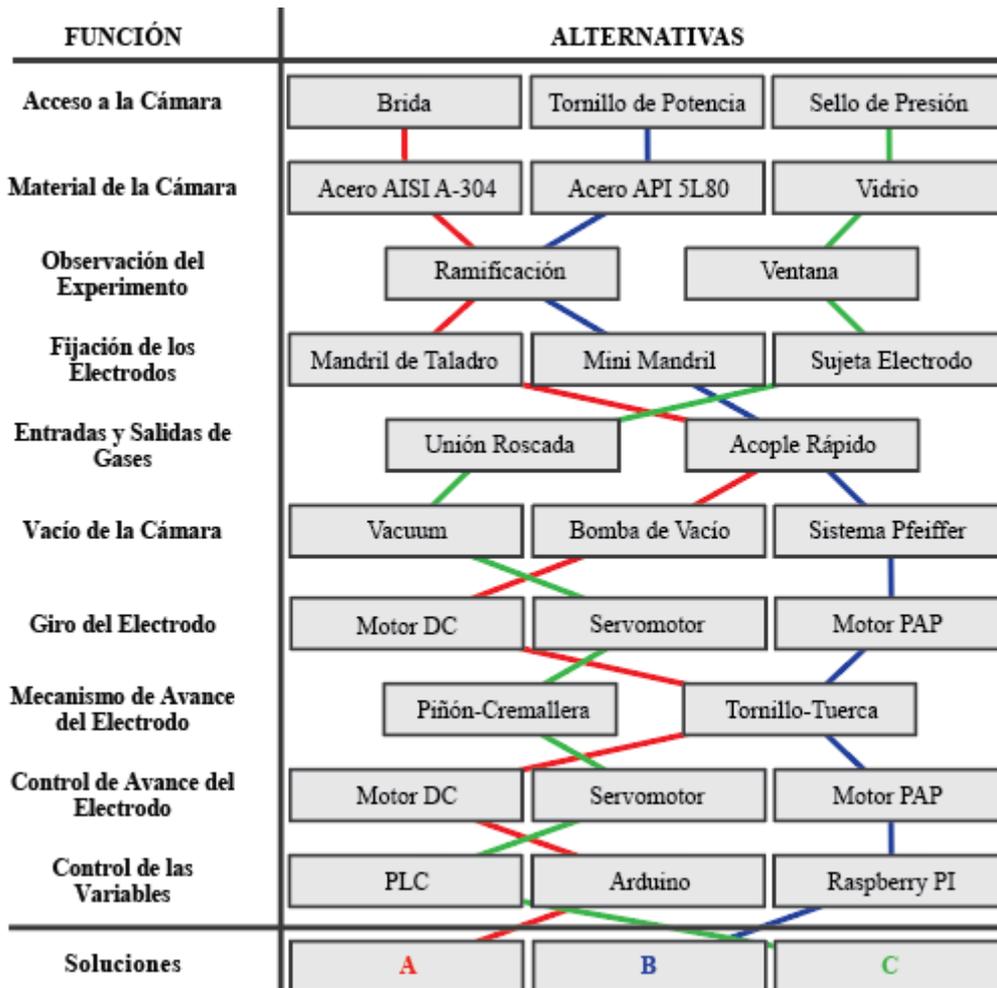


Figura 15-3: Alternativas por Módulos.

Realizado por: Caballero, 2019.

- **Seguridad.** – El amperaje es muy elevado, por lo que se debe preservar la seguridad del operario, el equipo y la cámara donde va a ser instalado, hay que evitar la fuga de gases con hollín y la temperatura generada tiene que controlarse para evitar fallos de los elementos.
- **Mantenibilidad.** – Fácil acceso a la cámara para cambiar materiales y realizar reparaciones, junto con la facilidad para limpiar el producto generado.
- **Precio.** – Es un factor limitante.

Para el cálculo del peso específico para cada criterio, se requiere de la evaluación de cada uno de los criterios anteriormente presentados, para ver su orden de importancia en la selección de todas las partes que van a constituir las máquinas, cuya representación está presente en la **Tabla 7-3**.

Tabla 7-3: Peso Específico de Cada Criterio.

Criterio	Pureza atmósfera	Variación parámetros	Seguridad	Manteni-bilidad	Precio	$\Sigma +1$	Ponderación	Prioridad
Pureza atmósfera		0	0	1	1	3	20%	3
Variación parámetros	1		0	1	1	4	27%	2
Seguridad	1	1		1	1	5	33%	1
Manteni-bilidad	0	0	0		1	2	13%	4
Precio	0	0	0	0		1	7%	5
						15	100%	

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 8-3: Peso específico del criterio Pureza de la Atmósfera.

Pureza de la atmósfera	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		0,5	1	2,5	42%
Alternativa B	0,5		1	2,5	42%
Alternativa C	0	0		1	17%
				6	100%

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 9-3: Peso específico del criterio Variación de Parámetros.

Variación de parámetros	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	0	2	33%
Alternativa B	0		0	1	17%
Alternativa C	1	1		3	50%
				6	100%

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 10-3: Peso específico del criterio Seguridad.

Seguridad	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	0,5	2,5	42%
Alternativa B	0		0	1	17%
Alternativa C	0,5	1		2,5	42%
				6	100%

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 11-3: Peso específico del criterio Manteneabilidad.

Manteneabilidad	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	0	2	33%
Alternativa B	0			1	17%
Alternativa C	1			2	33%
				5	83%

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 12-3: Peso específico del criterio Precio.

Precio	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		0	1	2	33%
Alternativa B	1		1	3	50%
Alternativa C	0	0		1	17%
				6	100%

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 13-3: Evaluación de la Alternativas por Criterios Ponderados.

Criterio	Pureza atmósfera	Variación parámetros	Seguridad	Manteneabilidad	Precio	Σ	Prioridad
Alternat. A	0,083	0,089	0,139	0,044	0,022	0,378	1
Alternat. B	0,083	0,044	0,056	0,022	0,033	0,239	3
Alternat. C	0,033	0,133	0,139	0,044	0,011	0,361	2

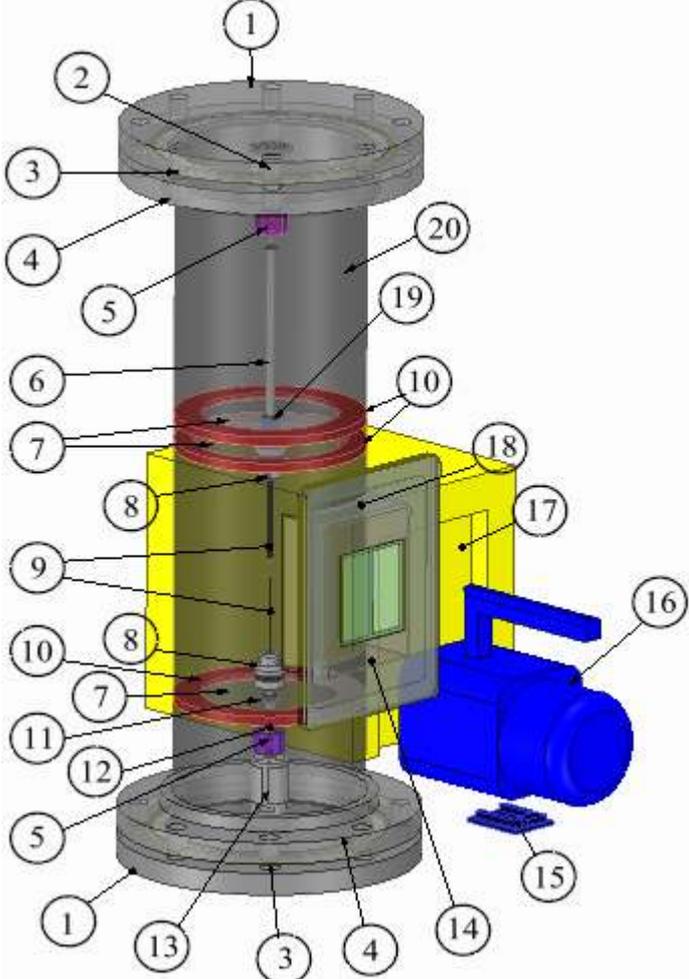
Realizado por: Caballero, 2019.

Observando los resultados del proceso, se selecciona la Alternativa A como objetivo de diseño, siguiendo con la Alternativa C y por último la B.

3.2.4 Características de la Máquina Prediseñada

A partir de los resultados del análisis de cada criterio se obtiene como solución la alternativa A para el sintetizado de nanotubos de carbono. Este prediseño toma en consideración la fácil adquisición de repuestos, el mantenimiento y la seguridad en la manipulación del equipo.

Tabla 14-3: Características de la máquina prediseñada.

ESQUEMA DE LA MÁQUINA	COMPONENTES
	1. Brida Ciega
	2. Motor de Avance DC
	3. Sello Espirometálico de Acero
	4. Brida Deslizante
	5. Unión de Abrazadera
	6. Eje de Avance con Tornillo de Potencia
	7. Placa de Soporte
	8. Mandril de Taladro
	9. Electrodo de Grafito
	10. Aislante Eléctrico
	11. Rodamiento
	12. Eje de Velocidad
	13. Motor de Velocidad DC
	14. Vidrio para Soldadura
	15. Arduino de Control
	16. Bomba de Vacío
	17. Soldadora Inverter
	18. Ventana de Observación
	19. Rodamiento Lineal
	20. Cuerpo del Sintetizador

Realizado por: Caballero, 2019.

3.2.4.1 Elementos de la maquina sintetizadora de CNT

- **Cámara.** Se la diseñó según las temperaturas y presiones de trabajo, para este caso se trabaja con acero ASTM A304 con un diámetro de 8in, espesor de 3 mm y una longitud aproximada de 50 cm.
- **Brida.** Se utiliza el mecanismo de sellado de la brida con empaques espirometálicos para garantizar hermeticidad en la cámara y un fácil acceso si algún elemento falla.
- **Ejes de acero.** Es diseñado para soportar altas velocidades (hasta 20 000RPM) y el peso tanto del mandril de taladro como del electrodo.
- **Aislamientos.** Para evitar que la corriente alta llegue a los componentes electrónicos y al usuario.

- **Bomba de vacío.** Se garantiza un bajo nivel de presión.
- **Rodamientos.** Se los selecciona tomando en consideración las cargas presentes y los diámetros de los ejes respectivos.
- **Abrazaderas.** Para unir los ejes con los motores evitando que la energía eléctrica de la soldadora llegue a los motores.
- **Motor DC con control PWM controlado con o sin Arduino.** Para realizar un control sencillo y eficiente de la velocidad de giro de los electrodos que deben girar y avanzar.

Tabla 15-3: Especificaciones técnicas del Sintetizador de CNT.

PARÁMETRO	RANGO ESPERADO	UNIDAD
Fuente de Alimentación	Corriente Continua	-
Voltaje	0-30	V
Corriente	0-300	A
Precursores	Electrodos de C	-
Presión	5-120	KPa (Abs)
Temperatura del Plasma	0-5 000	K
Velocidad de giro	0-20 000	RPM
Avance de eje	200	Mm
Ruido	20-60 dB	dB
Material	Acero AISI/SAE A-304	-
Peso	50-100	Kg
Dimensiones	Diámetro	6-8
	Longitud	0,4-1
Tiempo de operación máxima	2	min

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3 Diseño de Detalle

3.3.1 Diseño Mecánico

En base a los resultados arrojados por la selección de la mejor alternativa en el capítulo anterior, se puede determinar algunos de los valores correspondientes a condiciones básicas del equipo, obteniendo así algunas dimensiones sólo por criterios de facilidad de montaje o mantenimiento.

3.3.1.1 Determinación de la Temperatura Crítica de Diseño

A partir de las condiciones más críticas obtenidas en la literatura, se realiza el modelado en el Software ANSYS para determinar la temperatura más elevada en operación, y así, garantizar la seguridad del operario y el equipo.

El proceso empieza con el análisis del fenómeno de transferencia de calor. Puesto que lo que se genera es un arco eléctrico, se realiza la semejanza con el proceso de soldadura, y se obtiene que la transmisión de calor desde el arco hasta la cámara se produce por radiación y convección, en

valores referenciales de 29% y 18%, respectivamente. Aunque se puede esperar una eficiencia de hasta el 66% de transferencia de calor del cátodo al ánodo (Metcalf y Quigley 1975), lo que disminuiría los valores antes mencionados.

3.3.1.1.1 Radiación

La determinación aproximada de las dimensiones viene fijada por un diámetro externo de una tubería de 8 in equivalente a 219,1 mm valor referencial para lograr comodidad en el momento de manipulación y mantenimiento interno de la cámara, un espesor de 3 mm y una longitud de cámara de 270 mm como medidas referenciales. El coeficiente de emisividad de radiación (ϵ) se calcula en base a esta geometría, suponiendo que el plasma se genera en una forma cilíndrica, ϵ se calcula con las fórmulas de factor de forma o visión de un cilindro hacia otro (Ec. 5).

Donde todo está relacionado con la **Figura 11-2**, y r_1 es el radio del cilindro externo, en este caso el diámetro interno de la cámara; r_2 es el radio del cilindro interno, que es el diámetro del arco eléctrico; y L que es la longitud de ambos cuerpos cilíndricos, o la longitud de los electrodos de grafito y el arco, que sería la zona crítica radiante por la geometría.

$$X = \frac{r_1}{r_2} = \frac{104,55 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 17,425$$

$$Y = \frac{L}{r_2} = \frac{300 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 50$$

$$A = Y^2 + X^2 - 1 = 50^2 + 17,425^2 - 1 = 2802,631$$

$$B = Y^2 - X^2 + 1 = 50^2 - 17,425^2 + 1 = 2197,369$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{1 \rightarrow 2}} &= \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left(\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} \right) + B \sin^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] = \\ &= \frac{1}{17,425} - \frac{1}{\pi (17,425)} \left[\cos^{-1} \frac{2197,369}{2802,631} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2*(50)} \left(\sqrt{(2802,631+2)^2 - (2*17,425)^2} \cos^{-1} \frac{2197,369}{(17,425)(2802,631)} \right) + \right. \\ &\quad \left. ((2197,369) \sin^{-1} \frac{1}{17,425} - \frac{\pi (2802,631)}{2}) \right] = 0,01267 \end{aligned}$$

$$F_{2 \rightarrow 1} = \frac{r_1}{r_2} * F_{1 \rightarrow 2} = \frac{104,55 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} * 0,01267 = 0,2207$$

Tabla 16-3: Valores para calcular el Factor de Emisión.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Radio de la cámara	r_1	104,55	Mm	Medición
Radio del arco	r_2	6	Mm	Medición
Longitud del Arco	L	300	Mm	Medición
Relación de radios	X	17,425	-	Ec. 1
Relación de radio y longitud	Y	50	-	Ec. 2
Factor A	A	2802,631	-	Ec. 3
Factor B	B	2197,369	-	Ec. 4
Factor de forma de 1 a 2	$F_{1 \rightarrow 2}$	0,01267	-	Ec. 5
Factor de forma de 2 a 1	$F_{2 \rightarrow 1}$	0,2207	-	Ec. 6

Realizado por: Caballero, 2019.

El valor de la emisividad (ε) queda determinado por el valor de $F_{2 \rightarrow 1}$ de 0,22 o 22%, cercano al valor de 29% sugerido (Metcalf y Quigley 1975). Este valor se puede ratificar comparándolo con la gráfica de Çengel y la ecuación de la reciprocidad (**Ec. 6**).

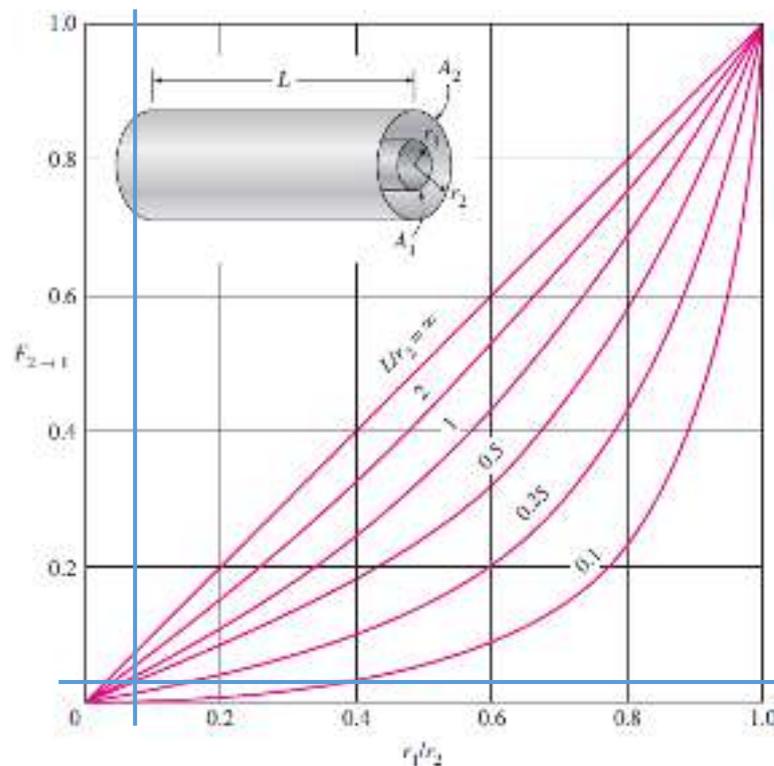


Gráfico 1-3: Indicación del valor del Factor de Forma de dos Cilindros Concéntricos, en base a los datos obtenidos:

$$L/r_2 = 2,9 \text{ y } r_1/r_2 = 0,057; F_{2 \rightarrow 1} = 0,01.$$

Realizado por: Çengel and Ghajar, 2011, p. 716.

3.3.1.1.2 Convección

El siguiente paso es hallar el coeficiente de convección. Analizando el fenómeno, al realizarse a vacío, la transferencia de calor por convección debería ser despreciable, sin embargo, se calculará

la constante de convección para el Argón a 1 atmósfera suponiendo cualquier falla en el sistema de vacío y/o la cámara se sature de gas con los datos de Metcalfe y Quigley presentes en la **Tabla 17-3**, junto con los valores medidos y calculados para calcular la constante de convección h en el interior de un cilindro.

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} = \frac{(9000 - 393)K}{2} = 4646,5K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{4646,5K} = 2,152 * 10^{-4} \frac{1}{K}$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k} = \frac{892 \frac{J}{Kg * K} * 2,180 * 10^{-4} \frac{Kg}{m * s}}{0,91 \frac{W}{m * K}} = 0,2137$$

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3}{\nu^2} * Pr = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} * 2,152 * 10^{-4} \frac{1}{K} * (9000 - 393)K * (0,008m)^3}{(4,058 * 10^{-3})^2} * 0,2137 = 0,1221$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * (0,1221)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{0,2137} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 0,6443$$

$$h = \frac{k}{D} * Nu = \frac{0,91 \frac{W}{m * K}}{0,008 m} * 0,6443 = 73,293 \frac{W}{m^2 * K}$$

Tabla 17-3: Valores para calcular el Coeficiente de Convección.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Calor específico del fluido a presión constante	C_p	892	$\frac{J}{kg * K}$	Anexo B [1]
Viscosidad dinámica	μ	$2,180 * 10^{-4}$	$\frac{Kg}{m * s}$	Anexo B [1]
Viscosidad cinemática	ν	$4,058 * 10^{-3}$	$\frac{m^2}{s}$	Anexo B [1]
Conductividad térmica	k	0,91	$\frac{W}{m * K}$	Anexo B [1]
Temperatura de la superficie	T_s	9000	K	Estimación
Temperatura del fluido	T_∞	293	K	Medición
Temperatura filmica	T_f	4646,5	K	Ec. 9
Expansividad volumétrica	β	$2,152 * 10^{-4}$	1/K	Ec. 8
Diámetro externo del arco	D	0,008	m	Medición
Gravedad	g	9,81	$\frac{m}{s^2}$	Estimación
Número de Prandtl	Pr	0,2137	-	Ec. 7
Número de Nusselt	Nu	0,6443	-	Ec. 11
Número de Rayleigh	Ra	0,1221	-	Ec. 10
Coeficiente de transferencia de calor por convección	h	73,293	$\frac{W}{m^2 * K}$	Ec. 12

Fuente: [1] Metcalfe and Quigley, 1975.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.1.3 Modelado

Con la geometría definida y los valores determinados para los fenómenos de radiación y convección, se pasa a realizar la simulación en el Software ANSYS, aplicando el Método de

Elementos Finitos (MEF), que es una aproximación a la solución que se calcula mediante sistemas de ecuaciones diferenciales muy complejos para resolver diversos problemas de fenómenos físicos mediante recursos computacionales. El MEF permite obtener una solución en un cuerpo de geometría compleja dividiendo el dominio en subdominios no intersecantes entre sí denominados Elementos Finitos, donde cada punto representativo es un nodo y el conjunto de estos nodos es un mallado (Ferrari y Diaz 2018).

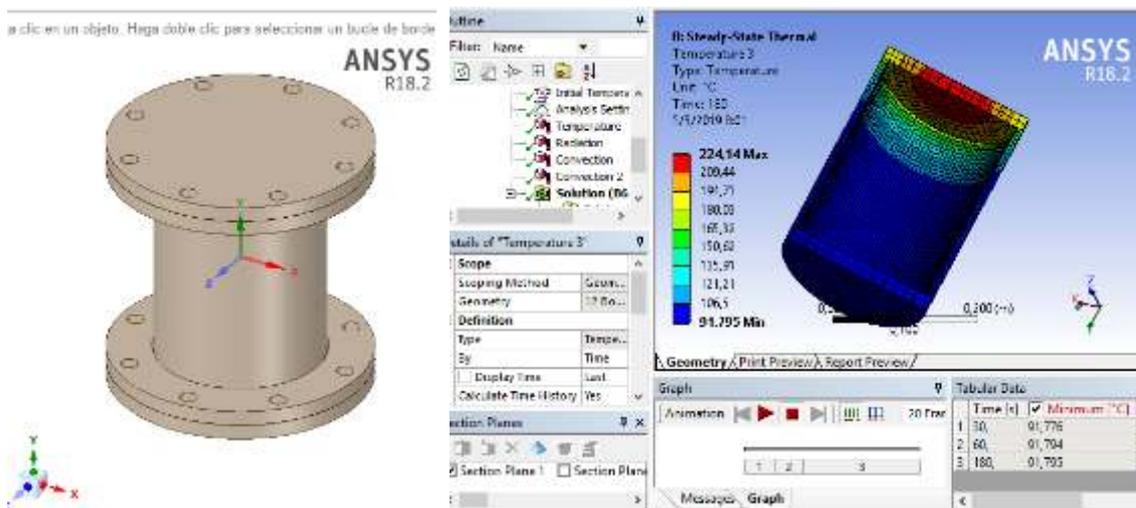


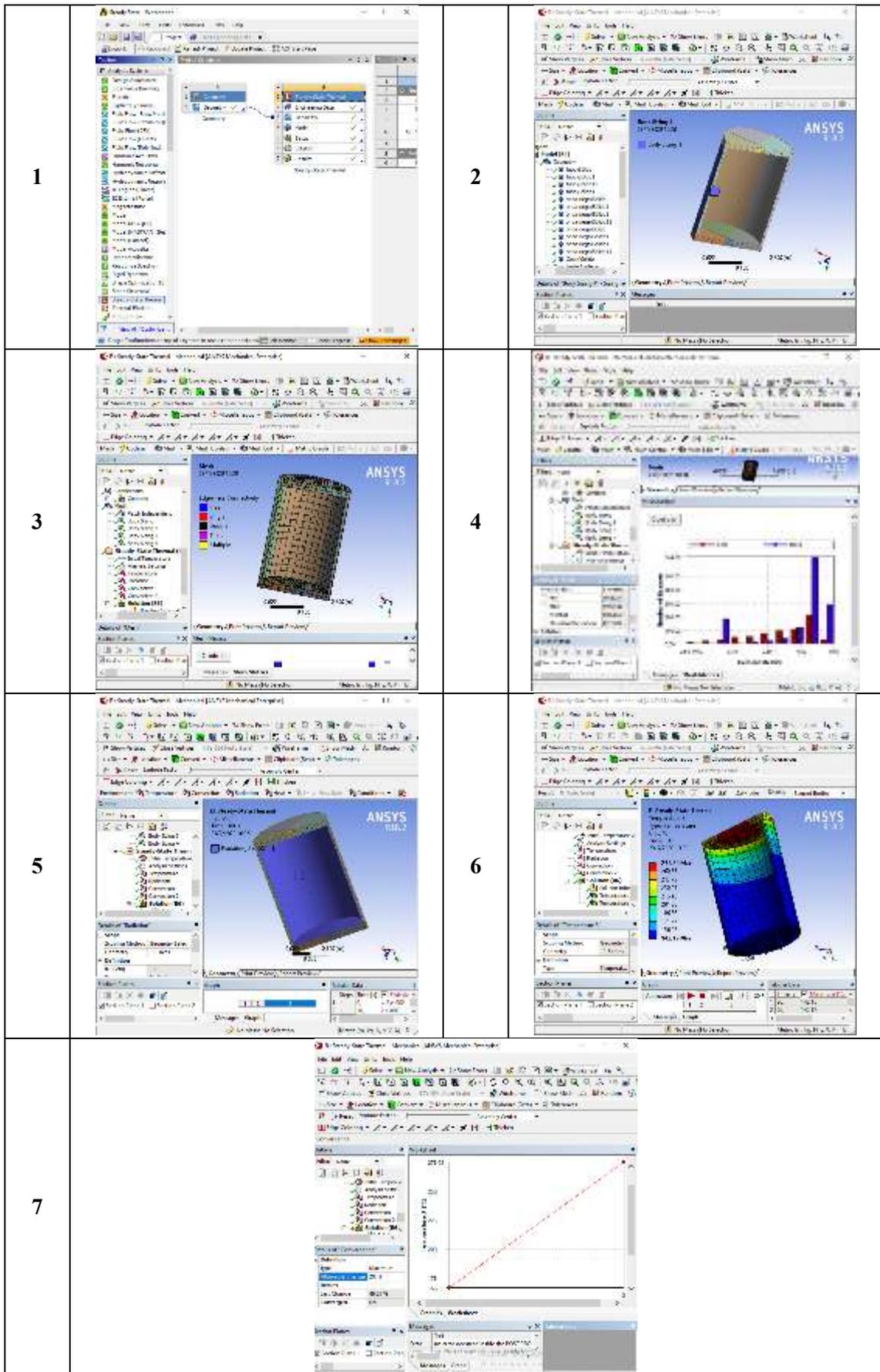
Figura 16-3: Modelado del Sistema en ANSYS Space Claim Design Manager y Análisis de la Temperatura cuando el experimento se realiza en vertical en ANSYS Mechanical.

