



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA GENERADOR DE
PLASMA FRÍO PARA UN REACTOR CAPACITIVO TIPO
MAGNETRÓN SPUTTERING PARA LA OBTENCIÓN DE
NANOCATALIZADORES”**

TITULACIÓN INTEGRAL:

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A:

ALAN EDUARDO MARTÍNEZ TELLES

NO. CONTROL:

13280450

ASESORES:

DR. JAIME GARCÍA GARCÍA

DR. GILBERTO PIÑA PIÑA



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca



20 de febrero de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México, 19/Febrero/2020

ASUNTO: Liberación de Proyecto para Titulación Integral

C. ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del Egresado: ALAN EDUARDO MARTÍNEZ TELLES
Carrera: INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. de Control: 13280450
Nombre del Proyecto: "DESARROLLO DE UN SISTEMA GENERADOR DE PLASMA FRÍO PARA UN REACTOR CAPACITIVO TIPO MAGNETRÓN SPUTTERING PARA LA OBTENCIÓN DE NANOCATALIZADORES"
Producto: "TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE
"Educación, integridad y ciencia"

ING. KARINA ESPERANZA ÁLVAREZ VÁZQUEZ
JEFA DEL DEPTO. DE INGENIERÍAS



DR. JAIME GARCÍA GARCÍA	DR. GILBERTO PIÑA PIÑA	DR. SERGIO DÍAZ ZAGAL
ASESOR	ASESOR	REVISOR

c.c.p. Expediente



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Número de registro: RPHL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10



ISO 9001:2015
CERTIFIED



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Toluca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México, 19/febrero/2020

División De Estudios Profesionales
Asunto: Autorización De Impresión De Trabajo Profesional

C. ALAN EDUARDO MARTINEZ TELLES
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó, con respecto a su trabajo profesional en la OPCIÓN TITULACIÓN INTEGRAL TESIS PROFESIONAL, con el tema denominado: "'DESARROLLO DE UN SISTEMA GENERADOR DE PLASMA FRÍO PARA UN REACTOR CAPACITIVO TIPO MAGNETRÓN SPUTTERING PARA LA OBTENCIÓN DE NANOCATALIZADORES'". La División de Estudios Profesionales concede su autorización para que proceda la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

"Educación, integridad y ciencia"

ING. MIGUEL ANGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



MATM/mppd



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Número de registro: RPrIL-072
Fecha de inicio: 2017-04-10
Término de la certificación: 2021-04-10

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a dios por permitirme llegar hasta esta etapa y por acompañarme en cada uno de los momentos de mi vida.

Al Dr. Jaime García García y al Dr. Gilberto Piña Piña, mis asesores a lo largo del desarrollo de mi tesis profesional.

Y por último a mi familia, mi papa, mi mama y mi hermano su apoyo incondicional me impulsaron a llegar hasta aquí el día de hoy.

“Recuerda mirar arriba, a las estrellas, y no abajo, a tus pies.

Intenta encontrar el sentido a lo que ves y pregúntate qué es lo que hace que el

Universo exista. Sé curioso.

Por muy difícil que te parezca la vida, siempre hay algo que puedes hacer y en lo que puedes tener éxito.

Lo único que cuenta es no rendirse”

(Stephen Hawking)

Resumen

En el presente trabajo se realizó el “Desarrollo de un sistema generador de plasma frio para un reactor capacitivo tipo magnetrón sputtering para la obtención de nanocatalizadores” como solución al problema que se presentó en el laboratorio de energías sustentables del Instituto Tecnológico de Toluca en el trabajo de investigación con el título “Evaluación de nanocatalizadores en la obtención de biocombustibles a partir de desechos orgánicos”. Esta solución contemplo el diseño y desarrollo de una fuente de alto voltaje, así como el control digital de todo el proceso a través de una interfaz en un proceso automatizado que se llevó a cabo gracias a la metodología del modelo secuencial en cascada, la cual se efectuó en 5 etapas (Requisitos, diseño, implementación, verificación y mantenimiento). En la primera etapa se analizaron todos los requisitos necesarios para atender la necesidad del problema, lo cual permitió definir características operacionales y restricciones del sistema, encontrando como solución los siguientes requerimientos:

Una fuente de alto voltaje con funcionalidad en el rango de 1 a 3KV a una frecuencia de 20 a 200 KHz, una interfaz digital con funciones para controlar los procesos de ignición del plasma a un voltaje por encima de 1.5 KV y después realizar una modificación del ciclo de trabajo de este mediante PWM (Modulación por ancho de pulso) a voltajes menores que el anterior de tal manera que el proceso no fuera agresivo para el proceso de síntesis.

Además, con el fin de ahorrar al máximo en recursos se usó tarjetas de televisión viejas, reutilizando sus componentes y aplicándoles reingeniería para el propósito del proyecto construyendo de esta manera la fuente de alto voltaje.

Posteriormente mediante la etapa de diseño, se construyeron modelos teóricos haciendo estudios y cálculos de funcionamiento del circuito integrado responsable de la modulación por ancho de pulso de la tarjeta, con fórmulas provistas por la misma hoja de datos para modificar frecuencia, voltaje y eliminar algunas restricciones que le circuito integrado presento para el objetivo. En la etapa de implementación, se construyeron los primeros prototipos tanto de la fuente de alto voltaje como de la interfaz para el usuario, se realizaron las primeras pruebas de alto voltaje de funcionamiento en laboratorio alcanzando resultados exitosos de acuerdo a los cálculos realizados con anterioridad, tales fueron un voltaje de ignición de 1.5 Kv y 1.8 Kv en las pruebas, asimismo pudimos eliminar el tiempo de bloqueo del circuito integrado cuyo

valor rondaba alrededor de los 10 segundos. Después se checa que cada uno de los componentes del sistema funcionen correctamente y cumplen con los requisitos en la etapa de verificación. El objetivo de las pruebas es el de obtener información de la calidad del sistema, y sirvió para encontrar defectos, aumentar la calidad y refinar detalles.

Por último, la etapa de mantenimiento, la cual no se incluye en este trabajo debido a que se planea desarrollar como trabajo a futuro.

Todos estos pasos con llevaron a la implementación de un sistema de generación de plasma frio controlado mediante un microcontrolador para el proceso de síntesis de nanocatalizadores, los cuales no se muestran en el trabajo debido a que se enfoca más en las partes funcionales para el reactor, en las cuales se logró construir con éxito una fuente de alto voltaje funcional en el rango de 20 a 200 KHz , control mediante el uso de una interfaz digital y por supuesto sistema de suministro de gas, así como también de vacío.

Abstract

In this work, the “Development of a cold plasma generator system for a capacitive reactor type magnetron sputtering to obtain nanocatalysts” was carried out as a solution to the problem presented in the sustainable energy laboratory of the Technological Institute of Toluca at work of research with the title “Evaluation of nanocatalysts in obtaining biofuels from organic waste”. This solution contemplated the design and development of a high-voltage source, as well as the digital control of the entire process through an interface in an automated process that was carried out thanks to the methodology of the sequential cascade model, which it was carried out in 5 stages (Requirements, design, implementation, verification and maintenance). In the first stage all the necessary requirements were analyzed to meet the need of the problem, which allowed to define operational characteristics and restrictions of the system, finding the following requirements as a solution:

A high voltage source with functionality in the range of 1 to 3KV at a frequency of 20 to 200 KHz, a digital interface with functions to control plasma ignition processes at a 1.5 KV oak voltage and then make a modification of the This work cycle by means of PWM (Pulse Width

Modulation) at voltages lower than the previous one so that the process was not aggressive for the synthesis process.

In addition, in order to save resources as much as possible, old television cards were used, reusing their components and applying reengineering for the purpose of the project, thus building the high voltage source.

Subsequently, through the design stage, theoretical models were constructed by making studies and calculations of the operation of the integrated circuit responsible for the pulse width modulation of the card, with formulas provided by the same data sheet to modify frequency, voltage and eliminate some restrictions that the integrated circuit presented for the purpose. In the implementation stage, the first prototypes of both the high-voltage source and the user interface were built, the first high-voltage tests of laboratory operation were performed, achieving successful results according to the calculations made previously, such were an ignition voltage of 1.5 Kv and 1.8 Kv in the tests, we could also eliminate the blocking time of the integrated circuit whose value was around 10 seconds. Then it is checked that each of the components of the system function properly and meet the requirements in the verification stage. The objective of the tests is to obtain information on the quality of the system, and served to find defects, increase the quality and refine details.

Finally, the maintenance stage, which is not included in this work because it is planned to develop as future work.

All these steps with led to the implementation of a cold plasma generation system controlled by a microcontroller for the nanocatalyst synthesis process, which are not shown in the work because it focuses more on the functional parts for the reactor, in which it was possible to successfully build a high functional voltage source in the range of 20 to 200 KHz, control through the use of a digital interface and of course gas supply system, as well as vacuum.

Índice de Contenido

1.	Capítulo 1 Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	2
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	Objetivo general	3
1.2.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.	Hipótesis	3
1.4.	Justificación.....	4
1.5.	Delimitación.....	4
2.	Capítulo 2 Fundamentos teóricos.....	5
2.1.	El estado del plasma	5
2.2.	Principales características del plasma	5
2.2.1.	Comportamiento colectivo en el estado plasmático	6
2.2.2.	Cuasi neutralidad del plasma	6
2.3.	Clasificación del plasma	7
2.3.1.	Plasma común.....	7
2.3.2.	Plasma termonuclear.....	7
2.3.3.	Plasma de nucleons	7
2.3.4.	Plasma de Quarks-gluones	8
2.3.5.	Plasmas en equilibrio termodinámico completo	8
2.3.6.	Plasmas térmicos o plasmas calientes	8
2.3.7.	Plasmas fríos.....	9
2.4.	Vacío	9
2.4.1.	Unidades del vacío	9
2.5.	Grados de vacío.....	11
2.5.1.	Presión atmosférica.....	11
2.5.2.	Vacío bajo	11
2.5.3.	Vacío medio.....	11
2.5.4.	Alto vacío	12
2.5.5.	Ultra-alto vacío.....	12
2.5.6.	Espacio profundo.....	12
2.5.7.	Vacío perfecto.....	12
2.6.	Instrumentos para generar vacío.....	12

2.7.	Ley de Paschen	13
2.8.	Deposición de materiales por pulverización catódica (Sputtering)	15
2.9.	Funcionamiento básico de la pulverización catódica	16
2.10.	Rendimiento sputtering	17
2.11.	Sistemas de pulverización catódica	18
2.11.1.	Sputtering por diodo	18
2.11.2.	Bias sputtering	18
2.11.3.	Sputtering por haz de iones (ion-beam)	18
2.11.4.	Sputtering DC	19
2.11.5.	Sputtering AC	19
2.11.6.	Sputtering RF	19
2.11.7.	Magnetron Sputtering	20
2.11.8.	Magnetron sputtering desbalanceado	21
2.12.	Nanotecnología	21
2.13.	Nanomateriales	22
2.14.	Catalizadores	23
2.15.	Nanocatálisis y nanocatalizadores	24
2.16.	Fuentes de voltaje para generar plasmas fríos	25
2.16.1.	Fuente de Corriente Continua	25
2.16.2.	Fuente de Corriente Alterna	26
2.16.3.	Fuente de Radiofrecuencia	26
2.17.	Convertidores de potencia de CC a CA (Inversores)	26
2.18.	Magnitudes básicas de los convertidores de CD-CA (Inversores)	27
2.19.	Técnicas de modulación para controlar la potencia de un inversor	28
2.19.1.	Modulación de ancho de pulso (PWM)	29
2.19.2.	Modulación de frecuencia de pulso (PFM)	29
2.19.3.	Modulación de amplitud de pulso (PAM)	29
2.20.	Clasificación de los inversores	30
2.20.1.	Inversor de medio Puente	30
2.20.2.	Inversor de puente completo	31
2.20.3.	Inversor Push-Pull	32
2.21.	Drivers para activar dispositivos de conmutación	33
2.21.1.	Optoacoplador	33
2.21.2.	Transformador de pulsos	34

2.22.	Fuentes de alto voltaje actuales	34
3.	Capítulo 3 Estado del arte	37
4.	Capítulo 4 Fundamentos metodológicos o método.....	48
4.1.	Etapa 1: Requisitos.....	49
4.1.1.	Fuente de alimentación	50
4.1.2.	Interfaz gráfica	50
4.1.3.	Sistema de gas plasmógeno y sistema de vacío.....	51
4.2.	Etapa 2: Diseño	51
4.2.1.	Fuente de alimentación	51
4.2.2.	Interfaz	52
4.3.	Etapa 3: Implementación	53
4.3.1.	Fuente de alimentación	53
4.3.2.	Interfaz	56
4.3.3.	Pantalla principal	57
4.3.4.	Password	57
4.3.5.	Menú principal	58
4.3.6.	Configuración de parámetros de funcionamiento	58
4.3.7.	Control del proceso	59
4.3.8.	Ayuda o soporte al usuario.....	60
4.3.9.	Sistema de gas plasmógeno y sistema de vacío.....	60
4.4.	Etapa 4 Verificación	60
4.4.1.	Verificación de funcionamiento de tarjeta modificada	60
4.4.2.	Verificación de funcionamiento de interfaz	62
4.4.3.	Verificación de sistema de vacío.....	65
4.4.4.	Verificación del sistema de generación de plasma total.....	66
4.5.	Etapa 5 Mantenimiento	69
5.	Capítulo 5 Resultados.....	70
5.1.	Reingeniería aplicada a tarjeta de circuitos de cátodo frío	70
5.2.	Interfaz	71
5.3.	Vacío	72
5.4.	Reactor magnetrón sputtering	73
6.	Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones	75
6.1.	Conclusiones.....	75
6.2.	Recomendaciones	75

7. Referencias bibliográficas	76
8. Anexos.....	78

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Los estados de la materia.....	5
Figura 2. 2 Bomba mecánica de vacío	13
Figura 2. 3 Curvas de Paschen	14
Figura 2. 4 Proceso de pulverización catódica	15
Figura 2. 5 Reactor de plasma y sus partes.....	15
Figura 2. 6 Reactor de plasma tipo magnetrón sputtering	21
Figura 2. 7 Convertido de corriente directa a corriente alterna (inversor)	27
Figura 2. 8 Esquema de representación de modulación para un inversor	28
Figura 2. 9 Modulación de potencia de salida mediante PWM	29
Figura 2. 10 Modulación PFM o modulación de frecuencia variable (VFM)	29
Figura 2. 11 Modulación mediante amplitud de pulso (PAM).....	29
Figura 2. 12 Inversor monofásico.....	30
Figura 2. 13 Inversor de medio puente	31
Figura 2. 14 Inversor en configuración de puente completo	31
Figura 2. 15 Generación del nivel de tensión para un inversor monofásico	32
Figura 2. 16 Inversor monofásico en configuración.....	32
Figura 2. 17 Equipo para generación de plasma mediante sputtering.....	35
Figura 4. 1 Metodología waterfall o en cascada.....	48
Figura 4. 2 Esquema general de las partes que conforman el reactor.....	49
Figura 4. 3 Diagrama de caso de uso para la interfaz de control	50
Figura 4. 4 Diagrama a bloques del diseño de la fuente de alto voltaje	51
Figura 4. 5 Tarjeta electrónica de potencia de CCFL.....	52
Figura 4. 6 Diagrama de flujo básico del funcionamiento de la interfaz	53
Figura 4. 7 Circuito inversor OZ9938.....	54
Figura 4. 8 Pantalla touch comercial.....	56
Figura 4. 9 Diagrama de caso de uso de la ventana principal.....	57
Figura 4. 10 Diagrama de caso de uso de la ventana de seguridad.....	57
Figura 4. 11 Diagrama de caso de uso del menú principal	58

Figura 4. 12 Diagrama de caso de uso de la configuración de los parámetros.....	59
Figura 4. 13 Diagrama de caso de uso de la ventana de control de proceso.....	59
Figura 4. 14 Diagrama de caso de uso de la ventana de ayuda para el usuario	60
Figura 4. 15 Verificación de tarjeta electrónica potencia.....	61
Figura 4. 16 Onda sinusoidal	61
Figura 4. 17 Forma de onda cuasi-senoidal	62
Figura 4. 18 Pantalla principal de interfaz de control	62
Figura 4. 19 Pantalla de contraseña del sistema.....	63
Figura 4. 20 Menú principal de la interfaz de control.....	63
Figura 4. 21 Monitoreo y operación durante el proceso.....	64
Figura 4. 22 Ventana de configuración de parámetros	64
Figura 4. 23 Ventana de soporte al usuario.....	65
Figura 4. 24 Manguera y abrazadera.....	65
Figura 4. 25 Bomba mecánica para la generación de vacío	66
Figura 4. 26 Presostato	66
Figura 4. 27 Primera verificación del sistema.....	67
Figura 4. 28 Modificación en la distancia.....	67
Figura 4. 29 Disminución en la distancia	68
Figura 4. 30 Distancia entre electrodos a 4 mm.....	68
Figura 4. 31 Curva característica de diente de sierra.....	69
Figura 4. 32 Modulación del flujo de plasma generado.....	69
Figura 5. 1 Tarjeta de potencia.....	70
Figura 5. 2 Forma de onda obtenida.....	70
Figura 5. 3 En la imagen se observa la pantalla.....	71
Figura 5. 4 Resultados obtenidos de la validación hecha a la interfaz de control	72
Figura 5. 5 Cabina del reactor magnetrón sputtering	72
Figura 5. 6 Ensamble del sistema de reactor magnetrón sputtering,.....	73
Figura 5. 7 Cabina del reactor magnetrón sputtering	73
Figura 5. 8 Forma de onda obtenida durante el proceso de validación	74

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Factores de conversión de vacío para unidades de vacío en inHg, torr y micro	10
Tabla 2. 2 Rangos de niveles de vacío, en la siguiente tabla se puede observar una distribución para distintos grados de presión necesaria para cada tipo de vacío	11
Tabla 2. 3 Clasificación de nanomateriales	23
Tabla 2. 4 Características de funcionamiento de una fuente para procesos de generación de plasma	35
Tabla 4. 1 Características requeridas para el funcionamiento de fuente de alto voltaje.....	50
Tabla 5. 1 Parámetros de funcionamiento de osciloscopio durante las pruebas de alto voltaje realizadas en laboratorio.....	71

1. Capítulo 1 Introducción

Durante mucho tiempo, las técnicas de plasma se han utilizado en la creación de nuevos materiales que poseen propiedades únicas, que no pueden fabricarse por otros métodos. Una técnica particularmente importante, que ofrece muchas posibilidades, es la deposición por plasma de materiales completamente nuevos y avanzados en forma de recubrimientos sólidos con una estructura molecular inusual y una sofisticada nanomorfología (Tyczkowski, 2016).

Los procesos de plasma también pueden usarse para modificar materiales convencionales a través del tratamiento durante o después de la síntesis "clásica", lo que generalmente conduce a nuevos procesos. Sustancias con propiedades dispares, a menudo más adecuadas que las de los materiales no modificados. Entre los muchos productos interesantes fabricados por técnicas de plasma, los materiales con propiedades catalíticas ocupan un lugar especial (Tyczkowski, 2016).

Existen muchas reacciones catalíticas, como la combustión de compuestos orgánicos volátiles, la metanización del CO₂, la síntesis de Fischer-Tropsch, los procesos de electrodeposición en celdas de combustible y muchos otros, que desafían a los químicos de todo el mundo a buscar mejores catalizadores o métodos de preparación de catalizadores más efectivos (Tyczkowski, 2016).

Parece que las técnicas de plasma allanan el camino para soluciones novedosas en este campo. En general, las técnicas de plasma utilizadas en la preparación de catalizadores pueden clasificarse en uno de dos grupos según el tipo de plasma: plasma térmico y frío (Tyczkowski, 2016).

El plasma frío, es una herramienta muy prometedora para la preparación de materiales catalíticos. Recientemente, estos materiales han atraído una atención considerable debido a la posibilidad de depositarlos como recubrimientos muy finos en prácticamente todos los soportes sin ningún cambio en su geometría (Tyczkowski, 2016).

Tales recubrimientos abren el camino para nuevos diseños de reactores, denominados reactores estructurados, para diversos procesos catalíticos químicos. También pueden usarse como depósitos catalíticos en la superficie de los electrodos de la celda de combustible sin prácticamente ningún cambio en su conductividad eléctrica y permeabilidad al gas. También se espera un mayor avance con respecto a la fabricación nuevas películas delgadas sofisticadas para la división fotocatalítica de moléculas de agua y la producción eficiente de hidrógeno (Tyczkowski, 2016).

La finalidad de este trabajo es exponer el desarrollo de un sistema de plasma para un reactor tipo magnetron sputtering en el proceso de síntesis de nanocatalizadores, el cual será construido a partir de la aplicación de reingeniería a una fuente de suministro de energía para el manejo de lámparas fosforescentes de cátodo frío pues resulta más factible realizar este tipo de acoplamientos que construir un sistema desde cero, ya que los componentes no son muy comerciales

1.1. Planteamiento del problema

En el laboratorio de energías sustentables, una unidad académica ubicada dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Toluca se trabaja actualmente desarrollando un trabajo de investigación con el título *“Evaluación de nanocatalizadores en la obtención de biocombustibles a partir de desechos orgánicos”* encabezado por el Dr. Manuel Borja Salin, en el que se involucra una etapa de síntesis de nanopartículas de metales a través de un reactor tipo magnetron sputtering.

Sin embargo, los generadores comerciales de alto voltaje actuales para generación de plasma son de un costo muy elevado aproximadamente \$2860 USD en una versión austera, de tal manera que es preciso realizar la implementación de un sistema de generación de plasma para llevar a cabo el proceso de síntesis de nanopartículas para la obtención de nanocatalizadores que ayuden para mejorar la eficiencia de producción de biocombustibles, en una versión más rentable , es entonces, cuando nos queda la interrogante.

¿La aplicación de reingeniería a tarjetas de circuitos de lámparas fluorescentes de cátodo frío (CCFL) podrá servir para generar voltajes de hasta 3000 volts a una frecuencia de 20 a 200

KHz en un reactor de plasma frio tipo magnetron sputtering y ser igual de efectivo, pero considerable más económico con respecto al mercado actual?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema capaz de generar plasma frio en un reactor tipo magnetron sputtering para síntesis de nanocatalizadores.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una fuente de alto voltaje a una frecuencia en el rango de 25 KHz para la generación de plasma en un reactor capacitivo tipo magnetron sputtering.
- Realizar el control de fuente de alto voltaje por medio de un microcontrolador para que el voltaje sea variable en un rango de 1000 a 3000 volts en la etapa de ignición y de 500 a 1500 volts en la operación normal.
- Aplicar reingeniería para acondicionar fuentes de alto voltaje de equipos que utilicen lámparas fosforescentes de cátodo frio (de las siglas en ingles CCFL) de 32 o más pulgadas que utilizan rangos de voltaje como los que requiere el reactor de plasma.

1.3. Hipótesis

El desarrollo de un generador de plasma a partir de tarjetas de circuitos de lámparas fluorescentes de cátodo frio (CCFL) servirá para generar voltajes por arriba de 1000 volts y trabajar en frecuencias de hasta 200 KHz para satisfacer las condiciones de reactor de plasma frio tipo magnetron sputtering en el proceso de síntesis de nanopartículas.

1.4. Justificación

La nanotecnología tiene hoy en día infinidad de aplicaciones en muy diversas áreas, entre las que destacan medicina, materiales y electrónica. El campo más avanzado y el que tiene el mayor impacto es el diseño de nuevos materiales con propiedades nuevas o mejoradas.

Por ejemplo, han fabricado raquetas de tenis, creado pértigas de atletismo más flexibles y resistentes, se han creado nuevos materiales en base a nano partículas, nuevos y mejores componentes electrónicos, etc., se espera que en años siguientes exista una revolución tecnológica debido a la creciente búsqueda por obtener más y mejores cosas. En la búsqueda por materiales más robustos, el uso del plasma está jugando un papel muy importante actualmente pues por medio de síntesis permite modificar químicamente elementos. Sin embargo, el producir plasma no es un método sencillo, existen solo dos maneras de producirlo por medio de alta temperatura y por medio de alto voltaje.

En este trabajo, la construcción de un sistema de generación de plasma frío para un reactor de plasma tipo magnetrón sputtering por medio de alto voltaje para el proyecto, *“Evaluación de nanocatalizadores en la obtención de biocombustibles a partir de desechos orgánicos”*, en el proceso de síntesis de nanopartículas de metales tendrá como ventaja principal ser más barato con respecto al mercado actual de generadores de plasma en un amplio porcentaje, además por ser un proyecto realizado dentro de una institución pública beneficiará a alumnos en el aprendizaje e interacción con el reactor de plasma en la observación del proceso síntesis de nanopartículas de metales para hacer nanocatalizadores, el cual es un proceso muy reciente y revolucionario en el ámbito de obtención de biocombustible.

1.5. Delimitación

Este Proyecto está delimitado al diseño y desarrollo de una fuente de alto voltaje para el reactor de plasma frío tipo magnetrón sputtering, la cual tendrá como función principal ser la encargada de generar un proceso de modulación de ancho de pulso a frecuencias por arriba de 100 KHz a un voltaje de 2000 volts para realizar el proceso de ignición y atenuar los mismos parámetros hasta frecuencias de 20 KHz y 800 volts para el proceso de síntesis, asimismo la creación de una interfaz la cual se encargará del control del proceso anterior.

2. Capítulo 2 Fundamentos teóricos

En esta sección se presentan conceptos fundamentales del plasma, sus características, propiedades, formas en que podemos encontrarlo y tipos, asimismo podremos aprender sobre el concepto de vacío, tipos, maneras de generarlos, y su medición. Otro concepto que se hablara a lo largo de este capítulo es la deposición, cuya importancia es relevante pues es uno de los productos de este trabajo de tesis.

2.1. El estado del plasma

Es el cuarto estado de la materia y constituye más del 99% del universo. A medida que aumenta la temperatura, las moléculas se vuelven más energéticas y se transforman en la secuencia: sólido, líquido, gas y plasma (Figura 2.1). En las últimas etapas, las moléculas en el gas se disocian para formar un gas de átomos y luego un gas de partículas cargadas que se mueven libremente, electrones e iones positivos. Este estado se llama el estado de plasma (M.A. Rahman, 2013).



Figura 2. 1 Los estados de la materia, se puede observar que a medida que las moléculas adquieren mayor energía pasan de un estado a otro disociándose unas de otras hasta crear un plasma.

2.2. Principales características del plasma

En la mayoría de los plasmas, los electrones y protones se encuentran en igual número, haciéndolo eléctricamente neutro o casi neutro, y como este tipo de materia fluye libremente, se ve afectada en los campos eléctricos y magnéticos que forman la materia.

Estos campos logran influir en los plasmas aun estando a grandes distancias, torciéndolos y moldeándolos a su gusto, estas dos características llamadas cuasi-neutralidad y comportamiento colectivo, dos de las principales características del plasma.

2.2.1. Comportamiento colectivo en el estado plasmático

En un gas cualquiera como el aire, el movimiento de las moléculas es dominado por colisiones o fuerzas externas, esto por cuanto la fuerza gravitacional es mínima y los campos electromagnéticos no tienen relevancia al tratarse de moléculas neutras.

En un plasma, la situación es completamente diferente ya que incluye partículas cargadas (electrones y iones), los cuales son susceptibles a campos electromagnéticos. Es más, conforme estas partículas se mueven existe la posibilidad de que se produzcan concentraciones de carga positiva o negativa, conllevando a la generación de campos eléctricos dentro del plasma (Brenes, 2013).

También, recordemos que cargas en movimiento significa corrientes eléctricas lo cual, a su vez, significa campos magnéticos, la combinación de estos campos dentro del plasma puede afectar otras de sus partículas cargadas a grandes distancias, por lo que se dice que el plasma es susceptible a fuerzas de Coulomb de largo alcance, es justamente este comportamiento colectivo el culpable de que el plasma presente características muy diferentes bajo distintos escenarios (Brenes, 2013).

2.2.2. Cuasi neutralidad del plasma

Debido a la alta movilidad de los electrones, cualquier concentración de carga positiva que pudiera dar lugar a un campo eléctrico es anulada por una avalancha electrónica de manera prácticamente instantánea.

Sin embargo, dependiendo de la densidad y de la temperatura de un plasma en particular, existirán en él regiones en las cuales habrá concentraciones de carga y, por lo tanto, campos eléctricos; el tamaño de dichas regiones idealizadas como esferas está dado por el radio de Debye (llamado también longitud de Debye), que puede variar unas centenas de nanómetro,

dentro de una esfera de Debye se rompe la neutralidad, entonces podemos decir que si las dimensiones totales de nuestro cúmulo de gas ionizado son mucho mayores a un radio de Debye, se cumple con la condición de cuasi neutralidad (Brenes, 2013).

2.3. Clasificación del plasma

El plasma se puede encontrar de dos maneras en el medio ambiente, natural y artificial. De manera natural el plasma se encuentra en el viento solar, atmósferas de estrellas, en el núcleo de la vía láctea y otras galaxias. Sin embargo, también podemos observar este estado en nuestro planeta en diversas formas, un ejemplo muy claro es la aurora formada en los polos terrestres en regiones de Islandia, Alaska, Noruega y Finlandia. De manera general el plasma que encontramos en la naturaleza podemos clasificarlo como se cita a continuación en:

2.3.1. Plasma común

Las capas de electrones de los átomos son parcialmente deterioradas (debido a una alta temperatura o presión). Los electrones libres son responsables de las características plasmáticas de la sustancia en cuestión (Ruvalcaba, 2014).

2.3.2. Plasma termonuclear

Las capas electrónicas de los átomos no existen, la sustancia es una mezcla de núcleos independientes y electrones libres. En este estado se encuentran el plasma en los núcleos de las estrellas (Ruvalcaba, 2014)

2.3.3. Plasma de nucleons

Debido a muy altas temperaturas o presiones, los mismos núcleos atómicos son fragmentados. La materia es una mezcla de electrones, protones y neutrones. Los plasmas nucleónicos se manifestaron a los 10^{-5} s después del comienzo del Universo, donde los quarks crearon los primeros protones y neutrones. Se encuentra también este tipo de plasma en las capas exteriores de una supernova explotando, donde su comienzo desarrolla una onda de choque de gas presionado. En esta capa por un corto tiempo se dan lugar disturbios en las reacciones termonucleares, que dan lugar a elementos pesados (Ruvalcaba, 2014)

2.3.4. Plasma de Quarks-gluones

En altas energías los nucleones mismos se desintegran en sus constituyentes: los quarks y los gluones. En ese estado se encontraba la materia quizá hasta el primer décimo de microsegundo después del comienzo del Universo y artificialmente se logró reproducir este estado de la materia en el CERN en el año 2000.

Los plasmas producidos artificialmente se pueden apreciar en diversos dispositivos como son: los televisores o monitores con pantalla de plasma, las lámparas fluorescentes, los tubos de neón, las soldaduras de arco, la materia expulsada para la propulsión de cohetes, el interior de los reactores de fusión, las descargas eléctricas de uso industrial, las bolas de plasma, y por supuesto, los producidos en laboratorio (Ruvalcaba, 2014). Mientras que el plasma generado artificialmente por el ser humano a través de distintos procesos podemos clasificarlos de acuerdo al equilibrio térmico que presentan en:

2.3.5. Plasmas en equilibrio termodinámico completo

En los plasmas de equilibrio térmico completo todas las partículas están en equilibrio unas con otras y con la radiación dentro del plasma como se encuentran las estrellas y en nebulosas (García, 2012).

2.3.6. Plasmas térmicos o plasmas calientes

Los plasmas térmicos consisten de una mezcla de electrones, iones y especies neutrales en un ambiente eléctricamente neutro y por trabajar a presiones reducidas, puede considerarse como un gas a muy alta temperatura parcial o totalmente ionizado. Los plasmas térmicos se caracterizan por su alta densidad de energía y su igualdad entre la temperatura de sus partículas pesadas y la temperatura de sus electrones.

En los plasmas calientes una temperatura común caracteriza a todas las partículas en el plasma, La temperatura en su interior de los plasmas térmicos llega a alcanzar millones de grados (10^7 °C a 10^9 °C), pero no hay equilibrio con la radiación contenida en ésta, algunos ejemplos de este tipo de plasma son; arcos de alta intensidad, antorchas de plasma y descargas de alta intensidad de potencia.

2.3.7. Plasmas fríos

En los plasmas fríos la temperatura de las partículas pesadas es ligeramente diferente del contenedor del plasma, la energía cinética que tienen los electrones en el plasma es muy alta de uno o más órdenes de magnitud, es decir, la temperatura de los electrones es mucho mayor que la temperatura de los iones, se caracterizan por el hecho de que se encuentran a temperatura dentro del rango de 20 °C a 100 °C, además poseen bajas densidades de energía comparadas con los plasmas térmicos y por su gran diferencia entre las temperaturas de sus partículas pesadas y la temperatura de sus electrones.

Dentro de las aplicaciones de los plasmas fríos se encuentran: descargas luminiscentes, descargas corona y descargas de radiofrecuencia, elaboración de materiales para circuitos integrados y celdas fotovoltaicas, generación de ozono y procesos de descontaminación del agua, cirugías (relacionado con el corte y cauterización), procesos de cicatrización de la piel, limpieza dental, tratamiento para papilomas, desinfección y esterilización de equipo médico.

2.4. Vacío

El vacío puede definirse como un espacio vacío de materia, donde se han eliminado gases (Al-Dmour, 2017); sin embargo, lograr tal espacio vacío es esencialmente imposible en la tierra. En cambio, el vacío se describe mejor como un espacio con presión gaseosa mucho menor que la presión atmosférica. Los físicos y los científicos del vacío describen esta falta de un "vacío perfecto" en cámaras hechas por el hombre, como los hornos de producción, como presión parcial o vacío parcial (Reál J. Fradette, 2016).

2.4.1. Unidades del vacío

Medir el vacío, como con cualquier tipo de medición, requiere unidades de medida estándar. Las pulgadas o milímetros de mercurio, torr y micras son tres unidades de medida asociadas típicamente con la industria del horno de vacío. Otros campos de vacío utilizan Pascales (Pa o kPa.). Debido al trabajo del científico Evangelista Torricelli, del siglo XVII, sabemos que la atmósfera generalmente ejerce suficiente presión a nivel del mar para soportar una columna de mercurio de aproximadamente 30 pulgadas (760 mm).

Desde esa base, podemos medir las disminuciones de la presión atmosférica en términos de pulgadas o milímetros de mercurio. Por lo tanto, una caída del 10% en la presión atmosférica indicaría una caída de 3 pulgadas en la altura de nuestra columna de mercurio. De esta manera, el vacío llegó a medirse por la diferencia entre la presión atmosférica normal y la presión en el sistema que se está midiendo (Reál J. Fradette, 2016).

Por lo tanto, una disminución del 10% en la densidad del gas de la presión atmosférica se medirá como un vacío de 3 pulgadas. Para las mediciones diarias de vacío, como en el pronóstico del tiempo, las pulgadas de mercurio funcionan bien, pero para las mediciones en una escala más fina, se necesitan otras unidades.

Un "torr", una unidad nombrada en honor de Torricelli, es equivalente a un milímetro de mercurio, lo que arroja la cifra de 760 torr como presión atmosférica normal a nivel del mar. Torr como unidades de medida se utilizan típicamente para vacíos en el rango de 1 a 760 Torr. Para mediciones de vacío en una escala aún más pequeña, el término "micrón" es el término de uso. Una micra es igual a 0.001 Torr (10^{-3} Torr).

Los micrones (representados por el símbolo μ) se utilizan normalmente para medir vacíos en el rango de 10^{-3} a 1 Torr. Para fines de tratamiento térmico, torr y micras son las unidades de medida más utilizadas (Reál J. Fradette, 2016). La tabla 2.1 ilustra los factores de conversión para las tres unidades discutidas anteriormente.

Tabla 2. 1 Factores de conversión de vacío para unidades de vacío en inHg, torr y micro.

Unidades de medida de vacío			
	In hg (abs)	torr	microns
1 inhg	1	25.4	25.4×10^4
1 torr	3.937×10^{-2}	1	1000
1 micron	3.937×10^{-5}	1×10^{-3}	1

2.5. Grados de vacío

La calidad del vacío se subdivide en rangos de acuerdo con la tecnología requerida para lograrlo o medirlo. Una distribución típica de los rangos aceptados universalmente se puede apreciar en la tabla 2.2 mostrada a continuación.

Tabla 2. 2 Rangos de niveles de vacío, en la siguiente tabla se puede observar una distribución para distintos grados de presión necesaria para cada tipo de vacío.

Nivel de vacío	
Presión atmosférica	760 Torr
Vacío bajo	760 a 25 Torr
Vacío medio	25 a 1×10^{-3} Torr
Alto vacío	1×10^{-3} a 1×10^{-9} Torr
Ultra alto vacío	1×10^{-9} a 1×10^{-12} Torr
Extremadamente alto vacío	$< 1 \times 10^{-12}$ Torr
Espacio profundo	1×10^{-6} a $< 3 \times 10^{-17}$ Torr

Los grados previstos, se describen a continuación a detalle conforme a sus características principales y rangos.

2.5.1. Presión atmosférica

Es variable, pero está estandarizada a 760 Torr o 101.325 kPa.

2.5.2. Vacío bajo

También llamado vacío brusco, es un vacío que puede lograrse o medirse con un equipo básico como un aspirador (Reál J. Fradette, 2016).

2.5.3. Vacío medio

Es un vacío que normalmente se logra con una sola bomba, pero la presión es demasiado baja para medirla con un manómetro mecánico. Puede medirse con un medidor McLeod, un

medidor térmico o un medidor de capacitancia. (La instrumentación se discutirá más adelante) (Reál J. Fradette, 2016).

2.5.4. Alto vacío

Vacío donde el MFP de los gases residuales es más largo que el tamaño de la cámara o del objeto bajo prueba. Por lo general, el alto vacío requiere el bombeo de etapas múltiples y la medición del medidor de iones. La NASA ha revelado que el nivel de vacío registrado en la luna era 1×10^{-9} Torr. 1 (Reál J. Fradette, 2016).

2.5.5. Ultra-alto vacío

Requiere hornear la cámara para eliminar los rastros de gases y otros procedimientos especiales. La mayoría de los estándares definen el vacío ultra alto como presiones por debajo de 10^{-8} Torr (Reál J. Fradette, 2016).

2.5.6. Espacio profundo

Generalmente es mucho más vacío que cualquier vacío artificial (Reál J. Fradette, 2016).

2.5.7. Vacío perfecto

Es un estado ideal de ausencia de partículas. No se puede lograr en un laboratorio, aunque puede haber volúmenes pequeños que, por un breve período, no tengan partículas de materia en ellos (Reál J. Fradette, 2016).

2.6. Instrumentos para generar vacío

La bomba de vacío es un equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes, redes de tuberías o en cualquier proceso donde se requiera reducir la presión interior de un sistema, a valores inferiores a la atmosférica, (Figura 2.2) (Mundo compresor, 2019).



Figura 2. 2 Bomba mecánica de vacío para la extracción de gases en el interior de recipientes.

Existen diferentes diseños, siendo los más habituales las bombas de pistón, tornillo, paletas, lobulares, de diafragma o de anillo líquido. El funcionamiento es similar al de su compresor homólogo, pero con la diferencia de que está pensada para aspirar y no para comprimir el aire o gas que aspira.

2.7. Ley de Paschen

La comprensión del mecanismo de la descomposición de la ionización en los gases ha sido un gran esfuerzo en la física de descarga durante más de un siglo.

La ley de Paschen es una ecuación que describe el voltaje de ruptura entre dos electrodos en función de la distancia de separación y la presión del gas intermedio. Para espacios grandes ($d > 100 \mu\text{m}$), la "curva de Paschen" describe la tensión de paso V_B como:

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma_{SE}})]} \quad (2.1)$$

Donde V_B es el voltaje de ruptura en volts, p es la presión en pascales, d es la distancia entre los conductores en metros, γ_{SE} (coeficiente de Townsend) es el número medio de electrones secundarios generados por ion, A es la ionización de saturación en el gas en un determinado, B está relacionado con la excitación y energías de ionización (R. Massarczyk, 2016)

Dado que este coeficiente es a menudo poco conocido, los parámetros A y γ_{SE} se combinan generalmente en un parámetro que convierte la ecuación en:

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(A'pd)} \quad (2.2)$$

Paschen estudió el voltaje de ruptura de varios gases entre placas metálicas paralelas a medida que variaban la presión del gas y la distancia de separación:

- Con una longitud de separación constante, la tensión necesaria para atravesar la separación disminuyó a medida que se reducía la presión y luego aumentaba gradualmente, excediendo su valor original.
- Con una presión constante, la tensión necesaria para causar un arco se reduce a medida que se reduce el tamaño del hueco, pero solo hasta un punto. A medida que la brecha se redujo aún más, el voltaje requerido para causar un arco comenzó a aumentar y nuevamente excedió su valor original.
- Para un gas dado, el voltaje es una función solo del producto de la presión y la longitud entre los electrodos. La curva que encontró de voltaje frente al producto de longitud de la brecha de presión (derecha) se llama curva de Paschen. Encontró una ecuación que se ajusta a estas curvas, que ahora se llama la ley de Paschen.

A presiones y longitudes de separación mayores, el voltaje de ruptura es aproximadamente proporcional al producto de la presión y la longitud de separación, y el término ley de Paschen a veces se usa para referirse a esta relación más simple (R. Massarczyk, 2016). Algunos ejemplos de la curva de Paschen (Figura 2.3) aplicados a diferentes gases se presentan en (Lieberman, 2005).

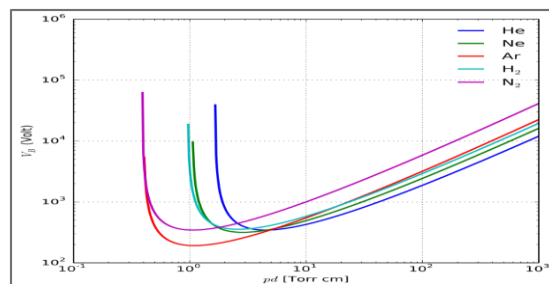


Figura 2. 3 Curvas de Paschen obtenidas de helio, neón, argón, hidrogeno y nitrógeno, medida que el vacío se incrementa en cada uno de los casos el voltaje de ruptura para una descarga es menor.

2.8. Deposición de materiales por pulverización catódica (Sputtering)

La pulverización catódica o sputtering, es un proceso no térmico de evaporación donde los átomos de la superficie de un material son expulsados físicamente por la transferencia de momento producida al hacer bombardear sobre un blanco partículas energéticas de tamaño atómico (Gutierrez, 2017) , como se muestra en la Figura 2.4.

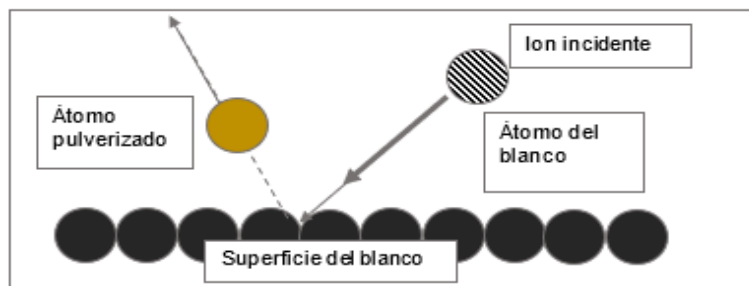


Figura 2. 4 El proceso de pulverización catódica, donde se puede observar como un ion incidente expulsa a un átomo de la superficie del blanco causando que se pulverice.

Estas partículas usualmente son iones gaseosos acelerados desde un plasma, mientras que el material a ser pulverizado (blanco) puede ser un elemento, una aleación, un material compuesto o una mezcla de varios elementos. En la deposición por pulverización catódica, los átomos del blanco son recondensados en la superficie de un sustrato, formando así un recubrimiento, el esquema de este sistema de deposición se ilustra en la Figura 2.5.

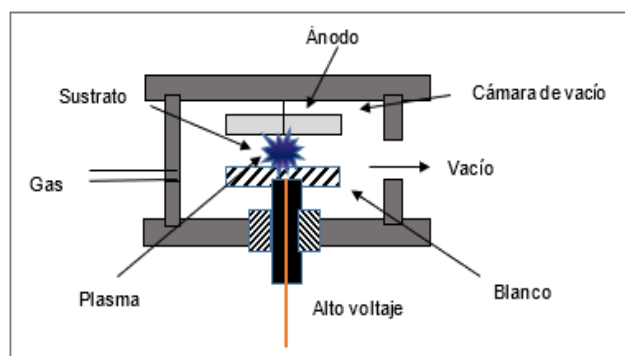


Figura 2. 5 Reactor de plasma y sus partes, un sistema normalmente utilizado para llevar a cabo la pulverización catódica en su interior.

2.9. Funcionamiento básico de la pulverización catódica

El principio de funcionamiento de sputtering está basado en la descarga luminosa generada por un campo eléctrico entre dos electrodos dentro de una cámara de vacío, la cual se evacúa hasta una presión base de 1 mPa a 10 μ Pa para mantener el sistema en un ambiente limpio, libre de impurezas y gases (García, 2012).

En uno de los electrodos se encuentra el material a depositar (blanco) donde se producirá un bombardeo de iones (partículas incidentes) para evaporarlo y que los átomos desprendidos se depositen en un sustrato previamente preparado. El blanco es conectado a una fuente de alimentación que puede ser de corriente directa (CD) o corriente alterna (CA), mientras que el sustrato puede estar aterrizado además éste puede ser calentado o enfriado.

Las partículas incidentes transfieren su energía y momento a los átomos de la superficie del blanco, dando lugar a la remoción de aquellos átomos del blanco con la energía suficiente para superar la energía local de enlace. Normalmente el ión incidente proviene de un gas inerte de masa elevada (por ejemplo, Argón). La colisión simple se obtiene cuando es removido un átomo de la superficie por la energía del ión incidente, aunque puede existir una remoción de átomos por efecto de retroceso, es decir existen colisiones entre los átomos en el blanco producidas por la energía del ión incidente (García, 2012).

Varios de los efectos ocurridos durante el proceso sputtering pueden explicarse a partir de la teoría de transferencia de momento, estos efectos incluyen:

- Rendimiento de sputtering.
- Hay un “umbral de energía” por debajo del cual no se produce el sputtering sin importar que tan alto sea el flujo incidente.
- Muchos átomos del blanco bombardeados tienen energías mucho más altas que los átomos térmicamente evaporados.
- Los átomos expulsados desde monocristales tienden a ser expulsados en las direcciones de los planos compactos del cristal.

- En un material policristalino algunos planos cristalográficos son bombardeados con más eficiencia que otros.
- Los átomos bombardeados desde una aleación utilizada como blanco, se depositan en relación con la composición química del material en bulto y el depósito no depende de su presión de vapor relativa como en el caso de la evaporación térmica.
- No se ha observado sputtering por electrones. La emisión de electrones secundarios por bombardeo de iones es baja, sin embargo, a altas temperaturas se esperarían altas tasas de emisión de termoelectrones.

2.10. Rendimiento sputtering

El rendimiento sputtering S es la tasa de remoción de átomos de la superficie debido al bombardeo de iones, es definido como; el valor medio de átomos removidos de la superficie de un sólido por iones incidentes y está dado por (Garcia, 2012):

$$S = \frac{\text{Átomos removidos}}{\text{Iones incidentes}} \quad (2.3)$$

Sputtering es causado por las interacciones de las partículas incidentes con los átomos de la superficie del blanco. La eficiencia de sputtering se debe a los siguientes factores:

- Energía de las partículas incidentes.
- Target (material blanco).

La eficiencia de sputtering puede medirse por los siguientes métodos:

- Pérdida de peso del blanco.
- Decremento de espesor del blanco.

2.11. Sistemas de pulverización catódica

2.11.1. Sputtering por diodo

Es la forma más simple de sputtering, en la que se usa una diferencia de potencial entre un cátodo y un ánodo para crear un plasma, el cual es utilizado para pulverizar la superficie del blanco (ubicado en el cátodo). El material es entonces transportado desde el blanco hacia un sustrato (ubicado en el ánodo) formando así un recubrimiento. Se pueden depositar así películas de metales puros o aleaciones usando descargas de gases nobles (típicamente Ar) con blancos metálicos (Gutierrez, 2017).

2.11.2. Bias sputtering

La pulverización catódica por voltaje de polarización (Bias) es una variante del sputtering de diodo en la que los sustratos son bombardeados por iones durante la deposición, este mecanismo puede hacer que el material que no se halla unido bien sea re-pulverizado, se implanten iones de bajas energías en el recubrimiento, desorción de gases o produzca modificaciones en la morfología de los recubrimientos. La fuente para el sputtering no necesita ser un blanco de sputtering, sino que puede ser tomada desde una fuente de evaporación, un gas reactivo con constituyentes condensados o una mezcla de gases reactivos con constituyentes condensados y otros gases que reaccionan con estos constituyentes condensados para formar compuestos (Gutierrez, 2017).

2.11.3. Sputtering por haz de iones (ion-beam)

En este tipo de pulverización catódica se utiliza un cañón de iones para desprender el material de los blancos, en este sentido el plasma no se genera en la cámara de deposición, sino que se produce en la fuente de los cañones de iones. Este tipo de sputtering es especialmente útil para controlar el área de deposición de los recubrimientos, pues permite de manera puntual depositar el material deseado, además no se entra en contacto con los elementos del plasma, lo que permite obtener una mayor pureza en los recubrimientos (Gutierrez, 2017).

2.11.4. Sputtering DC

Esta técnica utiliza una fuente de corriente directa (DC por sus siglas en inglés) para la generación del plasma en la que se produce una diferencia de potencial entre un electrodo denominado como cátodo (donde está situado el blanco) y otro denominado ánodo (donde está situado el sustrato) y el cual la mayoría de las veces está bajo un potencial a tierra. Para establecer una descarga de diodo DC en el argón se necesita que la presión del gas sea mayor de 10 mTorr para una región de generación de plasma de aproximadamente 1 cm de longitud. El límite de presión para realizar deposición es de 100 mTorr, a presiones mayores el material pulverizado es devuelto y dispersado hacia el electrodo, impidiendo la deposición. El cátodo (blanco) en la descarga de diodos DC debe ser un conductor eléctrico puesto que un material aislante produce el fenómeno del “ánodo desaparecido”, en el que se carga la superficie del blanco evitando la pulverización de la misma y “desapareciendo” así el ánodo, este fenómeno también ocurre cuando el blanco es inicialmente un conductor pero desarrolla una capa no conductora debido a reacciones con los gases en el plasma, lo cual produce arcos eléctricos y disminuye la velocidad de pulverización. Una ventaja del sputtering DC es que el plasma puede establecerse uniformemente sobre un área grande alrededor del blanco, lo que produce unas altas velocidades de pulverización (Gutierrez, 2017).