Realizado por: Caballero, 2019.

El primer paso, es modelar los cuerpos que van a ser analizados, en este caso, se trata de una tubería de 8 in: Diámetro externo de 209,10 mm, Longitud de 300 mm y un espesor aproximado de 3 mm; y una esfera interna de 8 mm de diámetro, siendo la representación del arco eléctrico. Tras modelar la geometría (**Figura 16-3** izquierda) con las dimensiones de una tubería de 8 in, se procede a simplificarla, es decir, eliminar todos los elementos que no interesan en el análisis (sólo se deja la cámara de síntesis en la **Figura 16-3** derecha).

Una vez realizado la forma del sintetizador SCDM 18.2, se procede a utilizar ANSYS Workbench. Los materiales seleccionados son: Acero Inoxidable A-304 para la tubería y Grafito para la esfera de plasma (**Tabla 18-3** 1 y 2); y la geometría se deja preparada para realizar el mallado.

Tabla 18-3: Pasos para la elaboración del análisis MEF de la temperatura del Sintetizador.



Realizado por: Caballero, 2019.

El mallado es la división de los cuerpos, de manera que se definen los Elementos Finitos para el análisis que realiza posteriormente el programa. Hay la opción de mallado automático realizado por el programa y el que se define por el usuario. Se recomienda la segunda opción ya que se puede controlar la forma de los subelementos que, generalmente, son cubos y tetraedros regulares y es lo óptimo para el análisis porque genera una malla de alta calidad (valor cercano a 1); sin embargo, para completar los cuerpos, estos elementos deben ajustarse, lo que baja la calidad del mallado, y es lo que hay que controlar. En este caso se realizó la división por tamaño (**Tabla 18-3 3**), yendo desde 30 mm hasta 6 mm en el tamaño límite de los elementos, que fue lo máximo permitido por los recursos computacionales disponibles; y se verificó la calidad del mallado en cada análisis (**Tabla 18-3 4**), y el resultado se reflejó en el **Gráfico 2-4**.

El siguiente paso fue determinar las condiciones del fenómeno (**Tabla 18-3 5**). La temperatura inicial del medio y el equipo se fijó en 19°C, suponiendo ensayos realizados entre las 12H00 y 16H00 en la ciudad de Riobamba. Se determinó Convección en el exterior, con la constante de convección del aire de $h = 5, W/m^2 * °C$; Convección interna con un valor de $h = 73,29 W/m^2 * °C$; la Radiación del arco hasta las paredes internas de la cámara con un factor de emisividad de 0,22; y la Temperatura del Arco se estableció en 8727°C o 9000K.

Una vez, establecido todos los parámetros se procede a realizar el análisis con el programa (**Tabla 18-3 6**) y así se obtiene una serie de temperaturas en base a los resultados arrojados por el programa y recogidos en el **Gráfico 2-3**.

Del **Gráfico 2-3**, 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.

Tabla 19-3: 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 ² °C En las paredes internas		
Convección externa	Transferencia de calor por convección = 5 w/m ² °C En las paredes externas		
Tiempo de análisis	3 min		

Realizado por: Caballero, 2019.

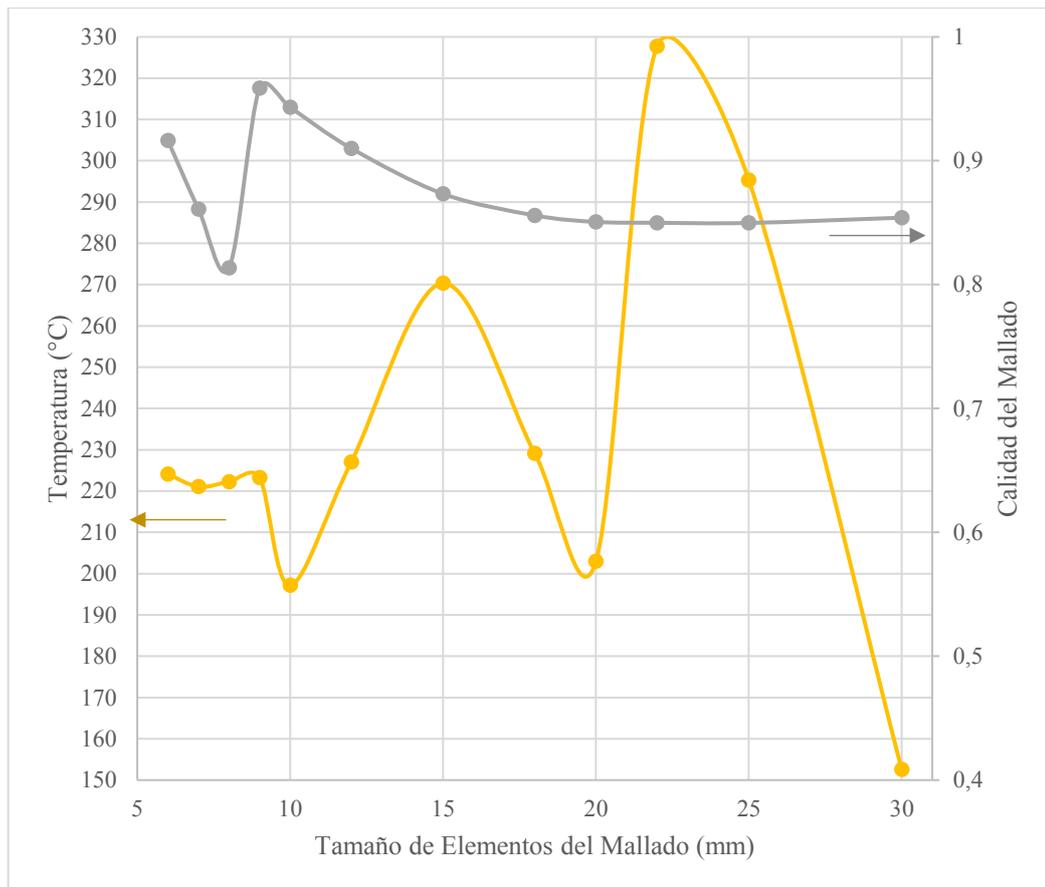


Gráfico 2-3: Convergencia de la Temperatura y la Calidad de Mallado en función de la Separación Mínima de Elementos.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.2 Cálculo del espesor de la cámara de síntesis

Se toma en cuenta las indicaciones de la norma ASME VIII División I apartado UG-28: Espesor de Carcasas y Tubos Bajo Presión Externa. El apartado UG-28 puede ser aplicado teniendo en cuenta los apéndices G-2 y G-8, los cuales indican que el recipiente a presión puede tener elementos rotacionales conectados o en su interior, siempre y cuando, la vibración no alcance la frecuencia de resonancia del acero (Boiler y Code 2010b, p. 575, 576).

Para poder realizar este proceso de cálculo, se deben definir las diferentes variables presentes en la **Tabla 20-3**, como la longitud entre soportes de $L = 300\text{mm}$; el diámetro externo de $D_o = 219,08\text{mm}$, la presión externa, que se estima de 1 atmósfera o $P_t = 0,1013\text{ MPa}$, suponiendo que la bomba pueda llegar a un vacío absoluto; y para la primera iteración, se seleccionó un espesor de 3mm por recomendación de ASME y el ingeniero miembro de la tesis. Para ver las propiedades del acero en las tablas de ASME, se recurre a fuentes de material ecuatoriano, donde se puede apreciar que los valores de Resistencia a la Fatiga (S_y) y Resistencia Última a la Tracción (S_{ut})

son de 176 y 479 MPa, respectivamente (DIPAC, 2016). Con esto, se define que el material y las propiedades es el acero inoxidable de la fila 24 de la Tabla 1A presente en el **Anexo C.1**, ya que se formará una tubería soldada, y tiene el menor valor en la tabla para la temperatura de diseño 250°C: 64,6 MPa (Boiler and Code, 2010, p. 82-85). De la misma manera, se realiza la búsqueda del Módulo de Young (E): 179GPa (**Anexo C.2**) (Boiler and Code, 2010, p. 738, 739).

$$P = 1,5 * P_t = 1,5 * 0,1013 \text{ MPa} = 0,1520 \text{ MPa}$$

$$\frac{L}{D_o/2} = \frac{300\text{mm}}{219\text{mm}/2} = 0,6846$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{219\text{mm}}{3\text{mm}} = 109,55$$

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} = \frac{4*41}{3*\left(\frac{219\text{mm}}{3\text{mm}}\right)} = 0,4990 \text{ MPa}$$

$$\frac{P_a}{P} = \frac{0,4990\text{MPa}}{0,1520\text{MPa}} = 3,3$$

Tabla 20-3: Valores para calcular el espesor de la Cámara por Presión Externa.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Esfuerzo Máximo Permitido a 250°C	S	64,6	MPa	Anexo C.1 [1]
Módulo de Young a 250°C	E	179 000	MPa	Anexo C.2 [1]
Presión Externa de Trabajo	P _t	0,1013	MPa	Estimación
Presión Externa de Diseño	P	0,1520	MPa	1,5*P _t
Espesor Mínimo Requerido	t	3	Mm	Estimación
Diámetro Exterior	D _o	219,08	Mm	Medición
Longitud entre Apoyos	L	300	Mm	Estimación
Razón para la Gráfica D	L/(D _o /2)	0,6846	-	-
Razón para la Gráfica D	D _o /t	109,55	-	-
Factor necesario para la Figura G en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D	A	0,00114	-	Anexo C.3 [2]
Factor necesario para la Figura G en la Subparte 3 de la Sección II, Parte D	B	41	MPa	Anexo C.3 [2]
Valor calculado de la Presión de Trabajo Externa Máxima Permitida para el valor supuesto de t	P _a	0,4990	MPa	Ec. 13

Fuente: [1] (Boiler y Code 2010b). [2] (Boiler y Code 2010a).

Realizado por: Caballero, 2019.

Con el espesor de lámina de 3 mm se tiene que la presión de diseño, P = 0,15 MPa es menor que la presión admisible, P_a = 0,5 MPa; con lo cual, el espesor mínimo recomendada es correcto por medio de ASME, con un amplio margen de seguridad (3,3).

3.3.1.3 Cálculo del Diámetro del Eje de Velocidad

Las características del modelo escogido, requiere que el sintetizador tenga 2 ejes: uno de rotación, para homogeneizar la temperatura y el flujo electrónico y material entre electrodos por rotación; y el segundo, que es un eje de avance, diseñado como un tornillo de potencia. Cada eje se diseña para estar en vertical, donde las cargas máximas son de compresión y tracción por el peso de los mandriles y la torsión de los motores a los ejes. Aunque si se toma en cuenta que el caso crítico sería el diseño de los ejes en horizontal, donde las cargas máximas son de tracción y torsión, se analiza en estas condiciones para obtener los diámetros, la velocidad crítica y rigidez.

3.3.1.3.1 *Diámetro de Eje de Rotación*

Este eje, colocado en la parte inferior de la cámara, va a someterse a una velocidad angular de 20000 RPM; está en vertical, lo que elimina cualquier fuerza radial; la única fuerza aplicada es la del propio peso del eje, de aproximadamente 500 g con dirección axial; y el momento torsor, viene definido por la fricción del elemento eléctrico. Este motor es uno DC de 30000 RPM, obtenido de una radial inalámbrica marca YATO 4 ½" 18V. Para el diseño en horizontal de este mismo eje, el peso que soportaría es el del mandril con el electrodo de grafito, dando un aproximado de 235g en el extremo roscado.

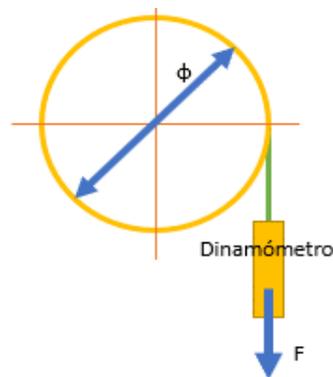


Figura 17-3: Esquema de medición del Torque necesario para mover el eje.

Realizado por: Caballero, 2019.

Para calcular el tamaño del eje, se mide la fricción que ofrecería un eje con el anillo de carbones seleccionado para la conexión eléctrica, que es de aproximadamente $230\text{N} \cdot \text{mm}$, medido como indica la **Figura 17-3** con un dinamómetro, que representa al momento torsor T de la **Figura 18-3**. Además, se toma en cuenta el acople del Mandril de Taladro de rosca de 3/8"-24 UNF (9,525 mm de rosca externa), por lo que el valor mínimo que se toma para el diseño es de 10 mm. También se añade un tope para sujetar el rodamiento necesario y contaría con un diámetro de 14mm. El cambio de sección viene suavizado por un fillet de 0,3 mm, dato obtenido del catálogo

de rodamientos SKF. Con esta información, se procede a analizar las fuerzas y momentos presentes en el eje según la **Figura 18-3**: la fuerza P representa el valor del peso del mandril y el electrodo (500 g o 4.9 N); las reacciones en A ($R_{Ay} = -3,54$ N) que es el acople al motor y C ($R_{Cy}=8.44$ N) el rodamiento, el punto B no se toma como apoyo debido a que genera una presión uniforme alrededor de todo el eje y se anula; los dos valores del cortante V_a (-3.54 N) y V_b (4.9 N), y el momento flector M_c (127,4 N * mm), junto al torsor T serán los valores utilizados para realizar los cálculos necesarios del coeficiente de seguridad en todos los puntos.

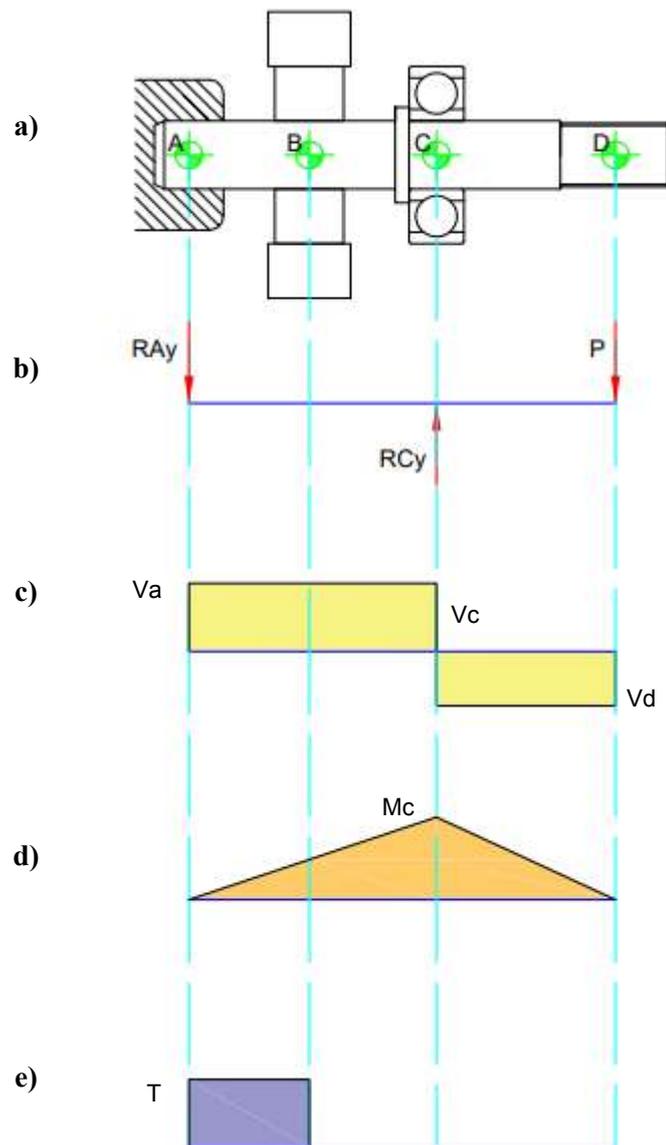


Figura 18-3: a) Esquema del eje de velocidad; b) Fuerzas en el eje; c) Diagrama de cortante; d) Diagrama de momento flector; e) Diagrama de momento torsor.

Realizad por: Caballero, 2020.

Los valores de las variables que fueron seleccionadas de la **Tabla 22-3** se encuentran a continuación en los cálculos realizados, para determinar el coeficiente de seguridad de cada punto en el eje, basándose en los cálculos del libro de Diseño Mecánico de Shigley (Budynas 2011, p. 286-294).

Factor k_a de calidad superficial. - Se recurre al **Gráfico 3-3**, donde el S_{ut} del material es de 479MPa, y $k_a=0,8$.

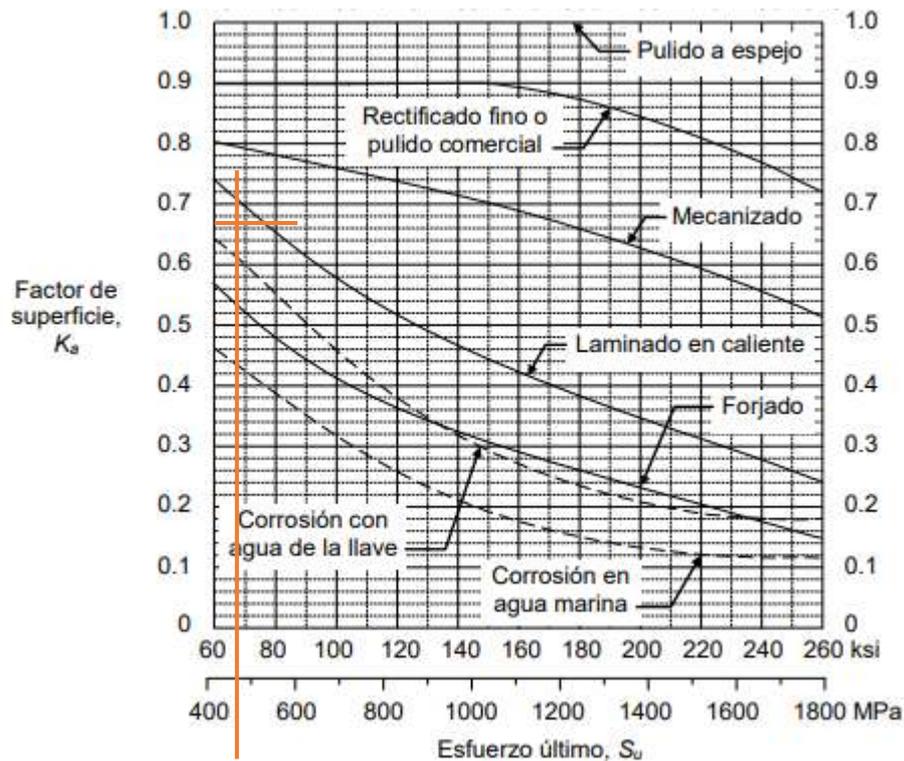


Gráfico 3-3: Factor k_a de superficie para el acero.

Fuente: Budynas, 2011.

Factor k_b de tamaño. - Se debe tener en cuenta el diámetro que en este caso es de 10mm.

$$k_b = 1,189 * d^{-0,097} = 1,189 * (10\text{mm})^{-0,097} = 0,951, \quad \text{si } 8\text{mm} < d < 250\text{mm}$$

Factor k_c de carga. - Se evalúan las cargas a las que está sometido el eje. En este caso, es flexión y torsión, por lo tanto $k_c = 1$, ya que manda la flexión.

Factor k_d de temperatura. - Se valora la temperatura de diseño de 250°C, y $k_d = 1$, debido a que la temperatura es inferior a 450°C.

Factor k_e de confiabilidad. - Se tiene en cuenta que se va a diseñar con un porcentaje de confiabilidad del 99%, y $k_e = 0,814$.

Factor k_f de efectos varios. - Al no considerar corrosión ni otros factores que puedan afectar al acero del eje, se toma en cuenta el valor de 1.

Tabla 21-3: Factor k_e de confiabilidad para el acero.

Confiabilidad (%)	50	90	99	99.9	99.99	99.999
k_e	1	0.897	0.814	0.753	0.702	0.659

Fuente: Budynas, 2011.

Así el factor de corrección es: $k = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f = 0,79 * 0,951 * 1 * 1 * 0,814 * 1 = 0,612$.

Con este valor se corrige el valor del S_{ut} del material del eje.

$$S'_e = 0,5 * S_{ut} = 0,5 * 479 = 239,5 \text{ MPa}$$

$$S_e = S'_e * k = 239,5 \text{ MPa} * 0,612 = 146,47 \text{ MPa}$$

El siguiente paso es calcular el factor de ajuste para concentración de esfuerzos y nodos sensibles, aunque el único cambio de sección se encuentra en el punto C, afectando al valor de $q=0,65$, como indica el **Gráfico 4-3**. El resto de puntos, $q=0$ debido a que no hay una concentración de esfuerzos debido a muescas o cambios de sección.