2.11.5. Sputtering AC

En la pulverización catódica de corriente alterna (AC por sus siglas en inglés) el potencial del blanco es revertido periódicamente, por lo general se usan frecuencias menores a 50kHz produciendo movilidad de iones similar a la del sputtering DC. Aquí el sustrato, la cámara de deposición u otro blanco de sputtering pueden ser usados como contra-electrodos. En el AC sputtering asimétrico el sustrato es el contra-electrodo y el recubrimiento depositado es repulverizado periódicamente para mejorar la pureza del recubrimiento (Gutierrez, 2017).

2.11.6. Sputtering RF

La pulverización catódica por radio frecuencia (RF) ocurre a frecuencias superiores a 50 kHz. En ésta, los iones no alcanzan suficiente movilidad como para establecer una descarga similar a la del sputtering DC y los electrones tienen suficiente energía como para causar colisiones

ionizantes en el espacio entre los electrodos, lo que produce el plasma en el espacio entre los electrodos. Una de las mayores ventajas de usar sputtering RF es que se pueden utilizar blancos no conductores pues se aplica un potencial oscilante en el blanco, lo que hace que en cada medio ciclo se puedan acelerar los iones del plasma hacia la superficie con suficiente energía como para producir la pulverización catódica y en el otro medio ciclo, los electrones del plasma alcanzan la superficie impidiendo cualquier tipo de acumulación de carga. Las frecuencias RF usadas para la deposición por sputtering están en el rango de 0.5 y 30 MHz siendo 13.56 MHz la frecuencia más usada comercialmente. Una de las mayores desventajas de la pulverización catódica de materiales semiconductores o aislantes es que la mayoría de estos materiales tienen baja conductividad térmica, grandes coeficientes de expansión térmica y son usualmente materiales frágiles, y este tipo de propiedades son indeseables en un proceso como el RF sputtering donde la mayoría de la energía de bombardeo produce calor y se generan grandes gradientes de temperatura en el blanco, lo que puede producir su fractura (Gutierrez, 2017).

2.11.7. Magnetron Sputtering

Una de las configuraciones de pulverización catódica más usadas es el magnetron sputtering, en la cual aplica un campo magnético cerca al blanco para concentrar los electrones de la cámara de pulverización en dicha región y con el alto flujo de electrones se genera un plasma de alta densidad desde el cual se puedan extraer los iones que realizan posteriormente la pulverización del blanco, incrementando así las velocidades de deposición y de pulverización. La pulverización catódica con magnetron es un método bastante exitoso en la producción de películas de alta calidad y pureza a una velocidad de deposición razonable, por lo que su uso comercial ha sido ampliamente extendido desde su desarrollo a mediados de la década de 1970. Gracias al campo magnético, los electrones usados para crear el plasma no bombardean los substratos, sino que quedan atrapados en trayectorias cicloides cerca al blanco, de este modo no hay daño por radiación y temperatura hacia los substratos, lo que permite la utilización de substratos que son sensibles a la temperatura como los plásticos con mínimos efectos adversos (Gutierrez, 2017). Existen sistemas de pulverización catódica con magnetron cilíndrico o plano como se muestran en la Figura 2.6.

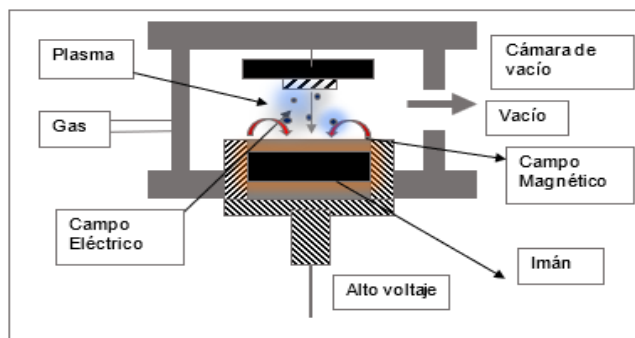


Figura 2. 6 Reactor de plasma tipo magnetrón sputtering, se pueden observar las partes de un reactor de este tipo, este método representa amabilidad para el proceso de síntesis de partículas debido a la presencia de un campo magnético en el interior del reactor.

2.11.8. Magnetron sputtering desbalanceado

Una desventaja de las configuraciones de magnetron sputtering es que el plasma está confinado a estar cerca al cátodo, lo cual aumenta la dificultad de que los gases del plasma puedan reaccionar con la superficie del sustrato y de las partículas recién depositadas, disminuyendo así la efectividad del sputtering reactivo. Esta desventaja puede ser superada al aplicar un voltaje de polarización RF (bias) en el cátodo, así como un potencial DC, sin embargo, esta solución no es efectiva para todos los materiales.

Alternativamente se puede usar una configuración de magnetron desbalanceada en la que el campo magnético es tal que algunos de los electrones del plasma pueden escapar de la región del cátodo y pueden llegar a la superficie del sustrato. Una desventaja de este tipo de configuración es que se produce un flujo no uniforme de electrones que escapan del plasma, generando así una pulverización y deposición no uniforme (Gutierrez, 2017).

2.12. Nanotecnología

La nanotecnología, introducida hace casi medio siglo, es un área de investigación activa con ciencia novedosa y aplicaciones útiles que se ha ido consolidando en las últimas dos décadas.

La nanotecnología, un término que abarca la ciencia, la ingeniería y las aplicaciones de los materiales submicrométricos implica el aprovechamiento de las propiedades físicas, químicas

y biológicas únicas de las sustancias a nanoescala en formas fundamentalmente nuevas y útiles. La promesa económica y social de la nanotecnología ha llevado a inversiones por parte de gobiernos y empresas de todo el mundo. Las complejidades y complejidades de la nanotecnología, aún en la etapa inicial de desarrollo, y el amplio alcance de estas aplicaciones potenciales, se han convertido cada vez más importante (Wang, 2018).

Un nanómetro es una mil millonésima parte de un metro. Por ejemplo, una hoja de papel tiene aproximadamente 100,000 nanómetros de grosor; un solo átomo de oro tiene aproximadamente un tercio de un nanómetro de diámetro (Garcia, 2012). Las dimensiones entre aproximadamente 1 y 100 nanómetros se conocen como nanoescala (Ramos, 2017).

La nanotecnología es la comprensión y el control de la materia en las dimensiones entre aproximadamente 1 y 100 nanómetros, donde los fenómenos únicos permiten nuevas aplicaciones.

Abarcando la ciencia, la ingeniería y la tecnología a nanoescala, la nanotecnología implica la obtención de imágenes, la medición, el modelado y la manipulación de la materia en esta escala de longitud (Wang, 2018).

2.13. Nanomateriales

Hoy en día, nanotecnología puede usarse en muchos campos científicos como química, física, ciencia de los materiales e ingeniería, teniendo así aplicaciones en medicina, bienes de consumo, comunicación, informática, energía, agricultura, tratamiento de agua e industria aeroespacial entre otras (Ramos, 2017).

El tamaño tan pequeño de estos materiales les aporta propiedades únicas y éstas pueden ser controladas según la estructura y composición en la nanoescala. Los nanomateriales son definidos como una sustancia o materiales químicos que se utilizan y fabrican a una escala muy reducida. Éstos se desarrollan para exhibir características como mayor resistencia, reactividad química o conductividad en comparación con el mismo material a otras escalas mayores. Este hecho es principalmente debido a su estructura y la mayor relación entre el área superficial y el volumen (Ramos, 2017).

Los nanomateriales pueden ser clasificados según la dimensionalidad de la nanoestructura, tal y como se muestra en la tabla 2.3, éstos pueden ser nanopartículas (objetos donde todas las dimensiones espaciales son nanométricas), nanocables (objetos que se alargan en la mesoescala en una dirección espacial, pero con una sección transversal nanométrica) y superficies delgadas (superficies constituidas por unas pocas capas atómicas de espesor) tales como revestimientos o películas.

Tabla 2. 3 Clasificación de nanomateriales.

Nanomateriales		
Dimensionalidad de nanoestructuras		
Nanopartículas: – Metal noble – Puntos cuánticos semiconductores – Poliméricas	Nanocables: – Metal – Óxido de metal – Calcogenuros metálicos – Semiconductor – Nanotubos de carbono	Nanopelículas: – Multicapas metálicas – Grafeno – Nanopelículas inorgánicas – Dicalcogenuros de metales de transición

2.14. Catalizadores

La catálisis forma parte esencial de diversos procesos de nuestra vida. Gracias a ella, tienen lugar diferentes funciones en nuestro organismo efectuadas por un tipo de catalizadores específicos denominados enzimas. Sin embargo, la catálisis ha hecho posible diversas reacciones en procesos industriales de gran utilidad tales como los que se dan en las industrias química y petroquímica (Santos, 2016).

Los fenómenos provocados por catálisis se caracterizan en intervenir en el mecanismo de la reacción sin consumirse ni alterar el rendimiento, modificando al mismo tiempo la energía de activación de dicha transformación.

Existen diversos tipos de catálisis: homogénea cuando el catalizador y los reactivos se encuentran dispersos en la misma fase, heterogénea cuando el catalizador se encuentra en

una fase separada o enzimática que se define como un carácter intermedio entre la homogénea y heterogénea.

2.15. Nanocatálisis y nanocatalizadores

Con la aparición de la nanotecnología donde se lleva a cabo la manipulación de la materia en escala nanométrica, apareció la nanocatálisis, la cual trajo consigo mejoras significativas en la velocidad de reacción de diferentes reacciones gracias al aumento del área superficial de los sólidos usados como catalizadores. La nanocatálisis se refiere a la aplicación de nanomateriales como catalizadores que ha sido muy relevante en los últimos años. Las aplicaciones de los nanocatalizadores se orientan tanto a la catálisis homogénea como a la heterogénea, en esta última se aprovechan varias propiedades como la mayor área superficial y por tanto mayor cantidad de sitios activos, además un mayor potencial superficial lo que puede conducir a sitios más activos en comparación a catalizadores convencionales (Santos, 2016).

La diferencia actual entre nanocatálisis y catálisis radica en el tamaño de partícula menor a 100 nm en el caso de la primera, comprobándose cambios considerables en el comportamiento y la potencialización de propiedades de los materiales a esta escala. Por ejemplo, las nanopartículas de oro han mostrado una alta actividad catalítica inesperada que no posee este metal a una dimensión mayor. Asimismo, compuestos con porosidades nanométricas también cambian su actividad catalítica.

Los nanocatalizadores que se obtienen en la actualidad van dirigidos a mejorar la selectividad, un bajo consumo de energía y una elevada efectividad en el rendimiento de la reacción. Su morfología, tamaño y estabilidad térmica y química juegan un rol primordial. La variedad de reacciones que se pueden catalizar con este tipo de nanomateriales es muy diversa, entre ellas la obtención de biocombustibles, reacciones de reducción, las ocurridas en celdas de combustible de membrana de intercambio protónico y procesos de extracción de aceites ligeros en crudos pesados. Se tienen muchas tendencias en cuanto a nanocatálisis se refiere. Una de ellas es diseñar procesos más verdes y más seguros, con un mayor control sobre la reactividad. Los nanomateriales que se pueden utilizar como nanocatalizadores se pueden obtener por diferentes métodos que en nanotecnología se clasifican como top down y bottom

up. Por su parte, otra corriente se orienta hacia la generación de nanocatalizadores con base en la biomimética (imitación de la naturaleza) para obtener una mejor reactividad (Santos, 2016).

2.16. Fuentes de voltaje para generar plasmas fríos

Las fuentes de voltaje son actualmente el medio por el que se puede realizar el proceso de generar un plasma frío, en este apartado del trabajo de tesis se explicara las maneras en las cuales se puede generar (A. von Keudell, 2017).

El tipo de plasma más adecuado depende de la aplicación particular y del rango de presión requerido. Más comúnmente es el calentamiento de un plasma con un campo eléctrico, que es un campo eléctrico constante (DC), un campo eléctrico alterno a bajas frecuencias (AC) o a frecuencias de radio (RF), o una onda electromagnética a frecuencias de GHz (A. von Keudell, 2017).

Dependiendo de la frecuencia de los campos eléctricos, el plasma es correspondientemente diferente debido a la inercia diferente de los electrones y los iones. Además, los electrones y los iones en un plasma pueden manipularse mediante el uso de campos magnéticos, que pueden confinar especies cargadas, ya que siguen principalmente las líneas del campo magnético. Uno puede distinguir cuatro tipos diferentes de maneras de generar plasma dependiendo de la frecuencia de los campos eléctricos aplicados utilizados para la generación de plasma (A. von Keudell, 2017).

2.16.1. Fuente de Corriente Continua

En un plasma de CC, se genera un plasma entre dos electrodos y una corriente continua fluye a través del sistema, que es transportado por los iones libres y los electrones en el plasma. La densidad del plasma se puede mejorar utilizando campos magnéticos para aislar las especies cargadas de los límites del plasma, como, por ejemplo: en plasmas de magnetrón (A. von Keudell, 2017).

2.16.2. Fuente de Corriente Alterna

En un plasma de CA, la frecuencia del campo eléctrico es lo suficientemente baja como para que los electrones y los iones puedan seguir la oscilación del campo eléctrico. Tanto los electrones como los iones contribuyen a la corriente en los electrodos (A. von Keudell, 2017).

2.16.3. Fuente de Radiofrecuencia

En un plasma de RF, la frecuencia del campo eléctrico está en el rango de las ondas de radio y es tan alta que solo los electrones pueden seguir al campo eléctrico, mientras que los iones permanecen casi en reposo. La corriente de plasma está dominada por la corriente de desplazamiento en lugar de por la corriente de conducción. Por lo tanto, también no conductor (A. von Keudell, 2017).

Las capas de los electrodos de plasma son posibles, lo que es esencial para el tratamiento con plasma de óxido de silicio u otros aislantes. El calentamiento de plasma se produce a través de pérdidas óhmicas de la corriente en el volumen de plasma y debido al calentamiento estocástico, cuando los electrones del plasma de volumen chocan con las vainas de borde de plasma oscilantes. Estos tipos de plasma pueden generarse a bajas presiones, pero también a presiones atmosféricas. Debido a la alta tasa de colisión a altas presiones, estos plasmas pueden estar más cerca del equilibrio térmico con temperaturas comparables de electrones e iones. Los detalles y el rendimiento de estos tipos de plasma se analizan con más detalle en los otros documentos de base de esta serie.

2.17. Convertidores de potencia de CC a CA (Inversores)

Un inversor es un convertidor de potencia basado en semiconductores. Un inversor que convierte una corriente continua en corriente alterna se llama inversor CC-CA. Sin embargo, el término "inversor" generalmente se refiere al equipo que combina un convertidor CA-CC (que cambia una corriente alterna en corriente continua) y un inversor CC-CA para poder generar frecuencias y voltajes arbitrarios (Toshiba, 2018). La figura 2.7 muestra el concepto de inversor. Algunas de las aplicaciones de los inversores son para aplicación de accionamiento de motores de CA de velocidad ajustable y hornos de inducción.

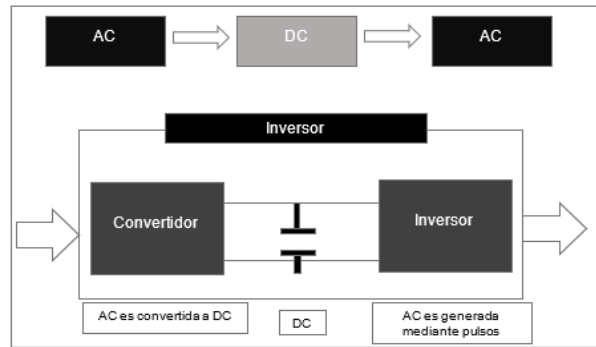


Figura 2. 7 Convertido de corriente directa a corriente alterna (inversor) en un esquema de funcionamiento básico donde el corriente primero pasa de alterna a directa y después de directa a alterna.

2.18. Magnitudes básicas de los convertidores de CD-CA (Inversores)

En la mayoría de las aplicaciones de los inversores se busca obtener una señal próxima a una onda senoidal para alimentar una carga de potencia. Habitualmente es preciso incluir filtros en la salida para obtener una forma de onda adecuada. Por tanto, algunos de los parámetros de mayor importancia para la selección de la topología inversora y el método de control son aquellos que miden el nivel de distorsión de la señal de salida respecto a una señal senoidal pura. Los parámetros más empleados se listan a continuación.

Distorsión del armónico de orden n: Este parámetro indica la contribución de cada uno de los armónicos en la distorsión de la señal de salida

$$D_n = \frac{D_n}{V_1} \quad (2.4)$$

Distorsión del armónico total: La distorsión armónica total indica la similitud de la forma de onda con una señal senoidal. Habitualmente se expresa en tanto por ciento.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_n^2 + \dots}}{V_1} (100) \quad (2.5)$$

Factor de distorsión del armónico de orden n: Para filtrar la señal de salida de un inversor los filtros más empleados son de segundo orden, por lo que la atenuación que proporcionan es proporcional al orden del armónico al cuadrado. El factor de distorsión del armónico de orden 'n' definido tiene en cuenta este efecto y permite estimar cual será la eficacia del filtrado para cada armónico.

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 n^2} \quad (2.6)$$

Factor de distorsión: El factor de distorsión indica el grado de aproximación de la señal a una onda senoidal teniendo en cuenta el orden de los armónicos.

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{n=2,3,\dots} (V_n/n^2)^2}}{V_1} \quad (2.7)$$

2.19. Técnicas de modulación para controlar la potencia de un inversor

Según (Toshiba, 2018) tres técnicas comunes utilizadas para controlar la potencia suministrada a una carga son: modulación por ancho de pulso (PWM), modulación de frecuencia de pulso (PFM) y modulación de amplitud de impulso (PAM). Sin embargo, PWM es la técnica más utilizada (Figura 2.8).

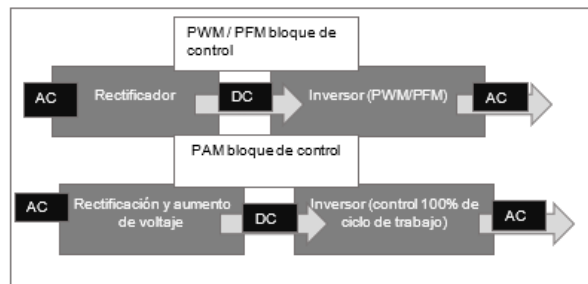


Figura 2. 8 Esquema de representación de modulación para un inversor mediante técnicas de PWM, PFM y PAM.

2.19.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

Es un esquema de modulación en el que el ancho de pulso (ciclo de trabajo) es modulado para controlar la potencia de salida (Toshiba, 2018) (Figura 2.9).

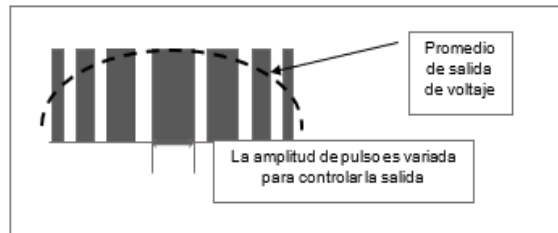


Figura 2. 9 Modulación de potencia de salida mediante PWM.

2.19.2. Modulación de frecuencia de pulso (PFM)

Es un esquema de modulación en el que el número de los pulsos (es decir, la frecuencia) se varían para controlar la potencia de salida (Figura 2.10). También conocido como frecuencia variable modulación (VFM) (Tangshan Biaoxian Electronic co., 2019).

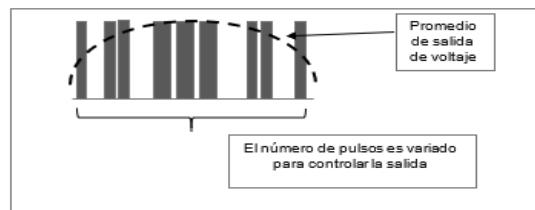


Figura 2. 10 Modulación PFM o modulación de frecuencia variable (VFM).

2.19.3. Modulación de amplitud de pulso (PAM)

Es un esquema de modulación en el que las amplitudes (es decir, voltajes) de pulsos son variados para controlar la potencia de salida (Figura 2.11) (Toshiba, 2018).

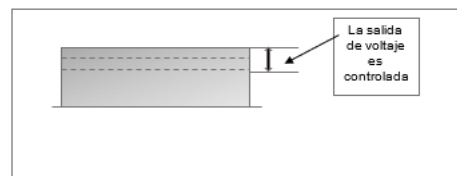


Figura 2. 11 Modulación mediante amplitud de pulso (PAM).

2.20. Clasificación de los inversores

Para este proyecto los hacemos uso de los inversores monofásicos de potencia que sirven para la configuración de la etapa de potencia, dentro de los cuales suelen distinguirse tres configuraciones o topologías, con transformador de derivación central (push-pull), con batería de toma media (medio puente) y configuración en puente completo, a continuación, se describirá cada uno de ellos.

2.20.1. Inversor de medio Puente

La estructura más básica es el inversor monofásico de medio puente (Figura 2.12). Está constituido por una fuente de voltaje de corriente continua V_1 , dos capacitores C_1 , C_2 para dividir la tensión de la fuente, dos dispositivos de conmutación S_1 , S_2 y una carga entre los nodos J_1 y J_2 . El principio de operación para este inversor es que los dispositivos de conmutación deben encender o apagar en secuencia, nunca ambos al mismo tiempo. Cuando S_1 se activa V_o (voltaje de salida) será igual a $-V_1/2$ y cuando S_2 se activa $V_o = V_1/2$ (Sanchez, 2016).

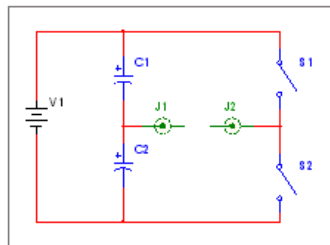


Figura 2. 12 Inversor monofásico en configuración de medio puente.

En la práctica los interruptores pueden sustituirse por elementos electrónicos (Figura 2.13), la selección de los interruptores depende de la reversibilidad requerida para el voltaje y la fuente de corriente. En un inversor, solo es necesaria la reversibilidad de corriente. Por lo tanto, se debe elegir un interruptor de tres segmentos. Al seleccionar un transistor y un diodo en paralelo, el encendido del transistor se puede controlar con voltaje. Cuando el voltaje aplicado es positivo y se da una orden, el transistor conduce y la corriente es positiva. Si el voltaje es negativo, el diodo conduce y la corriente es negativa. Esta selección es comúnmente utilizada en muchos circuitos.

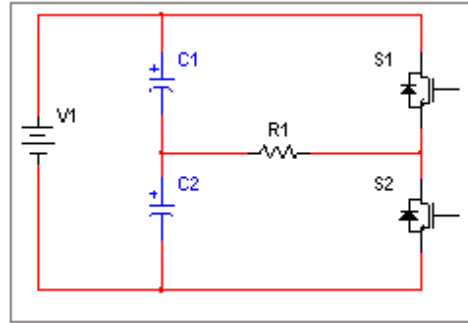


Figura 2. 13 Inversor de medio puente, los interruptores se reemplazan por dispositivos electrónicos.

2.20.2. Inversor de puente completo

El inversor de puente completo, o también llamado puente H (Figura 2.14), está compuesto por una fuente de CD (V1), 4 dispositivos de conmutación SW1-SW4, y una carga entre los puntos J1 y J2 (Sanchez, 2016).

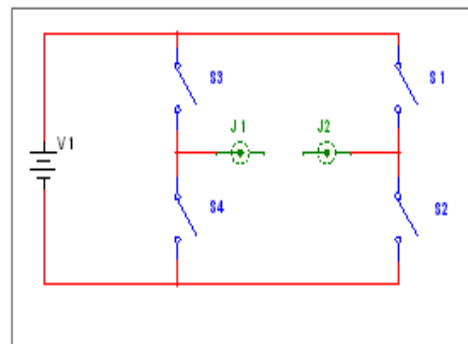


Figura 2. 14 Inversor en configuración de puente completo.

El principio de funcionamiento para este inversor está basado en el encendido de un par de dispositivos (S1 y S2) y el apagado del otro par de dispositivos (S3 y S4) durante un primer instante de tiempo; lo que hace que en la resistencia de carga se presente una diferencia de potencial con el valor de V1. En otro instante de tiempo los dispositivos que estaban encendidos se apagan y viceversa, logrando que en la resistencia de carga se presente una diferencia de potencial con la magnitud de V1, pero de signo negativo. En un tercer instante de tiempo, en la resistencia se presentaría una diferencia de potencial igual a cero cuando se enciendan al mismo tiempo los dispositivos S1 y S2 o S3 y S4 (Figura 2.15) (Sanchez, 2016).