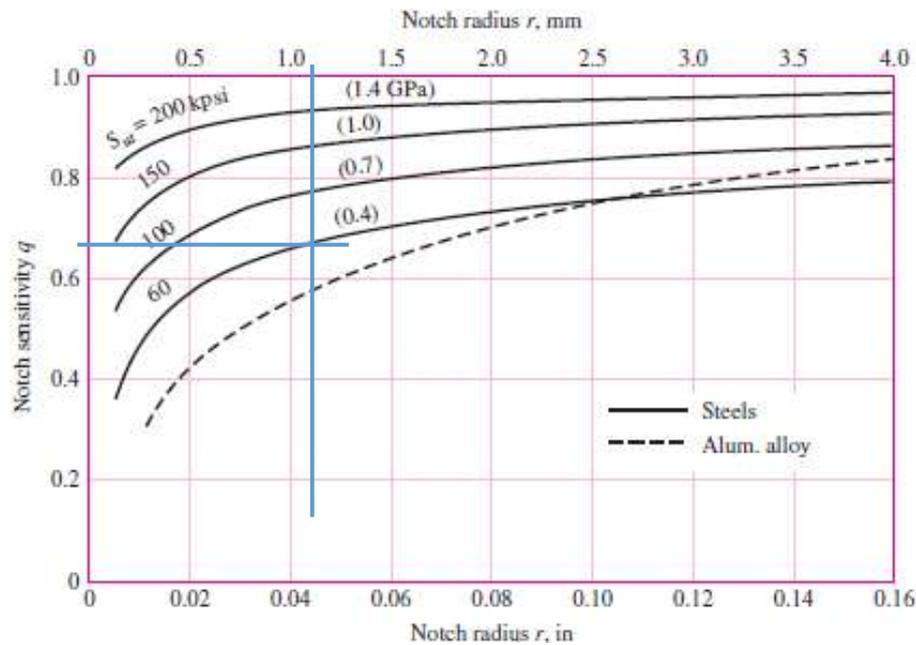


Gráfico 4-3: Factor q , relacionando el $S_{ut} = 0,41 \text{ GPa}$ y el radio $r = 1 \text{ mm}$ de redondeo del eje. $q = 0,65$.

Fuente: Budynas, 2011.

$$K_{fA} = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0 * (1,6 - 1) = 1$$

$$K_{fB} = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0 * (1,6 - 1) = 1$$

$$K_{fC} = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,65 * (1,6 - 1) = 1,39$$

$$K_{fD} = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0 * (1,6 - 1) = 1$$

Lo mismo sucede con el factor q_s .

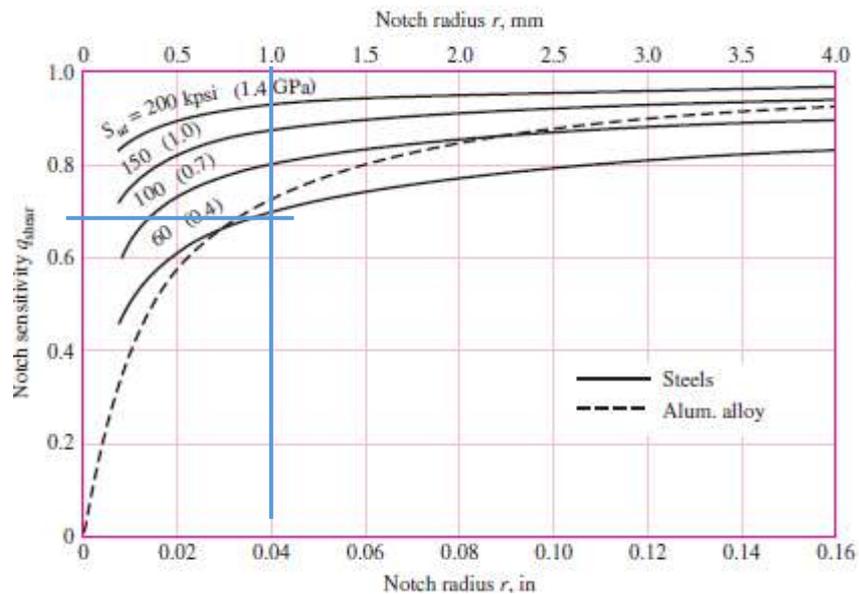


Gráfico 5-3: Factor q_s , relacionando el $S_{ut} = 0,41\text{GPa}$ y el radio $r = 1\text{ mm}$ de redondeo del eje. $q_s = 0,7$.

Fuente: Budynas, 2011, p. 296.

$$K_{fsA} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) = 1 + 0 * (1,4 - 1) = 1$$

$$K_{fsB} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) = 1 + 0 * (1,4 - 1) = 1$$

$$K_{fsC} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) = 1 + 0,7 * (1,4 - 1) = 1,28$$

$$K_{fsD} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) = 1 + 0 * (1,4 - 1) = 1$$

De esta manera, con los momentos presentados en la **Figura 18-3**, y los presentes en la **Tabla 22-3**, se calculan los momentos flectores y torsores, amplitud y medios en cada punto.

$$M_{aA} = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}}{2} = \frac{0 - 0}{2} = 0\text{ MPa}$$

$$M_{aB} = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}}{2} = \frac{69,9 - 0}{2} = 34,95\text{ MPa}$$

$$M_{aC} = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}}{2} = \frac{127,4 - 0}{2} = 63,7\text{ MPa}$$

$$M_{aD} = \frac{M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}}{2} = \frac{0 - 0}{2} = 0\text{ MPa}$$

$$M_{mA} = \frac{M_{m\acute{a}x} + M_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$M_{mB} = \frac{M_{m\acute{a}x} + M_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{69,9-0}{2} = 34,95 \text{ MPa}$$

$$M_{mC} = \frac{M_{m\acute{a}x} + M_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{127,4-0}{2} = 63,7 \text{ MPa}$$

$$M_{mD} = \frac{M_{m\acute{a}x} + M_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$T_{aA} = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{230-0}{2} = 115 \text{ MPa}$$

$$T_{aB} = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{230-0}{2} = 115 \text{ MPa}$$

$$T_{aC} = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$T_{aD} = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$T_{mA} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{230-0}{2} = 115 \text{ MPa}$$

$$T_{mB} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{230-0}{2} = 115 \text{ MPa}$$

$$T_{mC} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$T_{mD} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{0-0}{2} = 0 \text{ MPa}$$

De esta manera se calcula el coeficiente de seguridad en cada nodo.

$$n_A = \frac{1}{\frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\}} = 72,19$$

$$n_B = \frac{1}{\frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\}} = 68,12$$

$$n_C = \frac{1}{\frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\}} = 70,54$$

$$n_D = \frac{1}{\frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\}} = \infty$$

El eje queda definido por funcionalidad más que por resistencia, con un diámetro de 10 mm de espesor, que entrega un coeficiente de seguridad mínimo de 68. Todo esto se refleja en la **Tabla 22-3**.

Tabla 22-3: Valores para calcular el coeficiente de seguridad del eje por fatiga.

DIMENSIÓN	SÍMB	PTO A	PTO B	PTO C	PTO D	UNIDA D	REF.
Límite último de resistencia a la tensión	S_{ut}	479				MPa	[1]
Límite de la resistencia a la tensión	S_y	176				MPa	[1]
Factor de acabado superficial: Maquinado	k_a	0,79				-	Gráf. 3-3
Factor de tamaño: $d=10$ mm	k_b	0,951				-	Ec. 21
Factor de carga: Flexión	k_c	1				-	[2]
Factor de temperatura: $T=250^\circ\text{C}$	k_d	1				-	[2]
Factor de confiabilidad: 99%	k_e	0,814				-	Tabla 21-3
Factor de efectos varios	k_f	1				-	Estimación
Factor de reducción de estrés por fatiga	k	0,612				-	Ec. 17
Límite de fatiga del material en ensayo	S_e'	239,5				Mpa	Ec. 16
Límite de fatiga del material corregido	S_e	146,467				Mpa	Ec. 15
Sensibilidad del nodo por flexión	q	0	0	0,65	0	-	Gráf. 3-3
Factor de concentración de fatiga por flexión	K_t	1,6				-	Estimación
Factor de concentración de esfuerzo a la fatiga por flexión	K_f	1	1	1,39	1	-	Ec. 18
Sensibilidad del nodo por torsión	q_s	0	0	0,7	0	-	Gráf. 4-3
Factor de concentración de fatiga por torsión	K_{ts}	1,4				-	Estimación
Factor de concentración de esfuerzo a la fatiga por torsión	K_{fs}	1	1	1,28	1	-	Ec. 20
Torque máximo	$T_{m\acute{a}x}$	230	230	0	0	N.mm	Medición
Torque mínimo	$T_{m\acute{i}n}$	0	0	0	0	N.mm	Medición
Torque amplitud	T_a	115	115	0	0	N.mm	Ec. 24
Torque medio	T_m	115	115	0	0	N.mm	Ec. 25
Momento flexionante máximo	$M_{m\acute{a}x}$	0	69,9	127,4	0	N.mm	Medición
Momento flexionante mínimo	$M_{m\acute{i}n}$	0	0	0	0	N.mm	Medición
Momento amplitud	M_a	0	34,95	63,7	0	N.mm	Ec. 22
Momento medio	M_m	0	34,95	63,7	0	N.mm	Ec. 23
Diámetro de diseño	d	10	10	10	9,525	mm	Medición
Factor de seguridad	n	72,19	68,12	70,54	-	-	Ec. 20

Fuente: [1] DIPAC, 2016, [2] Budynas, 2011.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.3.2 Selección de Rodamiento

Si se observa la **Figura 19-3**, se verifica que la única carga a soportar es la del peso del propio eje, el electrodo y el Mandril de Taladro, cuyo peso total es de 560 g o 5,5 N. No representa una carga elevadamente significativa, por lo que, a pesar de que existen otro tipo de rodamientos, por facilidad de adquisición y precio, se opta por un cojinete de bolas. Para la selección se toman en cuenta las fuerzas axiales ($F_a = 5,5\text{N}$) y radiales ($F_r = F_{Cy} = 8,44\text{N}$) y se utiliza el catálogo de SKF, el cual indica que el rodamiento 6000 para diámetro de eje 10 tiene una capacidad dinámica

($C=4,75\text{kN}$) y una estática ($C_0=1,96\text{kN}$). Se estudió este rodamiento por su facilidad de adquisición, cuya referencia y datos se encuentran en el **Gráfico 6-3**. De la familia de los cojines de la gama 6000, se optó por el 2RSH, ya que tiene tapas y representa una ventaja en el medio de hollín de la cámara de síntesis.

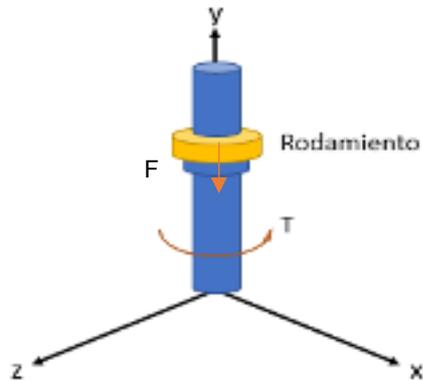


Figura 19-3: Esquema del eje de velocidad, mostrando que la única carga es axial y causada por el peso del eje.

Realizado por: Caballero, 2019.

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Mass	Designations	
d	D	B	C	C_0	P_0	Reference speed	Limiting speed ¹⁾		Bearing open or capped on both sides	capped on one side ⁴⁾
mm			kN		kN	r/min		kg	-	
9 mm	24	7	3,9	1,66	0,071	-	19 000	0,015	• 609-2RSH	609-RSH
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	34 000	0,014	• 609-2RSL	609-RSL
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	34 000	0,015	• 609-Z	609-Z
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	38 000	0,02	• 629	-
	26	8	4,75	1,96	0,083	-	19 000	0,02	• 629-2RSH	629-RSH
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	30 000	0,02	• 629-2RSL	629-RSL
10	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	30 000	0,021	• 629-Z	629-Z
	19	5	1,72	0,83	0,036	-	22 000	0,0055	61800-2RSH	-
	19	5	1,72	0,83	0,036	80 000	38 000	0,0055	61800-Z	-
	19	5	1,72	0,83	0,036	80 000	48 000	0,0053	61800	-
	22	6	2,7	1,27	0,054	-	20 000	0,01	61900-2RSH	-
	22	6	2,7	1,27	0,054	70 000	36 000	0,01	61900-Z	-
	22	6	2,7	1,27	0,054	70 000	45 000	0,01	61900	-
	26	8	4,75	1,96	0,083	67 000	40 000	0,019	• 6000	-
	26	8	4,75	1,96	0,083	-	19 000	0,019	• 6000-2RSH	6000-RSH
	26	8	4,75	1,96	0,083	67 000	34 000	0,019	• 6000-2RSL	6000-RSL

Gráfico 6-3: Catálogo de Rodamientos SKF, Rodamientos de Bolas.

Fuente: SKF Group, 2018, p. 264.

Carga estática. – La carga estática puede transformarse en una carga equivalente radial en base a factores de carga y las fuerzas que actúan en la ecuación: $P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a = 0,6 * 8,44 + 0,5 * 5,5 = 7,81 \text{ N}$; sin embargo, el catálogo indica que si la carga estática equivalente es menor a la carga radial, entonces la carga estática equivalente es igual a la carga radial y $P_0 = 8,44 \text{ N}$. Con este valor, y el factor de seguridad ($s_0=0,5$), se procede a calcular la capacidad de carga estática básica: $C_0 = s_0P_0 = 0,5 * 8,44\text{N} = 4,22 \text{ N}$; de esta manera se verifica que este valor

requerido por el mecanismo es menor que el proporcionado por el rodamiento y cumple los requisitos.

Carga dinámica. – Para el cálculo de la carga dinámica se utiliza la ecuación: $P = XF_r + YF_a = 0,56 * 8,44 + 2,3 * 5,5 = 17,38 \text{ N}$. De esta manera se verifica que también cumple para la carga dinámica, ya que es menor que la que ofrece el rodamiento.

Factor de confiabilidad. – Se selecciona un L_{10} , con confiabilidad del 90%.

Vida útil del rodamiento. – La vida nominal de un rodamiento es: $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = \left(\frac{4,75kN}{0,017kN}\right)^3 = 2,18 * 10^7$ millones de revoluciones, suponiendo que siempre gire a unas 20 000 rpm, $L_{10h} = 18,17 * 10^7$ millones de horas. Viendo estos valores, se procede a calcular la vida útil del lubricante, ya que será el punto crítico del diseño, debido a la temperatura ya que se ha comprobado que resiste las fuerzas sin problema alguno.

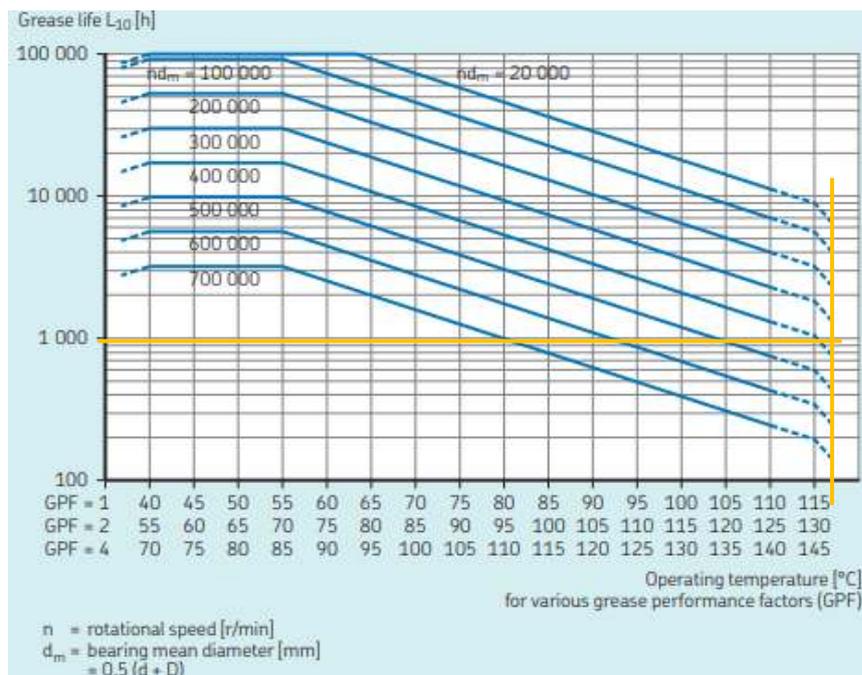


Gráfico 7-3: Catálogo de Rodamientos SKF, Vida de la Grasa con 90% de confiabilidad.

Fuente: SKF Group, 2018, p. 246.

Realizado por: Caballero, 2019.

Vida útil de la grasa. - Para determinar la vida útil de la grasa, se utiliza el **Gráfico 7-3**. Donde se entra con los valores de temperatura, velocidad angular y diámetro medio. Para la temperatura, se selecciona la máxima, que sería de 115°C, por lo que debe controlarse que la temperatura del

eje no se eleve a más de este valor. Para el valor de diámetro medio, se usa la **Ecuación 59**, tomando los valores de $D = 26 \text{ mm}$ y $d = 10 \text{ mm}$ del catálogo: $d_m = \frac{26+10}{2} = 18$. El valor de la velocidad es de 30 000 RPM. Con esto, se obtiene que la vida de la grasa es ligeramente superior a 1000 horas, pero al estar en vertical, SKF recomienda que el valor obtenido en horas se reduzca a la mitad. Por lo que debe programarse un mantenimiento cada 500 horas (SKF Group, 2018, p. 246).

3.3.1.3.3 Deformación Máxima

El primer paso para calcular la deformación máxima es determinar la inercia del eje:

$$I = \pi * \frac{r^4}{64} = \pi * \frac{(5\text{mm})^4}{64} = 30,68\text{mm}^4$$

Lo siguiente es calcular los datos presentados en la **Figura 8-3**, para calcular las deformaciones máximas: admisible, entre apoyos y en el punto de aplicación de la fuerza.

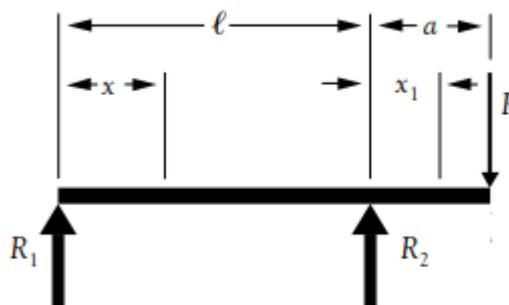


Gráfico 8-3: Nomenclatura para calcular deformaciones.

Fuente: American Forest & Paper Association 2007.

$$\delta_{ES} = \frac{Pa^2}{9\sqrt{3}EI} = \frac{4,9\text{N} * 26\text{mm} * (34\text{mm})^2}{9\sqrt{3} * 179000\text{MPa} * 30,68\text{mm}^4} = 0,0017\text{mm}$$

$$\delta_F = \frac{Pa^2}{3EI}(1+a) = \frac{4,9\text{N} * (26\text{mm})^2}{3 * 179000\text{MPa} * 30,68\text{mm}^4} (34 + 26)\text{mm} = 0,0121\text{mm}$$

$$\delta_{adm} = 0,0003L = 0,0003 * 75\text{mm} = 0,0225\text{mm}$$

$$\delta \leq \delta_{adm} \rightarrow 0,0121\text{mm} \leq 0,0225\text{mm}$$

3.3.1.3.4 Velocidad Crítica

Rayleigh-Ritz. - La velocidad crítica del eje necesita el peso de cada componente en el eje, en este caso el mandril y el electrodo, y la deformación que genera:

$$n_C = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sum w_i \delta_i}{\sum w_i \delta_i^2}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9810 \frac{mm}{s^2}}{0,0121mm}} = 8611,34 \text{ rpm}$$

Dunkerley. - La velocidad de Dunkerley es la misma que la de Rayleigh-Ritz, ya que no existe otra masa que deforme el eje.

Tabla 23-3: Valores para calcular la Deformación y la Velocidad Crítica.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIAS
Longitud del eje	L	75	mm	Medición
Inercia del eje	I	30,680	mm ⁴	Ec. 66
Carga	P	4,9	N	Estimación
Distancia entre apoyos	l	34	mm	Medición
Distancia del soporte al punto de aplicación	a	26	mm	Medición
Módulo de Young	E	179000	Mpa	Estimación
Deformación máxima entre soportes	δ_{ES}	0,0017	mm	Ec.
Deformación máxima en el punto de aplicación de la fuerza	δ_F	0,0121	mm	Ec.
Deformación máxima tolerable	δ_{ADM}	0,0225	mm	Ec. 63
Velocidad crítica por Rayleigh-Ritz	η_C	8611,345	rpm	Ec. 64
Velocidad crítica por Dunkerley	η_C	8611,345	rpm	Ec. 65

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.4 Eje de avance

3.3.1.4.1 Diámetro del tornillo de potencia

Para el eje de avance, se toma en cuenta el mecanismo de tornillo de potencia, que es una de las maneras más económicas de realizar la función de ascenso y descenso. Se verifica si el tornillo comercial de 5/16" in (8 mm) de rosca ACME, con un collarín de 16 mm de rosca es apto para elevar y descender con el eje.

El paso del tornillo de potencia es de:

$$l = \frac{1}{A \cdot \text{hilos}} = \frac{1}{6,350mm \cdot 4 \text{hilos}} = 1,588mm$$

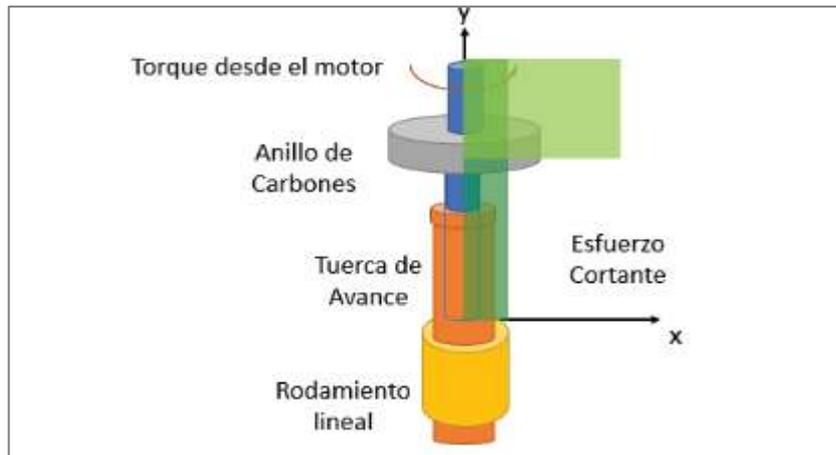


Figura 20-3: Esquema del eje de avance y Torque generado en el tornillo.

Realizado por: Caballero, 2019.