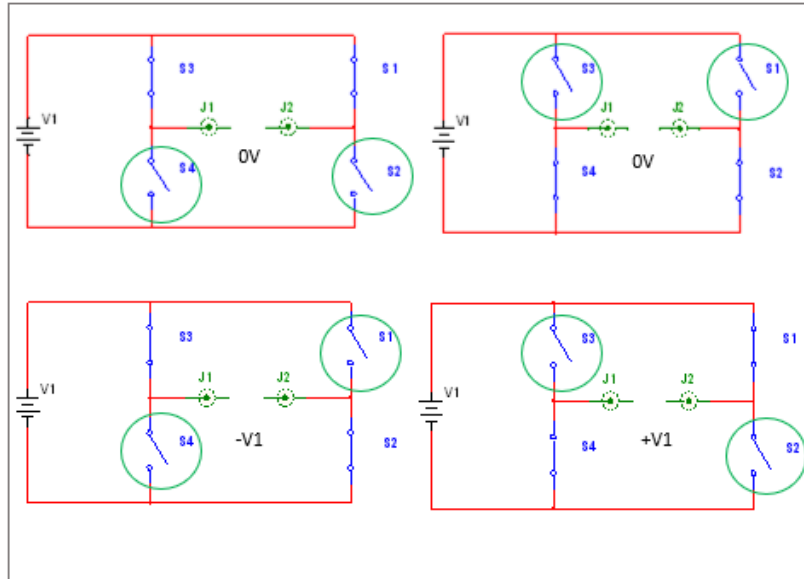


Figura 2. 15 Generación del nivel de tensión 0V, -V1 y +V1 para un inversor monofásico en configuración.

2.20.3. Inversor Push-Pull

El inversor push-pull es una topología que emplea dos interruptores controlados y un transformador con toma media en el primario para obtener una onda cuadrada de alterna (Figura 2.16).

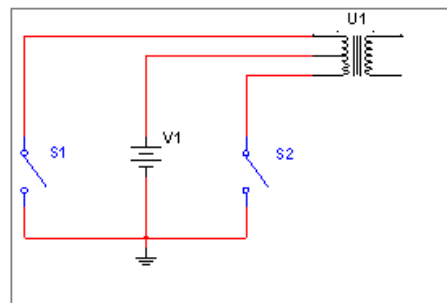


Figura 2. 16 Inversor monofásico en configuración.

Al igual que en el medio puente se hace conmutar ambos transistores empleando señales de control complementarias. De este modo, con $S2$ cerrado, se aplica una tensión en el semidevanado inferior del primario del transformador que induce una tensión de salida positiva.

Cuando se abre S2 y se cierra S1 la situación se invierte, quedando aplicada tensión en el semidevanado superior que induce una tensión de salida negativa. Mientras S1 permanece cerrado el transistor S2 soporta el doble de la tensión de entrada V_e debido a que se suman las tensiones de los dos semidevanados de primario.

Las características de un inversor en push-pull se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Proporcionan una onda cuadrada. Al igual que en el medio puente, la señal de salida de un inversor push-pull es una onda cuadrada, por lo que el contenido armónico es muy elevado.
- La amplitud de salida no es controlable. La tensión de salida es proporcional a la tensión de alimentación por lo que para el control de la amplitud es necesario un convertidor previo.
- Frecuencia de salida variable.
- La tensión máxima que soportan los interruptores es el doble de la tensión de alimentación.

2.21. Drivers para activar dispositivos de conmutación

2.21.1. Optoacoplador

Optoacopladores o aisladores ópticos, consisten en una combinación de un LED infrarrojo y un dispositivo sensible al infrarrojo como un fotodiodo o un fototransistor son ampliamente utilizados para pasar Información entre dos partes de un circuito que operan a niveles de voltaje muy diferentes. Su principal propósito es proporcionar aislamiento eléctrico entre dos partes de un circuito, aumentando la seguridad para los usuarios.

Al reducir el riesgo de descargas eléctricas y prevenir daños al equipo por posibles cortocircuitos, circuitos entre salida de alta energía y circuitos de entrada de baja energía (Corporation, 2018).

2.21.2. Transformador de pulsos

El transformador de pulsos es un tipo especial de transformador utilizado para el aislamiento eléctrico de dos circuitos diferentes. Es un transformador mejorado que produce pulsos eléctricos de gran velocidad y amplitud constante. Un buen transformador debe tener aislamiento galvánico (inductancia de baja fuga que permita que el circuito de accionamiento primario funcione en otra derivada de potencial eléctrico de un circuito impulsado secundario) y capacitancia distribuida. La baja capacitancia de acoplamiento también es crucial para proteger el circuito. Los tipos de señal de los transformadores de pulso se orientan a complementar las unidades lógicas a las líneas de transmisión. Estos operan con umbrales de potencia más pequeños. Muchos de estos transformadores sirven como transformadores de banda ancha. Para los tipos de transformadores de transmisión de datos digitales, están optimizados para reducir las distorsiones de señal (Electronics, 2019).

El rango de frecuencia y la conformidad de la señal están determinados por factores externos como la capacitancia entre devanados, la capacitancia individual de cada devanado e incluso la resistencia. Los efectos negativos de estas externalidades resultan en sobreimpulso, caída, balanceo hacia atrás, así como tiempo de subida y caída disuadido. En lugar de estas consideraciones, los transformadores de pulso están diseñados de acuerdo con los grados de potencia, inductancia, clasificaciones de voltaje, frecuencia de operación, tamaño, resistencia, rango de frecuencia, capacitancia del devanado (Electronics, 2019).

2.22. Fuentes de alto voltaje actuales

Actualmente existen en el mercado diversas marcas y modelos que proveen diferentes equipos de generación de plasma para síntesis mediante pulverización catódica (sputtering), entre sus características de funcionamiento podemos encontrar:

- Frecuencia ajustable a distintos rangos.
- Múltiples salidas de voltaje.
- Interfaz mediante pantallas OLED.

- Potencia a distintos rangos como: 6-120kW.
- Comunicación analógica mediante RS232.
- Capacidades para esclavo-maestro.
- Capacidad para voltajes inversos.

Un ejemplo de este tipo de equipos es el que se presenta a continuación (Figura 2.17) de (Tangshan Biaoxian Electronic co., 2019) y sus características de funcionamiento en la tabla 2.4.



Figura 2. 17 Equipo para generación de plasma mediante sputtering (Tangshan Biaoxian Electronic co., 2019).

La serie SS-II de fuente de alimentación de pulverización catódica de magnetrón D/C funciona en modo de conversión de alta frecuencia, salida de CC, la corriente de suministro se ajusta cambiando el ancho de pulso del convertidor de frecuencia para lograr. Tiene una buena característica de carga, es rentable, adecuado para entornos de capas de metal y reacción.

Tabla 2. 4 Características de funcionamiento de una fuente para procesos de generación de plasma.

Rango de potencia	10-120KW
Voltaje de entrada	AC380V trifásico sistema de cuatro cables AC50-60HZ + 10%
Tipo de salida	D/C
Voltaje de salida	800V sin carga

Tiempo de extinción de arco	$\leq 20\mu S$
La estabilidad de la relación de voltaje de salida	0.5%
Modo de enfriamiento	10-60 KW: enfriado por aire ,60-120 KW: enfriado por agua
El uso del medio ambiente	Temperatura ambiente: 0-40C Humedad ambiental: Humedad relativa $\leq 85\%$ Aire limpio, sin polvo, gas inflamable no corrosivo, buena ventilación
Agua para enfriamiento	Agua de enfriamiento Limpia, no contiene minerales ni otras sustancias solubles Temperatura del agua: 20-30 Presión: 0.15 + 0.05Mpa
Modo de comunicación	Analógica /RS485/RS232
Descripción	Los datos de salida de la fuente de alimentación según el uso deben ajustarse en consecuencia

3. Capítulo 3 Estado del arte

El plasma se genera por el paso de una corriente eléctrica a través de un gas. Dado que los gases a temperatura ambiente son excelentes aislantes, se debe generar un número suficiente de portadores de carga para que el gas sea eléctricamente conductor.

Actualmente en el laboratorio de energías sustentables del Instituto Tecnológico de Toluca se está desarrollando un proyecto de síntesis de nanopartículas a través del uso de plasma frío en un reactor capacitivo, con esto se creará nuevos materiales a partir del método magnetrón sputtering.

Sin embargo, como se mostró en la década de 1990, cuando la pulverización se realizaba a presiones lo suficientemente altas como para activar la nucleación / condensación en volumen del vapor sobresaturado generado por el magnetrón, también se pueden producir varios tipos de nanopartículas (Ondrej Kylián, 2019). Este hallazgo dio lugar al Desarrollo rápido de fuentes de agregación de gases a base de magnetrón. Dichos sistemas se utilizaron con éxito para la producción de nanopartículas de un solo material a partir de metales, óxidos metálicos y plasma. Además, el creciente interés en las nanopartículas heterogéneas de múltiples componentes ha llevado al diseño de nuevos sistemas para la síntesis en fase gaseosa de dichos nanomateriales, que incluyen nanopartículas de metal y plasma polímero (Ondrej Kylián, 2019).

Trabajos como: **“Desarrollo de un sistema para la generación de plasma basado en una descarga de barrera dieléctrica coplanar”**, desarrollado por la Ing. Lizeth Soto Ruvalcaba en el año 2014, (Ruvalcaba, 2014) en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada como parte del desarrollo de una tesis para obtener el grado de maestría en tecnología avanzada, en la cual se describe el diseño, construcción y caracterización de un sistema para generar plasma basado en una descarga de barrera dieléctrica coplanar con el objeto de obtener radicales libres.

El desarrollo de la infraestructura para generar plasma se llevó a cabo mediante una fuente de alimentación de radio frecuencia en el rango de 18 kHz – 23 kHz, dependiente de la mezcla de gases, con una potencia de hasta 2.1 kVA.

La fuente de alimentación eléctrica se diseñó y construyó utilizando tecnología comercial para 2 de las 6 etapas de esta, tomando en cuenta los parámetros requeridos de la fuente (frecuencia de operación entre 10 kHz y 100 kHz, corriente de hasta 15 A, y voltaje de salida de hasta 10 kVpp). Mientras que el reactor coplanar se diseñó y construyó atendiendo la necesidad de contar con una atmósfera controlada para la operación de este y tener un control de la distancia entre electrodos; el sistema contó con una cámara de descarga de geometría cúbica fabricada en acrílico, dentro de ella se localiza el reactor de plasma.

Este se compone de dos electrodos de aluminio con acoplamiento capacitivo, una pared de cuarzo como dieléctrico el cual recubre uno de los electrodos, y un dispositivo de desplazamiento vertical que permite variar la distancia entre electrodos.

El diseño de experimentos se hizo teniendo dos variables independientes: composición de la mezcla de gas de alimentación y distancia entre electrodos, ya que estas dos variables tienen un impacto directo en la química del plasma y por lo tanto en el tipo de especies que se forman en él. Cada una de estas variables se manejó con tres niveles durante los experimentos para tratar de encontrar la relación funcional entre las especies observadas en el plasma y la composición y temperatura de este.

La caracterización cualitativa del plasma se realizó por medio de espectroscopia de emisión óptica, colocando un arreglo de lentes al centro de una de las caras laterales de la cámara de descarga en forma concéntrica al punto medio entre electrodos. Dicha caracterización reveló que no se logró la fragmentación atómica de ninguno de los gases moleculares utilizados en este estudio, probablemente debido a que las temperaturas electrónicas que se alcanzan son bajas. Pese a que una determinación cuantitativa de la temperatura electrónica estaba fuera del alcance de este trabajo, se logró obtener evidencia del comportamiento cualitativo de este parámetro en función de las diferentes variables de operación.

“Fuente de alto voltaje para generación de plasma en un reactor cilíndrico a temperatura ambiente y a presión atmosférica” un trabajo desarrollado por Arturo Tepale Cortés, Hilda Moreno Saavedra, Carlos Eduardo Torres Reyes, Celso Hernández Tenorio en el periodo de Julio a Diciembre de 2015, (Arturo Tepale Cortes, 2015) en este trabajo se construyó una fuente de alto voltaje utilizando convertidores conmutados elevadores en cascada y circuitos resonantes inductivos-capacitivos para producir plasma artificial a temperatura ambiente y

presión atmosférica. Para generar el plasma se produjo descargas eléctricas con la técnica Descarga de Barrera Dieléctrica, que aprovecha la propiedad de los aislantes de almacenar carga electrostática.

La fuente para la ignición de plasma se desarrolló en múltiples etapas de conversión entre C.D. y C.A. para obtener voltajes de salida superior a 1 kv con una frecuencia de operación variable de 40 a 120 khz. Para la etapa inicial de C.D. se requirió una fuente de voltaje constante, mientras que en las etapas elevadoras de voltaje de C.D. se alcanzó un valor mayor de 100 V. Durante estas etapas se utilizó el convertidor elevador tipo Boost, a través de diodos rectificadores de potencia MR506, transistores MOSFET de potencia IRFP640 e inductores toroides para frecuencias mayores a 1 Khz. Las subetapas elevadoras formaron un circuito en cascada donde la relación de amplificación del voltaje de cada etapa dependió del ciclo de trabajo al cual se sometió el elemento de conmutación, en este caso el transistor MOSFET

La etapa de conversión de voltaje de C.D. a C.A. se realizó por medio de un inversor de puente completo de transistores MOSFET de potencia IRFP640, proporcionando una salida de voltaje alterno cuadrado, el control de los pulsos se realizó con los circuitos integrado PWMTL494 y un circuito integrado driver de conmutación superior e inferior IR2110.

A la salida de la etapa de conversión de C.D. a C.A. se acopló un circuito resonante inductivo-capacitivo para proporcionar al voltaje del inversor una forma sinusoidal. El elemento inductivo utilizado fue un transformador elevador tipo Flyback y el elemento capacitivo fue un banco de capacitores; el primero conformó a la etapa elevadora de voltaje de C.A. que también funcionó como aislamiento eléctrico entre el reactor y la fuente.

El voltaje de salida proporcionado por la fuente de alto voltaje superó el voltaje de rompimiento del gas Argón, que a presión atmosférica fue aproximadamente de 1 kv, alcanzado el voltaje de rompimiento para generar el plasma. Para producir el plasma se utilizó la técnica DBD, donde el reactor fue un cilindro de vidrio Pyrex, material utilizado en laboratorios por su resistencia al calor y su costo accesible, el electrodo interno fue una varilla de acero y el electrodo externo fue una malla metálica.

“Development of high-voltage high-frequency power supply for ozone generation” Un artículo de Nacera Hammadi, Mansour Zegrar, Said Nemmich, Zouaoui Dey, Sidi-Mohamed

Remaoun, Bouregba Naouel, Amar Tilmatine, para la revista Journal of Engineering Science and Technology en su vol. 11, y número 5 en el año de 2016. (Nacera Hammadi, 2016). En este artículo se presentó una fuente de alimentación de alta frecuencia y alta tensión para la generación de ozono. Se describe y analiza una etapa de potencia que consta de un inversor de puente completo monofásico para regular la potencia de salida, un inversor push-pull de corriente (controlador) y un circuito de control.

Esta fuente de alimentación de construcción de laboratorio utilizando un transformador de ferrita de alto voltaje y un microcontrolador PIC se empleó para energizar un generador de ozono de descarga de barrera dieléctrica (DBD). El inversor funcionó según la estrategia de control cuya estructura fue simple y tuvo un rango de variación de la frecuencia de trabajo para obtener el valor de frecuencia óptimo.

La fuente de alimentación comprendió una etapa de circuito de control para generar una señal cuadrada de alta frecuencia y un bloque de potencia compuesto por cuatro MOSFET controlados por la señal cuadrada.

El voltaje de entrada se redujo a 6V usando un transformador reductor de 220/6 V, que se rectificó y luego se fijó a un valor constante de 5 V usando un regulador de voltaje LM7805. Este voltaje, utilizado para alimentar un circuito de microcontrolador, se transformó en una señal cuadrada de frecuencia ajustable y al mismo tiempo, se transformó un voltaje rectificado y ajustable (0-310 V), que alimentó el primario de un transformador de ferrita elevador de potencia de 200 W, una señal de alta frecuencia por los MOSFET (IRF740) controlados por la señal cuadrada, obteniendo así una salida de alto voltaje ajustable. Los componentes principales de la cadena del inversor fueron: bloques de control, controlador y etapa de potencia.

Bloque de control: la generación de señales de control se realizó mediante un circuito tipo microcontrolador PIC16F84A, estas señales se enviaron los interruptores de potencia a través de un aislamiento galvánico garantizado por optoacopladores.

Controlador: la interfaz proporcionó protección del circuito de control en caso de problemas en el lado del circuito de alimentación. Se garantizó entonces el aislamiento galvánico entre el circuito de control (0V / 5V) y el circuito de alimentación (220V / 1A).

Bloque de etapa de potencia (inversor): el inversor utilizó un paquete IRF740 MOSFET equipado con un diodo de marcha libre que convirtió CC en voltajes de CA mediante el microcontrolador PIC.

Development and integration of a low cost, high voltage power supply into a thin film deposition system por Andrew C. Redman del departamento de física en mayo de 2017 (Redman, 2017) en cumplimiento parcial del requisito para el grado de Licenciado en Ciencias.

Se construyó un aparato para depositar sistemáticamente películas metálicas delgadas mediante emisión termiónica. Se alcanzó un vacío aproximado mediante una bomba rotativa y se usó una bomba turbo molecular para bajar la presión a 3×10^{-7} Torr. La emisión termiónica se logró haciendo pasar corriente a través de un filamento de tungsteno que flotó a -3 kV en relación con el material objetivo. Se utilizaron dos transformadores de 2 kV diseñados para su uso en un horno microondas para crear una fuente de alimentación de alto voltaje, de bajo costo y enclavada de seguridad capaz de suministrar una corriente de pico de 0.1 A a 3 kV.

Se realizaron pruebas para determinar la consistencia de la fuente de alimentación y crear un proceso repetible para depositar una película delgada. La fuente de alimentación fue capaz de suministrar energía totalmente rectificada, negativa y de alto voltaje al filamento. Esta salida no se suavizó. Sin embargo, se pudo colocar un condensador de alto voltaje entre la salida de la fuente de alimentación y tierra para almacenar la carga durante la fase de apagado del transformador. El apagado de seguridad en su lugar drenó este condensador cuando se desconectó la fuente de alimentación de seguridad.

La alimentación eléctrica se clasificó para 5 kV. Sin embargo, se notaron arcos durante múltiples pruebas a voltajes incrementalmente más bajos

“Aplicación de la descarga luminiscente anormal como una fuente calórica” por Iván Supelano García, Armando Sarmiento Santos, Carlos Arturo Parra Vargas y realizado el 21 julio de 2017 (Ivan Supelano Garcia, 2017) es un trabajo donde se diseñó un reactor cilíndrico en acero al carbono, constituido por dos electrodos concéntricos, donde el electrodo interno constituyó el cátodo de la descarga y el electrodo externo, que hizo las veces de la cámara del reactor constituyó el ánodo.

El ánodo fue sellado en uno de los extremos mientras que el ánodo y el cátodo se acoplaron entre sí a través de un material aislante. Las dimensiones del ánodo fueron: altura 20 cm y diámetro 4.5 cm. El electrodo interior fue de 18 cm de largo y 0.5 cm de diámetro. Para la atmósfera gaseosa de la descarga se utilizó argón a una presión de 2, 3, 4 y 5 Torr. El reactor se acopló a un recipiente calefactor comercial que funciona con base en resistencia eléctrica. Como fuente de alimentación de la descarga se utilizó una fuente de corriente continua pulsada (obtenida por rectificación de onda completa de la señal alterna de la red). La descarga fue establecida a una corriente de 0.45 A a voltajes diferentes, dependientes de la presión. A presión de 2 Torr también se observó el comportamiento de la descarga en función de la corriente y de la atmósfera gaseosa.

Se realizaron medidas de corriente y voltaje para determinar la potencia y tiempo de funcionamiento, la energía consumida, necesaria para elevar la temperatura de 1.5 L de agua desde 20°C por debajo de los 40° C, para evitar pérdida de energía por radiación. Estos mismos valores fueron medidos para el calefactor resistivo comercial. Con estos datos se estimó el calor cedido a la masa de agua y así se obtuvo la eficiencia de cada dispositivo.

“Diseño y construcción de un generador de plasma para aplicaciones en cirugía” Un trabajo para obtener el grado de: maestro en ciencias de la ingeniería presentado por Ángel Brian Sánchez Trujillo llevado a cabo en Toluca, Estado de México en octubre 2017 (Trujillo, 2017) por parte de la Universidad Autónoma de Estado de México.

En esta tesis se presentó el estudio teórico y experimental para el diseño y construcción de un generador de plasma, cuyo propósito fue la generación de plasma mediante solución conductora, con el objetivo de realizar el corte y cauterización de tejido animal. Para la implementación del generador se construyó una fuente de alto voltaje basada en la topología push pull, un rectificador de onda completa e inversor de puente completo. El generador de plasma realizado suministró voltajes hasta los 320 V RMS con una corriente máxima de 330 mA RMS, a una frecuencia que se encontró en el intervalo de 100 a 150 kHz. Se elaboraron pruebas en donde se comprobó el comportamiento del sistema, de acuerdo con los parámetros de diseño. En dichas pruebas se variaron los parámetros de voltaje y frecuencia y se logró determinar qué parámetros fueron óptimos para realizar un mejor corte al tejido utilizado.

El prototipo demostró tener la potencia suficiente para formar plasma alrededor de los electrodos de la sonda empleada, sumergida en solución salina. Con este trabajo se logró obtener una herramienta para los investigadores interesados en utilizar plasma en procesos quirúrgicos, a bajo costo y con la posibilidad de manipular los parámetros de voltaje, corriente y frecuencia.

“4T Analog MOS Control-High Voltage High Frequency (HVHF) Plasma Switching Power Supply for Water Purification in Industrial Applications”, un artículo del año de 11 Octubre de 2018 por T. N. V. Krishna , P. Sathishkumar, P. Himasree ,Dinah Punnoose , K. V. G. Raghavendra , Himanshu , Bandari Naresh , R. A. Rana , Hee-Je Kim colegas que contribuyeron por parte de diversas universidades como: School of Electrical K.V.G. Engineering, Pusan National University, Department of Computer Science and Engineering y Hindusthan Institute of Technology and Science en Chennai ,India (T.N.V. Krishna, 2018).

En este manuscrito se presentó el circuito inversor de alta frecuencia y control MOS analógico simple de 4T como fuente de alimentación de plasma utilizando la técnica de índice de modulación.

Se desarrolló prácticamente una fuente de alimentación de plasma de 10 kV a 5 kW basada en la esta topología y se ha probó experimentalmente que logró una excelente eficiencia de conversión de potencia de salida. A partir de estos resultados, se verificó la fuente de alimentación de conmutación de plasma de alta frecuencia (HVHF) de control MOS analógico 4T.

Esta fuente se desarrolló aplicando una fuente de CA monofásica como entrada a la y se diseñó un circuito rectificador de puente completo de diodo como la etapa inicial de la fuente de alimentación de plasma.

El circuito rectificó el voltaje de CA de 220 V al voltaje de salida de CC, que se ajustó de 0 V a 300 V. Se diseñó y ubicó un circuito inversor de alta frecuencia, seguido por el condensador de enlace de CC del rectificador, que recibió el voltaje de CC del rectificador y lo convirtió en un voltaje de salida de CC pulsante de alta frecuencia. La topología PWM de puente completo con alta frecuencia de conmutación se desarrolló como un circuito inversor para la fuente de

alimentación de plasma diseñada. Se diseñó un transformador de alta tensión y alta frecuencia y se colocó en la salida del lado del inversor. La salida de CC pulsante de alta frecuencia se conectó al lado primario del transformador. El transformador se diseñó con un núcleo de ferrita PL-13 U que transforma de 290–300 V a 10 kV de alto voltaje. El lado secundario del transformador que transformó el alto voltaje se conectó a la fuente de plasma, que fue diseñada con titanio, tubo de cuarzo y metal.

“Practical Design of a High-Voltage Pulsed Power Supply Implementing SiC Technology for Atmospheric Pressure Plasma Reactors” del 6 April 2019 por Jacek Kołek and Marcin Hołub de la Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, en Szczecin, Polonia (Jacek Kolek, 2019).

En este trabajo se presentó la construcción de una fuente de alimentación pulsada, electrónica de potencia simple, que implementó la operación del interruptor de potencia resonante, modernos semiconductores de potencia de carburo de silicio (SiC) y un diseño de transformador tipo bobina de Tesla. La fuente de alimentación constó de tres etapas de conversión principales: una fuente de voltaje de CC, un circuito de cargador resonante que constituyó la energía de pulso inicial por el control de voltaje del condensador; y un moldeador de pulso de salida con transformador tipo bobina de Tesla.

La primera parte de la fuente de alimentación de alto voltaje fue una fuente de voltaje de CC cuyo valor de voltaje de salida pudo fijarse a varios cientos de voltios (usando un circuito rectificador pasivo o una etapa PFC activa), o variable hasta valores similares (300– 650 V es el rango más útil y más utilizado).

En una aplicación específica, esta topología puede alimentarse directamente de la red eléctrica con un simple circuito rectificador con banco de condensadores.