Se debe tomar en cuenta que, para los torques de subida y bajada de la carga se les debe añadir el momento generado por el elemento que transmite electricidad al eje para generar la carga del Arco de Eléctrico, como se indica en la **Figura 20-3**. Los esfuerzos en el tornillo (elemento azul) se producen por el torque entrando desde el motor, y consumiéndose en su mayoría en el anillo de carbones que genera fricción, por lo que la zona crítica es la del inicio.

$$T'_s = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{1 + \pi f d_m \sec(\alpha)}{\pi d_m - f l \sec(\alpha)} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} = \frac{9,8N \cdot 6,922mm}{2} \left(\frac{1,588mm + \pi \cdot 0,25 \cdot 6,922mm \cdot \sec(14,5^\circ)}{\pi \cdot 6,922mm - 0,25 \cdot 1,588mm \cdot \sec(14,5^\circ)} \right) + \frac{9,8N \cdot 0,19 \cdot 13,953mm}{2} = 24,440Nmm$$

$$T'_b = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m \sec(\alpha) - 1}{\pi d_m \sec(\alpha) + f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} = \frac{9,8N \cdot 6,922mm}{2} \left(\frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 6,922mm \cdot \sec(14,5^\circ) - 1,588mm}{0,25 \cdot 1,588mm \cdot \sec(14,5^\circ) + \pi \cdot 6,922mm} \right) + \frac{9,8N \cdot 0,19 \cdot 13,953mm}{2} = 19,156 Nmm$$

$$T_s = T'_s + T = 24,440Nmm + 230Nmm = 254,440Nmm$$

$$T_b = T'_b + T = 19,156Nmm + 230Nmm = 249,156Nmm$$

A partir de los torques, se calculan los esfuerzos cortantes máximo y mínimo, y a partir de ellos, los esfuerzos amplitud y medio:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16T_s}{\pi d_r^3} = \frac{16 \cdot 254,440Nmm}{\pi \cdot (5,906mm)^3} = 22,297MPa$$

$$\tau_{m\acute{i}n} = \frac{-16T_b}{\pi d_r^3} = \frac{16 \cdot 249,156Nmm}{\pi \cdot (5,906mm)^3} = -21,834MPa$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{22,297MPa - (-21,834MPa)}{2} = 22,065MPa$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{22,297\text{MPa} + (-21,834\text{MPa})}{2} = 0,232\text{MPa}$$

Se debe tomar en cuenta el esfuerzo de aplastamiento que se calcula:

$$\sigma_y = \frac{-4F}{\pi d_f^2} = \frac{-4 * 9,8\text{N}}{\pi * (5,906\text{mm})^2} = -0,832\text{Nmm}$$

A partir de todos los esfuerzos, se calculan el amplitud equivalente y el medio amplitud, para determinar el coeficiente de seguridad:

Tabla 24-3: Valores para calcular el factor de seguridad del Tornillo de Potencia.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIAS
Diámetro exterior del tornillo	d	7,938	mm	Medición
Diámetro de raíz	d _r	5,906	mm	Medición
Diámetro medio	d _m	6,922	mm	Medición
Diámetro de tracción	d _t	3,874	mm	Medición
Avance por vuelta	A	6,350	mm	Medición
Número de hilos	h	4	hilos	Medición
Paso	l	1,588	mm	Medición
Carga	F	9,8	N	Medición
Diámetro del collarín	d _c	13,953	mm	Medición
Coeficiente de rozamiento del tornillo	f	0,25	-	[1]
Coeficiente de rozamiento del collarín	f _c	0,19	-	[1]
Ángulo de hélice	α	14,5	°	Medición
Torque generado por el motor	T	230	N.mm	Medición
Torque de subida de la carga	T' _s	24,440	N.mm	Ec. 26
Torque de subida	T _s	254,440	N.mm	Ec. 28
Torque de bajada de la carga	T' _b	19,156	N.mm	Ec. 27
Torque de bajada	T _b	249,156	N.mm	Ec. 28
Esfuerzo cortante máximo	τ _{máx}	22,297	MPa	Ec. 32
Esfuerzo cortante mínimo	τ _{mín}	-21,834	MPa	Ec. 32
Esfuerzo cortante amplitud	τ _a	22,065	MPa	Ec. 33
Esfuerzo cortante medio	τ _m	0,232	MPa	Ec. 33
Esfuerzo de aplastamiento	σ _y	-0,832	MPa	Ec. 31
Esfuerzo equivalente amplitud	σ _{a eq}	38,218	MPa	Ec. 34
Esfuerzo equivalente medio	σ _{m eq}	0,923	MPa	Ec. 34
Límite de la resistencia a la tensión	S _y	220	MPa	[2]
Límite Último de resistencia a la tensión	S _{ut}	520	MPa	[2]
Límite de fatiga del material corregido	S _e	130	MPa	Ec. 15
Factor de seguridad	N	3,4	-	Ec. 35

Fuente: [1] (Budyas, 2011), [2] (DIPAC 2016).

Realizado por: Caballero, 2019.

$$\sigma_{a \text{ eq}} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} = \sqrt{0^2 + 3 * (22,065\text{MPa})^2} = 38,218\text{MPa}$$

$$\sigma_{m \text{ eq}} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} = \sqrt{(-0,832\text{MPa})^2 + 3 * (0,232\text{MPa})^2} = 0,923\text{MPa}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_{a \text{ eq}}}{S_e} + \frac{\sigma_{m \text{ eq}}}{S_y} = \frac{38,218\text{MPa}}{130\text{MPa}} + \frac{0,923\text{MPa}}{220\text{MPa}}$$

$$n = 3,4$$

El tornillo comercial tiene un factor de seguridad de 3,4 si se determina con las **Ecuaciones 15 y 26-35**, por lo que es apto para su uso en esta aplicación de avance del electrodo.

3.3.1.4.2 Eje de avance

Para diseñar el eje hueco que se va a desplazar en el tornillo de potencia seleccionado, se toma en cuenta el esfuerzo axial a tracción que genera el propio peso del eje, el mandril del taladro y el electrodo, que no se consume en el experimento, lo que genera un peso de aproximadamente 9,8N, una carga despreciable y queda en función de la facilidad de construcción y el rodamiento lineal disponible, ya que no se somete a giro o fuerzas externas en vertical, ya que el collarín es el que soporta la carga. En horizontal, se produce una flexión que no genera carga dinámica, así que sólo se determina su deformación estática en la posición extrema y se aprecia que es mucho menor a la deformación admisible.

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{FL}{AE} = \frac{9,8\text{N} * 226\text{mm}}{\frac{\pi}{4} * ((16\text{mm})^2 - (10\text{mm})^2) * 179000\text{MPa}} = 0,0001\text{mm}$$

$$\delta_{\text{adm}} = 0,0003L = 0,0003 * 226\text{mm} = 0,0678\text{mm}$$

$$\delta \leq \delta_{\text{adm}} \rightarrow 0,0001\text{mm} \leq 0,0678\text{mm}$$

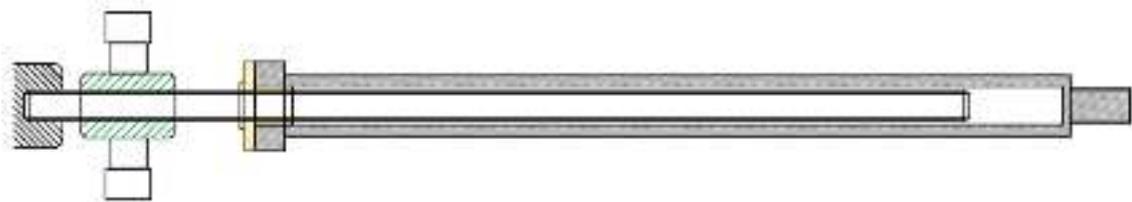


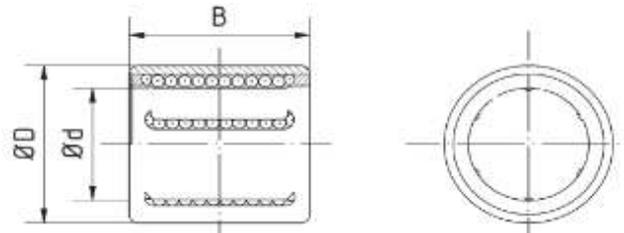
Figura 21-3: Esquema del eje de avance.

Realizado por: Caballero, 2019

3.3.1.4.3 Selección del rodamiento de avance

Para esta aplicación, se necesita que el eje avance una carrera de aproximadamente 20 cm sin que genere desviaciones del centro, para esto se requiere del uso de un rodamiento lineal que no genera oposición al desplazamiento axial, pero sí al radial. Comercialmente, se destacan los diámetros de 12 y 16 mm, pero por construcción se selecciona el de 16 mm NTN. Según el catálogo, la vida

útil del eje se calcula con la carga radial, y teóricamente, no se va a producir ninguna carga de este tipo, por su parte, la axial no tiene ninguna restricción, así que, únicamente, hay que controlar que la temperatura del rodamiento no sobrepase los 110°C (NTN-SNR 2015).



Referencia	Dimensiones [mm]			Número de circuitos de bolas	Capacidad de carga dinámica [N]	Capacidad de carga estática [N]	Peso [g]
	Ød	ØD	B				
KH1228	12	19	28	5	605	495	18
KH1428	14	21	28	5	600	505	21
KH1630	16	24	30	5	775	600	27
KH2030	20	28	30	6	1 050	880	33
KH2540	25	35	40	6	1 930	1 560	66
KH3050	30	40	50	7	2 700	2 450	95

Gráfico 9-3: Catálogo de Rodamientos NTN, Rodamientos de Bolas.

Fuente: NTN-SNR 2015, p. 22.

3.3.1.5 Placas

3.3.1.5.1 Placa de Soporte

Para que los ejes queden en su lugar, disminuyendo la vibración y ofreciendo un apoyo a los rodamientos, tiene que instalarse un medio que fije estos elementos, pero al mismo tiempo, debe aislarse térmica y eléctricamente del resto de la cámara ya que, si llegase a transmitirse los 250 A que se necesitan para el arco eléctrico con la cámara, se destruirían los motores con su sistema de control, se pondría en riesgo la integridad del equipo y, más importante, se pondría en riesgo la vida del usuario o usuarios del sintetizador. Se optó por un disco de acero, donde se colocan e inmovilizan los rodamientos y se une al anillo de carbones que entrega la energía eléctrica al sistema. Todo esto, se atornilla a un disco de porcelanato como se puede apreciar en la **Figura 22-3**. Este material tiene mayor resistencia que la cerámica tradicional a abrasión, esfuerzos y temperatura, no absorbe agua y no se dilata (LaCantera, 2017, p.1). La fuerza que la placa tiene que soportar es el peso del eje con sus complementos. El eje más crítico es este caso es el de avance. Suponiendo un peso de 800 g con todos los accesorios, se tiene 7,84 N de fuerza aplicada, como indica la **Figura 22-3**.

Tabla 25-3: Propiedades del Porcelanato.

PROPIEDAD	VALOR	VALOR DE NORMA	UNIDAD	NORMA
Absorción de Agua	1,3	0,5-3	%	ISO 10545-3
Módulo Elástico	37	30	MPa	ISO 10545-4
Fuerza de Rotura	1843	1100	N	ISO 10545-13
Módulo de Rotura	0,52	0,30	MPa	ISO 10545-13

Fuente: LaCantera, 2017, p. 5.

Con las **Ecuaciones 36** y **37**, se analiza el área mínima de contacto que la placa debe tener con la cerámica, para soportar el peso del eje y sus complementos. Primero, se parte del esfuerzo admisible por el material usando como referencia los valores de la **Tabla 25-3**, para hallar el área mínima necesaria para soportar los esfuerzos con un margen de seguridad de 3,5:

$$\frac{\tau_T}{n} = \frac{F}{A} \rightarrow A = \frac{nF}{\tau_T} = \frac{3,5 \cdot 7,84 \text{N}}{0,3 \text{MPa}} = 91,47 \text{mm}^2$$

Una vez obtenida el área, se procede a calcular el espesor necesario:

$$A = \pi D_e s \rightarrow s = \frac{A}{\pi D_e} = \frac{91,74 \text{mm}^2}{\pi \cdot 150 \text{mm}} = 0,19 \text{mm}$$

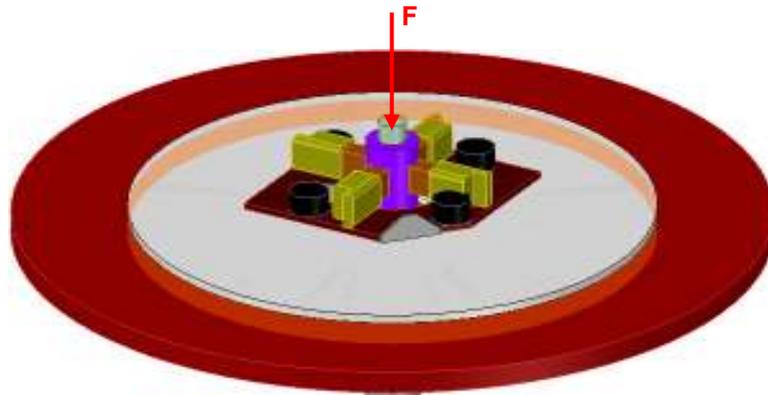


Figura 22-3: Esquema del eje generando carga en el eje y, y se resalta la zona de esfuerzo en color naranja.

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 26-3: Valores para calcular el Espesor Mínimo.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Esfuerzo cortante del porcelanato	τ_T	0,3	Mpa	[1]
Coefficiente de Seguridad	n	3,5	-	Estimación
Fuerza aplicada	F	7,84	N	Medición
Área necesaria para soportar la carga	A	91,47	mm ²	Ec. 36
Diámetro externo de la placa	D_e	150	mm	Medición
Espesor mínimo requerido de contacto	s	0,19	mm	Ec. 37

Fuente: [1] LaCantera, 2017, p. 5

Realizado por: Caballero, 2019.

El espesor necesario es mínimo, así que queda en función del espesor comercial de 8-10 mm.

3.3.1.5.2 Placa de la Brida de Observación

La brida de observación se va a fabricar en Acero A-304, teniendo en cuenta la necesidad de que el medio sea inerte y va a estar en contacto con el medio de síntesis. Las dimensiones se calculan en base a un acceso de 6 in de diámetro (ASME 2003) y se transforma en un acceso rectangular por comodidad con una relación de 3 a 4 entre la altura y la base, tomando en cuenta las áreas.

Tabla 27-3: Dimensiones de la Brida Rectangular.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	CÍRCULO EXTERIOR	CÍRCULO INTERIOR	CÍRCULO DEL RELIEVE
Diámetros de la brida	D	279,4	170,688	215,9
Área circular	$A_{Cír}$	61311,60	22882,10	36609,62
Altura teórica	h'	285,92	174,67	220,94
Base teórica	b'	214,44	131,00	165,70
Altura seleccionada	h	285	175	220
Base seleccionada	b	215	130	165
Área cuadrada	A_{Cuad}	61275	22750	36300

Realizado por: Caballero, 2019.

Una vez obtenidas las dimensiones, se calcula el coeficiente de seguridad con un espesor comercial de 6 mm con las **Ecuaciones 38** y **39**, con el caso de que los lados cortos están libres y los largos se consideran fijos por la disposición de los pernos, como se puede verificar en la **Figura 23-3**.

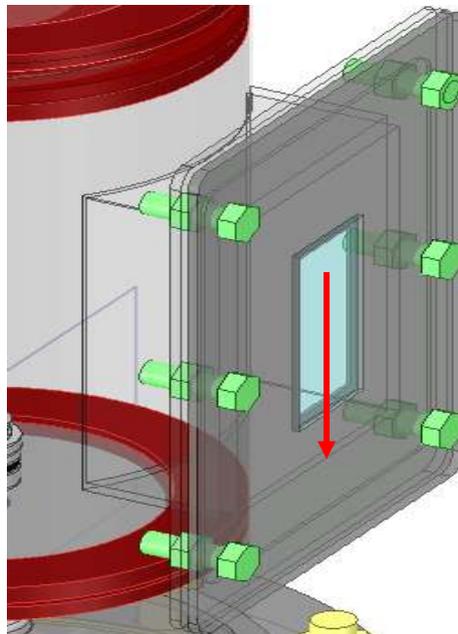


Figura 23-3: Ventana de Observación y fuerza cortante causada por el peso.

Realizado por: Caballero, 2019.

El cálculo para el coeficiente de seguridad para la brida cuadrada comienza definiendo largo (a=175mm), ancho (b=130mm) y espesor (t=6mm) que es un valor comercial. Lo primero es determinar la relación a/b para hallar las variables necesarias para aplicar las ecuaciones con la **Tabla 5-2**.

$$\frac{a}{b} = \frac{175\text{mm}}{130\text{mm}} = 1,3462 \rightarrow \alpha = 0,02569, \beta = 0,47970$$

Entonces el esfuerzo máximo producido queda:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{\beta q b^2}{t^2} = \frac{0,47970 * 0,10132\text{MPa} * (130\text{mm})^2}{(6\text{mm})^2} = 22,817\text{MPa}$$

Y considerando que la cámara se vacía hasta llegar a un vacío absoluto, en teoría, y se llena hasta estar a presión atmosférica, los esfuerzos medio y amplitud quedan:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{22,817\text{MPa} - 0\text{MPa}}{2} = 11,408\text{MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{22,817\text{MPa} + 0\text{MPa}}{2} = 11,408\text{MPa}$$

Entonces el coeficiente de seguridad es de:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{11,408\text{MPa}}{205\text{MPa}} + \frac{11,408\text{MPa}}{135\text{MPa}} \rightarrow n = 7,13$$

La deformación máxima y la admisible se evalúan también:

$$y_{\text{máx}} = \frac{\alpha q b^4}{E t^3} = \frac{0,02569 * 0,10132\text{MPa} * (130\text{mm})^4}{179000\text{MPa} * (6\text{mm})^3} = 0,019\text{mm}$$

$$y_{\text{adm}} = 0,0003 * 175\text{mm} = 0,0525\text{mm}$$

$$y_{\text{máx}} < y_{\text{adm}}$$

Se verifica en la **Tabla 28-3** que el espesor de 6 mm es suficiente tanto por resistencia como por rigidez. Aunque, se debe considerar también el diseño con una ventana de vidrio de soldadura para verificar por parte del operario si el experimento es correcto utilizando las mismas fórmulas y proceso para el caso anterior, sin embargo, cambian las constantes debido al tamaño y los apoyos, ya que se consideran todos simplemente apoyados.

Tabla 28-3: Verificación de espesor de la Brida de Observación.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Longitud mayor	a	175	mm	Medición
Longitud menor	b	130	mm	Medición
Espesor	t	6	mm	Estimación
Carga	q	0,10132	Mpa	Estimación
Relación de longitudes	a/b	1,3462	-	-
Constante de forma	β	0,47970	-	Tabla 5-2
Constante de forma	α	0,02569	-	Tabla 5-2
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\text{máx}}$	22,817	MPa	Ec. 38
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\text{mín}}$	0	MPa	Estimación
Esfuerzo amplitud	σ_a	11,408	MPa	Ec. 33
Esfuerzo medio	σ_m	11,408	MPa	Ec. 33
Límite de la resistencia a la tensión	S_y	135	MPa	[1]
Límite Último de resistencia a la tensión	S_{ut}	410	MPa	[1]
Módulo de Young	E	179000	MPa	[2]
Deformación máxima	$y_{\text{máx}}$	0,019	mm	Ec. 39
Deformación admisible	y_{adm}	0,0525	mm	Ec. 63
Coefficiente de seguridad	n	7,13	-	Ec. 40

Fuente: [1] DIPAC 2016, [2] Boiler y Code 2010a.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.5.3 Vidrio de Observación

Los cálculos se realizan de la misma manera. Únicamente cambian los valores de los límites del material.

$$\frac{a}{b} = \frac{108\text{mm}}{50\text{mm}} = 2,16 \rightarrow \alpha = 0,1146, \beta = 0,6267$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{\beta q b^2}{t^2} = \frac{0,6267 * 0,10132\text{MPa} * (108\text{mm})^2}{(3\text{mm})^2} = 17,639\text{MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{17,639\text{MPa} - 0\text{MPa}}{2} = 8,819\text{MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{17,639\text{MPa} + 0\text{MPa}}{2} = 8,819\text{MPa}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{8,819\text{MPa}}{18,2\text{MPa}} + \frac{8,819\text{MPa}}{28,4\text{MPa}} \rightarrow n = 1,07$$

$$y_{\text{máx}} = \frac{\alpha q b^4}{E t^3} = \frac{0,1146 * 0,10132\text{MPa} * (108\text{mm})^4}{71700\text{MPa} * (3\text{mm})^3} = 0,0317\text{mm}$$

$$y_{\text{adm}} = 0,0003 * 108\text{mm} = 0,0324\text{mm}$$

$$y_{\text{máx}} < y_{\text{adm}}$$

Tabla 29-3: Verificación de espesor del Vidrio de Observación.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Longitud mayor	a	108	mm	Medición
Longitud menor	b	50	mm	Medición
Espesor	t	3	mm	Estimación
Carga	q	0,10132	Mpa	Estimación
Relación de longitudes	a/b	2,16	-	-
Constante de forma	β	0,6267	-	Tabla 5-2
Constante de forma	α	0,1146	-	Tabla 5-2
Esfuerzo máximo	$\sigma_{\text{máx}}$	17,6385	MPa	Ec. 38
Esfuerzo mínimo	$\sigma_{\text{mín}}$	0	MPa	Estimación
Esfuerzo amplitud	σ_a	8,819	MPa	Ec. 33
Esfuerzo medio	σ_m	8,819	MPa	Ec. 33
Límite de la resistencia a la tensión	S_y	28,4	MPa	[1]
Límite Último de resistencia a la tensión	S_{ut}	28,4	MPa	[1]
Módulo de Young	E	71700	MPa	[1]
Deformación máxima	$y_{\text{máx}}$	0,0317	mm	Ec. 39
Deformación admisible	y_{adm}	0,0324	mm	Ec.
Coefficiente de seguridad	n	1,07	-	Ec. 40

Fuente: [1] Euroglas 2001.

Realizado por: Caballero, 2019.

En la **Tabla 29-3**, se observa que el coeficiente de seguridad es de apenas 1,07, sin embargo, la presión con la que se calcula es un valor al que ninguna bomba comercial llega, ya que sería un vacío absoluto teórico y por lo tanto, el cálculo se acepta.

3.3.1.6 Selección de los Pernos

3.3.1.6.1 Pernos para las Placas

En las placas que fijan los ejes se pueden encontrar: la fuerza causada por el peso de los objetos y el momento generado por los anillos de carbones. Seleccionando de nuevo la placa del eje de avance por ser la más pesada, y por lo tanto crítica, tenemos las fuerzas aplicadas en la **Figura 24-3**, y como resultado, se tiene que los pernos más críticos, serán los externos por soportar todo el peso, y todos están bajo la misma carga.

El proceso de cálculo comienza determinando el valor del momento, que es el mismo que actúa en el eje de 230 Nmm (**Sección 3.3.1.3.1**) y un peso de 1,2 Kg aproximadamente del eje con todos sus accesorios de sujeción (11,93 N), y se aplica la **Ecuaciones 41-55**.

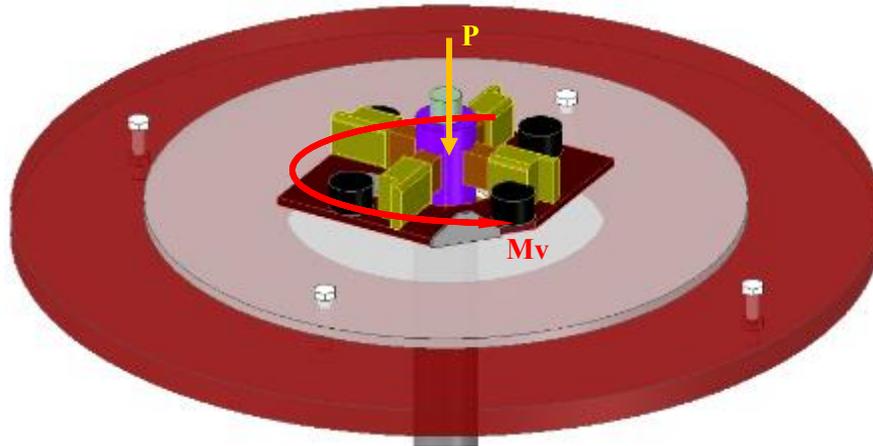


Figura 24-3: Distribución de Pernos: 2 internos y 2 externos. Peso (P), que causa tracción primaria y Momento (M_V) que causa corte secundario intermitente.

Realizado por: Caballero, 2019.

Para realizar el cálculo del coeficiente de seguridad de los pernos se empieza definiendo las fuerzas que actúan, en este caso: cortante secundaria causado por el momento, fuerza de tracción primaria causada por el peso y la precarga del perno:

$$V_i'' = \frac{M_V \cdot r_i}{r_1^2 + r_{2i}^2 + r_{3i}^2 + r_{4i}^2} = \frac{230 \text{ Nmm} \cdot 93 \text{ mm}}{2 \cdot (93 \text{ mm})^2} = 1,09 \text{ N}$$

$$P_i' = \frac{P}{\# \text{Pernos}} = \frac{11,93 \text{ N}}{2} = 5,96 \text{ N}$$

$$F_i = 0,75 S_p A_t = 0,75 \cdot 310 \text{ MPa} \cdot 5,03 \text{ mm}^2 = 1169 \text{ N}$$

Tabla 30-3: Propiedades mecánicas de los pernos y fuerzas aplicadas.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Tipo de Perno	-	M3	-	Estimación
Número de pernos	#Pernos	2	-	Estimación
Área de esfuerzo a la tensión	A_t	5,03	mm ²	[1]
Área del diámetro menor	A_m	4,47	mm ²	[1]
Grado del Perno	-	4.8	-	Medición
Resistencia a la Tracción Mínima	S_y	340	MPa	[1]
Resistencia Última a la Tracción Mínima	S_{ut}	420	MPa	[1]
Resistencia de prueba mínima	S_p	310	MPa	[1]
Momento	M_V	203	Nmm	Medición
Radio de aplicación	r_1	93	mm	Medición
Fuerza cortante secundaria	V''	1,09	N	Ec. 42
Peso del conjunto	P	11,93	N	Medición
Fuerza de tracción primaria	P'	5,96	N	Ec. 43
Precarga del perno	F_i	1169	N	Ec. 45

Fuente: [1] Budyas, 2011.