En otros casos, especialmente cuando se requiere aislamiento galvánico de la red eléctrica, se debe utilizar una fuente de alimentación de CA / CC aislada. Para verificar las propiedades del prototipo de laboratorio para diferentes valores de voltaje de entrada, se utilizó la fuente de voltaje de laboratorio TDK Lambda GEN600-2.6 SMPS (fuente de alimentación de modo de conmutación). Esto proporcionó un voltaje estable con un rango de control de 0 a 650 V CC y

2.6 A de corriente de salida promedio. La alta eficiencia y el aislamiento galvánico de la fuente de alimentación utilizada fueron características ventajosas adicionales.

La fuente de alimentación presentada generó pulsos de alto voltaje con amplitud ajustable y relación de repetición. La frecuencia de repetición de los pulsos de voltaje de salida se estableció en el rango de 250– 2000 Hz. La función del cargador de condensador resonante fue acumular la energía necesaria para generar un pulso de voltaje único en el campo eléctrico de un banco de condensadores.

“Construction of a power electronic source for cold plasma generation” un artículo desarrollado por Martínez Montejano Roberto Carlos, Carlos Miguel, Espinoza-López Víctor Esteban y Campos-Cantón Isaac de Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Neira-Velázquez María Guadalupe y Soria-Arguello Gustavo del Departamento de Síntesis de Polímeros Centro de Investigación en Química aplicada del 23 de julio de 2019 (Roberto Carlos Martinez Montejano, 2019).

Este artículo se presentó el desarrollo de una fuente electrónica de potencia de alto voltaje y alta frecuencia, para la generación de plasma, a presión atmosférica y al vacío, utilizando helio y aire como gases de trabajo. El diseño de la fuente consistió en un inversor resonante serie inductivo de puente completo a alta frecuencia, donde el control implementado permitió variar el ciclo de trabajo y la frecuencia.

La generación de plasma se realizó por alto voltaje con la señal de potencia aplicada en dos electrodos, lo que proporcionó un campo eléctrico fuerte que excitó y, por lo tanto, ionizó partículas de helio o partículas de aire. La operación de la fuente electrónica de potencia se probó en diferentes configuraciones de reactores de plasma (descarga de barrera dieléctrica, descarga de barrera dieléctrica doble y descarga de tipo de chorro). La fuente electrónica de potencia desarrollada mostró un rendimiento correcto y generó un fuerte campo eléctrico para lograr las descargas de plasma deseadas. La idea general fue proporcionar una señal de voltaje de CA a alta frecuencia y alto voltaje para generar un campo eléctrico, a fin de realizar la descarga en dos electrodos conectados a la salida del transformador que obtuvieron el plasma no térmico. La fuente de energía fue diseñada para operar en una amplia gama de potencias, desde 0-600 W, esto permitió tener control en diferentes aplicaciones y posibilidades de usarla en diferentes reactores de plasma. Para lograr estas características, la

potencia máxima se fijó a 600 W y la corriente a 0.6 A, esta fuente se conformó de bloques como:

a) Bloque de alimentación: El bloque de alimentación generó una señal bipolar cuadrada a partir de una señal de CC proporcionada por la fuente. Consiste en un puente H con cuatro transistores y una fuente de CC. Los transistores se seleccionan de acuerdo con la potencia nominal (0-600 W) y la frecuencia de conmutación (0-150 kHz), y por lo tanto, se utilizó MOSFET tipo IRFP4550 para estas características. Se utilizó una fuente de CC comercial programable BK PRECISION XLN10014, capaz de variar su voltaje de salida de 0 a 100 V en CC y 14.4 A. Esto permitió alcanzar la potencia indicada. Para activar los dispositivos de alimentación, fue necesario agregar un circuito, para garantizar el nivel de voltaje correcto del bloque de control, esto se logró a través de un controlador. Este controlador tuvo tres propósitos: proporcionar una alta impedancia en la entrada, adaptar los niveles de voltaje e incorporar un tiempo muerto. El dispositivo seleccionado fue el IR2110, capaz de controlar 2 MOSFET de la misma rama.

b) Bloque de control: El bloque de control, creó las señales para lograr la activación y desactivación de los dispositivos semiconductores de potencia, y pudo lograrse mediante un oscilador de señal cuadrada. El dispositivo seleccionado consistió en un TL494, capaz de proporcionar dos señales de modulación de ancho de pulso (PWM) a frecuencia fija o variable. El TL494 comparó una señal de diente de sierra con una constante dada por un condensador interno para alcanzar el ancho deseado en la señal PWM, para obtener las señales de control.

c) Bloque de transformación: Este bloque llevó la señal de CA que proviene del bloque de alimentación al nivel requerido para suministrar la carga. Para este propósito, se utilizó un transformador elevador, capaz de administrar la potencia de 1 kW y la relación de giro de 1:50. Los valores de resistencia y capacitancia en el primario del transformador se midieron físicamente utilizando un banco de precisión BK LCR / ESR 889B del transformador elevador, para obtener resultados más precisos. La resistencia, inductancia y capacitancia en el lado primario del transformador fueron 0.470 Ω , 37.9 μH y 150nF respectivamente.

“Desarrollo de un sistema generador de plasma frío para un reactor capacitivo tipo magnetrón sputtering para la obtención de nanocatalizadores”, El título del actual trabajo de tesis en donde se presentó el diseño y desarrollo de un sistema de generación de plasma,

cuyo propósito es servir como herramienta para el proceso de síntesis de nanopartículas de metales en la obtención de nanocatalizadores para el proyecto que actualmente se desarrolla en el laboratorio de energías sustentables aplicadas con el título: *“Evaluación de nanocatalizadores en la obtención de biocombustibles a partir de desechos orgánicos”*.

Para la implementación del generador de plasma, se contemplaron el desarrollo de una fuente de alto voltaje contemplando algunas metodologías usadas por (Ruvalcaba, 2014) y (Trujillo, 2017) , un sistema de vacío, un sistema de suministro de gas, cabina del reactor y una interfaz digital para tener el control de todo el proceso de síntesis tal como en el trabajo de (Roberto Carlos Martinez Montejano, 2019) y (Nacera Hammadi, 2016).

Para la construcción de la fuente de alto voltaje se aplicó reingeniería a una tarjeta de potencia de circuitos de lámparas fluorescentes de cátodo frio (CCFL) las cuales se basan en topologías de inversores de potencia, no obstante, representan una ventaja económica con respecto a los métodos tradicionales de desarrollo de fuentes de alto voltaje y con las del mercado actual.

A través de análisis se determinó que el controlador OZ9938 de esta tarjeta era el que coordinaba el voltaje suministrado a la salida, de tal manera que modificando su funcionamiento se obtuvo voltajes de hasta de 2000 volts a una frecuencia aproximada a 200 KHz en pruebas de funcionamiento ,este voltaje fue suficiente para poder realizar el proceso de ignición del reactor a una presión atmosférica, además con la implementación de un control digital realizado con microcontrolador ATMEGA2560 o Arduino se pudo variar los parámetros de voltaje y frecuencia para el ciclo de trabajo del proceso.

El prototipo demostró tener la potencia suficiente para formar plasma alrededor de los electrodos. Con este trabajo se logró obtener una herramienta para el proceso de obtención de nanocatalizadores, pero además una oportunidad de aprendizaje para los alumnos del Instituto Tecnológico de Toluca que interactúen con este equipo.

4. Capítulo 4 Fundamentos metodológicos o método

El desarrollo del proyecto de tesis se llevó a cabo gracias a la metodología del modelo secuencial comúnmente conocido como cascada o waterfall, el cual consta de etapas consecutivas como: requisitos, diseño, implementación, verificación y mantenimiento, (Figura 4.1).

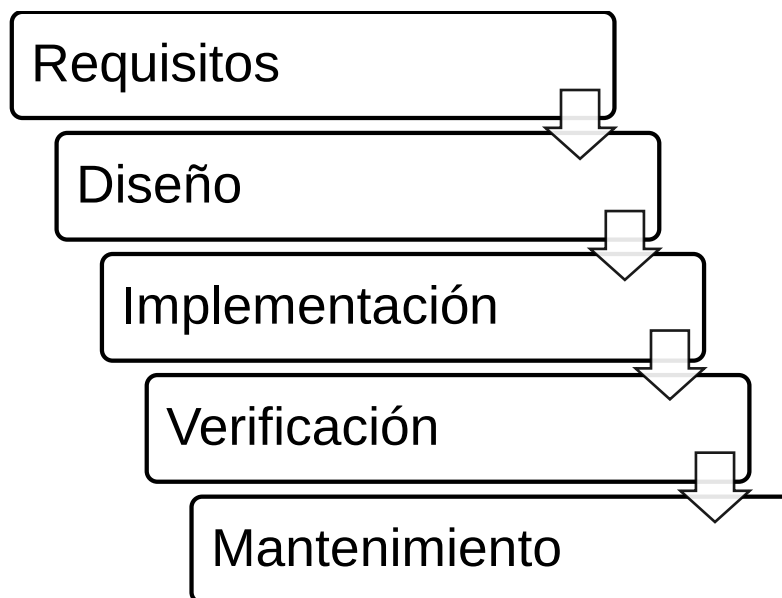


Figura 4. 1 Metodología waterfall o en cascada para desarrollo de proyectos, en la cual se observa cada una de las etapas que la conforman y la secuencia de cada una de ellas.

En la primera etapa se analizaron todos los requisitos necesarios para poder llevar a cabo el proyecto. En la etapa de diseño, se construyeron modelos teóricos y algunas simulaciones que nos dieron un preámbulo sobre el funcionamiento del sistema. Asimismo, se describió la relación entre cada uno de los elementos comprendidos en el sistema.

La tercera etapa de implementación, se desarrollaron todos los requisitos especificados para cada componente que comprendió el sistema haciendo uso de la fase previa de diseño.

Una vez que la etapa de verificación se checa que cada uno de los componentes del sistema funcionen correctamente y cumplen con los requisitos. El objetivo de las pruebas es el de obtener información de la calidad del sistema, y sirven para: encontrar defectos, aumentar la calidad y refinar detalles.

Por último, la etapa de mantenimiento, una vez se han desarrollado todas las funcionalidades del sistema y se ha comprobado que funcionan correctamente, se inicia la fase de instalación y mantenimiento. Se instala y se comprueba que funcione correctamente en el entorno en que se va a utilizar. A partir de ahora hay que asegurarse de que funcione y hay que destinar recursos a mantenerlo.

4.1. Etapa 1: Requisitos

Como se comentó anteriormente, la etapa de requisitos consistió en un análisis inicial en donde se determinó todos y cada uno de los elementos del sistema, así como sus características a grandes rasgos sin especificar todavía características técnicas pues esto se definió en la siguiente etapa del método y de manera general se determinó que el sistema debía contar con una cabina de vidrio pyrex para soportar temperaturas elevadas y que dentro contara con arreglo de placas paralelas que permitiera tener control de distancia entre electrodos, una atmósfera controlada obtenida por una bomba de extracción de aire y suministro de gas plasmógeno que permitiera tener un control en la composición del gas de operación, así como una fuente de alimentación de alto voltaje para generar el plasma, (Figura 4.2).

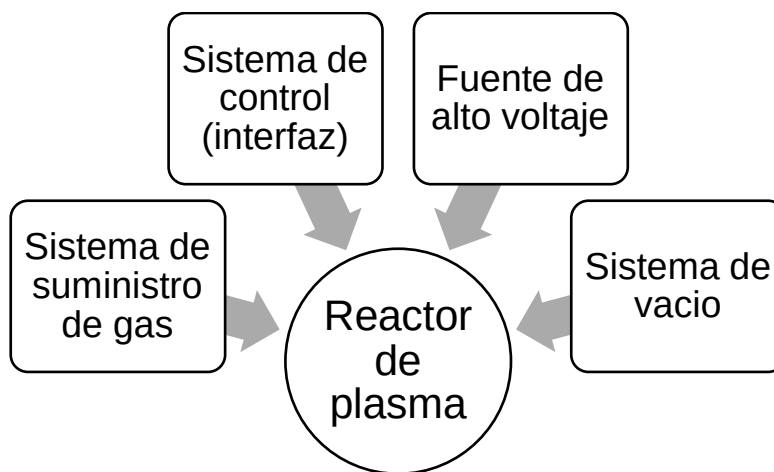


Figura 4. 2 Esquema general de las partes que conforman el reactor de plasma frío, entre las cuales se observan fuente de voltaje, sistema de vacío, interfaz de control, y sistema de suministro de gas.

Sin embargo, para la descripción a fondo de cada una de las funcionalidades de los elementos del sistema de generación de plasma se hizo uso de diagramas y descripciones, que a continuación se muestran.

4.1.1. Fuente de alimentación

Se estableció que este elemento pudiera trabajar en rangos de mediana a alta frecuencia, pues esto facilita obtener voltajes cada vez más altos y sobre todo útiles en el proceso de ignición del reactor, además de un manejo fácil para cualquier usuario, seguro y barato. Las características técnicas de la fuente de alimentación fueron acordadas en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Características requeridas para el funcionamiento de fuente de alto voltaje.

Característica	Valor (es)
Voltaje de ignición	3kv
Voltaje de trabajo	1Kv-2Kv
Frecuencia de ignición	100Khz
Frecuencia de trabajo	25-50Khz

4.1.2. Interfaz gráfica

Se determinó que esta herramienta tuviera características como: amabilidad con el usuario, es decir que no hubiera ambigüedad en su manejo evitando así malas prácticas por parte del usuario hacia el manejo del equipo, control de proceso de encendido y apagado del sistema, modulación de plasma y monitoreo u observación del comportamiento del sistema en tiempo real, (Figura 4.3).

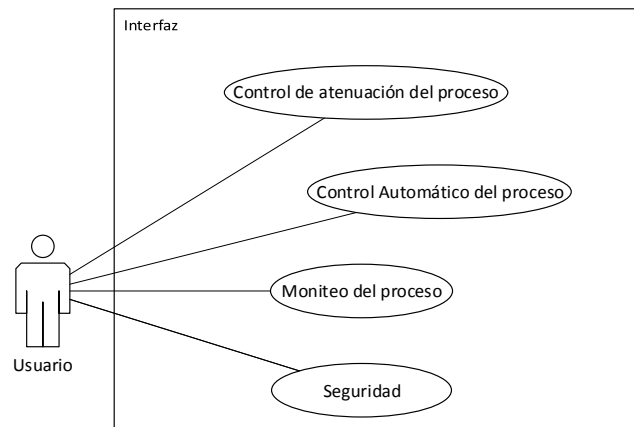


Figura 4. 3 Diagrama de caso de uso para la interfaz de control, en el cual se muestran los elementos básicos que deben de conformar la interfaz de control de usuario.

4.1.3. Sistema de gas plasmógeno y sistema de vacío

El sistema de gas, así como el sistema de vacío son elementos los cuales no tuvieron desarrollo alguno sin embargo se consideró características como: suministro de gas plasmógeno sin fugas, y extracción de aire residual de la cámara interior del reactor.

4.2. Etapa 2: Diseño

La etapa de diseño representó realizar simulaciones o cálculos del funcionamiento del sistema para generar plasma, como se puede observar a continuación:

4.2.1. Fuente de alimentación

De acuerdo con trabajos realizados por (Trujillo, 2017) y (Ruvalcaba, 2014) se determinó que la fuente de alimentación debía de contar con los siguientes bloques: rectificador de voltaje, convertidor de CD a CA por PWM, inversor de voltaje, transformador elevador y un sistema de control digital como innovación a los sistemas anteriores con la finalidad de ofrecer más seguridad a cualquier persona que pudiera operar el equipo en un futuro.

A continuación, en la Figura 4.4 se puede observar un diagrama a bloques del diseño de la fuente de alimentación.

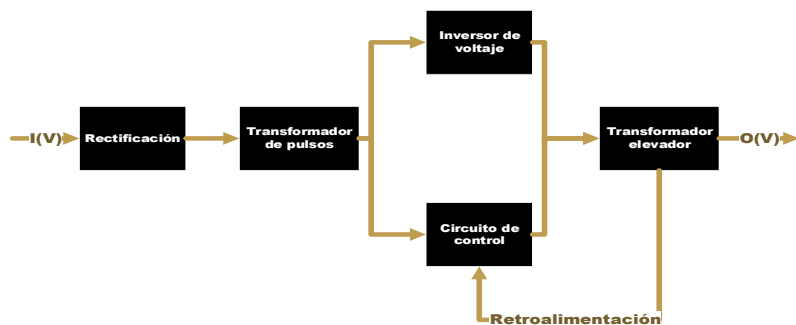


Figura 4. 4 Diagrama a bloques del diseño de la fuente de alto voltaje, en el cual se puede observar el camino que recorre la corriente a través del circuito iniciando desde una etapa de rectificación para convertirse en corriente directa, luego pasando por un transformador de pulsos hasta llegar a una etapa de inversión que es controlada electrónicamente y por último se eleva la tensión que el circuito entrega como salida.

Debido a los altos costos de elementos electrónicos en el mercado y a cotizaciones hechas, se determinó que este sistema podía realizarse por medio del reúso de elementos tales como tarjetas electrónicas, de esta manera el costo de desarrollo se redujo de una manera significativa.

En este caso se escogió una tarjeta electrónica de circuitos de CCFL pues contiene elementos muy importantes que nos ayudan a realizar nuestra fuente de alimentación, (Figura 4.5).



Figura 4. 5 Tarjeta electrónica de potencia de CCFL (Lámparas fluorescentes de cátodo frio), en la imagen puede observarse los distintos componentes que se encuentran en ella tales como transformador de pulsos, transformador elevador, capacitores.

4.2.2. Interfaz

Para su diseño primeramente se consideró un total de 6 ventanas de navegación las cuales fueron: pantalla principal, bloqueo de pantalla, menú principal, configuración, control de proceso y ayuda.

La pantalla principal se diseñó como indicador de funcionamiento de la pantalla básicamente, bloqueo de pantalla fue una medida de seguridad para cualquier persona que no estuviera autorizada a usar el equipo y que quisiera hacer mal uso del mismo, un menú principal donde podemos encontrar diferentes botones que direccionan a diferentes pestañas como configuración de los voltajes, y tiempos de proceso, control de proceso , cuyo solo objetivo es monitorear el proceso desde su inicio a su fin, y por último ayuda para el usuario. A continuación, en la Figura 4.6 se presenta el diagrama de flujo como diseño para la interfaz.

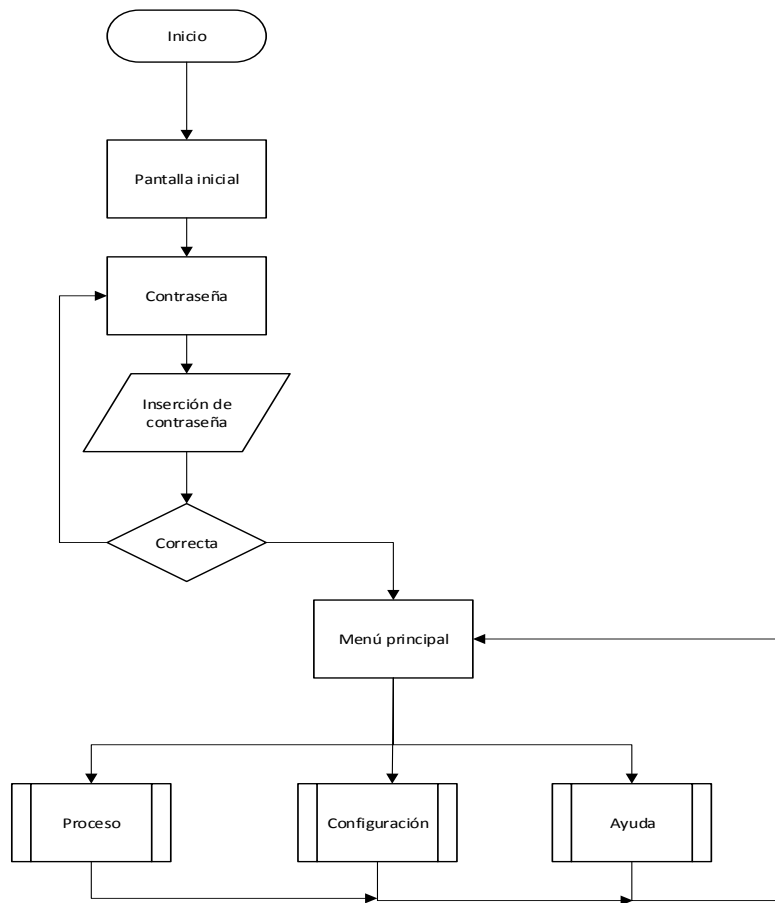


Figura 4. 6 Diagrama de flujo básico del funcionamiento de la interfaz de usuario, en él se muestra como las distintas ventanas de navegación interactúan entre ellas.

4.3. Etapa 3: Implementación

4.3.1. Fuente de alimentación

4.3.1.1. Modificación al circuito integrado OZ9938

El proceso de implementación de la fuente de alimentación se llevó a cabo a través del acoplamiento de la tarjeta de CCFL, en el controlador de conmutación de alto voltaje (OZ9938) cuyas funciones principales dentro de la tarjeta fueron:

Convertir los voltajes de corriente continua no regulados en un voltaje cuasi sinusoidal y formas de onda de corriente. Proporcionar una operación de arranque suave, regulación de corriente y voltaje, alta capacidad de manejo, múltiples funciones de regulación de PWM (Modulación

por ancho de pulso por sus siglas en ingles) y protección contra sobre voltaje y sobre intensidad.

La función de apagado, que actúo como protección de la tarjeta limito el flujo continuo de voltaje a las salidas de alimentación debido a que no se detectaba ninguna lámpara, para su modificación se realizó un análisis de acuerdo a la hoja de datos y se determinó que realizando un cambio en esta función mediante un capacitor de manera física se podía manipular el tiempo de apagado cuyo valor debía ser mayor a 5 segundos, de acuerdo a especificaciones, así que usando la siguiente formula se cambió el capacitor existente por uno de $22\mu F$.

$$C_{Timer}(\mu F) = \frac{T_{d(sec)}}{0.33}$$

$$C_{Timer}(\mu F) = \frac{7s}{0.33}$$

$$C_{Timer}(\mu F) = 21.2121\mu F \approx 22\mu F$$

Este componente fue soldado a la placa en el pin número 3 como puede apreciarse a continuación en la Figura 4.7.

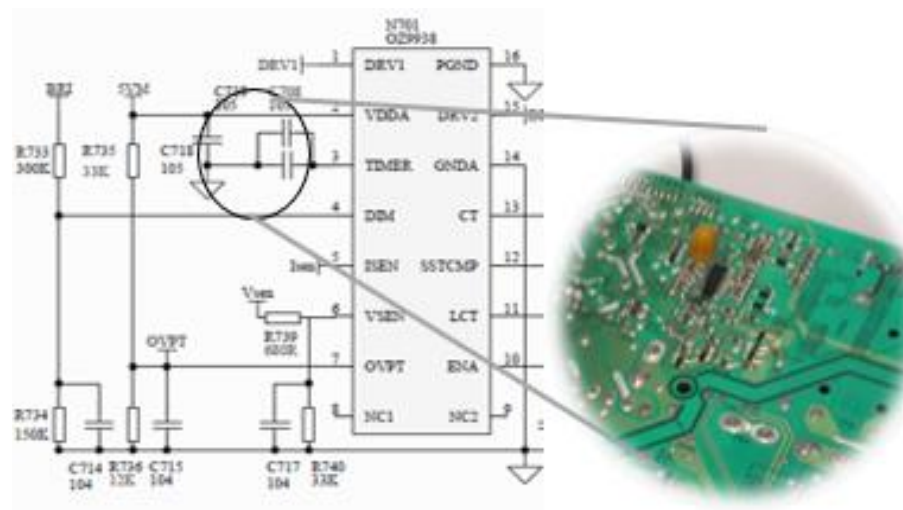


Figura 4. 7 Circuito inversor OZ9938 de la tarjeta electrónica de potencia, en la imagen se observa la zona donde se aplicó reingeniería al circuito para modificar su funcionamiento básico.

4.3.1.1.1. Frecuencia estimada

La corriente alterna se caracteriza por el número de repeticiones que se realizan en un segundo un determinado número de ondas sinusoidales, a esto se le llama frecuencia y para aplicaciones de PWM (Modulación por ancho de pulso) se vuelve fundamental debido a que su aumento o disminución son directamente proporcionales al voltaje de salida que se tendrá.