Realizado por: Caballero, 2019.

El siguiente paso, es determinar la constante de la junta (**Tabla 31-3**). Para calcular la constante elástica de la junta, hay que tener en cuenta la forma y los materiales sujetos por el perno como indica la **Figura 15-2** en base a la **Ec. 46, 49-51**.

Tabla 31-3: Cálculo de la constante elástica de la junta.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Área mínima del Perno	A_b	4,47	mm ²	[1]
Módulo de Young del Perno	E_b	206000	MPa	[1]
Longitud de la junta	l_b	11	mm	Medición
Rigidez del Perno	k_b	83710,91	-	Ec. 49
Módulo de Young del Porcelanato	E_1	37	MPa	[2]
Diámetro hueco	d	3	mm	Medición
Diámetro exterior menor del cono 1	D_1	5,5	mm	Estimación
Espesor del Porcelanato 1	l_1	5,5	mm	Medición
Rigidez del Porcelanato 1	k_{m_1}	285,07	-	Ec. 50
Diámetro exterior menor del cono 2	D_2	11,85	mm	Estimación
Espesor del Porcelanato 2	l_2	2,5	mm	Medición
Rigidez del Porcelanato 2	k_{m_2}	1923,55	-	Ec. 50
Módulo de Young de la Placa	E_3	179000	MPa	[3]
Diámetro exterior menor del cono 3	D_3	5,5	mm	Estimación
Espesor de la Placa de acero	l_3	3	mm	Medición
Rigidez de la Placa de acero	k_{m_3}	1845928,434	-	Ec. 50
Rigidez del Material	k_m	248,244	-	Ec.51
Constante elástica de la junta	c	0,997	-	Ec. 46

Fuente: [1] Budynas, 2011, [2] LaCantera 2017, [3] Boiler y Code 2010a.

Realizado por: Caballero, 2019.

Para hallar la constante elástica de la junta, se empieza con la rigidez del perno:

$$k_b = \frac{A_b E_b}{l_b} = \frac{4,47mm^2 * 206000MPa}{11mm} = 83710,91$$

El siguiente paso es calcular la rigidez de la junta teniendo en cuenta el acero y la placa de cerámica calculando los 3 conos: (1) de Porcelanato incompleto, (2) de Porcelanato completo y (3) de acero (**Figura 15-2**):

$$k_{m_1} = \frac{0,5774 \pi E d}{\ln\left(\frac{(1,155 l + D - d)(D + d)}{(1,155 l + D + d)(D - d)}\right)} = \frac{0,5774 \pi * 37MPa * 3mm}{\ln\left(\frac{(1,155 * 5,5mm + 5,5mm - 3mm)(5,5mm + 3mm)}{(1,155 * 5,5mm + 5,5mm + 3mm)(5,5mm - 3mm)}\right)} = 285,07$$

$$k_{m_2} = \frac{0,5774 \pi E d}{\ln\left(\frac{(1,155 l + D - d)(D + d)}{(1,155 l + D + d)(D - d)}\right)} = \frac{0,5774 \pi * 37MPa * 3mm}{\ln\left(\frac{(1,155 * 2,5mm + 11,85mm - 3mm)(11,85mm + 3mm)}{(1,155 * 2,5mm + 11,85mm + 3mm)(11,85mm - 3mm)}\right)} = 1923,55$$

$$k_{m_3} = \frac{0,5774 \pi E d}{\ln\left(\frac{(1,155 l + D - d)(D + d)}{(1,155 l + D + d)(D - d)}\right)} = \frac{0,5774 \pi * 179000MPa * 3mm}{\ln\left(\frac{(1,155 * 3mm + 5,5mm - 3mm)(5,5mm + 3mm)}{(1,155 * 3mm + 5,5mm + 3mm)(5,5mm - 3mm)}\right)} = 1845928,434$$

A partir de estas tres constantes de rigidez, se calcula la rigidez del material:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m_1}} + \frac{1}{k_{m_2}} + \frac{1}{k_{m_3}} = \frac{1}{285,07} + \frac{1}{1923,55} + \frac{1}{1845928,434} \rightarrow k_m = 248,24$$

Y la constante elástica de la junta:

$$c = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{83710,91}{83710,91 + 248,24} = 0,997$$

Por último, se determinan los esfuerzos presentes en el perno (**Tabla 32-3**), para determinar el coeficiente de seguridad con las **Ec. 33,34, 52-55**. Como es un valor que está presente en varias de las ecuaciones, se empieza calculando los valores que no dependen del coeficiente de seguridad:

$$S_e = 0,45 * S_{ut} * \frac{k_c}{k_f} = 0,45 * 420\text{MPa} * \frac{0,814}{2,2} = 69,93\text{MPa}$$

$$\tau_{mín} = \frac{n V_{mín}}{A_m} = \frac{n * 0}{4,47\text{mm}^2} = 0$$

El siguiente paso es despejar las ecuaciones con la incógnita n:

$$\tau_{máx} = \frac{n V_{máx}}{A_m} = \frac{n * 1,09N}{4,47\text{mm}^2} = 0,2442n$$

$$\tau_m = 0,1221n$$

$$\tau_a = 0,1221n$$

$$\sigma_a = \frac{n c}{2 A_t} (P_{máx} - P_{mín}) = 0,2114n$$

$$\sigma_m = \frac{F_i}{A_t} + \frac{n c}{2 A_t} (P_{máx} + P_{mín}) = 232,5 + 0,5911n$$

$$\sigma_{a\text{ eq}} = 0,2114n$$

$$\sigma_{m\text{ eq}} = \sqrt{(232,5 + 0,5911n)^2 + 3(0,1221n)^2}$$

$$1 = \frac{\sigma_{a\text{ eq}}}{S_e} + \frac{\sigma_{m\text{ eq}}}{S_y} = \frac{0,2114n}{69,93} + \frac{\sqrt{(232,5 + 0,5911n)^2 + 3(0,1221n)^2}}{340} \rightarrow n = 66,18$$

Se verifica que el coeficiente de seguridad es mayor a 2, por lo que el perno M3 es válido.

Tabla 32-3: Cálculo del coeficiente de seguridad con pernos M3-4.8.

DIMENSIÓN	SÍMB.	VALOR	UNIDAD	REF.
Coefficiente de confiabilidad: 99%	k_c	0,814	-	[1]
Coefficiente de rosca: laminada	k_f	2,2	-	[1]
Límite de fatiga del material corregido	S_e	69,93	MPa	Ec. 55
Esfuerzo cortante máximo	$\tau_{m\acute{a}x}$	0,2442n	Mpa	Ec. 52
Esfuerzo cortante mínimo	$\tau_{m\acute{i}n}$	0	MPa	Medición
Esfuerzo cortante medio	τ_m	0,1221n	MPa	Ec. 33
Esfuerzo cortante amplitud	τ_a	0,1221n	MPa	Ec. 33
Esfuerzo a tracción	σ_m	232,5+0,5911n	MPa	Ec. 53
Esfuerzo equivalente amplitud	$\sigma_{a\ eq}$	0,2114n	MPa	Ec. 34
Esfuerzo equivalente medio	$\sigma_{m\ eq}$	$\sqrt{(232,5 + 0,5911n)^2 + 3(0,1221n)^2}$	MPa	Ec. 34
Factor de seguridad	n	66,18	-	Ec. 54

Fuente: [1] Budynas, 2011.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.1.6.2 Pernos para las Brida Extremas

Las bridas que forman las tapas del recipiente están sometidas a presión de vacío, son de clase 150, RF (Cara Elevada), Slip-On o Deslizante con un peso aproximado de 13,6 Kg, y Ciega de 20,5 Kg. Cuentan con 8 agujeros para pernos de 3/4 de pulgada y de 3 ½ pulgadas de largo. Los pernos se encuentran ubicados en un círculo de diámetro de 298,5 mm en el centro de los pernos.

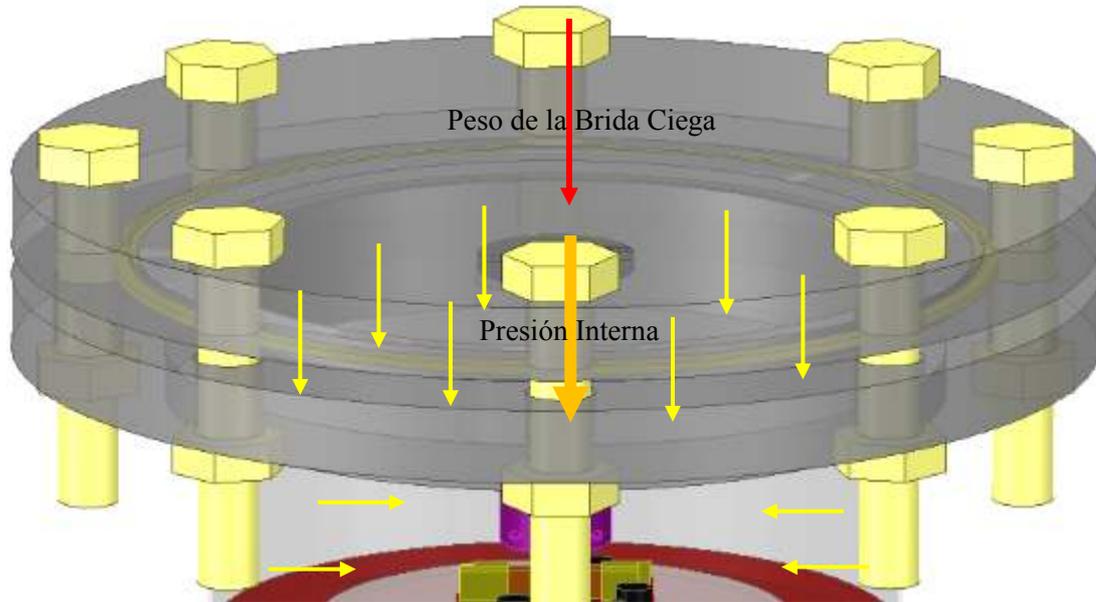


Figura 25-3: Esfuerzos en la brida superior.

Realizado por: Caballero, 2019.

A parte de los datos estructurales, se toma en cuenta la temperatura de diseño 250°C para determinar la presión máxima de trabajo de 12,1 bar (ASME 2003, p. 23, 69-71). Pero al analizar el fenómeno, como se observa en la **Figura 25-3** se puede ver que, debido a la posición vertical no

se tienen esfuerzos cortantes por fuerzas ni momentos paralelos en el plano de los pernos. Con respecto a las fuerzas y momentos axiales al perno, existe el peso de la brida, pero actúa a favor del ajuste del perno, disminuyendo la tracción por la precarga, al igual que la presión interna, que garantiza la estanqueidad. Se toma la decisión de colocar 4 pernos de 3/4x3½ pulgada con el fin de mantener el elemento en su sitio y hay que garantizar que los pernos estén correctamente ajustados con la precarga de una junta reutilizable. La brida inferior, tiene el mismo comportamiento que la superior, con la particularidad de que el peso que garantiza la estanqueidad es la de toda la estructura, auto sellándose de mejor manera que la brida superior.

3.3.1.6.3 Pernos para la Brida de Observación

Para esta brida se seleccionan pernos UNC ¼, con una distribución de 6 para garantizar que el empaque quede bien sujeto y comprimido. Esta brida presente en la **Figura 23-3**, al contrario que las otras dos extremas, se encuentra en vertical, por lo que el propio peso de la brida genera un esfuerzo cortante que no varía, mientras que el esfuerzo de tracción pasa de un máximo de precarga a un mínimo por la presión de vacío, por lo que la tracción se desprecia y se calcula sólo el corte. Analizando el fenómeno, se determina que se produce una fuerza cortante primaria y la fuerza de la precarga:

$$V'_i = \frac{V}{\#Pernos} = \frac{5 \text{ lb}}{6} = 0,833 \text{ lb}$$

$$F_i = 0,75 S_p A_t = 0,75 * 74000 \text{ psi} * 0,0318 \text{ in}^2 = 1764,9 \text{ lb}$$

Se estima que la constante de la junta es de 1, soportando todo el esfuerzo el perno por la presencia de un empaque de corcho aislante.

El único esfuerzo producido es el cortante máximo:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{n V_{\text{máx}}}{A_m} = \frac{2 * 0,833 \text{ lb}}{0,0269 \text{ in}^2} = 30,98 \text{ n psi}$$

La resistencia corregida del perno es:

$$S_{sy} = 0,557 * \frac{S_y}{k_f} = 0,557 * \frac{81000 \text{ psi}}{2,2} = 20507,7 \text{ psi}$$

Y el factor de seguridad:

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau} = \frac{20507,7\text{psi}}{30,98\text{psi}} = 661,99$$

Tabla 33-3: Cálculo del coeficiente de seguridad con pernos UNC 1/4-SAE5.

DIMENSIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	REFERENCIA
Pernos	–	UNC 1/4	-	Estimación
Número de pernos	#Pernos	6	-	Medición
Área de esfuerzo a la tensión	A_t	0,0318	in ²	[1]
Área del diámetro menor	A_m	0,0269	in ²	[1]
Grado del Perno	–	SAE 5	-	Medición
Resistencia a la Tracción Mínima	S_y	81000	Psi	[1]
Resistencia Última a la Tracción Mínima	S_{ut}	105000	Psi	[1]
Resistencia de prueba mínima	S_p	74000	Psi	[1]
Peso	W	5	Lb	Medición
Fuerza cortante primaria	V'	0,833	Lb	Ec. 41
Precarga del perno	F_i	1764,9	Lb	Ec. 45
Constante elástica de la junta	c	1	-	Estimación
Esfuerzo cortante máximo	τ	30,98	Psi	Ec. 52
Resistencia corregida	S_{sy}	20507,7	Psi	Ec. 55
Factor de seguridad	n	662,0	-	Ec. 54

Fuente: [1] Budynas, 2011, p.413, 433.

Realizado por: Caballero, 2019.

Los pernos comerciales UNC 1/4, soportan fácilmente la brida; sin embargo, el cambio se debe hacer cuando la rosca se desgaste, ya que van a estar sometidos a un continuo montaje y desmontaje.

3.3.1.7 Uniones Soldadas

La única suelda compleja presente, despreciando las cargas ya mencionadas para la selección del espesor bajo ASME VIII Div. 1 y la selección de pernos por ya haber sido comprobadas con un amplio margen de seguridad, es la de las bridas y los threadolets, ya que se realizan en acero AISI/SAE A105, o acero al carbono, que debe unirse al acero inoxidable A304 y para esto, se toma en cuenta el diagrama de Schaeffler, donde se puede predecir la estructura final de la soldadura tomando en cuenta la composición del material base y el de aporte, con los porcentajes del Cromo y Níquel equivalente con las **Ecuaciones 56 y 57**.

$$Cr_{eq\ MatB1} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb = 20 + 0 + 1,5 * 1 + 0,4 * 0 = 21,5$$

$$Cr_{eq\ MatB2} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb = 0,3 + 0,12 + 1,5 * 0,35 + 0,4 * 0 = 0,94$$

$$Cr_{eq\ MatAp} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb = 18,7 + 0,18 + 1,5 * 0,76 + 0,4 * 0 = 20,2$$

$$Ni_{eq\ MatB1} = \%Ni + 30 * \%C + 0,5 * \%Mn = 10,5 + 30 * 0,08 + 0,5 * 2 = 13,9$$

$$Ni_{eq\ MatB2} = \%Ni + 30 * \%C + 0,5 * \%Mn = 0,4 + 30 * 0,25 + 0,5 * 1,05 = 4,68$$

$$Ni_{eq\ MatAp} = \%Ni + 30 * \%C + 0,5 * \%Mn = 10 + 30 * 0,02 + 0,5 * 0,63 = 10,92$$

Tabla 34-3: Composición química y Cromo y Níquel equivalentes de los materiales.

Componentes		Material Base 1	Material Base 2	Material de Aporte
		AISI/SAE A304	AISI/SAE A105	AWS E308L-16
Carbono	[%C]	0,08	0,25*	0,02
Silicio	[%Si]	1	0,35	0,76
Manganeso	[%Mn]	2	1,05	0,63
Molibdeno	[%Mo]	-	0,12	0,18
Cromo	[%Cr]	20	0,3	18,7
Níquel	[%Ni]	10,5	0,4	10
Cromo Equivalente	[%Cr_{eq}]	21,5	0,94	20,2
Níquel Equivalente	[%Ni_{eq}]	13,9	4,68	10,92

*Para hacer el cálculo con aceros al Carbono como es el AISI A105, el porcentaje de carbono debe ser tomado sólo la mitad debido a que se pierde en el proceso.

Fuente: Indura, 2007, p. 61, 156, 163.

Realizado por: Caballero, 2019.

En base al **Gráfico 10-3**, se puede observar que con una disolución del 30% que es el valor que se suele usar en soldadura por arco eléctrico, con lo que el cordón tiene 8% de Ferrita Delta, siendo apto para soldar sin fisuras en caliente. Con el **Gráfico 11-3**, se aprecia que la suelda del acero A304 puede realizarse con el electrodo AWS: E308L-16, sin problemas con un 10% de Ferrita Delta.

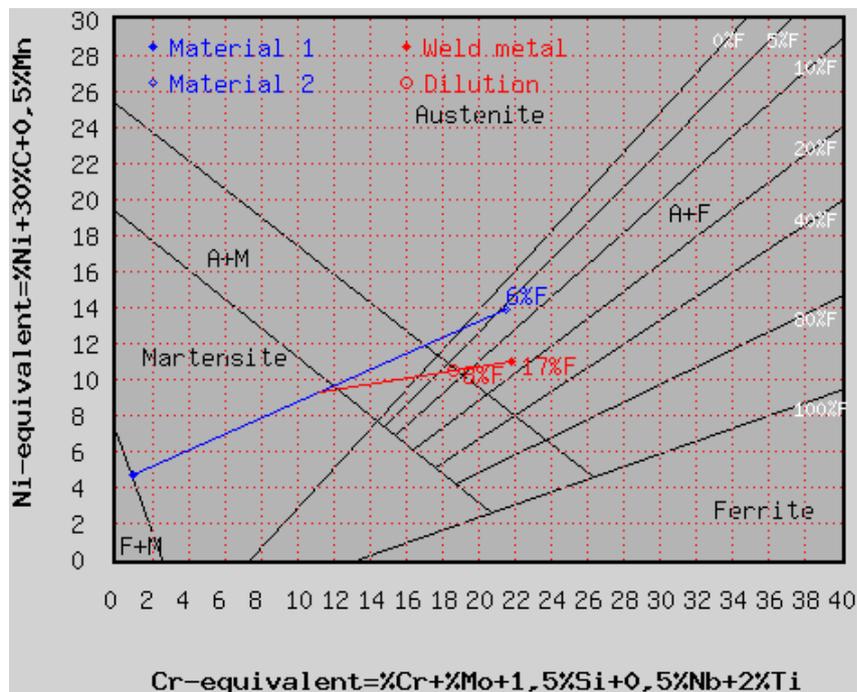


Gráfico 10-3: Diagrama de Schaeffler de la suelda disímil de los materiales de la Tabla 19-4. que generan un cordón con 8% de Ferrita Delta.

Fuente: Migal.com, 2019.

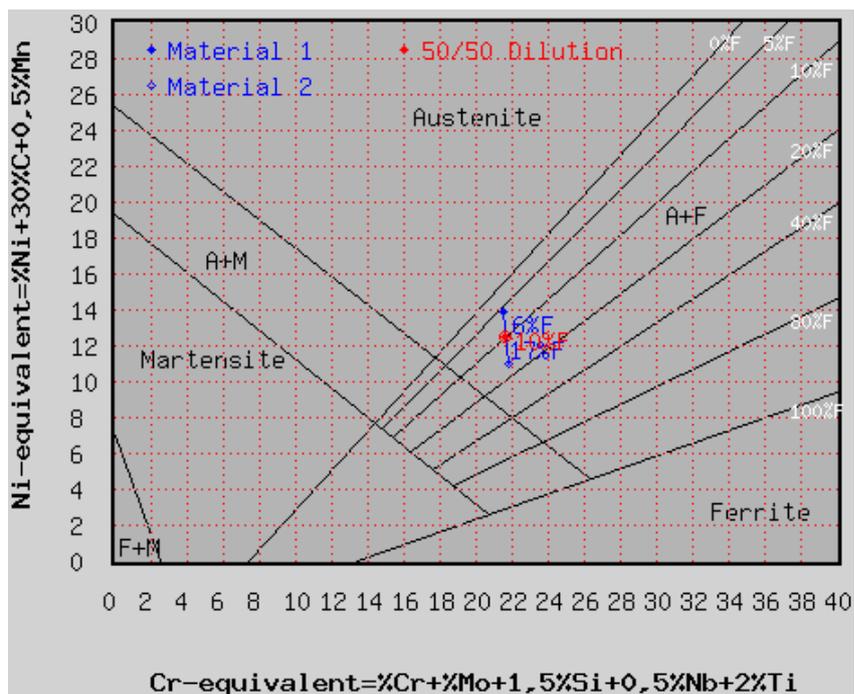


Gráfico 11-3: Diagrama de Schaeffler de la suelda disímil, siendo el Material 1 el AISI A304 y el Material 2 el electrodo E308L-16, que generan un cordón con 10% de Ferrita Delta.

Fuente: Migal.com, 2019.

3.3.2 Diseño Eléctrico

Para la aplicación requerida de un voltaje menor a 30 V y una corriente cercana a 300 A en corriente directa o continua, se seleccionó una soldadora inverter, la cual cuenta con las especificaciones de la **Tabla 35-3**, y cumple con los requisitos obligatorios para la síntesis de CNT en la cámara.

Tabla 35-3: Características de la Soldadora Inverter PS-S250DV.

ESPECIFICACIONES	VALOR		UNIDAD
Voltaje de entrada monofásico	110	220	V
Consumo de corriente máximo	43,6		A
Rango de Trabajo de Corriente	40-160	40-250	A
Rango de Trabajo de Voltaje	26,4-25	27,8-30	V
Dimensiones	41x15x25		cm
Peso	5,8		Kg

Fuente: Porten, 2015.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.3 Diseño Neumático

Para el sistema de vacío, se seleccionó una bomba entre las opciones presentadas en la **Sección 3.2.2** para refrigeración con las características de la **Tabla 36-3**, mediante el criterio de pesos

ponderados. Estas bombas son las que se encontraron disponibles en el país a un precio tolerable y en un período de entrega reducido.

Tabla 36-3: Características de las bombas de vacío.

ESPECIFICACIÓN	VP125+		BOECO R-300		HiCube MVP 015-4		UNID.
	110~/60Hz	220~/50Hz	110~/60Hz	220~/50-60Hz	110~/60Hz	240~/50Hz	
Voltaje de entrada monofásico	110~/60Hz	220~/50Hz	110~/60Hz	220~/50-60Hz	110~/60Hz	240~/50Hz	V
Desplazamiento libre de aire	114	100	17	20	12,5		$\frac{1}{\text{min}}$
Presión de Vacío Última	5		12,03E3		1E-5		Pa
Potencia del motor	$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{8}$		0,36		HP
Ajuste de Admisión	$\frac{1}{4}$		5/16		DN 63 ISO-K		in
Capacidad de Aceite	320		Sin aceite		Sin aceite		ml
Dimensiones	270x119x216		300x330x100		302x301x347		mm
Peso	5,8		4,1		13,8		Kg
Precio	199,98		400,40		1237 + envío		USD

Fuente: ZENY, 2019; Amazon, 2020.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

Tabla 37-3: Criterios ponderados de las bombas de vacío.

Criterio	Peso Relativo	Alternativas para Vacío		
		A	B	C
Pureza de la atmósfera	20%	6	10	10
Variación de parámetros	22%	3	1	5
Seguridad	33%	9	9	10
Manteneabilidad	13%	9	7	5
Precio	12%	10	7	1
Puntuación Final		7,20	6,94	7,17

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

La bomba seleccionada por recursos y funcionalidad, más que por un criterio de diseño es la V125+. Esta bomba tiene la capacidad de crear un vacío de 18 KPa con un caudal de $114 \frac{1}{\text{min}}$ o $0,0019 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, el volumen del tubo es de $0,032 \text{ m}^3$, la tubería de conexión es de $\frac{1}{4}$ in (ZENY 2019).

3.3.4 Diseño Electrónico

Para controlar el movimiento interno de la máquina, tanto del eje de giro como el de avance, es necesario recurrir a motores. Se seleccionaron 2 motores de corriente continua ya que se puede programar más fácilmente y el control de la velocidad se realiza con cambios de voltaje y no necesitan de frecuencímetros o partes externas complejas como los motores de corriente alterna.

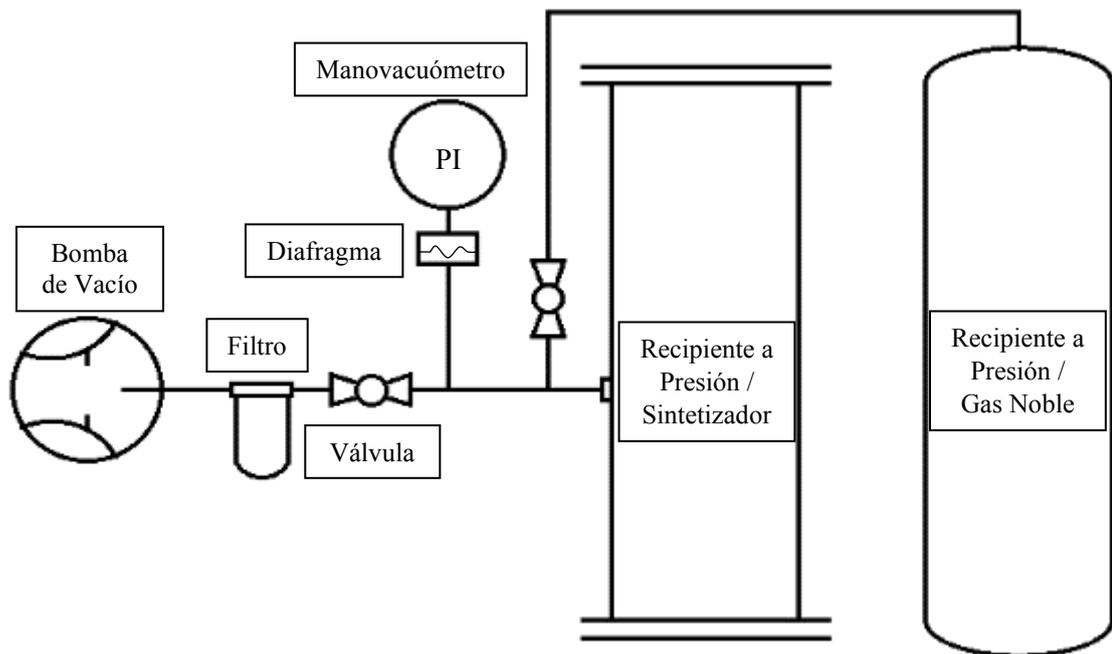


Figura 26-3: Diagrama P&ID del sistema de vacío.

Realizado por: Caballero, 2019.

Lista de elementos eléctricos y electrónicos:

- Arduino NANO.
- Driver para Motor DC de 2A y 12V.
- Driver para Motor DC de 60A y 12V.
- Fuente 14V y 2A.
- Fuente 18V y 4A.
- Pantalla LCD 16 columnas y 2 filas.
- Motor DC de 30000 RPM, obtenido de una radial inalámbrica marca YATO YT-82826 4 ½” 18V y 2 Ah.
- Motor DC 9c4a8d7e-ddae-4b56048821baed de 35 Kg.cm, 12 V y 1 A.
- 2 potenciómetros 10k.
- Cable.

El circuito se diseñó en base a la necesidad: *conexión y control de los motores*; la cual, al ser tan sencilla, se tomó referencia de ejercicios prácticos y, tras algunas pruebas, se verificó que cumplían su función de encender y apagar. Este fue el primer paso antes de pasar a la conexión con el controlador seleccionado (Arduino NANO) y su programación.

3.3.4.1 Automatización flujograma

El flujograma del proceso del circuito electrónico que se indica en la **Gráfico 12-3**, indica el proceso de control que debe hacer el operador, ya que se trata de un circuito con programación de lazo abierto. Con esta programación de lazo abierto, 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 o sensor que verifique que los ejes estén en la posición programada y el usuario debe verificar que todo funcione dentro de los parámetros necesarios.

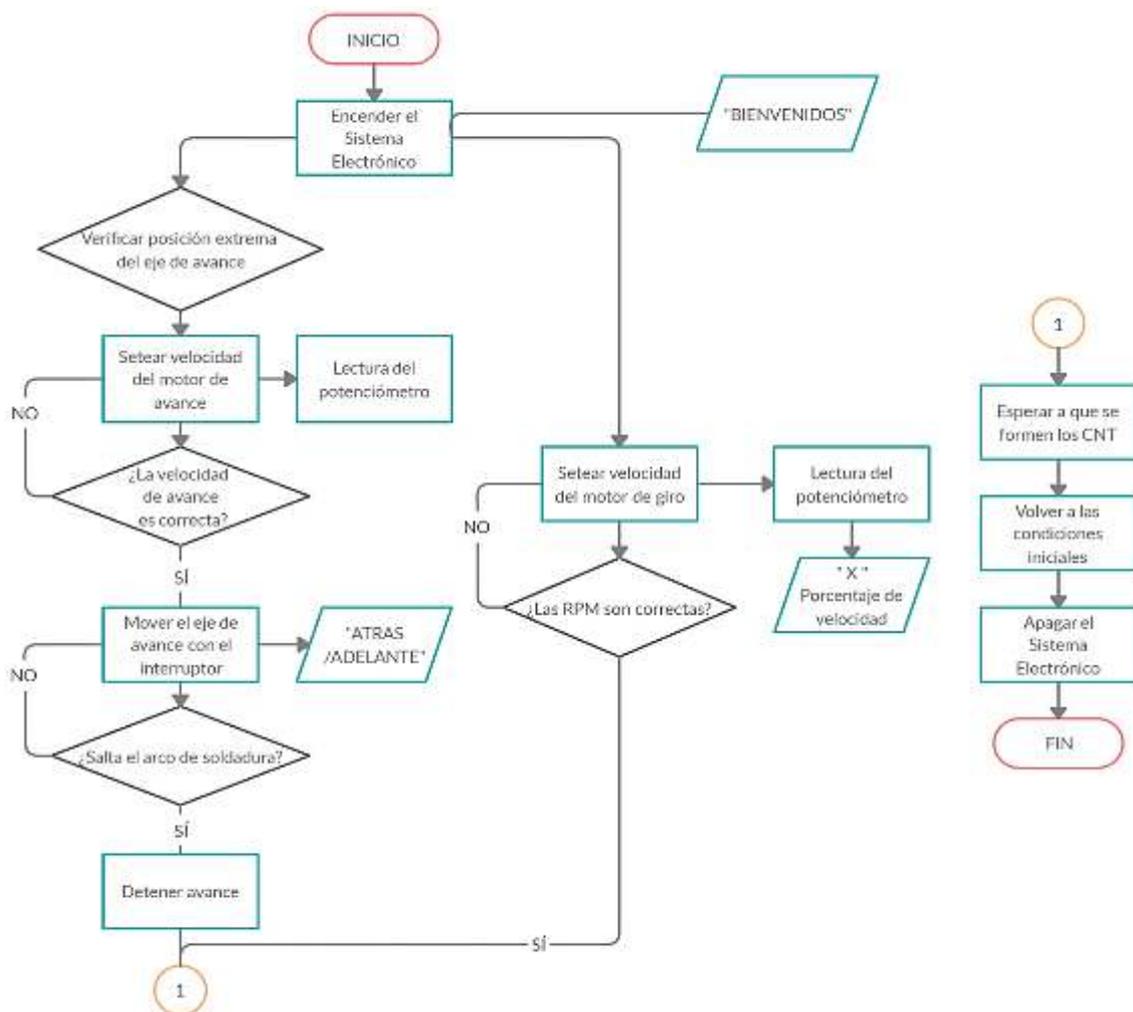


Gráfico 12-3: Flujograma del proceso del Sistema Electrónico.

Realizado por: Caballero, 2019.

3.3.4.2 Selección del controlador

Un controlador es un instrumento comparativo que utiliza el valor medido con el deseado, realiza un cotejo interno y genera una señal modificatoria en el sistema para compensar o disminuir el error entre los dos valores comparados (Martínez 2013).

Según su fuente de energía o accionamiento, pueden ser de tipo (Golato 2016):

- Manual.
- Neumático.
- Mecánico.
- Eléctrico.
- Electrónico.

Según su acción estándar de control, pueden ser (Golato 2016):

- De dos posiciones u ON/OFF. – Se define simplemente como un control elemental de la acción en el que se conecta el sistema cuando el valor de la variable es inferior al deseado o se desconecta cuando el valor está por encima del deseado.
- Proporcional (P). – La salida medida es proporcional al error que tiene el sistema, es decir, se multiplica por un valor determinado por el controlador.
- Derivativa (D). – El controlador calcula la tasa de cambio del error haciendo que la velocidad de cambio de la variable disminuya o se estabilice.
- Integral (I). – El control regula la tasa de cambio de la salida, haciéndola proporcional a la señal de error de entrada en base al tiempo.
- Proporcional e Integral (PI). – Se trata de eliminar el error con una acción proporcional y se corrige teniendo en cuenta la magnitud del error y el tiempo.
- Proporcional y derivativa (PD). – Se trata de eliminar el error con una acción proporcional y se controla la velocidad de la variable controlada en el tiempo.
- Proporcional, integral y derivativa (PID). – En este caso se combinan las acciones P+I+D, reuniendo sus ventajas en un solo controlador.

Para controlar el sentido de avance del eje de avance se seleccionó un interruptor simple de 3 posiciones (manual): hacia arriba, el mecanismo avanza ascendentemente; hacia abajo, descendientemente; y la posición central o neutra detiene el movimiento. Esto representa un control ON/OFF, el cual es el control más simple en lazo abierto para controlar el sentido de giro de un motor.

El controlador seleccionado para la aplicación fue el Arduino NANO, ya que tiene las condiciones suficientes para realizar el control de la manera más económica. Se trata de una placa compacta pero muy completa que contiene un microcontrolador ATmega328P y posee 14 pines de entrada y salida digitales y 6 entradas analógicas; el cristal que utiliza es de 16 Mhz, una conexión

miniUSB, terminales de conexión ICSP (Programación Serial en Circuito) y su botón de reseteo (ARDUINO 2018).

3.3.4.3 Circuito Electrónico

El Circuito se compone de 5 partes: el interruptor de encendido/apagado, el interruptor de control del eje de avance, la pantalla LCD, el circuito de control y el circuito de potencia. La programación requerida para el circuito presentado se encuentra en el Anexo C.

- El interruptor de Encendido/Apagado controla el estado de funcionamiento del sistema.
- El interruptor del eje de avance permite al operador avanzar, retroceder o permanecer en la posición que se requiera.
- La pantalla LCD muestra el estado del sistema electrónico.
- El circuito de control permite controlar la pantalla LCD, la velocidad de los motores y el estado de encendido y apagado.
- El circuito de potencia permite mover los motores de velocidad y avance del sintetizador.

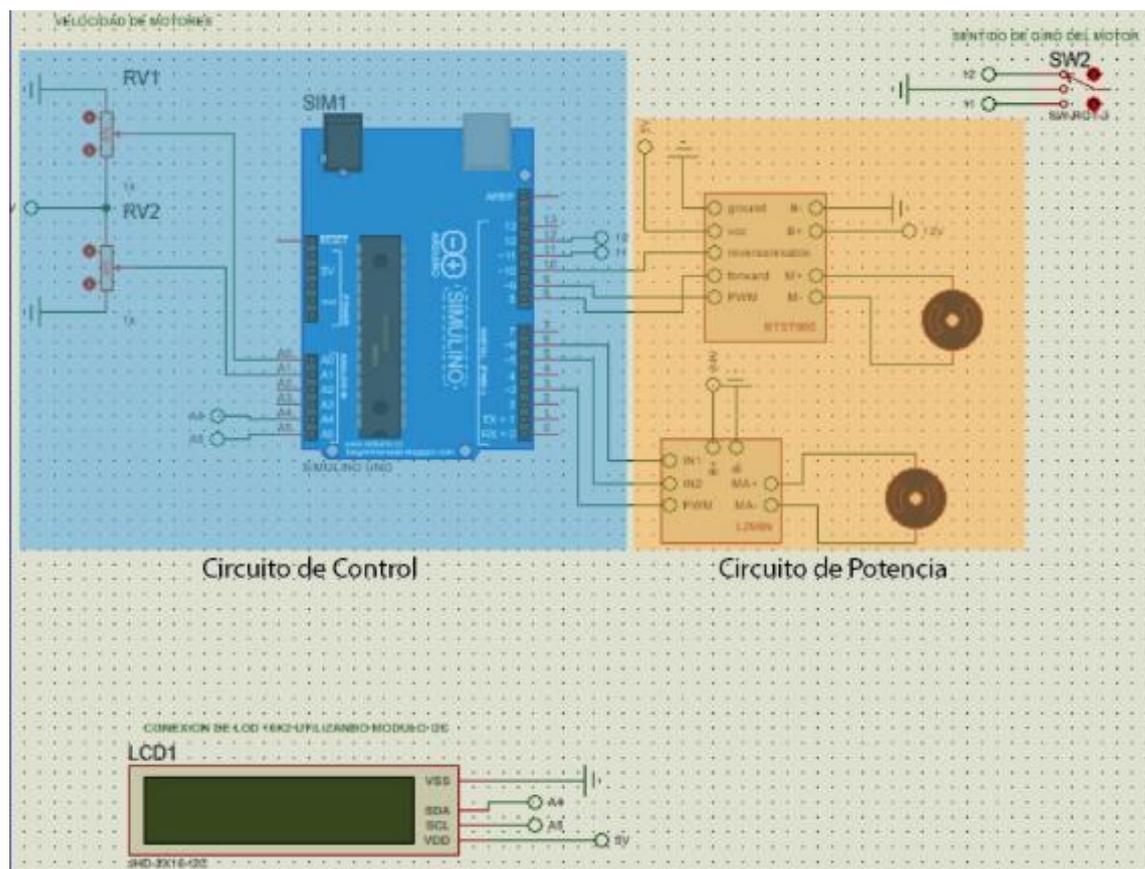


Figura 27-3: Circuito Electrónico.

Realizado por: Caballero, 2019.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Construcción

Para la construcción del sintetizador, con las dimensiones y requerimientos del capítulo anterior, se procede a la construcción, la cual viene resumida en la **Tabla 1-4**. Primero, se obtienen todas las partes que conforman la máquina, para después seguir con el proceso de construcción y ensamblaje de estas.

Tabla 1-4: Proceso de construcción del sintetizador de CNT.

P.	PROCESO	HERRAMIENTAS Y MATERIALES	IMAGEN	T. [h]
1	<p>Corte de las partes metálicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinar dimensiones. - Corte de la lámina con agua. - Rolado del tubo principal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora de metal con agua • Roladora • Plancha de Acero AISI/SAE A-304 		14
2	<p>Soldadura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Suelda de las partes independientes. - Suelda disimil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadora GTAW • Soldadora SMAW • Electrodo ER 308L • Electrodo E308L-16 • Bridas Slip-On • Bridas Ciegas • Threatdolet 1/2" • Threatdolets 1" 		48

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

Tabla 1-4 (continuación): Proceso de construcción del sintetizador de CNT.

3	<p>Torneado.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Realización de ejes. - Realización del aislante. - Realización de los couplings. - Torneado de la guía de bronce. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eje de acero AISI/SAE A304 • Eje de aluminio para la realización de aislamiento de chispa. • Eje de nylon para la realización de matrimonio de ejes. • Tornillo de potencia de 8mm de 4 hilos, 25 cm • Rodamiento 6000-2RSH/C3 • Rodamiento lineal KH1630 • Carboneras • Mandriles de taladro • Pernos M3x20 • Baldosa de 60x60cm • Bronce para la Guía de avance 		120
4	Ensamblaje.	<ul style="list-style-type: none"> • Llaves • Calibrador • Nivel • 8 pernos de 3/4"x3 1/2" rosca fina • 6 pernos 1/4"x1 1/4" rosca fina • Vidrio de Soldadura • Resina Epóxica. • Sello espirometálico 8 in T316, Clase 150 		72
5	<p>Realización del Circuito electrónico.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Impresión 3D de la caja del circuito. - Conexiones y pruebas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arduino Nano • Drivers de motor DC 2A y 12V, y 60A y 12V • Fuentes 14V y 2A, y 18V y 4A • Pantalla LCD • Motor para Avance • Motor de 2A y 12V • Motor para Velocidad de Radial YATO con batería. 		80

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 1-4 (continuación): Proceso de construcción del sintetizador de CNT.

6	Conexión del Sistema Eléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadora Inverter Porten 110/220V, con salida de 26V-300A • Conexión 3/4"-1" metálica para aislar cables • Silicona de alta temperatura 363°C 		5
7	Conexión del Sistema Neumático.	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba de Vacío 1/4 HP, 3.5CFM, vacío hasta 5Pa • Manovacuómetro WINTERS 1/4", Dial de 2,5", de 30 a -30 PSI • Filtro para Vacío, FCT. 12A Conexión 1/4" • Diafragma Ashcroft 50312SS02T, 316SS, 1/2"-1/4" • Racor roscado 1/2" a 12 mm • Racor roscado 1/4" a 12 mm • Conexiones tipo "T" de bronce. • Nepsos de bronce • Manguera de PU de 12 mm • Válvulas de bola de 1/2" 		12

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

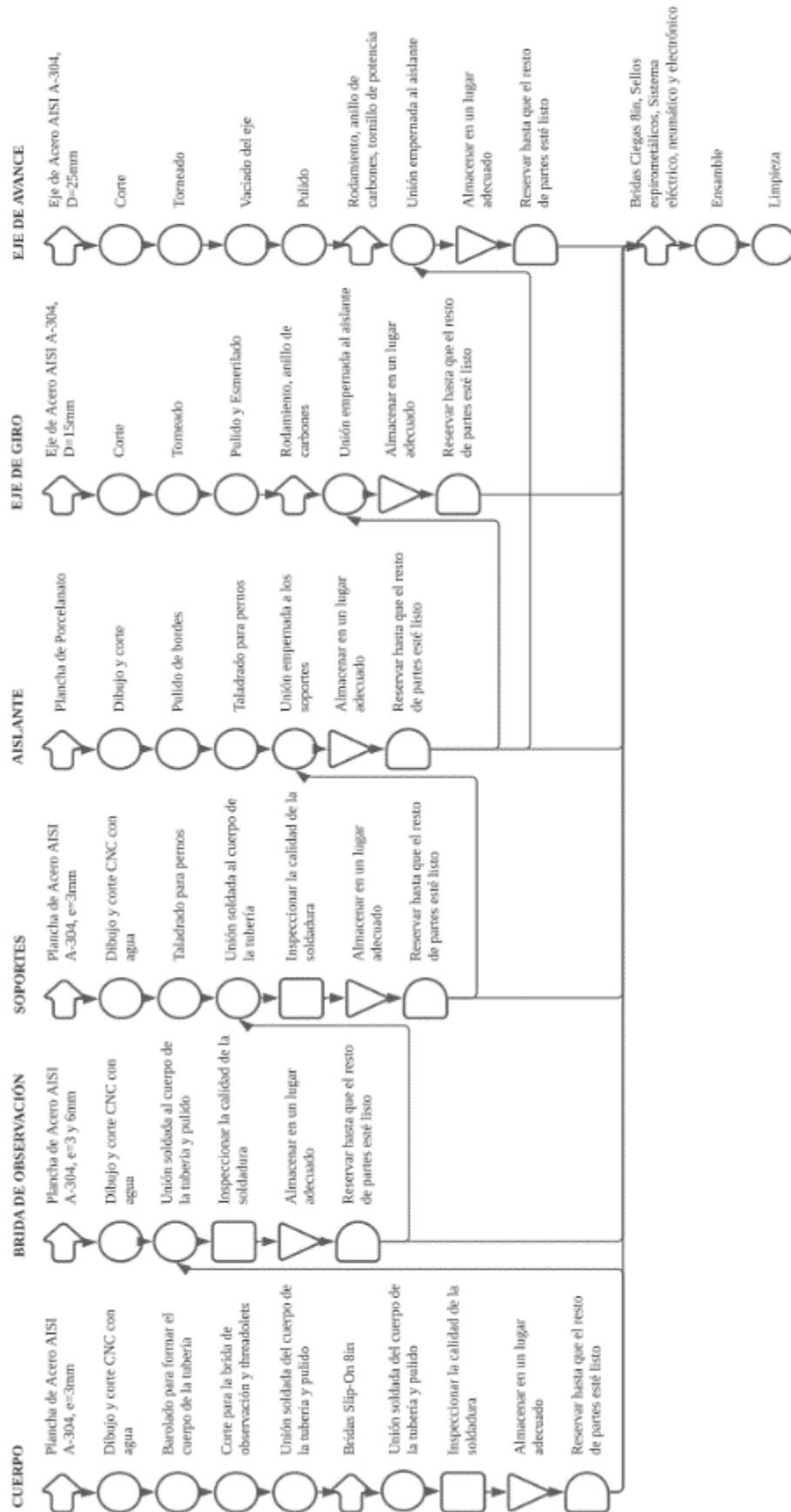


Gráfico 1-4: Flujograma de construcción del sintetizador.

Realizado por: Caballero, 2020.

4.2 Montaje

En este paso, se resume el montaje de los tres sistemas presentes fuera de la estructura y los mecanismos que conforman el sintetizador de nanotubos de carbono: el sistema eléctrico, el sistema neumático y el sistema electrónico. Para el ensamblaje de todos, se aplica el proceso presente en el **Gráfico 2-4, 3-4, 4-4**.



Gráfico 2-4: Flujograma del Sistema eléctrico.

Realizado por: Caballero, 2020.

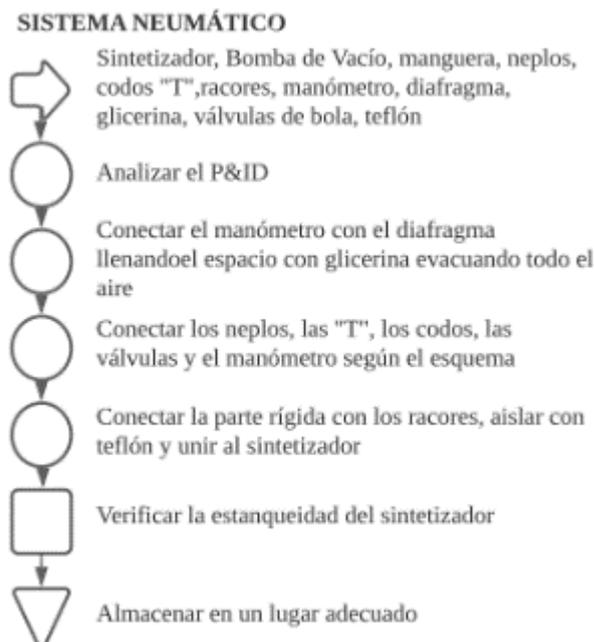


Gráfico 3-4: Flujograma del Sistema neumático.