4.3.1.1.2. Frecuencia de ignición

Se calculó de acuerdo a la fórmula proporcionada por la hoja de datos, se refiere a la frecuencia a la que el proceso inició, y normalmente se trabaja a frecuencias muy altas, para este trabajo se calculó una frecuencia de 150 KHz aproximadamente cambiando elementos como resistencias y capacitores que se describen a continuación.

$$f_{st} = \frac{3812 / R_{CT}(K\Omega) + 26}{4 (C_{CT})(pF)} (1000) KHz \quad (1.9)$$

Para $R_{CT} = 1000 K\Omega$ y $C_{CT} = 47 pF$

$$f_{st} = \frac{3812 / 1000(K\Omega) + 26}{4 (47)(pF)} (1000) KHz$$

$$f_{st} = \frac{3812 / 1000(K\Omega) + 26}{4 (47)(pF)} (1000) KHz$$

$$f_{st} = 158.5744 KHz$$

4.3.1.1.3. Frecuencia de operación

Una vez que se alimentó la carga, la frecuencia disminuyó y el circuito integrado entró en modo de operación normal. La frecuencia en modo de operación normal se determinó por la resistencia y el capacitor conectados pin número 13 de circuito integrado a través de la siguiente formula proporcionado por la hoja de datos, y para tal caso se calculó una frecuencia aproximada de 30 KHz, usando componentes básicos electrónicos como resistencias y capacitores de 33 pF y 1000 $K\Omega$ respectivamente.

$$f_{op} = \frac{9.53 \times 10^5}{R_{ct}(K\Omega) * C_{ct}(pF)} KHz \quad (2.10)$$

Para $R_{CT}= 1000 K\Omega$ y $C_{CT}= 33 pF$

$$f_{op} = \frac{9.53 \times 10^5}{R_{ct}(K\Omega) * C_{ct}(pF)} KHz$$

$$f_{op} = \frac{9.53 \times 10^5}{(39K\Omega) * (10pF)} KHz$$

$$f_{op} = 28.87878 KHz \approx 30 KHz$$

4.3.2. Interfaz

El diseño de la interfaz se basó en un total de 6 ventanas de navegación (pantalla principal, bloqueo de pantalla, menú principal, configuración, control de proceso y ayuda), para su desarrollo se utilizó una pantalla touch comercial de 2.8 pulgadas la cual contó con su propio software para poder desarrollar la interfaz, (Figura 4.8).



Figura 4. 8 Pantalla touch comercial, componente principal para el desarrollo de un control electrónico para el reactor de plasma.

4.3.3. Pantalla principal

La función de la primera pantalla solo fue dar una pequeña introducción al sistema mostrando indicadores de actividad, con fines de detectar alguna falla en la pantalla touch comercial, esto se puede observar en el diagrama de caso de uso de la Figura 4.9.

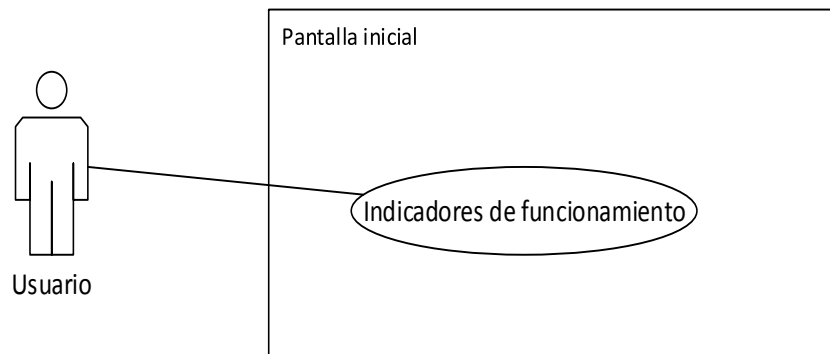


Figura 4. 9 Diagrama de caso de uso de la ventana o pantalla principal de la interfaz de control donde se muestra la característica básica de que debe contener para su desarrollo.

4.3.4. Password

para este sistema se propuso como característica principal “seguridad”, pues en cualquier momento se presentan contratiempos, para ello el diseño de una pantalla de inserción de contraseña, cuyas funciones principales se observan en el diagrama caso de uso de la Figura 4.10 en la parte inferior.

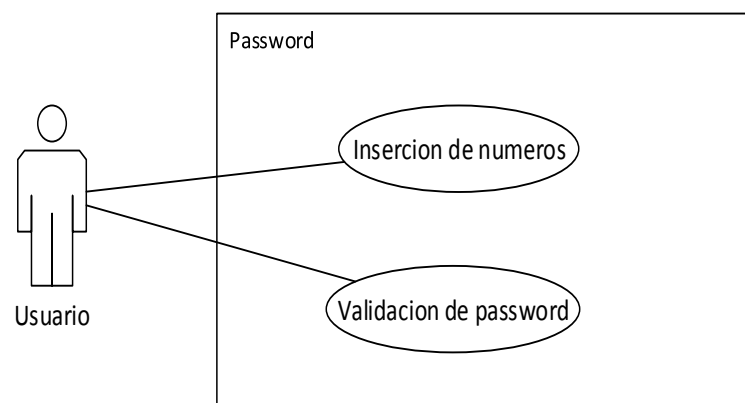


Figura 4. 10 Diagrama de caso de uso de la ventana de seguridad de la interfaz conocida como password donde se muestra sus características principales de desarrollo.

4.3.5. Menú principal

Fue el encargado de la coordinación de acceso a diferentes ventanas, y su diseño fue tal que consto de funciones principales como: Redirección al proceso de pulverización catódica a ejecutar, configuración de los parámetros de funcionamiento del proceso a ejecutar, término del proceso de navegación y soporte para el usuario, tal como se aprecia en el diagrama de caso de uso de la Figura 4.11.

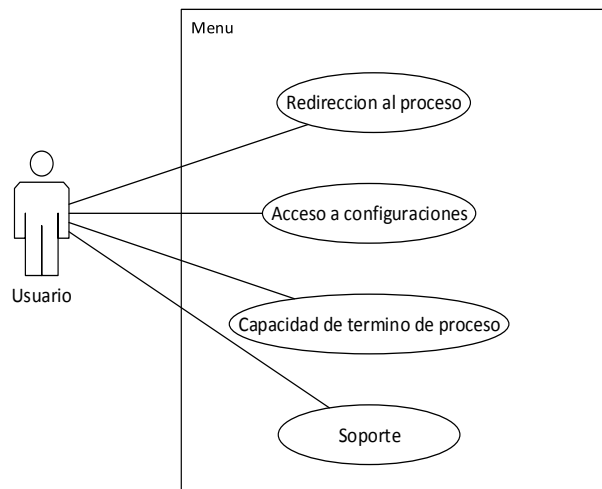


Figura 4. 11 Diagrama de caso de uso del menú principal de navegación de la interfaz de control en ella se aprecia que la ventana actúa como un enlace principal a las demás ventanas siendo esta el corazón de la interfaz.

4.3.6. Configuración de parámetros de funcionamiento

Tales como voltaje de ignición, voltaje de trabajo y tiempo de ciclo, así como comunicación con Arduino y regreso a menú fueron las funciones principales involucradas en el diseño de esta ventana, como se aprecia en el diagrama de caso de uso de la Figura 4.12.

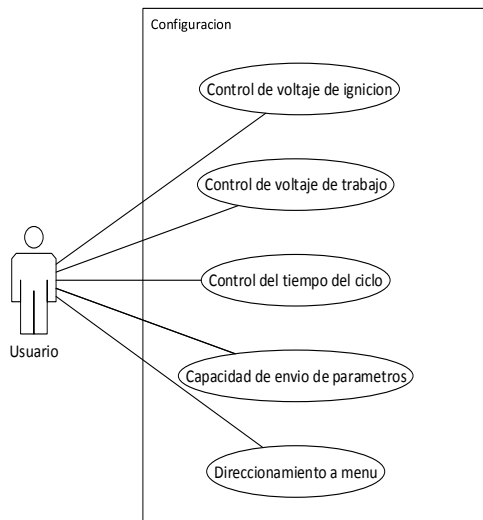


Figura 4. 12 Diagrama de caso de uso de la configuración de los parámetros de funcionamiento donde se muestra las funcionalidades que debe contener la ventana para el control del proceso.

4.3.7. Control del proceso

Fue una parte fundamental, su diseño conllevó contemplar poder observar la forma de onda durante el proceso, así como los parámetros fundamentales de funcionamiento como: voltaje de ignición, voltaje de trabajo, tiempo del ciclo de trabajo y también acceso a las configuraciones del proceso, (Figura 4.13).

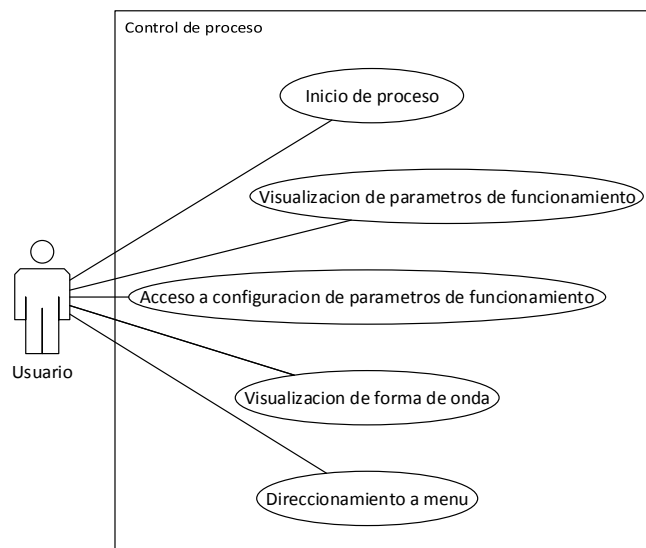


Figura 4. 13 Diagrama de caso de uso de la ventana de control de proceso de síntesis del reactor magnetrón sputtering, su desarrollo consto de los requisitos mostrados para su funcionamiento.

4.3.8. Ayuda o soporte al usuario

Por último, esta ventana se diseñó para tales casos en los que el usuario no tenga información necesaria sobre el manejo del sistema de generación de plasma, las funciones principales de esta ventana fueron orientar al usuario y enfocarlos al uso de las buenas prácticas del equipo, y regreso al menú principal, (Figura 4.14).

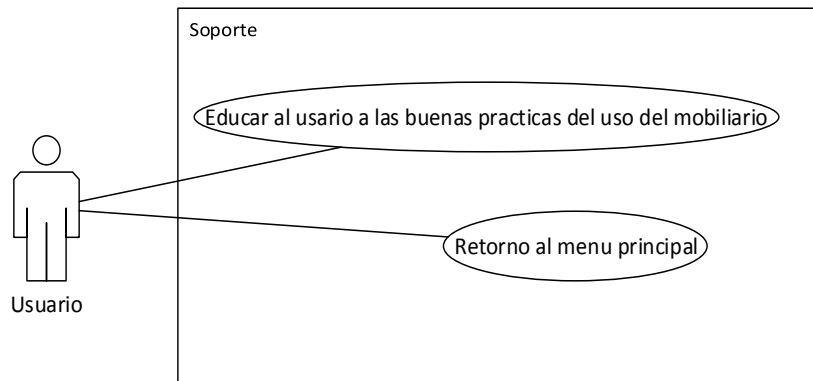


Figura 4. 14 Diagrama de caso de uso de la ventana de ayuda para el usuario, donde se observa que características debió contener la ventana de apoyo.

4.3.9. Sistema de gas plasmógeno y sistema de vacío

El sistema de gas plasmógeno y sistema de vacío, no tuvieron diseño alguno pues su construcción solo involucró el uso de componentes funcionales.

4.4. Etapa 4 Verificación

4.4.1. Verificación de funcionamiento de tarjeta modificada

Los cálculos a través de fórmulas arrojaron los parámetros necesarios para poder realizar ajustes a la tarjeta, y se procedió de verificación de funcionamiento, para ello se hizo uso de elementos como: punta lógica de alto voltaje y osciloscopio. Se conectó cada una de las salidas de alimentación de alto voltaje como se muestra en la Figura 4.15.

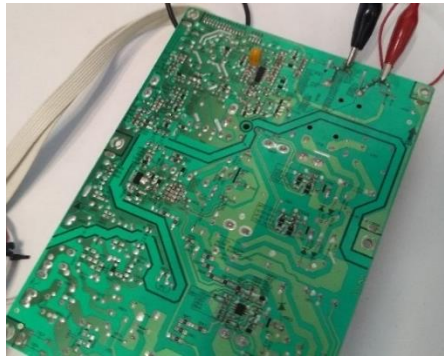


Figura 4. 15 Verificación de tarjeta electrónica potencia modificada para el funcionamiento del reactor magnetron sputtering.

Y se obtuvo la forma de onda mostrada en la Figura 4.16 donde podemos observar un voltaje de 1.83 Kv de voltaje pico a pico, este voltaje es el máximo valor alcanzado en 5 segundos de prueba de laboratorio, además de una forma de onda sinusoidal característica de la corriente alterna.

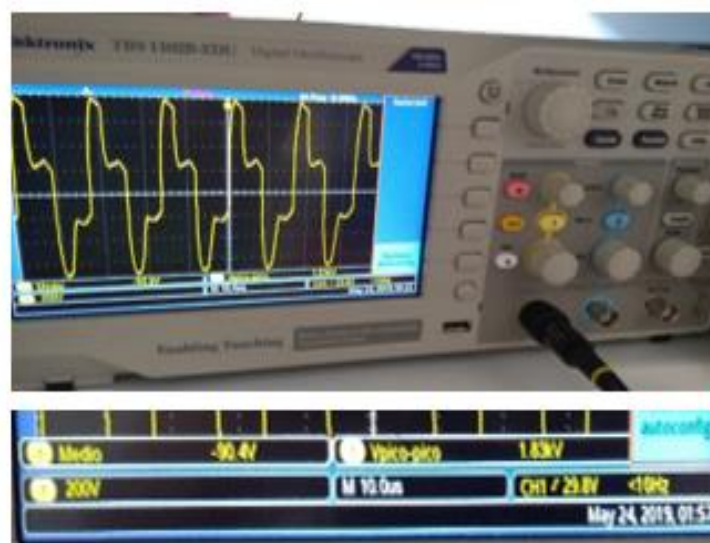


Figura 4. 16 Onda sinusoidal y voltaje de 1.83 Kv obtenidos durante las pruebas de verificación de alto voltaje sobre las modificaciones hechas a la tarjeta de potencia característicos de los primeros segundos del proceso.

Después de 10 segundos de prueba, el voltaje disminuyó de 1.85 Kv a 1.51 Kv donde se mantuvo estable hasta 5 minutos de prueba, (Figura 4.17), mientras que se observó una distorsión armónica donde se muestra señales de tensión múltiplos de la fundamental que se

adicionan para aumentar el voltaje, este tipo de ondas son características de los circuitos que se accionan con núcleo magnético como tal es el caso.

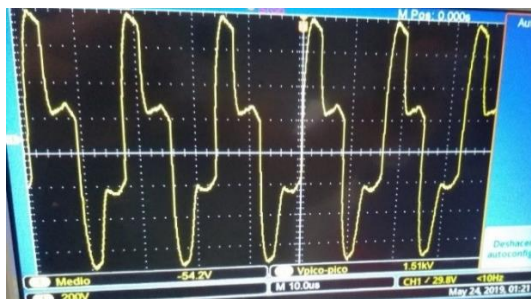


Figura 4. 17 Forma de onda cuasi-senoidal obtenida después de 10 segundos del proceso en la verificación de las modificaciones hechas a la tarjeta de potencia.

4.4.2. Verificación de funcionamiento de interfaz

4.4.2.1. Pantalla principal

Su programación (ver anexo D), consistió en la inserción de objetos como: una progress bar, logos y texto dentro de la ventana, (Figura 4.18).

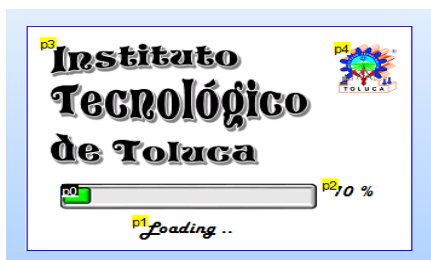


Figura 4. 18 Pantalla principal de interfaz de control, en la figura se observa cada uno de los componentes que la integraron tales como progress bar, e imágenes.

4.4.2.2. Password

El diseño y programación de esta ventana (ver anexo D) consistió en un panel de seguridad de varios botones y barra de visualización, el cual tuvo como función principal brindar seguridad en el sistema ya que solo los usuarios autorizados tuvieron acceso a la contraseña correcta, (Figura 4.19).



Figura 4. 19 Pantalla de contraseña del sistema, en la imagen se muestran los botones y panel que conformaron esta pantalla durante su desarrollo.

4.4.2.3. Menú principal

Una parte importante de la interfaz que consistió en una serie de botones de navegación a través de los cuales el usuario pudo navegar hacia las diferentes ventanas de la interfaz como: Sputtering, Help, Settings y Exit, (Figura 4.20).

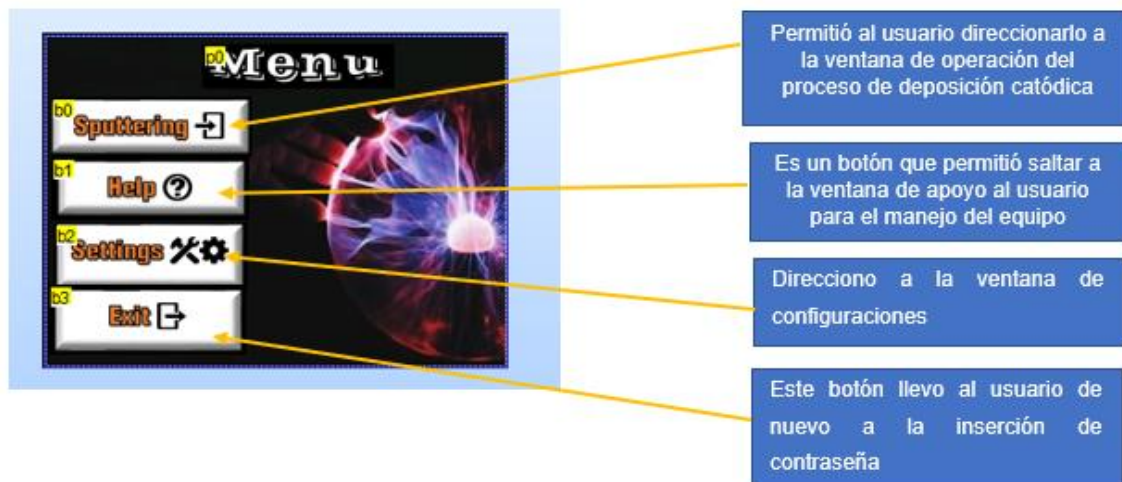


Figura 4. 20 Menú principal de la interfaz de control del sistema en los recuadros azules se puede observar que función permitió realizar cada uno de los botones de esta ventana.

4.4.2.4. Operación y monitoreo del proceso

Conocida como “sputtering” en el menú principal, fue básicamente donde el usuario visualizó el voltaje al que se trabajó durante el proceso, permitió realizar el control del inicio del proceso y observar su forma de onda respectivamente, (Figura 4.21).

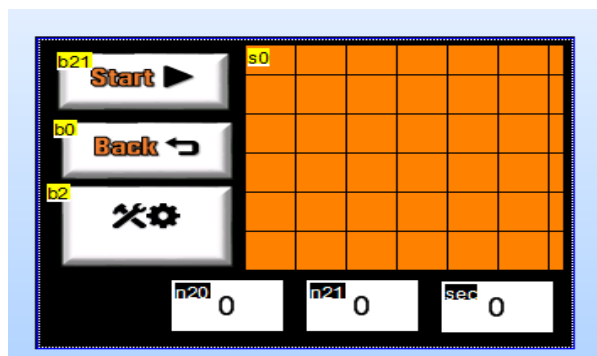


Figura 4. 21 Monitoreo y operación durante el proceso de funcionamiento del reactor, en la imagen se observan componentes como botones e indicadores de parámetros de forma de onda del proceso.

Como se mencionó previamente en el botón de “settings” apuntó a la ventana de configuraciones de voltaje y tiempo para el proceso de pulverización catódica (sputtering), fue una ventana donde el usuario configuro el voltaje de ignición del proceso, el voltaje de trabajo y el tiempo de ciclo. Además, conto con botones de aumento (+) y disminución (-) para los parámetros, y por último el botón “upload” sirvió para enviar la información al Arduino, (Figura 4.22).

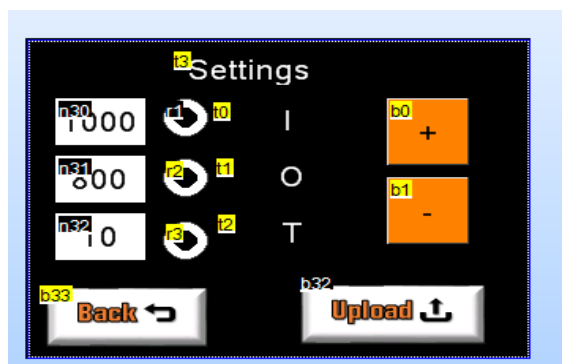


Figura 4. 22 Ventana de configuración de parámetros de funcionamiento, se puede apreciar cada uno de los componentes que la conforman.

4.4.2.5. Ayuda

Esta ventana como su nombre lo dice sirvió de soporte al usuario en cuyos casos que no cuenten con el conocimiento necesario para operar el dispositivo, (Figura 4.23).

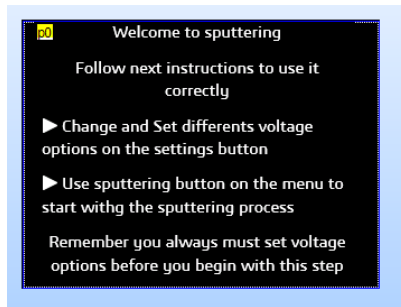


Figura 4. 23 Ventana de soporte al usuario.

4.4.3. Verificación de sistema de vacío

El vacío es uno de los elementos para un sistema de generación de plasma, para este trabajo fue determinante, ya que sin él el proceso de ignición no se logró en varias ocasiones debido a las fugas.

Para llevar a cabo el proceso de vacío se involucró varios factores como: sellado de la cámara de ignición, bomba mecánica de extracción de aire residual, y presostatos para la de medición de vacío.

Para un sellado óptimo se utilizó o-rings de viton y abrasadera en cada uno electrodos debido a las fugas (Figura 4.24).



Figura 4. 24 Manguera y abrazadera conectadas a la cabina principal del reactor de plasma para la generación de vacío por parte de la bomba mecánica.

Estos componentes ayudaron a mitigar en su totalidad estos problemas, mientras que para la extracción de aire se usó una bomba mecánica (Figura 4.25) de 1.5, cuya función principal fue

formar un alto vacío extrayendo moléculas de gas, eliminando humedad y deshidratando la cámara hasta una presión específica.



Figura 4. 25 Bomba mecánica para la generación de vacío en el interior de la cabina del reactor de plasma.

El presostato midió la presión de la cámara hasta 0.72 MPa, cuyo valor fue suficiente para realizar el proceso de ignición entre electrodos, (Figura 4.26).



Figura 4. 26 Presostato, elemento que ayudo a la medición del vacío generado por la bomba mecánica.

4.4.4. Verificación del sistema de generación de plasma total

Una vez hecho el vacío a una presión aproximada de 0.72 MPa, se realizó la conexión de la tarjeta de fuente al reactor, se energizo el sistema y se procedió a realizar el proceso de ignición, (Figura 4.27).

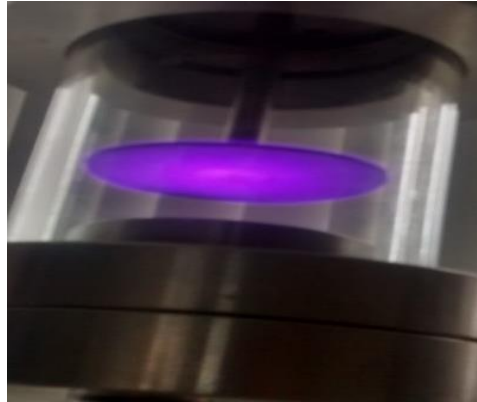


Figura 4. 27 Primera verificación del sistema de generación de plasma, en la imagen se aprecia la generación de una descarga en uno de los electrodos.

Sin embargo, se pudo notar que la concentración del plasma no era la adecuada para el proceso por lo que se optó por mover a diferentes distancias (10mm, 7mm y 4mm) el ánodo del cátodo con la finalidad de encontrar la distancia correcta.

En la Figura 4.28 se observa a los electrodos colocados a 10 mm uno con respecto del otro, en donde se notó una mejoría en el flujo, pero la concentración al centro del electrodo no fue la esperada, por lo que se redujo la distancia entre ánodo y cátodo con el fin de encontrar mayor concentración de plasma.



Figura 4. 28 Modificación en la distancia entre electrodos a 10 mm para una mayor concentración de energía.

A 7 mm la desviación del plasma fue reduciendo pero sin tener todavía el flujo de intensidad esperado así que se decrementó la distancia una vez más, y asimismo se observó que el plasma ya no se dispersaba sino que se concentraba en un solo haz, (Figura 4.29).

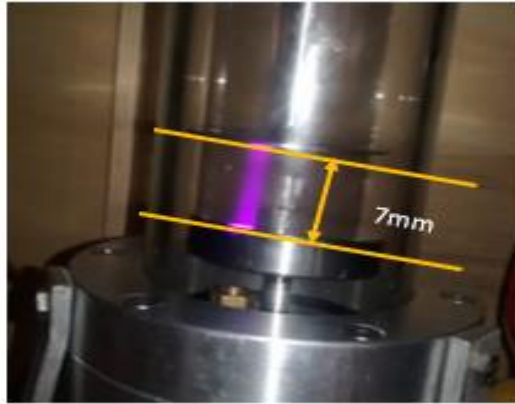


Figura 4. 29 Disminución en la distancia entre electrodos a 7 mm para mayor concentración al centro.

A 4mm la prueba de concentración de plasma llego a su consumación, el plasma se concentró totalmente al centro, logrando así una mayor concentración de la energía para los efectos de deposición de partículas, (Figura 4.30).

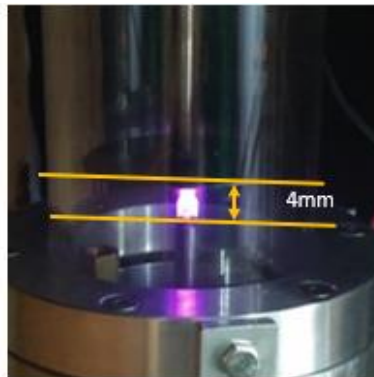


Figura 4. 30 Distancia entre electrodos a 4 mm de distancia, ideal para el proceso de síntesis debido a su alta concentración.

4.4.4.1. Modulación de plasma mediante pantalla touch comercial

Una vez determinada la distancia adecuada entre ánodo y cátodo (electrodos), el siguiente paso fue hacer pruebas de regulación de intensidad del plasma mediante el control por pantalla touch.

Así que se conectó la pantalla a la tarjeta, se energizó y procedió a realizar su verificación. Primeramente, se configuro parámetros de voltaje de ignición al 70 %, voltaje de trabajo al 40 %, y tiempo de ciclo de 10 segundos.

Los resultados arrojaron una gráfica de diente de sierra en la pantalla touch característica del mismo componente, en la que se observó diente de sierra muy grande que correspondió al inicio del proceso o ignición y pequeños dientes de sierra correspondientes al voltaje de trabajo del proceso.



Figura 4. 31 Curva característica de diente de sierra característica de la interfaz de control, el pico más grande represento el proceso de ignición para poder generar el voltaje de rompimiento.

En cuanto al reactor se observó una atenuación en el flujo del plasma de electrodo a electrodo debido a la automatización del mismo proceso como se aprecia en la Figura 4.32.



Figura 4. 32 Modulación del flujo de plasma generado por el reactor de plasma controlado por la interfaz.

4.5. Etapa 5 Mantenimiento

El programa de mantenimiento se contempló para realizar en la siguiente fase del proyecto, en este trabajo solo se incluyó la construcción del sistema de plasma.

5. Capítulo 5 Resultados

A continuación, veremos los resultados que se obtuvieron a lo largo del proceso de construcción del reactor.

5.1. Reingeniería aplicada a tarjeta de circuitos de cátodo frío

Utilizando las modificaciones hechas en la tarjeta a través de inserción de un capacitor de tantalio de 10 uf, se configuro el valor de tiempo de retardo evitando que la tarjeta se apagara y permitiendo el libre flujo de energía durante periodos prolongados de tiempo, (Figura 5.1).



Figura 5. 1 Tarjeta de potencia modificada, en la imagen se muestra uno de ellos capacitores agregados a la placa.

La siguiente es una forma de onda obtenida en laboratorio durante las primeras pruebas de alto voltaje, en ella se puede observar una onda cuasi senoidal donde se presentan distorsiones en la forma de onda original llamados comúnmente como armónicos, estos contienen una frecuencia múltiplo de la señal fundamental y se suman a la misma llegando a tomar valores de hasta 2 Kv en los primeros segundos del proceso de ignición , esta peculiaridad es característica de los sistemas convertidores de potencia, (Figura 5.2).

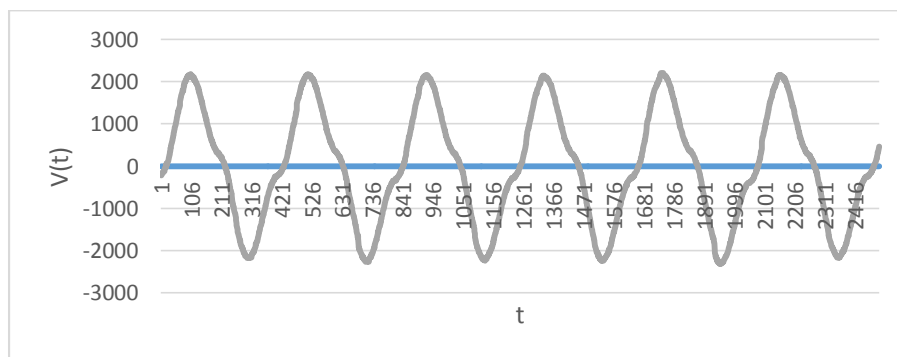


Figura 5. 2 Forma de onda obtenida durante las pruebas de alto voltaje.

Los parámetros observados en el osciloscopio se describen a continuación en la tabla 5.1, en ella se denota los parámetros a los que se realizaron las pruebas en el equipo de trabajo.

Tabla 5. 1 Parámetros de funcionamiento de osciloscopio durante las pruebas de alto voltaje realizadas en laboratorio.

Record Length	2500
Sample Interval	0.00000004
Trigger Point	1250
Source	CH1
Vertical Units	V
Vertical Scale	500
Vertical Offset	0
Horizontal Units	s
Horizontal Scale	0.00001
Pt Fmt	Y
Yzero	0
Probe Atten	100
Model Number	TBS1102B-EDU
Serial Number	C021688

5.2. Interfaz

El diseño permitió crear cada uno de las pantallas de navegación del usuario en el entorno de desarrollo propio del componente, y a través de las pruebas para validar su funcionamiento de manera exitosa, en las siguientes imágenes se puede observar la interfaz en un ambiente real de funcionamiento, (Figuras 5.3 y 5.4).



Figura 5. 3 En la imagen se observa la pantalla principal de la interfaz y la ventana de control de acceso al sistema mediante contraseña.



Figura 5. 4 Resultados obtenidos de la validación hecha a la interfaz de control, a la derecha se puede observar la pantalla de configuración de parámetros de funcionamiento, 60 es el porcentaje del ciclo de trabajo del proceso de ignición, 20 es el porcentaje en la disminución que se tiene y 10 son los segundos que dura el proceso completo.

5.3. Vacío

Como se explicó en el capítulo anterior, contar con una presión de vacío adecuada es fundamental para todo proceso de plasma frío pues ayuda a que la ignición pueda producirse.

Durante las pruebas de vacío se probó tanto el equipo de vacío como la extracción de aire en la cámara de vidrio pyrex, obteniéndose resultados exitosos debido a un sellado total que permitió llegar a una presión de 0.73 MPa suficiente para el voltaje de ruptura pudiera generar un gas ionizado, (Figura 5.5).



Figura 5. 5 Cabina del reactor magnetrón sputtering (a la izquierda) y presostato (a la derecha), se observó una presión de 0.73Mpa suficientes para el proceso de ignición del sistema.

5.4. Reactor magnetrón sputtering

Los resultados anteriores nos llevaron a un solo procedimiento, el ensamble del sistema de generación de plasma, el cual conto de las partes de control arduino y pantalla touch, componentes para generación y medición de vacío (bomba mecánica y presostato), tarjeta de circuitos de CCFL, cabina y se omitió el sistema de suministro de gas como se observa en la Figura 5.6.

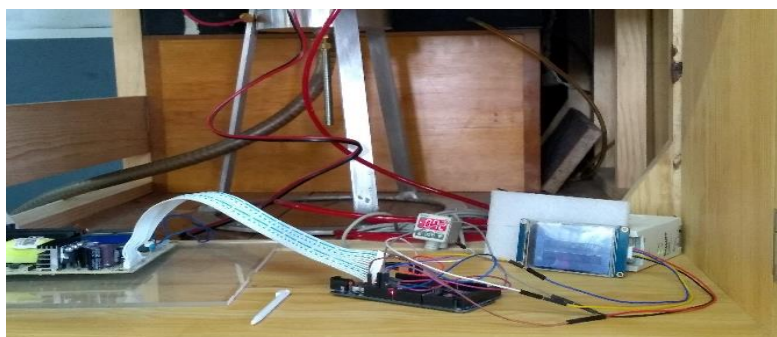


Figura 5. 6 Ensamble del sistema de reactor magnetrón sputtering, en la figura se observa la tarjeta de potencia conectada a Arduino y su conexión con la pantalla touch, asimismo se conectó al reactor de plasma.

En esta parte se obtuvieron los resultados de la Figura 5.7 que a continuación se muestran, se observó una descarga tipo glow, que se conformó por un ciclo de trabajo del 100% para el proceso de ignición y después una atenuación a el 40% del ciclo de trabajo respectivamente de acuerdo a lo programado en la interfaz de control.



Figura 5. 7 Cabina del reactor magnetrón sputtering, donde se pudo observar una atenuación en el plasma propio del proceso debido a su automatización.

Durante el proceso de ignición se pudo observar la onda senoidal vista en la Figura 5.8 donde se observó una distorsión armónica y un voltaje de 1.5 Kv suficiente para ser el voltaje de rompimiento del proceso.

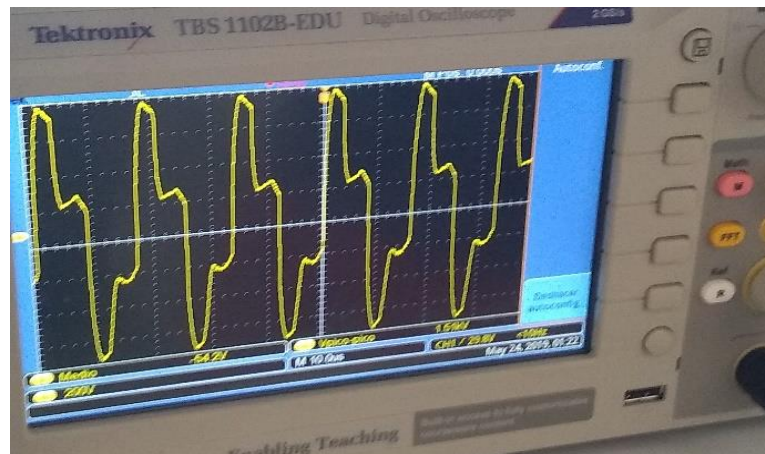


Figura 5. 8 Forma de onda obtenida durante el proceso de validación del funcionamiento del reactor magnetron sputtering, donde se muestra una onda cuasi-senoidal debido a la distorsión armónica ocasionada por la tarjeta electrónica de potencia.

6. Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En esta investigación se presentó el desarrollo de un generador de plasma frio basado en los circuitos convertidores de potencia de corriente alterna a directa (CA-CD) y de corriente directa a alterna (CD-CA), en configuración de medio puente y puente completo.

El prototipo desarrollado demostró tener la potencia suficiente para generar plasma en una descarga tipo glow alrededor de electrodos de acero inoxidable, además conto con la capacidad de variar el voltaje desde 0 a 1800 volts pico a pico como voltaje máximo.

Se pudo observar que el plasma comenzaba a generarse a partir de los 400 volts de voltaje RMS a una presión 0.73 MPa que nos proporcionó el vacío necesario para poder generar plasma a través de una descarga eléctrica.

6.2. Recomendaciones

Algunas sugerencias sobre el funcionamiento del sistema de generación de plasma que se recomiendan son:

Para mejorar la potencia del sistema es necesario cambiar una tarjeta de CCFL cuya capacidad sea mayor, es decir, pueda generar mayor voltaje y corriente.

Realizar una programación de interface hombre máquina más adecuada para las necesidades del sistema como pueden ser parámetros en tiempos, reloj de tiempo real para hora y fecha, captura de datos y almacenaje de datos en memoria SD u alguna otra opción.

Utilizar otra pantalla touch más robusta, cuyas características sean capaces de satisfacer más ampliamente las necesidades de hoy en día por ejemplo notificaciones por medio de celular o incluso uso de bluetooth para controlar el proceso por medio de celular.

7. Referencias bibliográficas

A. von Keudell, V. S.-v. (2017). *Foundations of low-temperature plasma physics—an introduction*. Artículo, Ruhr-Universität Bochum, Institute for Experimental Physics II, Department Plasmas, Bochum, Germany. Recuperado el 21 de Julio de 2019, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/aa8d4c>

Al-Dmour, E. (June de 2017). *Fundamental of Vacuum Technology*. Glumslov, Sweden.

Arturo Tepale Cortes, H. M. (2015). Fuente de alto voltaje para generación de plasma en un reactor cilíndrico a temperatura ambiente y a presión atmosférica. *Revista Ideas*, 33-41.

Brenes, S. G. (2013). Plasma ¿que es y para que se utiliza? *Investiga TEC*, 6-9.

Corporation, T. E. (1 de Febrero de 2018). Basic Characteristics and Application Circuit Design of Transistor Couplers. *Basic Characteristics and Application Circuit Design of Transistor Couplers*, 20. Recuperado el 24 de Julio de 2019, de <https://toshiba-semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=13438>

Electronics, A. (11 de Octubre de 2019). *Arrow*. Obtenido de Arrow: <https://www.arrow.com/en/categories/magnetics/transformers/pulse-transformers>

Garcia, J. G. (Octubre de 2012). Dispositivos electroluminiscentes. *Dispositivos electroluminiscentes*. Estado de Mexico, Mexico.

Gutiérrez, L. G. (2017). *SÍNTESIS DE PELÍCULAS DELGADAS POR LA TÉCNICA DE MAGNETRÓN SPUTTERING A PARTIR DE BLANCOS DE RENIO Y BORO*. Tesis Profesional, Universidad EAFIT, Departamento de Ciencias Físicas, Medellín. Recuperado el 14 de Junio de 2019, de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11822/AngaritaGutierrez_LuisGuillermo_2017.pdf?sequence=2

Ivan Supelano Garcia, A. S. (21 de Julio de 2017). Aplicacion de la descarga luminiscente anormal como una fuente calorica.

Jacek Kolek, M. H. (6 de Abril de 2019). Practical design of a high-voltage pulsed power supply implementing SiC technology for atmospheric pressure plasma reactors. Szczecin , Polonia.

Lieberman, M. A. (2005). *Principles of plasma discharges and materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.

M.A. Rahman, M. S. (2013). Generation and Characterization of Atmospheric Pressure Air Plasma and Finding its Applications. *Global Journal of Science Frontier Research*, 6-10.

Mundo compresor. (Julio de 2019). Obtenido de Mundo compresor: <https://www.mundocompresor.com/print/bomba-de-vacio>

Nacera Hammadi, M. Z. (2016). "Development of high-voltage high-frequency power supply for ozone generation". *Journal of Engineering Science and Technology* .

Ondrej Kylián, D. N. (2019). Magnetron Sputtering of Polymeric Targets: From Thin Films to Heterogeneous Metal/Plasma Polymer Nanoparticles. *Materials*, 1-16.

R. Massarczyk, P. C. (2016). *Paschen's law studies in cold gases*. Artículo, Cornell University. doi:10.1088/1748-0221/12/06/P06019

Ramos, C. A. (2017). *SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS A PARTIR DE EXTRACTOS DE RASPO DE UVA*. Trabajo de fin de grado, Universidad politecnica de Catalunya. Recuperado el 28 de Junio de 2019, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/118065/TFG-memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Reál J. Fradette. (2016). *Solar Atmospheres. Understanding Vacuum and Vacuum Measurement*. Obtenido de Solar Atmospheres.

Redman, A. C. (2017). *Development and integration of a low cost,high voltage power supply into a thin film deposition system*.

Roberto Carlos Martinez Montejano, V. E. (23 de Julio de 2019). Construction of a power electronic source for cold plasma generation.

Ruvalcaba, L. S. (Julio de 2014). Desarrollo de un sistema para la generacion de plasma basado en una descarga de barrera dielectrica coplanar. *Desarrollo de un sistema para la generacion de plasma basado en una descarga de barrera dielectrica coplanar*. Queretaro, Mexico.

Sanchez, I. R. (Enero de 2016). *Diseño y Construcción de un inversor multinivel de 5 niveles , de semiciclos segmentados de bajas perdidas*. Tesis, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ingenieria Electrica, Ciudad de Mexico. Recuperado el Julio de 2019, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9157/tesis.pdf?sequence=1>

Santos, C. V. (2016). Nanocatalisis y nanofotocatalisis. *Revista virtual pro*, 1-7.

T.N.V. Krishna, K. R. (11 de Octubre de 2018). "4T analog MOS control high voltage high frequency (HVHF) plasma switching power supply for water purification in industrial applications". Chennai, India.

Tangshan Biaoxian Electronic co. (20 de Julio de 2019). *Tangshan Biaoxian Electronic* . Obtenido de Tangshan Biaoxian Electronic: http://www.bovceed.com/ecp_view.asp?id=48

Toshiba. (26 de Julio de 2018). DC-AC Inverter Circuit. *DC-AC Inverter Circuit*, 29. Recuperado el 27 de Julio de 2019, de <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did>

Trujillo, A. B. (Octubre de 2017). Diseño y construcción de un generador de plasma para aplicaciones en cirugía. *Diseño y construcción de un generador de plasma para aplicaciones en cirugía*. Toluca de lerdo, Estado de Mexico.

Wang, G. (2018). *Nanotechnology: The New Features*. Artículo, University of Connecticut, Dept. of Computer Science and Engineering. Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de <https://arxiv.org/abs/1812.04939>

8. Anexos

Anexo A Datasheet OZ9938



OZ9938

Change Summary

CHANGES

No.	Applicable Section	Description	Page(s)
1.	Electrical Characteristics	Update 保护 protection release threshold in 'Timer & protection' parameter Min & Max limits	3
2.	Throughout datasheet	Miscellaneous changes	---

REVISION HISTORY

Revision No.	Description of change	Release Date
0.60	Initial release	5/12/2005
0.65	1. Electrical Characteristics: <u>a.</u> Modify general test conditions in line 1; <u>b.</u> Modify 'Driver Frequency – Striking & Normal Operation' Typ limit; <u>c.</u> Modify 'PWM Dimming Control – LCT frequency'. 2. Reference Application Circuit: Modify C14, C9 & R9 values	6/27/2005
1.0	1. Ordering Information: Add OZ9938G, IG, D & DN. 2. Recommended Operating Range: a. Add 'Dimming Range'; b. Fill in 'Thermal Impedance'. 3. Electrical Characteristics: a. Update 'Supply Current' limits; b. Update 'Soft Start' limits; c. Update 'Under Voltage Lockout' limits; d. Update 'Reference Voltage' limits; e. Update 'Driver Frequency' limits; f. Update 'Timer & Protection' limits; g. Update 'Drivers' parameter name & limits; h. Update 'PWM Dimming Control' limits; i. Delete 'Analog Dimming Control'. 4. Function Description: Update formula in NO. 4 Ignition, No. 6 Normal Operation & No. 9 Dimming Control. 5. Package Information: Add DIP package drawing.	9/22/2005

LCDM Inverter Controller

FEATURES

- Positive PWM dimming polarity
- Constant operating frequency
- Drives positive/negative-impedance lamps during ignition
- High drive current for external MOSFETs
- User-defined ignition time and shutdown delay time
- Multiple mode dimming control
- Built-in intelligence for ignition and normal operation of CCFLs
- Built-in open-lamp protection and over-voltage protection for backlight system
- Optimized soft-start function

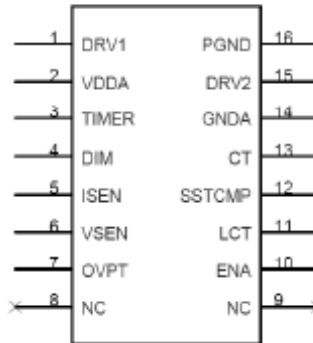
The control logic provides a regulated ignition voltage and appropriate protection features for over-voltage or over-current conditions.

The OZ9938 offers a high level of integration, while maintaining flexibility and high-efficiency operation that reduces external component heating, resulting in higher reliability and longer CCFL life. The proprietary design technique provides a simple, low-cost system solution.

ORDERING INFORMATION

Part Number	Temp Range	Package
OZ9938G	-20°C to 85°C	16-pin SOIC
OZ9938GN	-20°C to 85°C	16-pin SOIC Lead-Free
OZ9938IG	-40°C to 85°C	16-pin SOIC
OZ9938IGN	-40°C to 85°C	16-pin SOIC Lead-Free
OZ9938D	-20°C to 85°C	16-pin DIP
OZ9938DN	-20°C to 85°C	16-pin DIP Lead-Free

PIN DIAGRAM



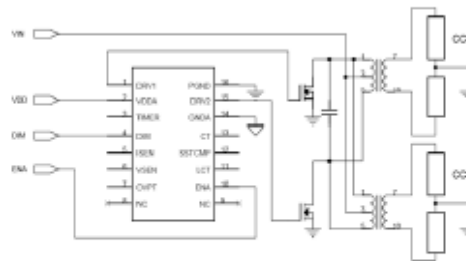
GENERAL DESCRIPTION

The OZ9938 is a high performance, cost-effective CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp) controller designed for driving large-size Liquid Crystal Display (LCD) applications requiring 2 to 6 CCFLs.

The controller converts unregulated DC voltages into a nearly sinusoidal lamp voltage and current waveforms.

The OZ9938 provides two drive signals for most power conversion topologies while maintaining high-efficiency operation. The PWM controller provides a soft-start operation, current and voltage regulation, over-voltage and over-current protection, high drive capability and multiple dimming functions (internal PWM or external PWM or analog dimming functions).

SIMPLIFIED APPLICATION CIRCUIT



PIN DESCRIPTION

Pin No.	Names	Description
1	DRV1	Drive output
2	VDDA	Supply voltage input
3	TIMER	Timing capacitor to set striking time and shutdown delay time
4	DIM	Analog dimming or Internal LPWM dimming or external PWM pulse input for dimming function
5	ISEN	Current sense feedback
6	VSEN	Voltage sense feedback
7	OVPT	Over-voltage/ over-current protection threshold setting pin
8	NC	No connection
9	NC	No connection
10	ENA	ON/OFF control of IC
11	LCT	Timing capacitor to set internal PWM dimming frequency and also a pin for analog dimming selection
12	SSTCMP	Capacitor for soft start time and loop compensation
13	CT	Timing resistor and capacitor for operation and striking frequency
14	GNDA	Ground for analog signals
15	DRV2	Drive output
16	PGND	Ground for power paths

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Input Voltage VDDA	7.0V
GNDA	+/- 0.3V
Signal Inputs	-0.3V to VDDA +0.3V

Operating Temp.	OZ993B	OZ993BI
	-20°C to 85°C	-40°C to 85°C

Operating Junction Temp.	125°C
Storage Temp.	-55°C to 150°C

RECOMMENDED OPERATING RANGE

VDDA - Input Voltage	4.5V to 5.5V
f _{op} - Operating Frequency	20KHz to 150KHz
Analog Dimming Range	0.7V to 2.1V
Thermal Impedance (θJA)	
- 16-pin SOP	86 °C/W
- 16-pin DIP	56 °C/W

Note ⁽¹⁾: The Absolute Maximum Ratings are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The Electrical Characteristics table defines the conditions for actual device operation. Exposure to absolute maximum rated conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Symbol	Test Conditions	Limits			Unit
		VDDA=5V; Ta=25°C R _{CT} =39Kohm, C _{CT} =470pF R _{LCT} =3.3Mohm, C _{LCT} =4.7nF	Min	Typ	Max	
Supply Current						
Stand By	I _{sb}	ENA=0V		2.0	5.0	μA
Operating	I _{sd}	Capacitance at DRV1 & DRV2=2nF	1.5	2.0	2.5	mA
Soft Start						
Current Source	ISSTCMP		1.83	2.29	2.75	μA
Under Voltage Lockout						
Lock out	UVLO	VDDA 5V→0V			3.2	V
Resume	UVLO	VDDA 0V→5V	4.0			V
Reference Voltage						
ISEN reference voltage		ISEN-SSTCMP	1.12	1.18	1.23	V
		Temperature Coefficient		360		ppm/°C
VSEN reference voltage during striking		VSEN-SSTCMP	2.78	2.92	3.06	V
		Temperature Coefficient		310		ppm/°C
Driver Frequency						
Striking	f _{st}		62.6	65.8	69.0	KHZ
		Temperature Coefficient		290		ppm/°C
Normal operation	F _{op}		50.0	52.0	54.0	kHz
		Temperature Coefficient		110		ppm/°C
Timer and Protection						
Striking current Source		ISEN =0V	2.3	2.9	3.5	uA
Open lamp and over voltage protection current Source		SSTCMP > 3.3V or VSEN>OVPT	8.0	10.0	12.0	uA
Protection release threshold			2.60	2.81	3.02	V
Drivers						
DRV1/2 source	R _{on}			12	18	Ω
DRV1/2 sink	R _{on}			5	9	Ω
Maximum duty cycle			45			%

FUNCTIONAL DESCRIPTION

1. Power Conversion

The OZ9938 controller is designed to suit various power conversion topologies and provides symmetrical drive pulses to the tank circuit that includes the transformer(s), output capacitors and the CCFL/panel load that yields quasi-sinusoidal CCFL voltage and current waveforms. High efficiency operation of the OZ9938 yields lower heat dissipation for the inverter system resulting in higher reliability.

To illustrate the controller functions, refer to Figures 1 and 2 on pages 5 and 8, respectively for the following sections.

2. Enable

Applying a voltage level greater than 2V to ENA (pin 10) enables the IC. A voltage less than 1V will disable the IC.

3. Soft-Start (SST)

Utilizing a patented multi-task technique, the soft-start function and the loop compensation function are combined to provide a good start-up characteristic. Connecting an external capacitor to SSTCMP (pin 12) provides the functions. In the start-up mode, current charges capacitor C13 connected to SSTCMP. The voltage at the capacitor controls the gradual increase in power to the transformer and subsequently to the output load. This reduces in-rush current and provides reliable operation to the CCFL.

4. Ignition

When the VDDA voltage exceeds the under-voltage lockout threshold, the IC is enabled and internal striking timer is activated.

The approximate striking frequency is calculated by the following equation.

$$f_{st} = \frac{3812 / R_{CT} [K\Omega] + 26}{4 * C_{CT} [pF]} \times 1000 \text{ [KHz]}$$

5. Aged CCFL Ignition

OZ9938 provides a striking timer function to ensure that any aged, slow-turn-on CCFL is provided with sufficient voltage and time to ignite. The transformer output voltage is sensed at VSEN

(Pin 6). When the voltage at VSEN reaches a threshold of approximately 3.0V, the IC regulates the output voltage at the transformer secondary. If the lamps are not ignited when the voltage at TIMER (pin 3) reaches a threshold of approximately 3V, the IC will shutdown and latch

The approximate striking time is calculated by the following equation.

$$T_{st} [\text{Sec}] = C_{TIMER} [\mu F]$$

To resume normal operation, toggle the ENA signal or reset VDDA.

6. Normal Operation

Once the lamps are ignited and the voltage at ISEN (pin 5) is >0.7V, the IC enters the normal operation mode and the PWM dimming control is activated.

The operating frequency is determined by resistor (R9) and capacitor (C9) connected to CT (pin 13). The control loop regulates the average current through the lamps by adjusting the duty cycle of the output drives. Constant frequency operation eliminates interference with the inverter and LCD panel that often occurs in a variable frequency inverter system. The peak and valley of the CT waveform are 2V and 0V respectively.

The approximate operating frequency is calculated by the following equation.

$$f_{op} = \frac{9.53 \times 10^6}{R_{CT} [K\Omega] * C_{CT} [pF]} \text{ [KHz]}$$

7. Open Lamp Protection

If a CCFL is removed or damaged during normal operation, the voltage at SSTCMP (pin 12) rises rapidly. When the voltage at SSTCMP reaches a threshold of approximately 2.5V, a current source charges the capacitor (C17) connected to TIMER (pin 3). Once the voltage level at the TIMER pin reaches a threshold of approximately 3V, the drive outputs shut down and latch.

The shutdown delay feature avoids inverter shutdown due to a VIN transient or if a lamp has a positive impedance characteristic.

The approximate shutdown delay time is calculated by the following equation.

$$T_d [\text{Sec}] = 0.33 * X_{CTIMER} [\mu F]$$

To resume operation, toggle the ENA signal or restart VDDA.

8. Over-Voltage and Over-Current Protection

Over-voltage and over-current protection are monitored by the voltage on VSEN (pin 6). During normal operation, if a CCFL is damaged or removed, the voltage at VSEN (pin 6) increases. Once the voltage at VSEN exceeds the user-defined, preset voltage set by OVPT (pin 7), the driver output duty cycle is regulated and the shutdown delay timer is activated. OVPT sets the overall protection threshold voltage that is lower than -3V (VSEN threshold). Once the voltage at TIMR pin reaches -3V, the IC will shut down and latch. OVPT voltage setting is determined by a resistor divider (R13 and R16) connected to the OVPT.

The approximate shutdown delay time is calculated by the following equation.

$$T_d [\text{Sec}] = 0.33 \times C_{\text{TIMER}} [\mu\text{F}]$$

To resume operation, toggle the PWM signal or restart VDDA.

External PWM dimming is implemented by setting LCT to a DC voltage between 0.5V to 1.0V using a resistor divider (R8 and R17) between VDDA and GND. Apply the external PWM pulse to DIM (pin 4).

9. Dimming Control

A built-in function enables the user to select one of the following dimming controls: analog, internal LPWM or external PWM signal.

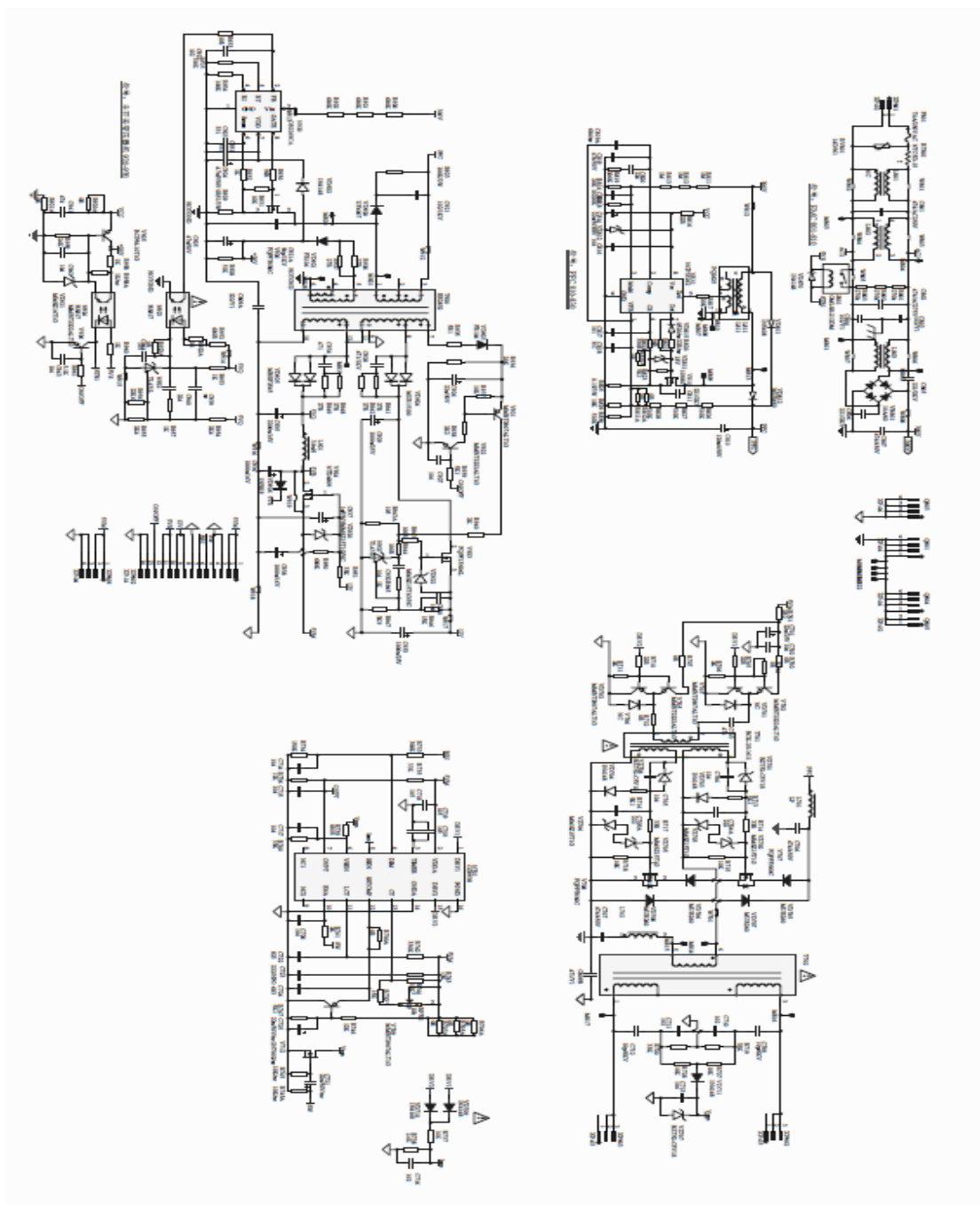
Analog dimming control is activated when the voltage to LCT (pin 11) is greater than 3V. A voltage of 0.5V to 1.25V applied to DIM (pin 4) controls the amplitude of the lamp current.

Internal LPWM dimming control is determined by resistor R8 and capacitor C14 connected to LCT. The low frequency sawtooth waveform is compared with the voltage at DIM to generate the LPWM signal. The peak and valley of the waveform are 1.5V and 0.1V respectively. The frequency is approximated by the following equation:

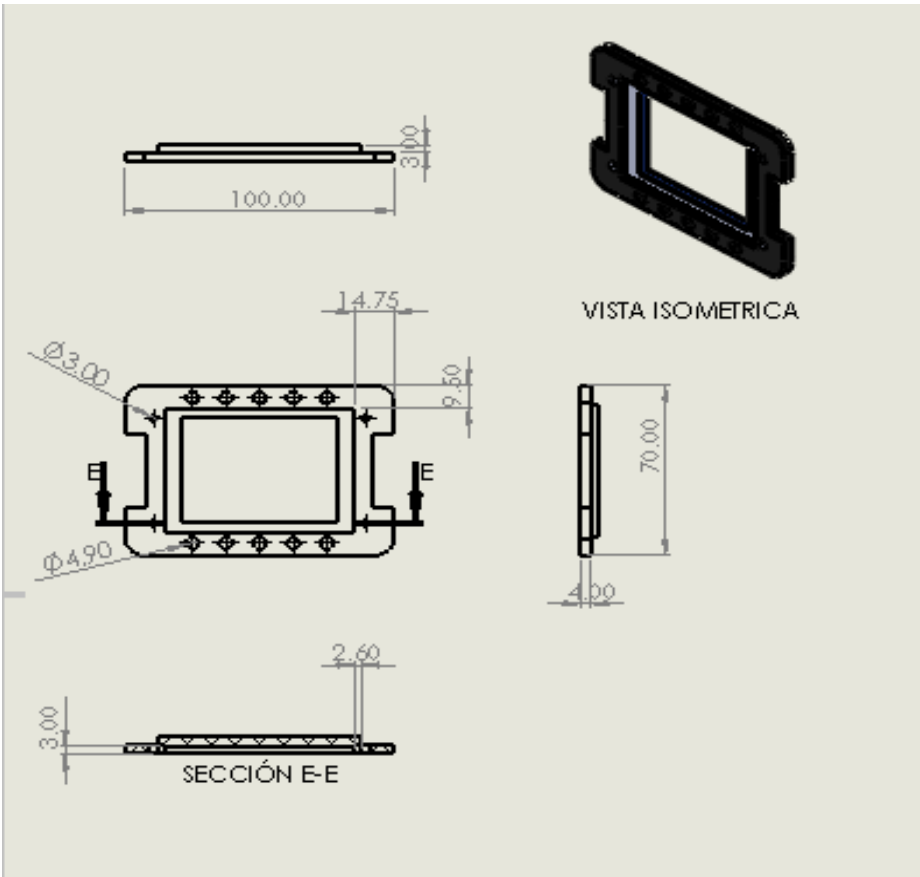
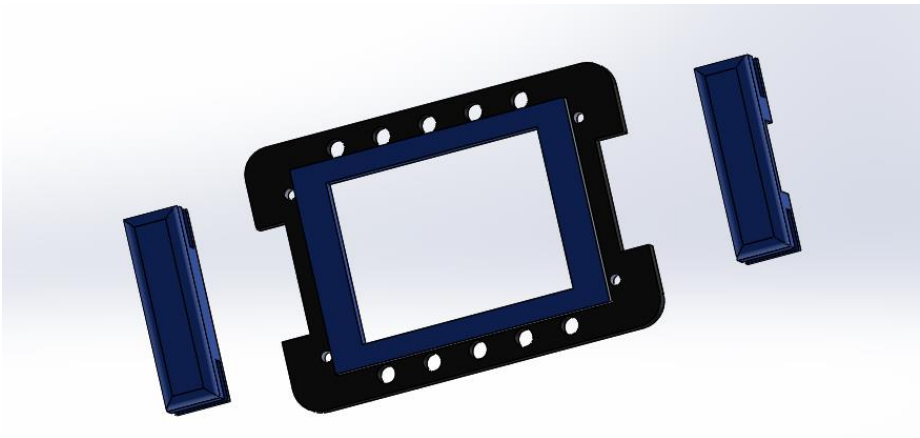
$$f_{\text{LOSC}} = \frac{3102}{R_{\text{LCT}} [\text{M}\Omega] \times C_{\text{LCT}} [\text{nF}]} \quad [\text{Hz}]$$

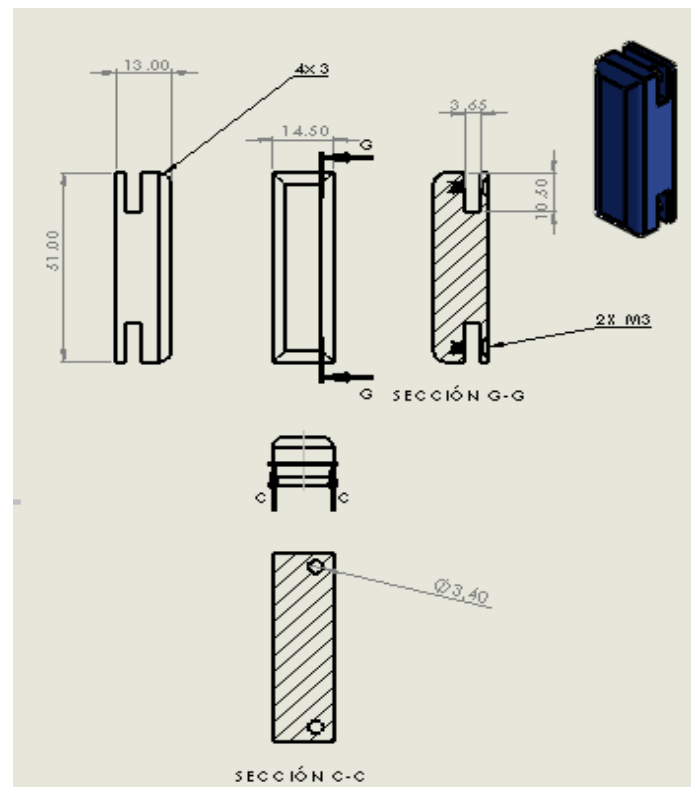
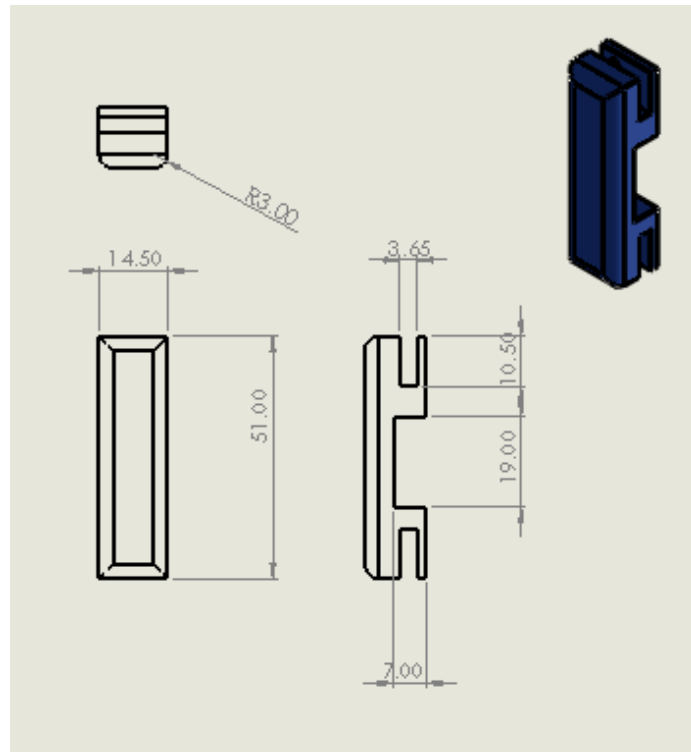
With positive PWM dimming polarity, the LPWM duty cycle will be 100% when DIM pin voltage is higher than 1.5V. LCD panel will have maximum brightness. When DIM pin voltage is lower than 0.1V, the LPWM duty cycle will be 0%. LCD panel will be totally dark.

Anexo B Diagrama de tarjeta de potencia



Anexo C Diseño de carcasa para impresión en 3D





Anexo D Programación de pantalla táctil

Page 0 (Pantalla inicial)



```
if(p0.pic<10&&p1.pic<13&&p2.pic<23)
{
    p0.pic++
    p2.pic++
    p1.pic++
} else
if(p1.pic>11&&p0.pic<=10&&p2.pic<=23)
{
    p1.pic=11
} else
{
    page 4
}
```

Page 1 (Menú principal)



```
B0
delay=1000
page 2

B1
delay=1000
page 5

B2
delay=1000
page 5

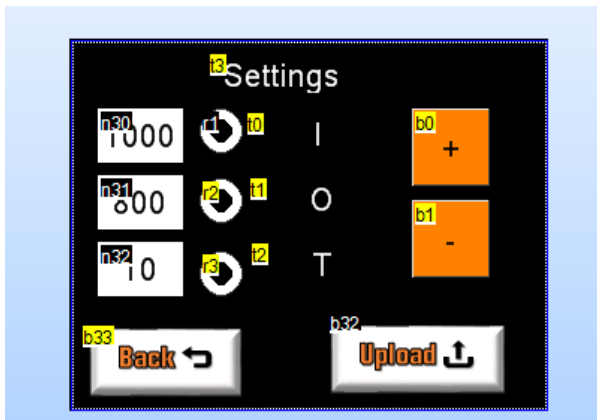
B3
page 4
```

Page 2 (Pantalla modo operación)



```
n20.val=page3.n30.val
tiempo.val=page3.n32.val
delay=10
while(b21.val==1&&acum.val<tiempo.val)
{
    y.val++
    va0.val=y.val
    delay=10
    if(y.val==n20.val||y.val==n21.val)
    {
        y.val=0
        n21.val=page3.n31.val
        y.val++
        delay=30
        acum.val++
        sec.val=acum.val
        delay=30
        if(y.val==n21.val)
        {
            y.val=0
            delay=2000
        }
    }
    add 7,0,y.val/2
}
cle 7,0
```

Page 3 (Menú de configuraciones)

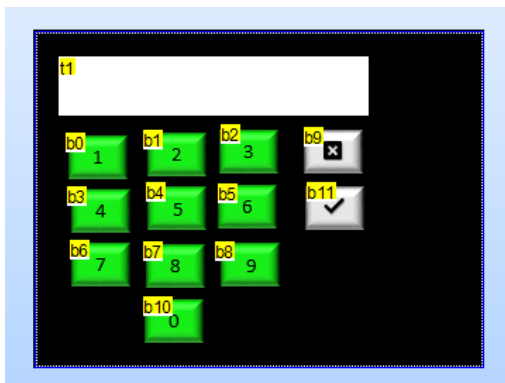


```

if(r1.val==1)
{
  if(b0.val==1)
  {
    cont1.val=cont1.val+10
    n30.val=cont1.val
    delay=10
  } else if(b1.val==1)
  {
    cont1.val=cont1.val-10
    n30.val=cont1.val
    delay=10
  }
}
if(r1.val==1)
{
  if(b0.val==1)
  {
    cont1.val=cont1.val+10
    n30.val=cont1.val
    delay=10
  } else if(b1.val==1)
  {
    cont1.val=cont1.val-10
    n30.val=cont1.val
    delay=10
  }
}
if(r3.val==1)
{
  if(b0.val==1)
  {
    cont3.val=cont3.val+10
    n32.val=cont3.val
    delay=10
  } else if(b1.val==1)
  {
    cont3.val=cont3.val-10
    n32.val=cont3.val
    delay=10
  }
}

```

Page 4 (Pantalla de bloqueo)



```

if(t1.txt=="1234")
{
    delay=1000
    t1.txt="OK"
    delay=500
    page 1
} else
{
    t1.txt="Error"
    delay=500
}

if(t1.txt=="1234")
{
    delay=1000
    t1.txt="OK"
    delay=500
    page 1
} else
{
    t1.txt="Error"
    delay=500
}

```

Page 5 (Pantalla de ayuda)



```

delay=4000
page 1

```

Anexo E Programacion en Arduino IDE

```
/*  
  
This code is created to manage the process of sputtering inside plasma reactor  
  
*/  
  
#include <SoftwareSerial.h> //Include the library  
  
bool button = false; //will store the button state  
  
bool mas =false;  
  
bool menos =false;  
  
bool mas_tiempo=false;  
  
bool menos_tiempo=false;  
  
bool play =false;  
  
bool sw=false;  
  
int cont=0;  
  
int cont1=0;  
  
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX  
  
String message;  
  
void setup () {  
  
    // Open serial communications and wait for port to open:  
  
    Serial.begin(57600); //open the serial port  
  
    while (! Serial) {  
  
        ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only  
  
    }  
  
    Serial.println("Serial On");
```

```

pinMode(13, OUTPUT);

pinMode(12,OUTPUT);

// set the data rate for the SoftwareSerial port

mySerial.begin(9600);

}

void loop() { // run over and over

  while (!mySerial.available()) { //While no data is coming in from the Nextion

    if (message.length() > 14){ //This was the easiest way for me to check that the whole message
has been received. Some messages might be longer, but the shortest ones are 15 characters.

      Serial.println(message); //See what the entire message that the Arduino receives from the
Nextion

      Serial.print("button state: ");

      Serial.println(button); //See what state the button is in

      Serial.println(mas); //See what state the button is in

      Serial.println(menos); //See what state the button is in

      Serial.println(play); //See what state the button is in

      Serial.println(mas_tiempo); //See what state the button is in

      Serial.println(menos_tiempo); //See what state the button is in

      Serial.print("message[3]: "); //according to the Nextion message structure, item 4 will be the
page number.

      Serial.println(message[3]); //See what message[3] (the fourth character in the message) is

```

Serial.print("message[4]: "); //according to the Nextion message structure, item5 will be the component number.

Serial.println(message[4]); //See what message[4] (the fifth character in the message) is

mas =false;

menos =false;

mas_tiempo=false;

menos_tiempo=false;

play =false;

sw=false;

if ((play == false &&cont<=255)&& (message[3] == '1' && message[4] == '1')){ //Test that the button is off and that it was indeed this button that has been pressed

play = true; //The button is now pressed

Serial.println("PLAY"); //For debugging. Check that the 'if' was entered

message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated

int i=0;

analogWrite(13, i);

int ignicion=0;

int proceso=0;

int tiempo=0;

int tiempo1=0;

int tiempo_total=0;

```

tiempo_total=cont1;

tiempo=10;

tiempo1=tiempo_total-tiempo;

ignicion=cont;

proceso=cont;

i=0;

i=ignicion;

int k=0;

Serial.println(i);

analogWrite(13, i);

delay(1000);


while(k<tiempo){

    i=ignicion;

    k++;

    Serial.println(i);

    analogWrite(13, i);

    delay(100);

    if(k==tiempo){

        i=proceso;

        Serial.println(i);

        analogWrite(13, i);

```

```
    delay(100);  
    break;  
  }  
}  
  
i=proceso;  
k=0;  
while(k<tiempo1){  
    i=proceso;  
    k++;  
    Serial.println(i);  
    analogWrite(13, i);  
    delay(100);  
    if(k==tiempo1){  
        i=0;  
        Serial.println(i);  
        analogWrite(13, i);  
        delay(100);  
        break;  
    }  
}  
}
```

```
//SW
```

```
if (sw == false && message[3] == '1' && message[4] == '4' ){ //Test that the button is off and
that it was indeed this button that has been pressed
```

```
    sw = true; //The button is now pressed
```

```
    digitalWrite(12, HIGH); //Switch the led off
```

```
    Serial.println("SW ON"); //For debugging. Check that the 'if' was entered
```

```
    message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated
```

```
}
```

```
else
```

```
{//Else the button is on and that it was indeed this button that has been pressed
```

```
    sw = false; //The button has been deactivated
```

```
    digitalWrite(12, LOW); //Switch the led off
```

```
    Serial.println("SW OFF"); //For debugging. Check that the 'if' was entered
```

```
    message = ""; //Clear the message, otherwise we might get mixed messages
```

```
}
```

```
//VOLTAGE
```

```
if (mas == false &&( message[3] == '0' && message[4] == '3')){ //Test that the button is off and
that it was indeed this button that has been pressed
```

```
    mas = true; //The button is now pressed
```

```
    cont=cont+25.5;
```

```
    delay(100);
```

```
    Serial.println(cont); //For debugging. Check that the 'if' was entered
```

```
    message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated
```

```
}
```

if (menos == false &&(message[3] == '0' && message[4] == '4')){ //Test that the button is off and that it was indeed this button that has been pressed

 menos = true; //The button is now pressed

 cont=cont-25.5;

 delay(100);

 Serial.println(cont); //For debugging. Check that the 'if' was entered

 message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated

}

//TIME

if (mas_tiempo == false &&(message[3] == '0' && message[4] == '5')){ //Test that the button is off and that it was indeed this button that has been pressed

 mas_tiempo = true; //The button is now pressed

 cont1=cont1+60;

 delay(100);

 Serial.println(cont); //For debugging. Check that the 'if' was entered

 message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated

}

if (menos_tiempo == false &&(message[3] == '0' && message[4] == '6')){ //Test that the button is off and that it was indeed this button that has been pressed

 menos_tiempo = true; //The button is now pressed

 cont1=cont1-60;

 delay(100);

 Serial.println(cont); //For debugging. Check that the 'if' was entered

 message = ""; //Clear the message, otherwise the next if will also be activated

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
while (mySerial.available()){ //Is data coming through the serial from the Nextion?
```

```
    message.concat(mySerial.read()); //If so, construct the message
```

```
}
```

```
}
```