Realizado por: Caballero, 2020.

SISTEMA ELÉCTRICO



Gráfico 4-4: Flujograma del Sistema electrónico.

Realizado por: Caballero, 2020.

4.3 Operación

Para poder utilizar el equipo, se sigue el siguiente proceso, marcado en el **Figura 1-4**:

0. Verificar las uniones y sellos, el nivel de aceite de la bomba, el buen estado de los cables y soldadora, que los mandriles que sujetan los electrodos estén en su posición extrema y la integridad de la estructura.
1. Fijar los electrodos de grafito teniendo en cuenta que el polo positivo de la soldadora se conecta en el eje inferior que gira y se conecta el electrodo más delgado. El más grueso va en la parte superior, con el polo negativo y es el que avanza.
2. Sellar la brida cuadrada, apretando los pernos y fijando el sello de caucho.
3. Cerra la válvula de gas y abriendo la válvula que conecta a la bomba de vacío.
4. Encender la bomba.
5. Cuando se llegue al valor de vacío máximo de la bomba, se comprueba en el manómetro.
6. Se cierra la válvula de paso de aire a la bomba y se apaga la misma.
7. Los indicadores deben establecerse en los mínimos valores de la soldadora.
8. Encender la soldadora y establecer el amperaje.
9. Se prende el control de los motores para establecer la velocidad de avance del electrodo grueso y la velocidad de giro del delgado, como indica la **Sección 4.3.1**. La distancia entre los

electrodos debe reducirse hasta que el arco eléctrico se establezca, y se realiza el experimento variando los parámetros y realizar el registro necesario.

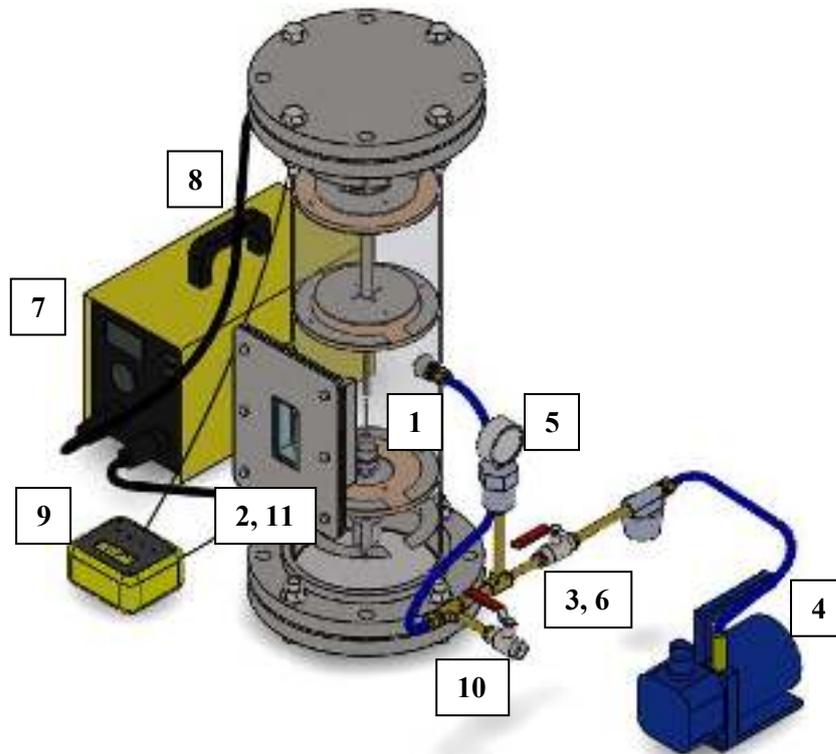


Figura 1-4: Sintetizador de CNT ensamblado.

Realizado por: Caballero, 2020.

10. Una vez concluido el experimento, abrir el acceso de aire y colocar los mandriles en los extremos.

11. Abrir la ventana de observación, y limpiar la cámara, dejando el sintetizador preparado para un siguiente experimento.

4.3.1 Operación del Aparato de Control

Para realizar el control de los ejes del sintetizador, se manipula el aparato de control de la siguiente manera:

1. Antes de encender el dispositivo, se deben colocar las perillas en su posición extrema hacia la izquierda como muestra la **Figura 2-4**, para evitar un arranque indebido; el segundo interruptor debe estar en posición neutra, es decir, que no esté colocada hacia arriba ni hacia abajo.



Figura 2-4: Dispositivo de Control.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

2. Encender el primer interruptor en la posición mostrada de la **Figura 2-4**, en la posición ON. Se debe esperar a que desaparezca el mensaje de: “BIENVENIDOS”, dado que el dispositivo se está seteando.

3. El segundo interruptor, debe moverse hacia abajo y arriba para el avance del eje, y la velocidad se establece con la perilla amarilla. Se coloca el interruptor en posición neutra para detener el movimiento de avance.

4. Para establecer la velocidad de giro del otro eje, se debe mover la perilla azul, arrancando siempre en el 90% que se ve en la pantalla, y estableciendo la velocidad haciendo una proporción con la **Ecuación 67**, teniendo en cuenta que el 100% es aproximadamente 30 000 RPM y 0% es 0 RPM.

4.3.2 Seguridad en la Operación del Sintetizador

4.3.2.1 Precauciones

- El equipo puede elevar demasiado su temperatura, llegando a más de 68°C en el exterior del sintetizador, lo que puede causar quemaduras si se tiene contacto directo con la tubería principal y el tiempo de experimentación no se controla. No se recomienda que el cuerpo pase de los 40°C.
- Retire cualquier material inflamable de la cámara de síntesis.
- Proteja las bombonas de gas comprimido y colóquelas lo más alejadas posible del sintetizador.
- Siempre que se vaya a hacer un mantenimiento, la parte eléctrica debe estar desconectada.

- Para evitar las emisiones electromagnéticas, se recomienda recoger los cables y alejarlos de la zona de experimentación.
- No trabajar con el equipo, si este empieza a superar los 40°C en el exterior de la tubería, ya que internamente, la temperatura equivalente es de 93°C en los ejes y puede causar daños en las uniones de nylon.

4.3.2.2 *Advertencias*

- Los vapores producidos por el arco eléctrico son muy tóxicos debido a la síntesis de diferentes compuestos de carbono, cuya exposición prolongada puede causar enfermedades respiratorias, incluso se puede llegar a desarrollar cáncer. Al abrir la cámara de síntesis, se recomienda guardar la mayor distancia posible y no respirar el contenido directamente.
- Nunca ponga en funcionamiento los motores con las bridas abiertas, ni los manipule en funcionamiento.
- Evitar la humedad o cualquier forma de conducción eléctrica, ya que una descarga podría ser mortal.
- Evitar el contacto con el sintetizador en el momento del experimento. Todo el control debe hacerse con el dispositivo de control, para evitar la posibilidad de descargas eléctricas, quemaduras, rotura del vidrio de observación, etc.

4.4 **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.

4.4.1 *Definición de objetivos*

- El principal objetivo de estos ensayos es garantizar el funcionamiento del Sintetizador en las condiciones de diseño.
- El otro objetivo es determinar las condiciones máximas de funcionamiento sin ocasionar daños al sistema.

- Por último, se busca comprobar que los diferentes módulos funcionen simultáneamente.

4.4.2 *Diseño del ensayo*

Se considera la realización de 10 ensayos, que es el número máximo que se puede realizar debido a la limitación del material (10 electrodos de grafito de 99,9% de pureza). Todas las pruebas se realizarán evaluando las condiciones extremas de cada módulo, variando desde el nivel máximo, al mínimo. Se considera la utilización de diferentes equipos y herramientas para medir los resultados de las pruebas como: contador de revoluciones, reloj comparador, medidor de vibraciones, multímetro, termómetro, manómetro y calibrador; y, de esta manera, establecer las condiciones de operación de trabajo normales.

Al estar instalado en el laboratorio, se considera que el equipo no va a tener condiciones extremas como: corrosión por estar a la intemperie, humedad en el sistema, contacto con sustancias corrosivas, etc.

4.4.3 *Planificación del ensayo*

Dado que es un equipo nuevo en diseño y uso, la condición crítica es la que entregará el tiempo de ensayo, empezando a trabajar desde los valores extremos máximos a los mínimos. Todos los ensayos se realizarán en el transcurso de 3 días, ya que se espera que el equipo vuelva a sus condiciones de temperatura inicial, para poder lograr resultados congruentes.

Las pruebas se distribuirán de la siguiente manera:

- Día 1: Evaluación de los valores del sistema electrónico y eléctrico.
- Día 2: Evaluación de los valores del sistema electrónico, del mecanismo de avance y el de giro.
- Día 3: Evaluación de los valores del sistema neumático y de presión en la cámara.

4.4.4 *Organización de prototipo y medio del ensayo*

Se tiene construido el sintetizador y se evalúa mediante las máquinas y herramientas ya mencionadas las condiciones máximas y mínimas que tiene la máquina. Se realizó el registro de datos, resumidos en la **Tabla 2-4**. Además, se explican las modificaciones realizadas al equipo gracias a estas pruebas.

4.4.5 *Interpretación y validación de resultados*

En las pruebas reales realizadas, se obtuvieron resultados congruentes con las especificaciones de diseño. Al final se realizaron varias pruebas más, 20 en total, con los siguientes resultados:

Tabla 2-4: 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 _g)	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

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

Dentro de los cambios que se tuvieron en el diseño, debido a las pruebas, se pueden destacar los siguientes:

- Adición de una guía para el eje de avance. – Cuando se hicieron las primeras pruebas con un reloj comparador, se vio que la desviación superaba los 3 mm, lo cual no era aceptable. Por ello se añadió una guía de bronce, con lo que la desviación se redujo a 0,2 en su punto máximo.
- La velocidad de giro. – Nominalmente, se tenían 30 000 RPM en la descripción del motor; sin embargo, hay que destacar que al unirlo al mecanismo y distintos puntos de fricción reducen este valor.
- Presión en la cámara. – La cámara fue diseñada para soportar 1 atmósfera de vacío, pero la restricción viene dada por la potencia de la bomba.
- Corriente de la soldadora. – Las pruebas preliminares se realizaron con electrodos de acero, y la corriente venía limitada por la soldadora; sin embargo, al realizar las pruebas con los electrodos de grafito, se observó que el arco no empezaba hasta alcanzar los 40A.
- Diámetro del electrodo. – Con el punto anterior, se vio que los electrodos de 3 mm eran demasiado delgados y colapsaban; presumiblemente por el valor del voltaje.
- Temperatura de la cámara. – Este es el dato crítico, ya que al realizar la prueba por tercera vez consecutiva sin esperar a que los ejes se enfriasen, la temperatura externa de 68°C tenía una equivalencia de 163°C en el interior, lo que hizo colapsar la unión de nylon. Por lo que se recomienda no superar los 40°C, lo que refleja en un tiempo de aproximadamente 2 minutos de funcionamiento.

4.4.5.1 *Análisis en el Microscopio SEM*

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.

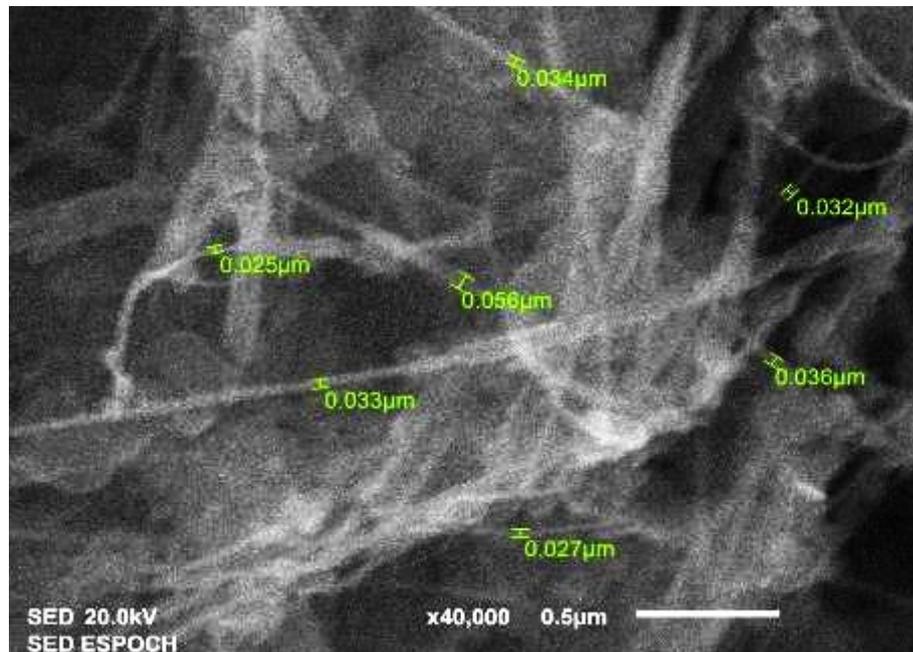


Figura 3-4: Micrografía SEM 1 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

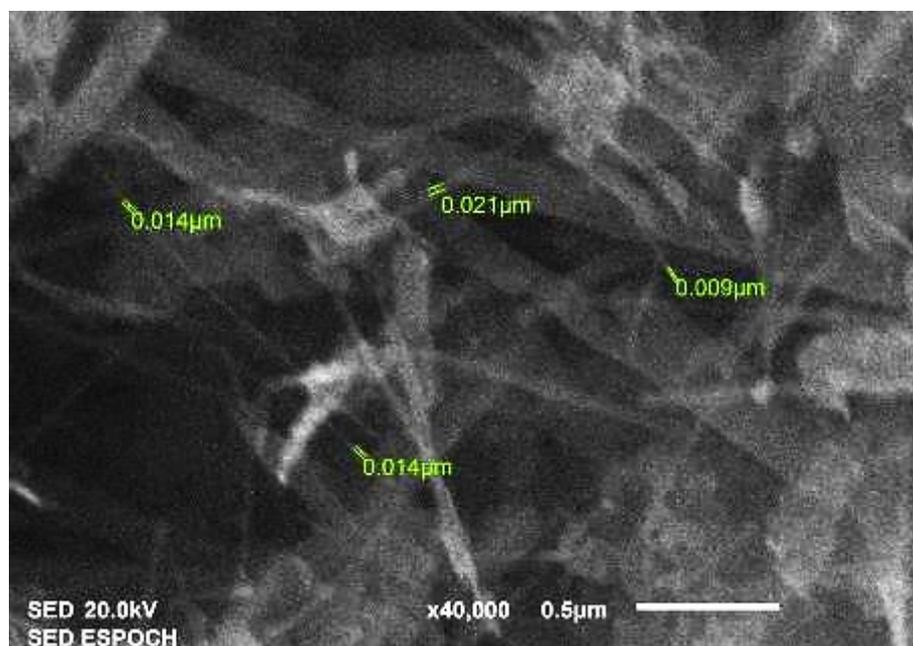


Figura 4-4: Micrografía SEM 2 de la ESPOCH, 50-70A y -0.25bar.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

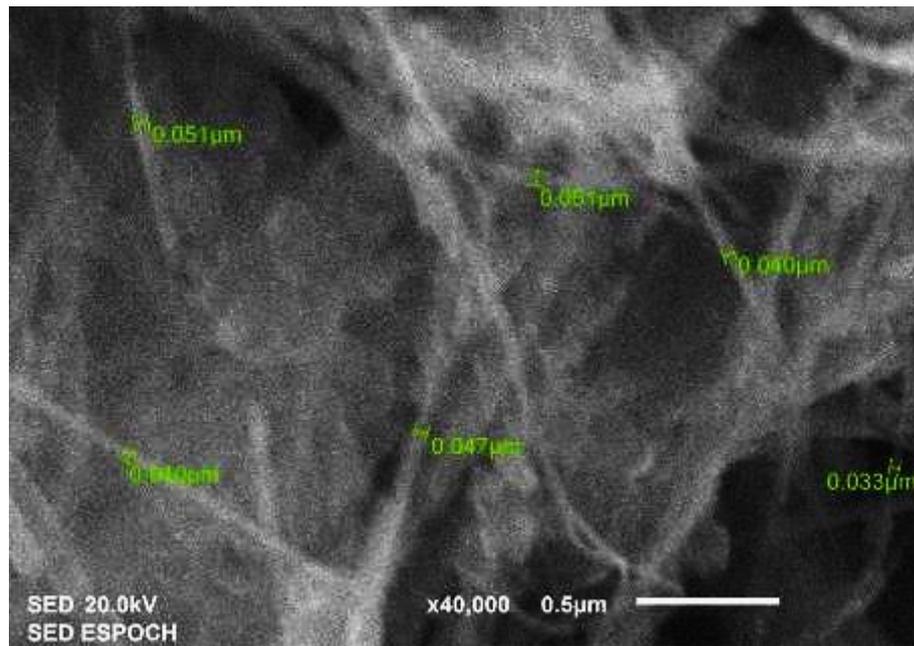


Figura 5-4: Micrografía SEM 3 de la ESPOCH, 60A y -0.25bar.

Realizado por: Caballero Silva, Enya, 2020.

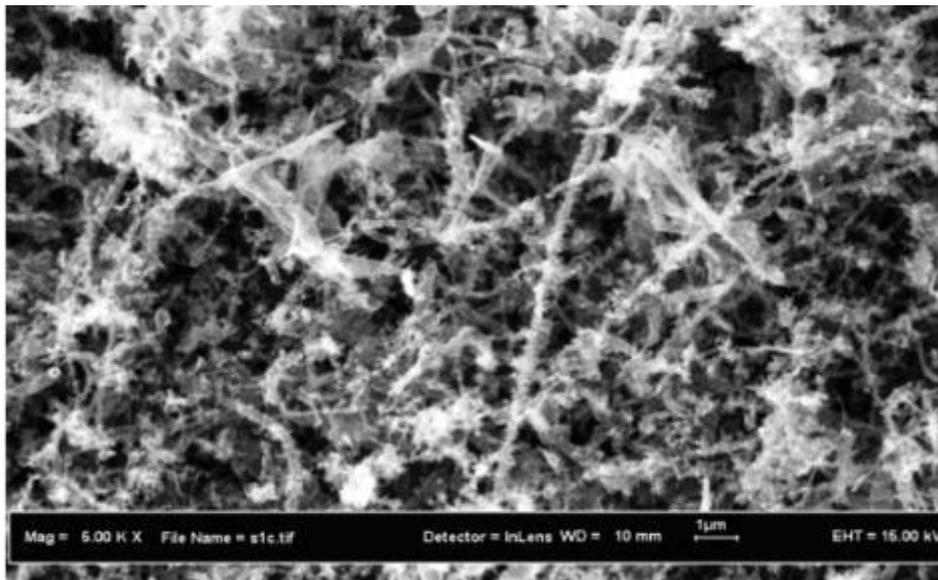


Figura 6-4: Escaneo SEM de MWCNT sintetizado a 50A y presión ambiental.

Realizado por: Chaudhary et al. 2013.

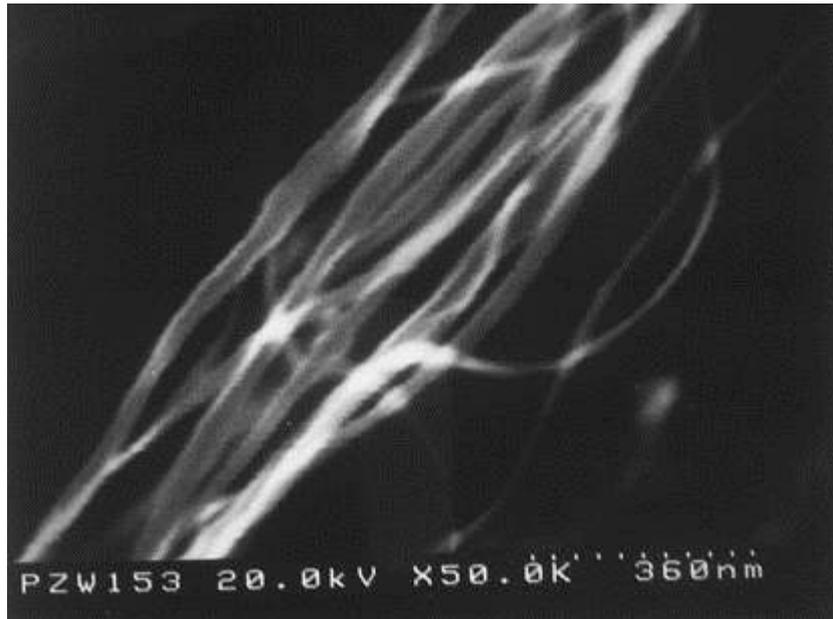


Figura 7-4: Escaneo SEM de un ramo de MWCNT.

Realizado por: Xie et al. 2000.

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, un CNT de 7 a 11 capas si se compara con el trabajo de Chaudhary. 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%.

4.5 Mantenimiento

Para garantizar el correcto funcionamiento del equipo y su vida útil teniendo en cuenta los elementos estructurales y de los mecanismos de movimiento, se recomienda realizar el mantenimiento preventivo del equipo con los tiempos presentes en la **Tabla 3-4**. Los elementos que no son listados en la tabla, es debido a que son piezas no estudiadas en material o elemento, ya que normalmente no se usan para el propósito de realizar CNT, y se deberán reparar o sustituir tras su colapso o falta de funcionalidad.

Tabla 3-4: Tiempos y actividades del mantenimiento preventivo del Sintetizador de CNT.

ELEMENTO	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	HERRAMIENTAS E INSUMOS	FRECUENCIA
Uniones de Nylon o Couplings	Revisión	Verificación de la transmisión de movimiento desde el motor hacia los ejes	Parte electrónica del sintetizador	Diario
Rodamiento	Revisión y limpieza	Observar el correcto funcionamiento, lubricación y ajuste del soporte	Llaves, destornillador, lubricante	Mensual
Soldadora y sistema eléctrico	Revisión y limpieza	Verificación de la integridad de cables y limpieza	Brocha	Mensual
Bomba y sistema neumático	Revisión y limpieza	Verificación de la integridad de mangueras y limpieza. Revisión del nivel de aceite	Aceite de compresor, brocha	Mensual
Uniones empernadas	Revisión de vibraciones anómalas	Inspección visual de las uniones empernadas y ajuste de ser necesario, para evitar vibraciones y ruidos extraños.	Llaves	Semanal
Placas de cerámico	Revisión	Inspección visual en busca de fisuras que podrían hacer colapsar la estructura	Inspección visual	Diario
Tornillo sinfín	Revisión y limpieza	Limpieza y lubricación del tornillo de potencia evaluando su correcto funcionamiento	Lubricante, llaves y destornillador	Mensual
Motores	Revisión y limpieza	Revisión del funcionamiento correcto de los motores, limpieza y revisión de la velocidad para verificar que no hay problemas con los motores	Parte electrónica del sintetizador, brocha, contador de revoluciones	Trimestral
Estructura	Revisión y verificación	Comprobar que la estructura no tenga fallos, grietas o golpes que podrían poner en peligro al usuario	Inspección visual	Anual

Realizado por: Caballero, 2019.

4.6 Recursos y materiales

4.6.1 Costos directos

Tabla 4-4: Costos por materiales e insumos.

MATERIALES	UNIDAD	PRECIO UNIT. [USD]	CANT.	COSTO [USD]
Lámina AISI/SAE A304 de 3mm de espesor	U	136,06	1	136,06
Bridas Slip-On 8in, Clase 150, acero al carbono	U	43,45	2	86,90
Bridas Ciegas 8in, Clase 150, acero al carbono	U	60,38	2	120,76
Sellos Espirometálicos 8in T316, Clase 150	U	13,16	2	26,32
Threadolet de 8" x 1/2" ASTM-A105 #300	U	8,69	1	8,69
Threadolet de 8" x 1" ASTM-A105 #300	U	10,15	2	20,29
Barra de Acero AISI/SAE A304, para los ejes	m	60,00	0,5	30,00
Barra de Aluminio para aislamiento de chispa	m	40,00	0,15	6,00
Barra de Bronce para la guía de avance	m	1200,00	0,05	60,00
Barra de Nylon para Couplings	m	116,67	0,06	7,00

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 4-4 (continuación): Costos por materiales e insumos.

Tornillo 8mm de 4 hilos, 25 cm, con tuerca	U	4,50	1	4,50
Rodamiento 6000-2RSH/C3	U	3,00	1	3,00
Rodamiento Lineal KH1630	U	17,00	1	17,00
Anillo Portagrafitos para 300 A	U	7,00	2	14,00
Mandril de Taladro	U	7,50	2	15,00
Porcelanato	U	2,50	2	5,00
Vidrio de Soldadura	U	0,50	1	0,50
Vidrio Templado	U	1,00	1	1,00
Manovacuómetro WEISS 1/4", de 30 a -30 PSI	U	32,93	1	32,93
Filtro FCT. 12A Conexión 1/4"	U	85,09	1	85,09
Conexión 3/4"-1" metálica para aislar cables	U	2,02	2	4,04
Sello de diafragma Ashcroft 50312SS02T, 316SS	U	187,04	1	187,04
Conexión roscada 1/2" a 12mm	U	9,38	2	18,75
Conexión roscada 1/4" a 12mm	U	8,40	1	8,40
Válvula de Bola 1/2"	U	5,50	2	11,00
Conexiones tipo T de 12mm	U	3,00	2	6,00
Manguera de PU	m	2,80	2	5,60
Reducciones de PVC 1"-3/4"	U	0,50	2	1,00
Bomba de Vacío 1/4 HP, 3.5 CFM, hasta 5 Pa	U	170,00	1	170,00
Soldadora Inverter Porten 110/220V	U	351,00	1	351,00
Arduino Nano	U	7,99	1	7,99
Drivers Motor DC 2A y 12V, y 60A y 12V	U	20,50	2	41,00
Fuentes 14V y 2A – 18V y 4A	U	26,18	2	52,35
Pantalla LCD	U	4,00	1	4,00
Motor para Avance 2A y 12V	U	18,70	1	18,70
Motor para Velocidad de Radial YATO con batería	U	134,71	1	134,71
Pernos 3/4"x3 1/2" rosca fina	U	3,58	8	28,67
Pernos 1/4"x1 1/2" rosca fina	U	0,78	6	4,70
Pernos M3x20	U	0,13	20	2,69
Electrodos AGA-60 (AWS: E308-16)	U	0,60	70	42,00
Silicona de Alta Temperatura hasta 363°C	U	7,69	1	7,69
Pintura Anticorrosiva	U	4,21	1	4,21
Cables y uniones	Implementos	5,75	-	5,75
Electrodos de Grafito 99,9% pureza de 3mm	10 U	15,00	1	15,00
Electrodos de Grafito 99,99% pureza de 5mm	10 U	16,00	1	16,00
SUBTOTAL [USD]				1828,34

Realizado por: Caballero, 2019.

Tabla 5-4: Costos por maquinaria y equipos.

MÁQUINAS	COSTO/h [USD]	HORAS	COSTO [USD]
Corte en Agua	19,60	5	98,00
Barolado	25,00	2	50,00
Torneado	9,50	20	190,00
Mecanizado del Porcelanato	4,00	5	20,00
Soldadura	5,63	16	90,00
Rectificado y soldadura	2,41	25	60,20
Impresión 3D	3,75	8	30,00
SUBTOTAL [USD]			538,20

Realizado por: Caballero, 2019.

4.6.2 Costos Indirectos

Tabla 6-4: Costos Indirectos del Trabajo de Titulación.

DETALLE	COSTO [USD]
Importación	38
Transporte	49,37
SUBTOTAL [USD]	87,37

Realizado por: Caballero, 2019.

4.6.3 Costos Totales

Tabla 7-4: Costos Totales del Trabajo de Titulación.

DETALLE	COSTO
Costos Directos Totales	2366,54
Costos Indirectos Totales	87,37
TOTAL [USD]	2453,91

Realizado por: Caballero, 2019.

5. 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, solda 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.

6. RECOMENDACIONES

Antes de encender el equipo y usarlo, hay que asegurarse de: la correcta limpieza de la cámara para evitar contaminación de los Nanotubos producidos; que los ejes se desplacen sin problema; verificar la concentricidad de ambos ejes evitando encenderlo si se observa desbalanceo, ya que una alta velocidad generaría una fuerza centrífuga que podría dañar el equipo; que los aislamientos estén correctamente colocados; guardar distancia antes de encender el equipo de soldadura, por si los aislantes llegaran a fallar.

Leer el Manual de Operación y Mantenimiento del equipo, respetando los tiempos para el correcto mantenimiento, evitando el daño de las diferentes partes.

Los materiales fueron obtenidos de las empresas chinas: Yodaoke, electrodos de grafito de 99,99% de pureza de 3 mm de diámetro, y de hBARSCI, electrodos de grafito de 99,95% de pureza de 5 mm de diámetro. Ambas empresas se pueden encontrar como proveedores de Amazon.com.

El proceso de Síntesis de CNT es algo complejo, por lo que se recomienda anotar cada uno de los parámetros modificados y la clase de CNT generado en un registro dentro del laboratorio donde está instalado el equipo.

Dentro de las partes que se pueden mejorar, como diseñadora de la máquina recomiendo: agregar un sistema de refrigeración externa para poder aumentar el diámetro de los electrodos de grafito o cambiar de material, aumentando sin peligro el tiempo de síntesis; también se puede mejorar el proceso de automatizado, por ejemplo, con un PLC o pantalla que permita introducir los parámetros de síntesis y que el Sintetizador se coloque automáticamente en las condiciones requeridas.

GLOSARIO

Adsorción: Atraer y retener en la superficie de un cuerpo moléculas o iones de otro cuerpo (RAE, 2019).

Alotropía: Propiedad de algunos elementos químicos, debido a la cual pueden presentarse con estructuras moleculares distintas, como el oxígeno, que existe como oxígeno divalente y como ozono; o con características físicas diversas, como el carbono, que puede aparecer en forma de grafito o de diamante (RAE, 2019).

Ánodo: Electrodo positivo (RAE, 2019).

Área superficial relativa: Relación entre el área de la superficie del sólido y el volumen de este (McMurry, 2014).

Cátodo: Electrodo negativo (RAE, 2019).

Disproporcionación: una reacción, típicamente una Rédox, donde una molécula se transforma en dos o más productos diferentes (Helmenstine, 2018).

Ecuación de onda: relación lineal que expresa el movimiento de un electrón como si se tratara del movimiento de una ola en un fluido en una sola dimensión (McMurry, 2014).

Electrodo: Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que transmite o del que recibe una corriente eléctrica (RAE, 2019).

Electrones de valencia: También conocidos como electrones libres; son aquellos que después de saturar los niveles energéticos inferiores no logran llegar a la distribución de gas noble y tienden a reaccionar con otros elementos o moléculas buscando la estabilidad (McMurry, 2014).

Módulo de Young: Constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación unitaria que representa la medida de rigidez de un material en el rango lineal del esfuerzo (Budynas, 2011).

Momento flector: Resultado de la aplicación de alguna carga a un elemento mecánico a una distancia dada desde un punto de referencia causando una deformación flexionante (Budynas, 2011).

Momento torsor: Resultado de la aplicación de alguna carga a un elemento mecánico en aplicación paralela al eje longitudinal causando torsión (Budynas, 2011).

Orbital: solución de una ecuación de onda de grado cuadrático, de carácter integrable y cada una de sus soluciones genera una coordenada tridimensional (McMurry, 2014).

Pirólisis: Descomposición de un compuesto químico por acción del calor (RAE, 2019).

Resistencia a la Tensión: Esfuerzo máximo desarrollado en un material en un ensayo de tracción antes de llegar a la fluencia (Budynas, 2011).

Resistencia última a la tensión: Máximo esfuerzo a la tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse (Budynas, 2011).

BIBLIOGRAFÍA

ABB COLOMBIA *¿Qué es un Variador de Velocidad?* [en línea]. Colombia, 2014. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?time_continue=163&v=z_6YlBjq04.

AJAYAN, P.M.; & ZHOU, O.Z. "Applications of carbon nanotubes". *Carbon nanotubes*. S.l.: Springer (2001), pp. 391-425.

AMAZON INC. Comprar por categorías principales, 2019. *Amazon.com* [en línea]. [Consulta: 17 agosto 2019] Disponible en: <https://www.amazon.com/>.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. *Beam Design Formulas with Shear and Moment Diagrams*. Washington, DC: American Wood Council, 2007.

ANDO, Y. "Carbon nanotube: the inside story". *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 10, no. 6, (2001) pp. 3726-3738.

ANDO, Y.; & IJIMA, S. "Preparation of carbon nanotubes by arc-discharge evaporation". *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 Letters*, vol. 32, (1993) pp. L107

ARDUINO. Arduino NANO, 2018. [en línea]. [Consulta: 17 agosto 2019]. Disponible en: <https://arduino.cl/arduino-nano/>.

ARNOLD, M.S.; et al. "Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation". *Nature nanotechnology*, vol. 1, no. 1, (2006) pp. 60.

ARORA, N.; & SHARMA, N.N. "Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review". *Diamond and Related Materials*, vol. 50, (2014) pp. 135-150.

ASME B16.5-2003 (Revision of ASME B16.5-1996) Pipe Flanges and Flanged Fittings. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://itok-co.com/uploads/images/standards/ASME B16.5 - 2003.pdf>.

ASME Section VIII Division II Part D. *Properties*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2010a.

ASME Section VIII Division 1. *UG-126 Pressure Relief Valves to UG-129 Marking*, ASME International, New York, 2010b.

BACSA, R.R.; et al. "High specific surface area carbon nanotubes from catalytic chemical vapor deposition process". *Chemical Physics Letters* [en línea], vol. 323, no. 5-6, (2000) pp. 566-571. [Consulta: 13 diciembre 2019]. ISSN 00092614. DOI 10.1016/S0009-2614(00)00558-3. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009261400005583>.

BADJIAN, H.; & SETOODEH, A.R. Improved tensile and buckling behavior of defected carbon nanotubes utilizing boron nitride coating--A molecular dynamic study. *Physica B: Condensed Matter*, vol. 507, (2017) pp. 156-163.

BALANDIN, A.A. "Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials".

Nature materials, vol. 10, no. 8, (2011) pp. 569.

BANDARU, P.R. "Electrical properties and applications of carbon nanotube structures". *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 7, no. 4-5, (2007) pp. 1239-1267.

BANERJEE, S.; & WONG, S.S. "Demonstration of Diameter-Selective Reactivity in the Sidewall Ozonation of SWNTs by Resonance Raman Spectroscopy". *Nano Letters* [en línea], vol. 4, no. 8, (2004) pp. 1445-1450. [Consulta: 27 mayo 2019]. ISSN 1530-6984. DOI 10.1021/nl049261n. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl049261n>.

BARRETT, R.T. *Fastener Design Manual*, 1990. [en línea]. [Consulta: 7 agosto 2019]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19900009424>.

BAUGHMAN, R.H.; et al. "Carbon nanotubes-the route toward applications". *science*, vol. 297, no. 5582, (2002) pp. 787-792.

BEER, F.P.; et al. *Mecánica de Materiales*. Sexta Edición Edición. 4th. S.l.: Mc Graw Hill México, 2007.

BOYLESTAD, R.L.; & NASHELSKY, L. *Electrónica teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 8th. Ciudad de México: Prentice Hall, INC, 2003.

BUDYNAS, R.G. *Shigley's mechanical engineering design*. 9th. S.l.: McGraw-Hill Education, 2011.

ÇENGEL, Y.A.; & GHAJAR, A.J. *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. 4th. S.l.: Mc Graw Hill México, 2011.

CHAUDHARY, K.T., et al. "Multiwalled Carbon Nanotube Synthesis Using Arc Discharge with Hydrocarbon as Feedstock". *Journal of Nanomaterials* [en línea], vol. 2013, (2013) pp. 1-13. [Consulta: 27 mayo 2019]. ISSN 1687-4110. DOI 10.1155/2013/105145. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2013/105145/>.

CHENG, H.M., et al. "Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons". *Applied Physics Letters*, vol. 72, no. 25, (1998) pp. 3282-3284.

COLEMAN, J.N.; et al. "Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube--polymer composites". *Carbon*, vol. 44, no. 9, (2006) pp. 1624-1652.

CORVILLO, P.A.; & GÓMEZ, H.G. "Síntesis, propiedades fotofísicas y aplicaciones de nanotubos de carbono de pared única funcionalizados". *Instituto de tecnología química, departamento de química, 1*, vol. 50, (2007).

CRUZ, A.; et al. *Química orgánica vivencial*. S.l.: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2002.

DAI, H. "Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties". *Accounts of chemical research*, vol. 35, no. 12, (2002) pp. 1035-1044.

DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS. Introducción a la tecnología inversora para soldadura. [blog]. [Consulta: 7 agosto 2019]. Disponible en:

<https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tecnologia-inversora-inverter-para-soldadura>.

DEVANATHAN, R. "An Introduction to Graphene and Carbon Nanotubes" *J. MRS Bulletin*, vol. 43, no. 02. (2018) [Consulta: 27 mayo 2019] DOI 10.1557/mrs.2018.25. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/1422273>

DIPAC. Planchas de acero inoxidable. [en línea]. [Consulta: 25 mayo 2019]. Disponible en: <http://www.dipacmanta.com/planchas-inoxidables>.

EBBESEN, T.W.; & AJAYAN, P.M. "Large-scale synthesis of carbon nanotubes". *Nature*, vol. 358, no. 6383, (1992) pp. 220.

EUROGLAS. Ficha Técnica Cristal Templado, 2001. [en línea]. [Consulta: 04 octubre 2019]. Disponible en: <http://bus.euroglas.net/sites/bus.euroglas.net/files/descargas/fichaTEMPLADO3.pdf>.

FANG, X.; et al. "Determining synthesis region of the single wall carbon nanotubes in arc plasma volume". *Carbon*, vol. 107, (2016) pp. 273-280.

FARHAT, S.; et al. "Diameter control of single-walled carbon nanotubes using argon–helium mixture gases". *The Journal of Chemical Physics* [en línea], vol. 115, no. 14, (2001) pp. 6752-6759. ISSN 0021-9606. DOI 10.1063/1.1390526. Disponible en: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1390526>.

FERRARI, D.; & DIAZ, F. *Metodo del elemento finito y AutoFEM®* [en línea]. 2018. S.l.: s.n. [Consulta: 12 agosto 2019] Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf.

GEIM, A.K.; & NOVOSELOV, K.S. "The rise of graphene". *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*. S.l.: World Scientific, (2010) pp. 11-19.

GOLATO, M. *Acciones de control* [en línea]. 2016. Tucumán: s.n. [Consulta: 28 agosto 2019] Disponible en: https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf.

GÓMEZ, E. Que es PWM y para que sirve. [en línea]. 2017. [Consulta: 28 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.rinconingenieril.es/que-es-pwm-y-para-que-sirve/>.

HAN, W.; et al. "Synthesizing boron nitride nanotubes filled with SiC nanowires by using carbon nanotubes as templates". *Applied physics letters*, vol. 75, no. 13, (1999) pp. 1875-1877.

HARRIS, P.J.F. *Carbon Nanotube Science. Synthesis, Properties and Applications*. 2009. S.l.: Cambridge.

HELMENSTINE, A.M. Disproportionation Definition in Chemistry. [en línea]. 2018. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://www.thoughtco.com/definition-of-disproportionation-605037>.

HIRLEKAR, R.; et al. "Carbon nanotubes and its applications: a review". *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, vol. 2, no. 4, (2009) pp. 17-27.

- HOJATI TALEMI, P.; et al.** "Fusion of carbon nanotubes for fabrication of field emission cathodes". *Carbon*, vol. 50, no. 2, (2012) pp. 356-361.
- HONE, J.; et al.** "Electrical and thermal transport properties of magnetically aligned single wall carbon nanotube films". *Applied physics letters*, vol. 77, no. 5, (2000) pp. 666-668.
- HU, Huawen; et al.** "Metal-free graphene-based catalyst-Insight into the catalytic activity: A short review". *Applied Catalysis A: General*, vol. 492, (2015) pp. 1-9.
- IJIMA, S.** "Helical microtubules of graphitic carbon". *Nature*, vol. 354, no. 6348, (1991) pp. 56.
- INDURA S.A. INDUSTRIA Y COMERCIO, 2007. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Cerrillos, Chile: s.n.
- JIMÉNEZ LÓPEZ, M.** *Síntesis de Nanoestructuras de carbono por descarga de plasma* [en línea]. S.l.: Instituto Tecnológico de Toluca. 2007 Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21013988>.
- KIM, K.-S.; & PARK, S.-J.** "Influence of enhanced dispersity of chemically treated MWNTs on physical properties of MWNTs/PVDF films". *Macromolecular research*, vol. 18, no. 10, (2010) pp. 981-985.
- KUMAR, K.** *Carbon Nanotube: A revolution in Science*. S.l.: Educreation Publishing, 2018.
- LA CANTERA.** Porcelanato Ficha Técnica. [en línea]. 2017 [Consulta: 16 julio 2019]. Disponible en: <http://www.piedraslacantera.cl/wp-content/uploads/2017/04/Ficha-técnica-Borde-y-Palmetas-Porcelanato1.pdf>.
- LEE, S.J.; et al.** "Large scale synthesis of carbon nanotubes by plasma rotating arc discharge technique". *Diamond and Related Materials*, vol. 11, no. 3-6, (2002) pp. 914-917.
- LIEW, K.M., et al.** *Mechanical Behaviors of Carbon Nanotubes: Theoretical and Numerical Approaches*. S.l.: William Andrew, 2016.
- LIU, Z.; et al.** Carbon nanotubes in biology and medicine: in vitro and in vivo detection, imaging and drug delivery. *Nano research*, vol. 2, no. 2, (2009) pp. 85-120.
- LÓPEZ, A.** XIX.- *Radiación térmica fundamentos y factores de forma* [en línea], 2011. [Consulta: 16 abril 2019]. Disponible en: <https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/cap19.pdf>.
- LU, J.P.** "Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes". *Physical Review Letters*, vol. 79, no. 7, (1997) pp. 1297.
- MARIA, K.H.; & MIENO, T.** Synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-frequency bipolar pulsed arc discharge method. *Vacuum*, vol. 113, (2015) pp. 11-18.
- MARTÍNEZ, E.** *Controladores Automáticos* [en línea]. 2013. MATURIN: INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITECNICO "SANTIAGO MARIÑO". [Consulta: 16 julio 2019] Disponible en: https://es.slideshare.net/martinezduardo/controladores-teoria-de-control-24587590?from_action=save.
- MCMURRY, J.E.** *Organic Chemistry with Biological Applications*. S.l.: Cengage Learning,

2014.

METCALFE, J.C.; & QUIGLEY, M.B.C. "Heat transfer in plasma-arc welding". *Welding journal*, vol. 54, no. 3, (1975) pp. 99-103.

MIGAL.COM. Schaeffler diagramm. [en línea], 2019. [Consulta: 23 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.migal.co/english/service/welding-stainless-steels/schaeffler-diagram-with-different-base-materials/>.

MINGO, N.; & BROIDO, D.A. "Carbon Nanotube Ballistic Thermal Conductance and Its Limits". *Physical Review Letters* [en línea], vol. 95, no. 9, (2005) pp. 096105. ISSN 0031-9007. DOI 10.1103/PhysRevLett.95.096105. Disponible en: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.096105>.

MIZEL, A.; et al. "Analysis of the low-temperature specific heat of multiwalled carbon nanotubes and carbon nanotube ropes". *Physical Review B*, vol. 60, no. 5, (1999) pp. 3264.

NTN-SNR. NTN-SNR Linear Motion: Rodamientos Lineales De Bolas. [en línea] , 2015.. [Consulta: 12 julio 2019]. Disponible en: https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-04/ball_bushings_es.pdf.

PARK, J.G.; et al. "Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization". *Carbon* [en línea], vol. 50, no. 6, (2012) pp. 2083-2090. ISSN 00086223. DOI 10.1016/j.carbon.2011.12.046. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622311009924>.

PARVEZ, K.; et al. "Exfoliation of Graphite into Graphene in Aqueous Solutions of Inorganic Salts". *Journal of the American Chemical Society* [en línea], vol. 136, no. 16, (2014) pp. 6083-6091. ISSN 0002-7863. DOI 10.1021/ja5017156. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja5017156>.

PÉREZ URBANO, W. *Fabricación y caracterización de nanotubos de carbono de multicapa producidos por PAPVD* [en línea], 2006. S.l.: Universidad Central de Colombia. [Consulta: 7 abril 2019]. Disponible en: www.bdigital.unal.edu.co/3511/.

PORTEN PERFORMANCE & TECHNOLOGY. *Soldadora Inverter Porten PS-S250DS*. 2019. S.l.: Porten Performance & Technology.

PRASEK, J.; et al. "Methods for carbon nanotubes synthesis". *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 40, (2011) pp. 15872-15884.

PULIDO, A. Mecanismos de transformación del movimiento. [blog], 2008. [Consulta: 7 abril 2019]. Disponible en: <https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transformacion-del-movimiento/>.

RANISZEWSKI, G "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., (2017) pp. 1-4.

- RAE.** Diccionario de la lengua española, 2019. *rae.es* [en línea]. [Consulta: 20 noviembre 2019] Disponible en: <https://www.rae.es/>.
- RIBA ROMEVA, C.** *Diseño concurrente*. S.l.: Univ. Politèc. de Catalunya, 2002.
- RODRÍGUEZ, H.** Cálculo mecánico de las uniones soldadas. *www.ingemecanica.com* [en línea], 2019. [Consulta: 15 abril 2019]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial46.pdf>.
- ROSLAN, M.S.; et al.** "Growth of Wall-controlled MWCNTs by Magnetic Field Assisted Arc Discharge Plasma". *Journal of Saudi Chemical Society* [en línea], (2018) Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.06.003>.
- SALVETAT, J.-P.;** et al. "Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes". *Physical review letters*, vol. 82, no. 5, (1999) pp. 944.
- SKF GROUP.** *Rolling bearings*, 2018. [en línea]. [Consulta: 11 julio 2019]. Disponible en: <https://www.skf.com/binary/21-121486/Rolling-bearings---17000-EN.pdf>.
- WANG, D.; et al.** "Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes". *Nanotechnology*, vol. 19, no. 7, (2008) pp. 75609.
- XIE, S.; et al.** Mechanical and physical properties on carbon nanotube. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [en línea], vol. 61, no. 7, (2000) pp. 1153-1158. ISSN 00223697. DOI 10.1016/S0022-3697(99)00376-5. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022369799003765>.
- YANG, D.J.;** et al. Thermal and electrical transport in multi-walled carbon nanotubes. *Physics Letters A*, vol. 329, no. 3, (2004) pp. 207-213.
- YI, W.; et al.** "Linear specific heat of carbon nanotubes". *Physical Review B*, vol. 59, no. 14, (1999) pp. R9015.
- YOUNG, W.C.; et al.** *Roark's formulas for stress and strain*. S.l.: McGraw-Hill New York, 2002.
- ZENY.** *Vacuum Pump*. 2019. S.l.: ZENY S.A, 2019.
- ZHU, W.; et al.** "Large current density from carbon nanotube field emitters". *Applied Physics Letters*, vol. 75, no. 6, (1999) pp. 873-875.
- ZOU, X.; et al.** "Cobalt-embedded nitrogen-rich carbon nanotubes efficiently catalyze hydrogen evolution reaction at all pH values". *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 53, no. 17, (2014) pp. 4372-4376. ISSN 15213773. DOI 10.1002/anie.201311111.



Firmado electrónicamente por:
**JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS**