TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

NOMBRE DEL PROYECTO

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DEPOSITO DE PELICULAS DELGADAS

OPCIÓN QUE CORRESPONDA

TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERIA ELETRÓNICA

PRESENTA:

JHOVANY FLORES NAVA

NOMBRE DEL ASESOR:

DRA. RAQUEL RAMIREZ AMADOR

Instituto Tecnológico de Apizaco

APIZACO, TLAX., MAYO 2026

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica

Tzompantepec, Tlaxcala, 11/noviembre/2025
Departamento: Ingeniería Eléctrica y Electrónica
No. De oficio: I.E.E. /674/2025

Asunto: Liberación de Proyecto para la Titulación Integral

LIC. CECILIA YARELLY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

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

Nombre del egresado:	JHOVANY FLORES NAVA
Carrera:	INGENIERÍA ELECTRÓNICA
No. De Control:	19370502
Nombre del proyecto:	"AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DEPÓSITO DE PELÍCULAS DELGADAS".
Producto	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

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

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

MTRO. MARIO EDUARDO LEAL LÓPEZ
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DRA, RAQUEL RAMÍREZ AMADOR
Nombre y firma del asesor

MELL/isa*
C.p. Archivo

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala, 15/abril/2026

JHOVANY FLORES NAVA
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL 19370502.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** y cuyo tema es**: "AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE DEPÓSITO DE PELÍCULAS DELGADAS",** conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **1 USB** del mismo, apropiadamente empastados, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

EDUCACIÓN | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CECILIA YARELLY ARREGUIN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ccp. Archivo
CYAL/gvm*



2026 año de Margarita Maza

Agradecimientos

Al concluir esta etapa tan importante de mi carrera profesional, quiero decirles a todos los que me apoyaron en este camino recorrido muchas gracias por su ayuda.

A mis padres, mi mamá por el apoyo tanto económico, moral, emocional estando en mis peores momentos cono muchas horas de desvelos etc., a mi papá por el económico del transporte y darme todo lo que necesitaba en toda la carrera profesional que estaba empleando, los dos son mi familia y les doy un agradecimiento muy grande porque ellos fueron y son mi más grande apoyo.

A mis familiares, como mis tíos, que me dieron un gran apoyo cuando me encontraba en una situación delicada de salud, apreciando su apoyo a mi lado, animándome y con sus visitas; a mis primos, por darme la moral de seguir adelante con la carrera de forma verbal, de igual manera con sus visitas, donaciones y nuevamente por darme ánimos para continuar.

A mis hermanos, que siempre estuvieron a mi lado cuando pasaba muchas horas de desvelo por el estudio de la ingeniería, apoyándome en temas que no entendía, brindándome su conocimiento en el tema dado, así como yo también los apoyé en sus propios estudios profesionales.

A mis profesores, que de alguna u otra manera ayudaron en mi avance en la universidad con tanta información, cálculos, teorías, programación, tareas, exámenes, proyectos, maquetas, códigos, simulaciones, emulaciones, circuitos tanto eléctricos como electrónicos, también de instrumentación, por todo el conocimiento adquirido para mi desarrollo profesional. Algunos de ellos no solo fueron docentes, sino verdaderos mentores que creyeron en mis capacidades incluso cuando yo dudaba de mí mismo.

Agradezco su amistad, su apoyo incondicional y su capacidad de hacer que los días más complicados fueran más llevaderos. Gracias a todos por formar parte de este capítulo de mi vida y lo que falta.

Sin olvidar para dar un profundo agradecimiento a Erika por su invaluable apoyo con el papeleo, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible concluir este proceso. También se reconoce a los profesores Alfredo y Rasiel por su dedicación y por haber contribuido a una mejor comprensión de cómo funciona un sistema RPU, brindando conocimientos clave para el desarrollo académico. Asimismo, se agradece de manera especial a la doctora Raquel por permitir la realización de las residencias profesionales bajo su guía, así como por la oportunidad de participar en los concursos aplicados, lo cual fortaleció la formación profesional y personal. Su apoyo conjunto fue fundamental para alcanzar esta importante etapa.

ÍNDICE

INDICÉ DE IMÁGENES 6

RESUMEN..... **¡Error! Marcador no definido.**

1. INTRODUCCIÓN..... 8

2. Descripción de la empresa – Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco 9

2.1. Misión..... 9

2.2. Visión..... 9

2.3. Valores 10

2.3.1. Honestidad..... 10

2.3.2. Responsabilidad..... 10

2.3.3. Lealtad..... 10

3. Objetivo General 11

4. Justificación. 11

5. HIPÓTESIS..... 12

6. Marco Teórico..... 13

6.1. Historia 13

7.2. Depósito de Películas Delgadas 14

7.2.1. Técnicas de Depósito Físico (PVD – Physical Vapor Deposition)..... 14

7.2.1.1. Evaporación Térmica 15

7.2.1.2. Sputtering (Pulverización Catódica) 15

7.2.1.3. Ablación Láser 17

7.2.2. Técnicas de Depósito Químicas (CVD – Chemical Vapor Deposition)..... 18

7.2.2.1. CVD (Deposición Química de Vapor) 18

7.2.2.2. Spray Pirólisis 19

7.2.2.3. Sol-Gel 20

7.2.2.4. Electrodeposición..... 21

7.2.2.5. Spin Coating..... 22

8. Técnica Rocío Pirolítico Ultrasónico. 23

9. SISTEMA RPU PROPUESTO..... 24

9.2. Diseño para el almacenamiento del sistema RPU 24
9.3. Elección de componentes para incluir al sistema de Rocío 25
9.3.1. Matraz de dos bocas 25
9.3.2. Plancha eléctrica 25
9.3.3. Pantalla LCD 16x2 con su módulo de conversión I2C 27
9.3.4. Teclado matricial 27
9.3.5. Interruptor 10A con vástago rojo 28
9.3.6. Microcontrolador Arduino Uno 28
9.3.7. Relevadores 29
9.3.8. Dimmer 29
9.3.9. Fuente de voltaje 30
9.3.10. Sensor de temperatura Max 6675 30
9.3.11. Buzzer 31
9.3.12. Nebulizador 31
9.3.13. Bomba de aire 32
9.3.14. Trampa 32
9.3.15. Código de Arduino IDE 33
10. Cable y Cálculos 33
11. Diagrama del sistema 34
12. Emulación de componentes 35
13. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas 36
14. Primeras Pruebas 40
15. Cambios Inesperados 41
16.1. Arduino Uno 41
15.2. NEBULIZADOR ULTRASONICO HOSPITALARIO WH-802 42
15.3. Controlador de Temperatura PID REX-C100 43
15.4. Cambios en el circuito del sistema y diagrama 44
15.5. Diseño nuevo y funciones 45
15.6. Pruebas 47
15.7. Código de Arduino IDE 47

16. Armado Completo del Sistema de Rocío Pirolítico Ultrasónico 47
17. Conclusión 49
Referencias 50
ANEXOS 53

INDÍCE DE IMÁGENES

Imagen 1 - Ubicación del plantel educativo 9
Imagen 2 - Deposito de película delgada 14
Imagen 3 - Evaporación térmica 15
Imagen 4 - Diagrama esquemática de un sistema de pulverización catódica 16
Imagen 5 - Imagen Representativa 17
Imagen 6 - Deposición química en fase vapor 18
Imagen 7 - Método Spray Pirólisis 19
Imagen 8 - Proceso Sol-Gel 20
Imagen 9 - Diagrama de conección 21
Imagen 10 - Proceso Spin Coating Proceso 22
imagen 11 - Esquema representativo del sistema de Rosío Pirolítico Ultrasónico. 23
imagen 12 - Caja de madrea propuesta 24
imagen 13 - Caja de metal para el sistema RPU propuesto 24
Imagen 14 - Matraz de dos bocas 25
imagen 15 - Plancha eléctrica 26
imagen 16 - Pantalla LCD 16x2 I2C 27
Imagen 17 - Teclado Matricial 4x4 27
Imagen 18 - Interruptor rojo con vástago 28
Imagen 19 - Arduino Uno con el microchip ATmega328 28
Imagen 20 - Relevador 12v 30A y Relevador 5v 10A 29
Imagen 21 - Circuito Dimmer 29
Imagen 22 - Eliminador de 12v 2.5A y 24v a 500mA, ... 30
Imagen 23 - Sensor Max6675 con termopar tipo K 30
Imagen 24 - Buzzer 31
Imagen 25 – Generador de niebla para pecera 31
Imagen 26 - Bomba de aire 32
Imagen 27 - Trampa 32
Imagen 28 - Cable uso rudo Cal. 12 con clavija 33
Imagen 29 – Diagrama del sistema 34

Imagen 30 - Emulación de componentes 35
Imagen 31 - flujómetro 35
Imagen 32 – Componentes y Caja metálica 36
Imagen 33 – Perforación de placa de metal 36
Imagen 34 - Espaciadores hexagonales 37
Imagen 35 - Parte frontal de sistema RPU 37
Imagen 36 - Eliminadores de 12v 2.5A y de 24v y 500mA 38
Imagen 37 - Conexiones 38
Imagen 38 - Pieza de porcelana 39
Imagen 39 - Manguera de PVC flexible transparente 39
Imagen 40 - Pruebas correspondientes 40
Imagen 41 - Conexión para fuente de voltaje externe 41
Imagen 42 - Nebulizador Ultrasónico WH-802 42
Imagen 43 - Controlador de temperatura PID REX-C100 43
Imagen 44 - Relay SSR 40A 43
Imagen 45 - Termopar tipo K 43
Imagen 46 - Diagrama 1era Parte 44
Imagen 47 - Diagrama 2da Parte 44
Imagen 48 - nuevo diseño y reubicación 45
Imagen 49 - Nuevas entradas de termopares 45
Imagen 50 - Salidas en AC 46
Imagen 51 - USB tipo B 46
Imagen 52 – Sistema de control funcionando 47
Imagen 53 - Boquilla de vidrio 47
Imagen 54 - Sistema RPU por detrás 48
Imagen 55 - Sistema RPU 48

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la tecnología ha avanzado de manera considerable, unos de estos avances son las películas delgadas, que ha ganado un lugar importante gracias a su amplia gama de aplicaciones, especialmente en campos como la electrónica, la óptica, electrónica de semiconductores y otros sectores tecnológicos. Este proceso se basa en depositar capas muy finas de materiales químicos (que pueden ir desde unos pocos nanómetros hasta algunos micrómetros) sobre una superficie o sustrato determinado.

Lo interesante de este método es que permite alterar y mejorar las propiedades de los materiales depositados, ya sean físicas, químicas o estructurales, lo cual es crucial para el funcionamiento óptimo de componentes como sensores, celdas solares, pantallas, microchips o recubrimientos especiales para la aplicación ya sea en la industria, comercial, uso técnico, especialistas, ingenieros, etc.

Esto se hace con el fin de reducir costos, hacer más flexible la investigación y creación del equipo necesario, el equipo necesita de sensores, microcontroladores etc. Esto se hace para su debida investigación no solo en grandes industrias o grandes centros de investigaciones y universidades grandes ya que, debido a esto, sus costos pueden llegar a más de $1,000,000.00 de dólares poniendo un límite entre las universidades no tan grandes para su debida investigación y enseñanzas, sin embargo, uno de los principales retos es mantener un control preciso sobre las variables que intervienen en el proceso: temperatura, duración de exposición, distancia entre la boquilla, tiempo y el sustrato, entre otras lo que lleva a sus costos tan elevados. Cualquier pequeña alteración en estos factores puede afectar negativamente la calidad de las películas obtenidas. Por esa razón, cada vez resulta más común automatizar estos sistemas para asegurar que el proceso se mantenga estable, eficiente y seguro en todo momento.

La automatización para el sistema implica la incorporación de sensores, control y dispositivos que puedan ajustar las condiciones en tiempo real. Por ejemplo, sensores de temperatura junto con módulos de control permiten manejar el calentamiento del sustrato o de la plancha. De igual forma, bombas y sensores de presión hacen posible regular con precisión la cantidad de líquido o gas que se utiliza durante la deposición. Para implementar estos controles, se recurre a microcontroladores como el Arduino Uno, que facilitan la programación de respuestas automáticas ante cualquier cambio en las condiciones. Estos sistemas pueden incluir desde PLC´s sencillos y pantallas digitales hasta teclados y termopares.

2. Descripción de la empresa – Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco

El Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Apizaco, llamado Instituto Tecnológico de Apizaco, es una institución pública de educación superior ubicada en Apizaco, Tlaxcala. Fue fundada el 1 de octubre de 1975, en un terreno donado por familias ejidatarias, e inaugurada oficialmente el 11 de octubre de 1976 por el presidente Luis Echeverría Álvarez. Surge del impulso del gobernador Emilio Sánchez Piedras, bajo la gestión federal del presidente Echeverría, con la visión de ofrecer formación técnica y profesional en la región. (TecNM, 2020; TecNM, 2022).

2.1. Misión

El Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Apizaco, llamado Instituto Tecnológico de Apizaco, es una institución pública de educación superior ubicada en Apizaco, Tlaxcala. Fue fundada el 1 de octubre de 1975, en un terreno donado por familias ejidatarias, e inaugurada oficialmente el 11 de octubre de 1976 por el presidente Luis Echeverría Álvarez. Surge del impulso del gobernador Emilio Sánchez Piedras, bajo la gestión federal del presidente Echeverría, con la visión de ofrecer formación técnica y profesional en la región. (TecNM, 2020; TecNM, 2022).

2.2. Visión

Ser una Institución de educación superior tecnológica de vanguardia, formadora de ciudadanos del mundo, con conocimientos intercultural, respetando la diversidad social (TecNM, 2020).

El campus ocupa cerca de 22.8 hectáreas y atiende a más de 4 500 alumnos, distribuidos en doce ingenierías de nivel licenciatura como -Ingeniería Civil, Ingeniería Electromecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Administración, Ingeniería en Gestión Empresarial, Ingeniería Informática, Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicación (Tic's), Ingeniería Industrial, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería en Sistemas Automotrices, Ingeniería en Inteligencia Artificial e Ingeniería en Semiconductores- además de tres maestrías y un doctorado (TecNM, 2023).



Imagen 1 - Ubicación del plantel educativo

La carrera en Inteligencia Artificial representa el compromiso institucional con la innovación y la respuesta a las demandas de la industria actual. (TecNM, 2022).
En su trayectoria, el Tecnológico ha consolidado convenios bajo el modelo de Educación Dual con empresas regionales (como Transportes Terrestres Novilleros en 2019) para facilitar la formación práctica de estudiantes. (TecNM, 2019; SEP, 2018)

Su logotipo y lema fueron seleccionados por concurso en 1976, con símbolos que reflejan la región (volcán Malintzi, vías ferroviarias) y áreas de conocimiento (rayo, engrane, libro, disquete). La mascota, creada en 1994, rinde homenaje a la tradición taurina de Apizaco. (TecNM, 2020)

2.3. Valores

2.3.1. Honestidad

Se demuestra día a día a través de la transparencia en la ejecución de las actividades laborales cotidianas. (TecNM, 2020)

2.3.2. Responsabilidad

Es la actitud que caracteriza al personal al cumplir su tarea con eficacia y eficiencia en beneficio de la comunidad. (TecNM, 2020)

2.3.3. Lealtad

Se refiere a que el personal aplique sus conocimientos y habilidades para alcanzar las metas institucionales, sin olvidar el lema: “Pensar para servir, servir para triunfar”. (TecNM, 2020)

3. Objetivo General

Implementar un sistema de control PID del proceso de deposición de películas delgadas en la técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU) para garantizar la estabilidad térmica requerida durante la operación del sistema.

4. Justificación.

La técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU), ha demostrado ser una ser una herramienta eficiente y versátil para las películas delgadas y nanopartículas con propiedades específicas para aplicaciones en electrónica, optoelectrónica, energía solar, sensores y almacenamiento de energía.

Uno de los principales desafíos del proceso RPU (Rocío Pirolítico Ultrasónico), el control preciso de la temperatura del sustrato, ya que pequeñas variaciones pueden afectar significativamente su proceso y por ende su calidad del sustrato, estos problemas son de mucha inversión financiera y una escuela normal obviamente no lo tiene.

Requerir un control preciso de la temperatura del sustrato en el proceso RPU para asegurar que la calidad y las propiedades de las películas obtenidas dependan de condiciones térmicas estables, incluyendo los efectos de cavitación, del flujo y de la dinámica temporal de la temperatura generada. Aplicar el sistema PID en el proceso RPU para regular las variaciones térmicas, mantener un flujo de temperatura eficiente y optimizar el desempeño global del proceso de deposición. Integrar sensores de temperatura, un regulador térmico, un controlador de flujo de aire y una bomba en el sistema RPU para disponer de los elementos esenciales que permitan su funcionamiento adecuado.

Ante esta necesidad, surge la implementación de un sistema de control de temperatura eficiente y confiable, como lo es el controlador PID, el cual permite mantener condiciones térmicas estables a lo largo del proceso armado convencionalmente.

Ya que los equipos profesionales para estos métodos son demasiados caros, estos equipos tienen un costo no menor al $1,000,000, con esto al fin de crear un sistema para el análisis de dichas películas a un costo no mayor a lo necesitado permitiendo que los centros de investigación y universidades tengan la posibilidad del análisis y uso de dicha técnica, puedan tener un sistema tecnológico que les permita búsqueda y creación de prototipos semiconductores teniendo la misma calidad similar al de las distintas empresas que ofrecen un equipo experimental para la creación de películas delgadas pero a un alto costo económico esto ayudara a los centros de investigación y universidades del territorio Mexicano que no cuenten con dicho equipo para el análisis y aplicación de las películas delgadas a través de la técnica RPU.

5. HIPÓTESIS

Diseñar e implementar un sistema de rocío pirolítico ultrasónico capaz de depositar un sustrato para películas delgadas mediante una bomba de aire, un flujómetro, un nebulizador, así como un control de temperatura y una plancha, nos permitirá obtener los materiales requeridos a un bajo costo.

6. Marco Teórico

6.1. Historia

En sus inicios, durante las décadas de 1950 y 1960, la pirólisis se empleó principalmente para la deposición de películas metálicas y semiconductoras, centrándose en la comprensión de los principios fundamentales del proceso y en el desarrollo de soluciones precursoras simples, así como en la optimización de las condiciones de operación necesarias para obtener películas delgadas de alta calidad (Falcony, 2018). Posteriormente, en las décadas de 1970 y 1980, el uso de esta técnica se expandió hacia la fabricación de películas de óxidos metálicos, tales como óxidos de titanio (TiO_2), zinc (ZnO) y óxidos mixtos de zinc-estaño (Zn_2SnO_4), consolidándose como un método eficiente y versátil para la obtención de recubrimientos funcionales con propiedades ópticas, eléctricas y estructurales controladas. (Miranda, 2016)

En 1966, Chamberlin y Sharman desarrollaron el método Spray Pyrolysis (SP) como una técnica de crecimiento de películas delgadas para diversas aplicaciones en celdas solares (Portillo, 2014). Durante las décadas de 1990 y 2000, este método adquirió un creciente interés y reconocimiento, impulsado por los avances en la investigación de soluciones precursoras, la diversidad de materiales depositados y la capacidad de generar estructuras complejas con un control preciso sobre su composición y morfología (Patiño, 2013). En la actualidad, la técnica de Spray Pyrolysis se encuentra ampliamente implementada en distintos campos de la ingeniería y las ciencias de los materiales, debido a su versatilidad para la producción de una amplia gama de nanomateriales, metales, semiconductores y recubrimientos cerámicos. Estos pueden obtenerse a partir de diversos materiales precursores, incluyendo compuestos organometálicos y soluciones multimetálicas. (Obregón, 2021)

7.2. Depósito de Películas Delgadas

El depósito de películas delgadas son capas de materiales con un grosor desde nanómetros que pueden llegar a los micrómetros, estas se llegan a formar a través de la acumulación y agrupamiento de átomos de diferentes elementos en la superficie de un sustrato (Flores-Carrasco & Alcántara-Iniesta. 2014). Su desarrollo ha tomado importancia a través de los años debido a su continuo crecimiento en diversas aplicaciones tecnológicas como lo es la fabricación de componentes microelectrónicos, fotovoltaicos, diversos sensores, etc. (Miranda, 2016).

Este proceso consiste en la transferencia controlada de átomos, moléculas o partículas desde una fuente hacia una superficie sólida (Patiño, 2013**)**. Las películas pueden estar compuestas por metales, óxidos, semiconductores o materiales compuestos, y pueden utilizarse en una amplia gama de aplicaciones, las técnicas para depositar películas delgadas se clasifican principalmente en dos importantes grupos: Físicas (PVD) y Químicas (CVD) entre otras (Gutiérrez-Lazos et al. 2017). Cada técnica se elige en función del material, el espesor deseado, la aplicación específica y la precisión requerida. (Falcony, 2018)

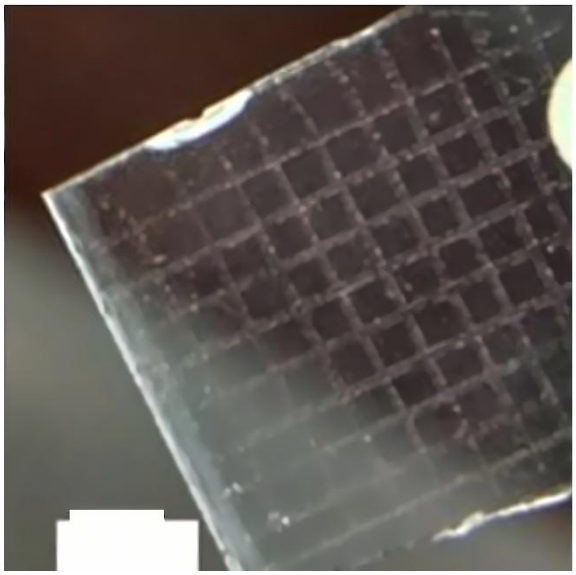


Imagen 2 - Deposito de película delgada

7.2.1. Técnicas de Depósito Físico (PVD – Physical Vapor Deposition)

Existen diferentes técnicas que implican la transferencia física de material desde una fuente sólida o líquida hacia un sustrato en forma de vapor, usualmente en un entorno de vacío (que no se usaran en este proyecto) que son:

7.2.1.1. Evaporación Térmica

Esta es una técnica que consiste en evaporar un material sólido, dentro de una cámara que se mantiene a una presión menor a 1×10^{-6} Torr, permitiendo que las partículas en la fase de vapor se muevan a través de un medio de baja densidad molecular para finalmente poder condensarse sobre la superficie del substrato. (Soto Molina & Salazar Miranda, 2015)

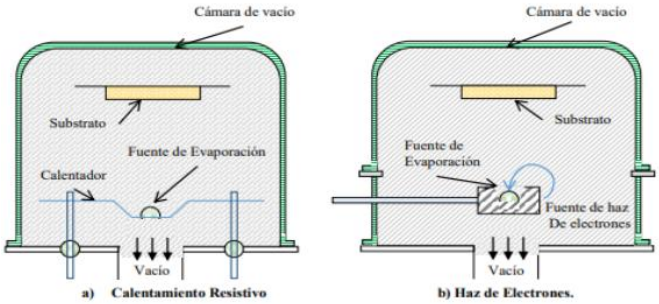


Figura 1.- Procesos de evaporación térmica.

Imagen 3 - Evaporación térmica

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Se calienta el material hasta su evaporación.
- El vapor se condensa sobre el sustrato, formando la película.
- Se requiere vacío alto.
- Usada para metales, semiconductores y dieléctricos. (Ipaz, 2023).

7.2.1.2. Sputtering (Pulverización Catódica)

Es una técnica para la extracción de átomos de la superficie de un electrodo mediante el intercambio de iones que bombardean los átomos de la superficie. Los átomos expulsados pueden ser condensados en un substrato para formar una partícula delgada (Salvador-Cruz. 2024).

Este procedimiento se lleva a cabo en una cámara de vacío que contiene dos electrodos: uno positivo (ánodo) y otro negativo (cátodo). Al aplicar una descarga eléctrica entre ambos, se genera un campo eléctrico que provoca la ionización de los átomos presentes en el gas residual. Los iones resultantes son acelerados hacia el cátodo, donde se encuentra el material objetivo (blanco). Al impactar con este, los átomos del blanco se desprenden, generando una nube de partículas que posteriormente se depositan sobre las superficies cercanas. Este fenómeno se conoce como sputtering catódico. (Calle Gíl. 2007)

La figura 3 ilustra el principio del proceso, mientras que en la (imagen 4) se presenta el equipo utilizado para su implementación.

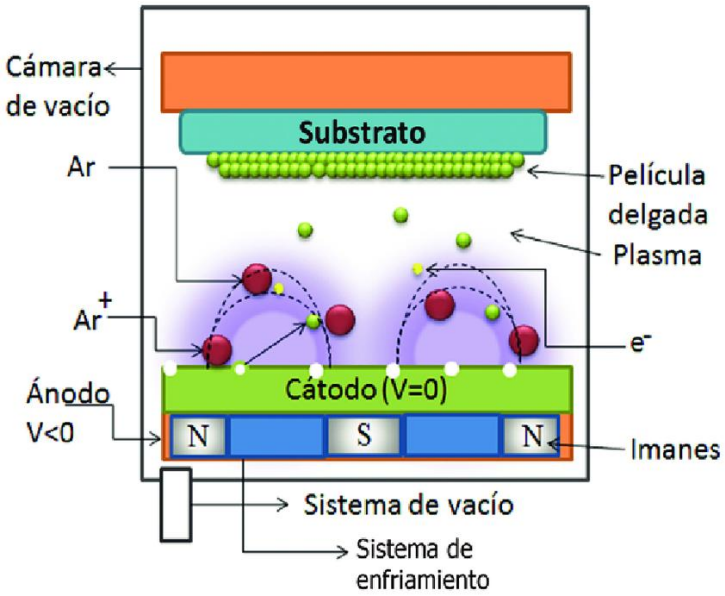


Imagen 4 - Diagrama esquemática de un sistema de pulverización catódica

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Se bombardea un blanco (material a depositar) con iones.
- Los átomos se desprenden y se adhieren al sustrato.
- Alta uniformidad y buena adhesión.
- Muy usada en electrónica y óptica. (Magaña. 2002; Universidad Nacional de La Plata. 2025)

7.2.1.3. Ablación Láser

Cuando una muestra policristalina es sometida a un haz de rayos X, ocurre un fenómeno de interferencia entre las ondas que están en fase. Este fenómeno genera patrones de difracción que permiten obtener un difractograma, el cual es único para cada material cristalino. Esta característica hace posible no solo identificar las fases cristalinas presentes, sino también analizar su proporción del análisis cuantitativo y su tipo análisis cualitativo (Unidad de Análisis Estructural-Molecular UAM, 2025).

La técnica de difracción de rayos X (DRX) es ampliamente empleada en estudios de polimorfismo, transformaciones de fase, soluciones sólidas, estimación del tamaño de partícula, y la construcción de diagramas de fase. Incluso, permite deducir la estructura interna de materiales desconocidos, a partir del análisis de los ángulos en los que se produce la difracción, los cuales están directamente relacionados con la disposición de los átomos en la red cristalina. (UABC, 2023)

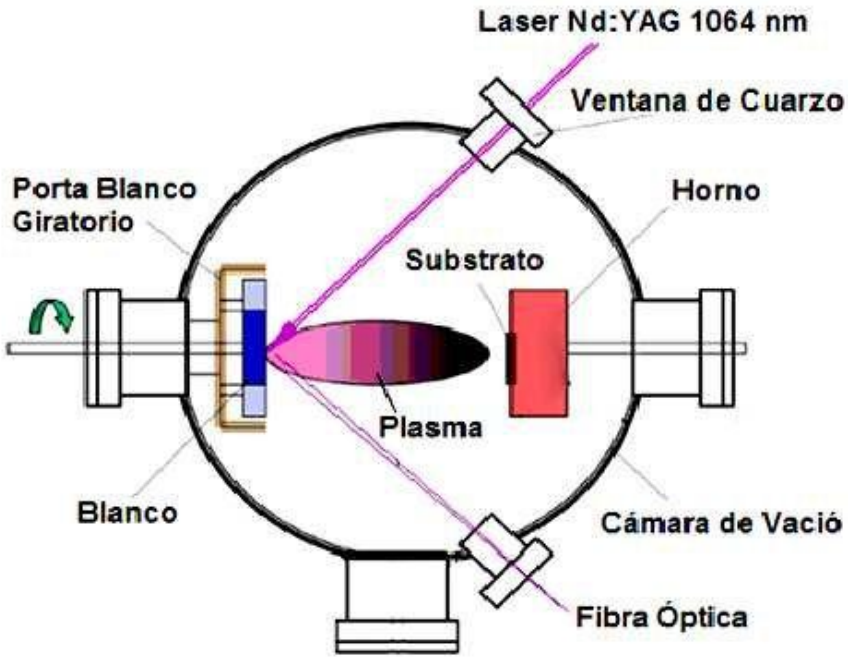


Imagen 5 - Imagen Representativa

En investigaciones con nitruro de boro, se ha observado que sus fases estructurales pueden variar significativamente según condiciones como la presión, temperatura, flujo gaseoso o distancia entre el blanco y el sustrato. En la figura 3 se presenta un difractograma correspondiente a películas de nitruro de boro depositadas mediante deposición química de vapor (CVD) sobre acero inoxidable, con temperaturas entre 250 °C y 550 °C. El pico en los 26° se asocia con la fase hexagonal (h-BN) en el plano (0002), mientras que el observado en los 42° corresponde a la fase cúbica (c-BN) en el plano (111). Además, se identificaron otras fases como la ortorrómbica, más marcadas a 480 °C. Aplicando la ecuación de Scherrer, se estimó un tamaño de cristal promedio de aproximadamente 45 nm. (Superficies y Vacío, 2012)

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Un láser de alta energía vaporiza una parte del material.
- Ideal para materiales complejos o multicomponentes.
- Control muy preciso del espesor.

7.2.2. Técnicas de Depósito Químicas (CVD – Chemical Vapor Deposition)

Estas técnicas se basan en reacciones químicas que ocurren en la superficie del sustrato, donde se forma la película delgada a partir de gases o soluciones. Que son:

7.2.2.1. CVD (Deposición Química de Vapor)

La deposición química en fase vapor (CVD) es una técnica utilizada para formar películas sólidas sobre la superficie de un sustrato, a través de reacciones químicas que ocurren en estado gaseoso. Este procedimiento, también conocido como deposición de capa delgada, es ampliamente empleado en sectores como la electrónica, la optoelectrónica, la catálisis y las tecnologías energéticas, siendo esencial para la fabricación de semiconductores, obleas de silicio y células solares de tipo imprimible. (Pierson. 1999; Universidad Veracruzana. 2021)

El proceso CVD destaca por su rapidez y adaptabilidad, permitiendo el desarrollo de recubrimientos homogéneos, con espesor controlado y baja porosidad, incluso sobre geometrías complejas o superficies irregulares. Además, se puede aplicar de manera selectiva en áreas específicas de sustratos con patrones predefinidos, cubriendo amplias zonas con precisión. (MerckMillipore. 2020; Asatekin. 2010; Arroyave. 2015)

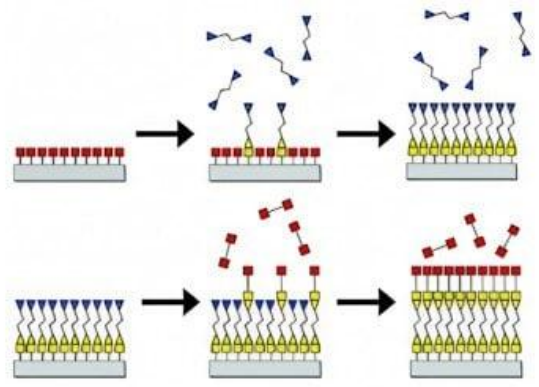


Imagen 6 - Deposición química en fase vapor

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Gases precursores reaccionan en el sustrato caliente.
- Produce películas densas, puras y adherentes.
- Ampliamente usada en semiconductores y recubrimientos duros.

7.2.2.2. Spray Pirólisis

La técnica de pirólisis por atomización consiste en proyectar una solución líquida sobre una superficie previamente calentada, generando una película delgada a través de reacciones químicas entre los componentes del líquido. Este método emplea sales metálicas disueltas en un medio líquido como materia prima, y su eficacia depende principalmente de variables como la temperatura del sustrato, la concentración de la solución utilizada y el diseño del sistema de pulverización, en particular de las boquillas encargadas de dispersar el líquido (Cubillos González et al., 2012; Ruiz Barrera, 2015). Este método es el particularmente se usará en este proyecto. (Patiño Rodríguez, 2013)

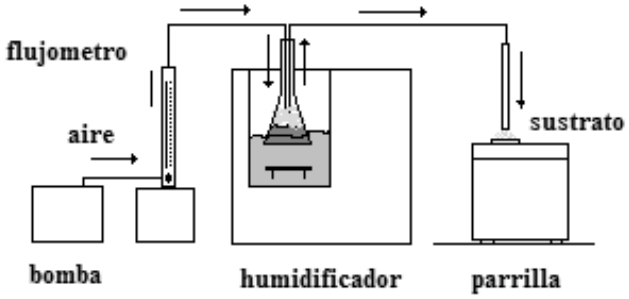


Imagen 7 - Método Spray Pirólisis

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- • Una solución líquida es pulverizada (nebulizada) sobre un sustrato caliente
- • El calor provoca una reacción química (pirólisis) y se forma la película
- • Es económica y fácil de automatizar
- • Ideal para óxidos metálicos y películas conductoras (Cubillos González, 2012)

7.2.2.3. Sol-Gel

En el campo de la ciencia de materiales, el método sol-gel es una técnica utilizada para sintetizar materiales sólidos partiendo de compuestos moleculares simples. Este proceso se aplica principalmente en la obtención de óxidos metálicos, siendo los más comunes los de silicio y titanio. La técnica consiste en transformar monómeros en una solución coloidal (conocida como "sol"), la cual sirve como base para formar una estructura tridimensional continua (gel), compuesta por partículas independientes o polímeros entrelazados. Generalmente, los materiales iniciales utilizados son compuestos químicos del tipo alcóxidos. (Pabón Gelves; Ingeniería & Desarrollo. 2011)

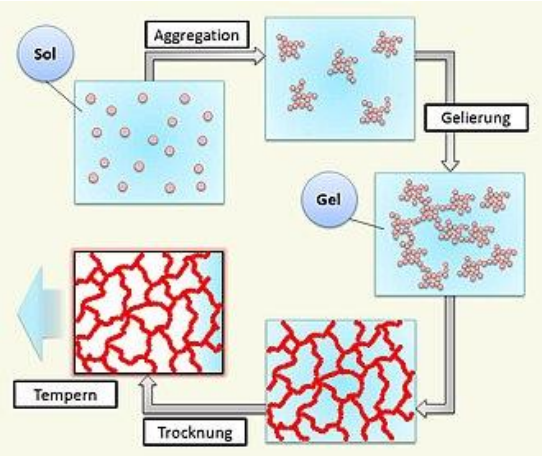


Imagen 8 - Proceso Sol-Gel

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Inicia con una solución coloidal (sol), que se transforma en un gel y luego en una película al calentarla.
- Buena para recubrimientos cerámicos y ópticos.
- Permite el dopado y control químico fino.

7.2.2.4. Electrodeposición

La electrodeposición es un procedimiento electroquímico mediante el cual iones metálicos presentes en una disolución acuosa son depositados sobre una superficie conductora, formando una capa delgada sobre dicha superficie. Este método funciona al aplicar una corriente eléctrica que provoca la reducción de los iones metálicos en el cátodo, donde se acumulan gradualmente formando una película metálica. El grosor de esta capa depende de diversos parámetros como la intensidad de la corriente, el tiempo de exposición y la concentración de la solución. (Castro, 2018)

Este proceso se utiliza principalmente para otorgar a los objetos características superficiales específicas, como mayor resistencia al desgaste, protección contra la corrosión, propiedades lubricantes, o mejoras visuales. Cabe destacar que la electrodeposición modifica únicamente las propiedades superficiales de la pieza tratada, sin alterar su composición interna. Por ejemplo, el niquelado incrementa la protección frente a la oxidación (cambio químico), puede cambiar el aspecto visual del material (cambio físico), o mejorar su dureza superficial y resistencia mecánica (cambio mecánico), cualidades esenciales en sectores como el de herramientas industriales. (Mike, 2014)

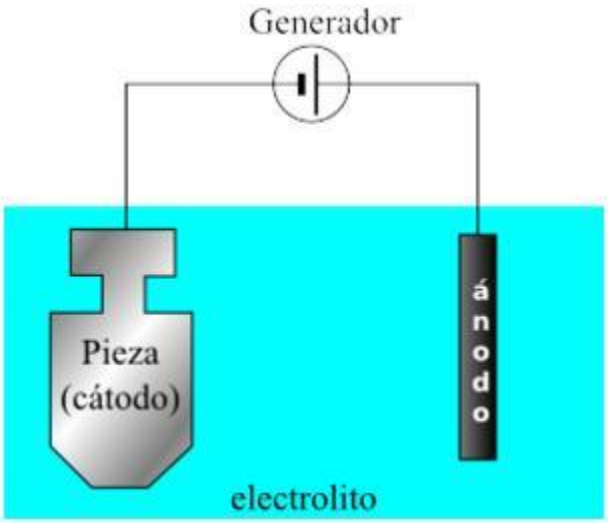


Imagen 9 - Diagrama de conección

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Se utiliza corriente eléctrica para depositar un metal desde una solución iónica.
- Común en la metalurgia y dispositivos electrónicos.

7.2.2.5. Spin Coating

La técnica de recubrimiento por giro es ampliamente utilizada para depositar capas delgadas sobre diversas superficies. En este método, una mezcla líquida que contiene el material deseado junto con un disolvente se coloca sobre un sustrato y se hace girar a gran velocidad. Como resultado de la fuerza centrífuga y las propiedades del líquido, se forma una capa homogénea que cubre la superficie. Una vez que el disolvente se evapora, lo que queda es una película delgada cuyo grosor puede oscilar entre unos cuantos nanómetros y varias micras, dependiendo de los parámetros de operación. (Rojas-Aguilera. 2016; Rojas-Flores, 2020)

Esta técnica se ha convertido en una herramienta esencial en múltiples áreas industriales y tecnológicas debido a su sencillez y eficacia, ya que permite obtener recubrimientos uniformes con relativa facilidad y rapidez en comparación con otros procedimientos. (Martínez Hernández et al. 2010; Rojas-Aguilera. 2016)

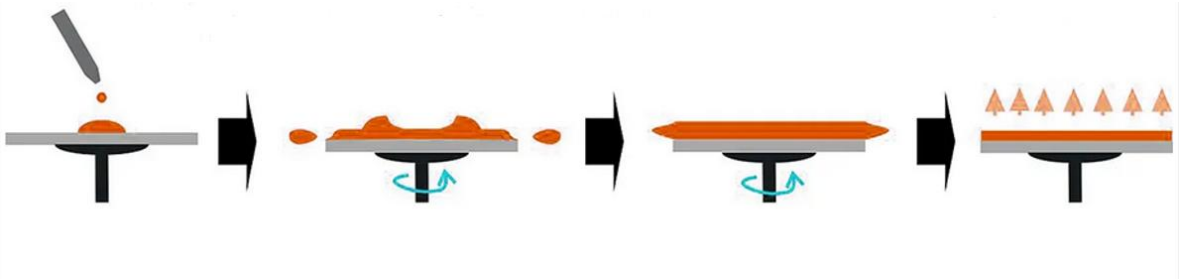


Imagen 10 - Proceso Spin Coating Proceso

-En campos como la nanotecnología y la electrónica orgánica, el recubrimiento por giro es un proceso habitual, influenciado por muchas de las metodologías tradicionales utilizadas en la fabricación de semiconductores. No obstante, la exigencia de películas extremadamente delgadas y consistentes, sumado a la necesidad de organización molecular durante el secado, ha llevado al desarrollo de adaptaciones específicas de esta técnica para cumplir con los requisitos particulares de estos dispositivos avanzados. (Díaz Uribe. 2020; Ardila Vargas, 2016)

Puntos importantes sobre este tipo de técnica:

- Se aplica una solución sobre el sustrato girando a alta velocidad.
- Produce películas muy delgadas y uniformes.
- Muy usada en investigación y microelectrónica. (Díaz Uribe. 2020; Ardila Vargas, 2016)

8. Técnica Rocío Pirolítico Ultrasónico.

La Técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU) se posiciona como un método avanzado de deposición de películas delgadas basado en la atomización ultrasónica de una solución precursora, la cual es posteriormente transportada como aerosol hacia un sustrato caliente donde tiene lugar la pirólisis y la formación de la película sólida. Este proceso destaca por su capacidad de controlar el tamaño de las gotas, la uniformidad del recubrimiento y la composición química final, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para la síntesis de materiales funcionales (Ramírez-Amador, 2023).

Dentro del mecanismo característico del proceso, la etapa "gota → partícula" desempeña un papel determinante: las microgotas generadas por el atomizador experimentan evaporación parcial y reacciones termoquímicas durante su trayectoria hacia el sustrato, lo que permite formar películas continuas o ensamblajes particulados dependiendo de los parámetros de operación (Ramírez-Amador et al., 2019). La optimización de estos parámetros resulta esencial para garantizar la reproducibilidad y calidad del material depositado, los factores que gobiernan el desempeño del RPU incluyen la concentración del precursor, el tamaño de gota producido por el transductor ultrasónico, la temperatura del sustrato o del reactor de pirólisis, el flujo del gas portador y la distancia entre la boquilla y el sustrato. Estudios comparativos han demostrado que variaciones en el tipo de atomizador—pneumático vs. ultrasónico—pueden modificar significativamente la densidad, transparencia, conductividad y morfología de las películas obtenidas (Ramírez-Amador et al., 2023).

Además, la estabilidad térmica del sustrato es un elemento crítico para asegurar uniformidad y repetibilidad en el proceso. La inclusión de sistemas de control de temperatura y de flujo gaseoso resulta indispensable para evitar fluctuaciones que puedan alterar la estequiometría o la adhesión del recubrimiento. La literatura de la autora muestra que un control preciso permite obtener películas de óxidos metálicos, semiconductores transparentes conductores (TCO) y materiales avanzados con excelente uniformidad, adherencia y densidad (Ramírez-Amador et al., 2023).

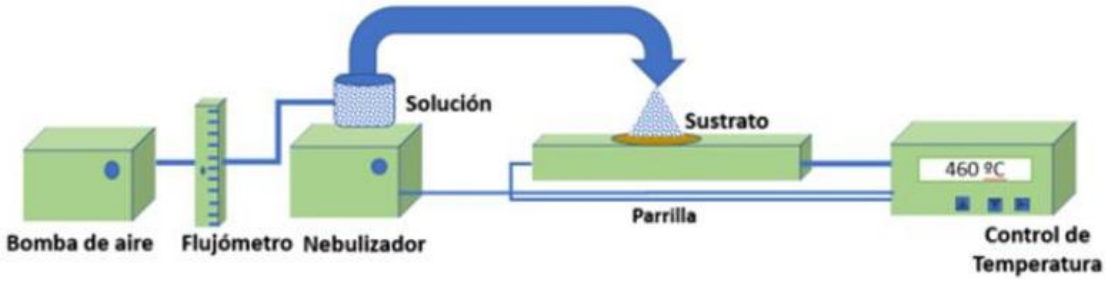


imagen 11 - Esquema representativo del sistema de Rocío Pirolítico Ultrasónico.

9. SISTEMA RPU PROPUESTO

9.2. Diseño para el almacenamiento del sistema RPU

Para el diseño del sistema propuesto para el proceso de la Técnica RPU se consideró *tener* una caja de madera de unas dimensiones de 30×40×25 cm, puede ser una buena opción económica, o permitir hacerla o mandarla hacer con un carpintero, o *adquirirla* ya preensamblada como en la imagen 12.



imagen 12 - Caja de madrea propuesta

Pero se previó la posibilidad de sufrir daños por la temperatura de la plancha y por la humedad, ya sea del sustrato químico o del nebulizador, por lo que se optó por una caja metálica para *evitar* posibles problemas por los instrumentos a utilizar. Al navegar en internet, se logró encontrar una caja de proyectos de tamaño considerable para el proyecto propuesto y de precio aceptable para su uso, la cual se muestra en la imagen 13..



imagen 13 - Caja de metal para el sistema RPU propuesto

Para el sistema de Rocío Pirolítico Ultrasónico, el que permita almacenar todo el sistema para su óptimo funcionamiento, garantizando su seguridad, la de los componentes, así como la del usuario que va a manipular el sistema.

9.3. Elección de componentes para incluir al sistema de Rocío

Elección de componentes electrónicos como eléctricos.

9.3.1. Matraz de dos bocas

Para la cavitación ultrasónica se usa un matraz de dos bocas una parala entrada de aire y la otra para la salida ya con el sustrato.



Imagen 14 - Matraz de dos bocas

9.3.2. Plancha eléctrica

Hay que tener en el laboratorio una plancha eléctrica donde crear la temperatura; esta plancha eléctrica conformarse por un cuerpo externo de metal para darle estabilidad y un cuerpo interno totalmente de barro para evitar quemaduras graves. En la plancha eléctrica tener dos resistencias eléctricas, cada una con un valor distinto (una de 7 ohms y la otra de 6 ohms), unidas en serie para hacer solo una y obtener una mayor resistencia (13 ohms), como se muestra en la imagen 15.

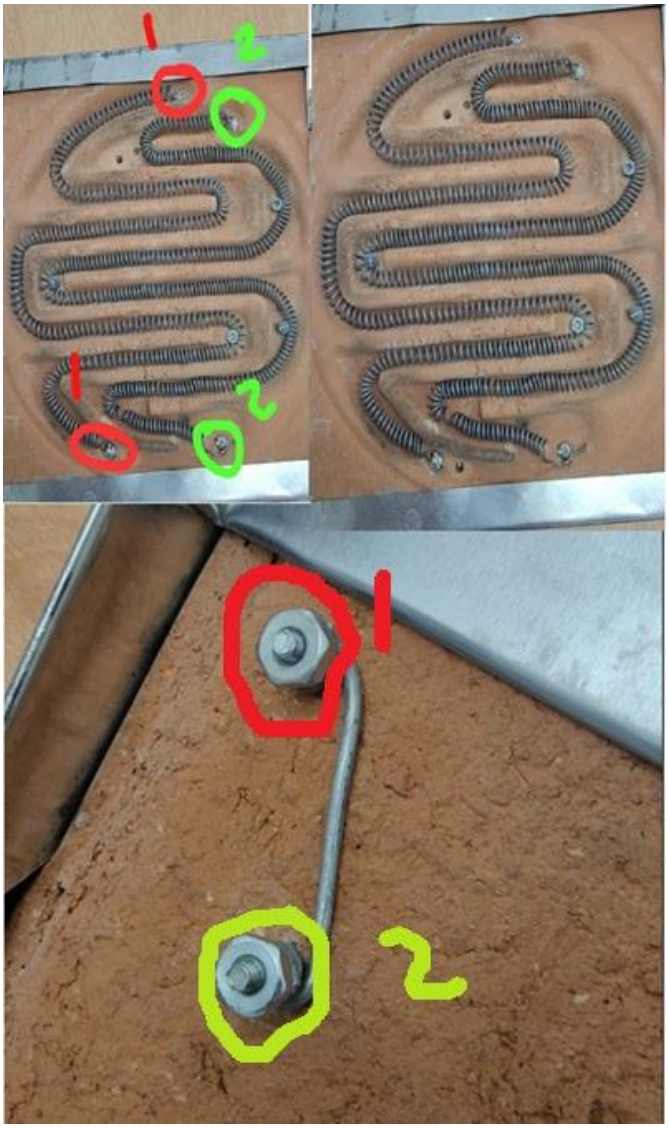


imagen 15 - Plancha eléctrica

9.3.3. Pantalla LCD 16x2 con su módulo de conversión I2C

Para el monitoreo de las variables como por ejemplo la temperatura, se usará una pantalla LCD 16x2 con su módulo de conversión I2C para Arduino que es una buena opción por su brillo en lugares oscuros, su bajo costo, su versatilidad y su fácil instalación, como se muestra en la ilustración 16.



imagen 16 - Pantalla LCD 16x2 I2C

9.3.4. Teclado matricial

Para el cambio de variables como lo podría ser el cambio de temperatura deseada, tiempo de exposición del sustrato, Reinicio, paro de emergencia, etc. La propuesta fue implementar un teclado matricial debido a su bajo costo, rápida instalación y fácil de manejar (como se muestra en la imagen 17).



Imagen 17 - Teclado Matricial 4x4

9.3.5. Interruptor 10A con vástago rojo

Para lo que es el interruptor principal de funcionamiento del sistema se escogió un interruptor iluminado para ver si pasa la corriente eléctrica en caso de no hacerlo no se enciende el vástago color rojo, este interruptor no es demasiado grande lo que ayuda a su fácil instalación y bajo costo como se muestra en la imagen 18.



Imagen 18 - Interruptor rojo con vástago

9.3.6. Microcontrolador Arduino Uno

Como controlador principal se escogió el Arduino Uno que es una placa de microcontrolador de dispositivos basado en el microchip ATmega328 y desarrollado por Arduino.cc. (Wikimedia, 2019), perfecta para el proyecto.

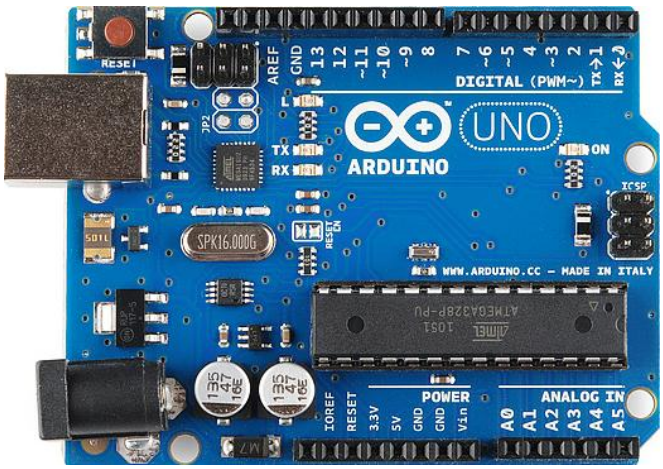


Imagen 19 - Arduino Uno con el microchip ATmega328

9.3.7. Relevadores

El relevador será uno que aguante un voltaje no muy grade, de unos 5 volts y una corriente también no muy grande, en este caso los más comerciables son unos relevadores cuadrados de 5 volts a 10A así que escogimos 3 de estos y un relevador de 30A a 12v para la plancha eléctrica que como habíamos dicho cada una con una resistencia de distintos valores (una de 7 ohms y la otra de 6 ohms) unidas en serie para hacer solo una y tener una mayor resistencia (13 ohms),(como se muestra en la imagen 15 y la imagen 20).

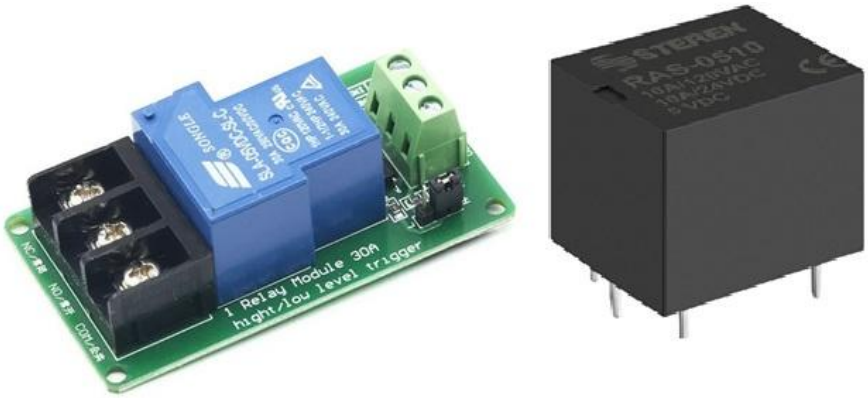


Imagen 20 - Relevador 12v 30A y Relevador 5v 10A

9.3.8. Dimmer

El dimmer "recorta" partes de la onda (técnica de control de fase), la corriente alterna que llega a la resistencia en una onda senoidal completa, la recorta haciendo que la lámpara reciba menos energía por cada ciclo. Menos energía, menos temperatura. (Sanchez, 2022)



Imagen 21 - Circuito Dimmer

9.3.9. Fuente de voltaje

Para la fuente de voltaje se escogió dos fuentes una de 12v 2.5A y una de 24v y 500mA, las dos en su formato como eliminador, la fuente de poder de 24v a 500mA servirá para alimentar el generador Hz.



Imagen 22 - Eliminador de 12v 2.5A y 24v a 500mA,

9.3.10. Sensor de temperatura Max 6675

El Sensor de temperatura Max6675 con su termopar tipo K es el indicado para el proyecto ya que es compatible con el Arduino uno y aguanta más de 1,000 grados centígrados.

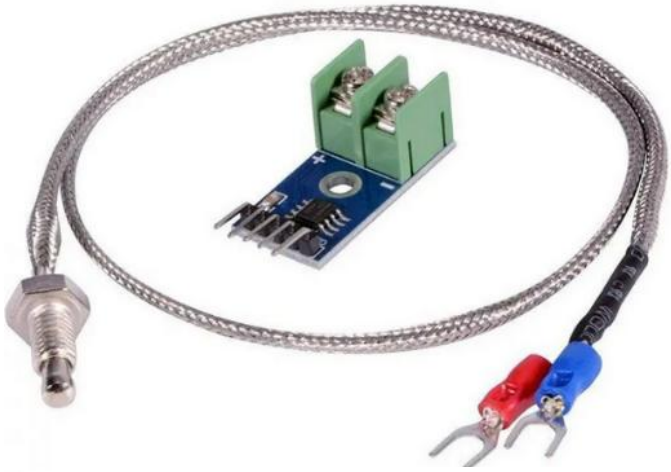


Imagen 23 - Sensor Max6675 con termopar tipo K

9.3.11. Buzzer

Se decidio incorporar un buzzer generador de sonido para indicar cuando un relevador se activa, cuando se precione una tecla y cuando se inicia el sistema.



Imagen 24 - Buzzer

9.3.12. Nebulizador

Para el generador de Hz que nececitamos, se escogio un generador de neblina para pecera que serivira para el sistema, como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 25 – Generador de niebla para pecera

9.3.13. Bomba de aire

La bomba de aire funciona con voltaje AC para la dirección del aire del sistema, como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 26 - Bomba de aire

9.3.14. Trampa

La trampa consiste en que las partículas más grandes se queden en el vaso y las más finas sigan por el tubo.



Imagen 27 - Trampa

9.3.15. Código de Arduino IDE

El código para el microcontrolador funciona por variables controladas, para más información véase en el (**Anexo I**)

10. Cable y Cálculos

Para el cable principal se tuvo que calcular cuanta corriente pasaría por la plancha eléctrica, la plancha eléctrica tenía dos resistencias eléctricas, cada una con una resistencia de distintos valores (la resistencia 1 de 7 ohms y la resistencia 2 de 6 ohms) unidas en serie para hacer solo una y tener una mayor resistencia (13 ohms), (como se muestra en la imagen 15). Sacando las fórmulas para la ley de ohm tenemos.

$$R_1 = 7\ ohms$$

$$R_2 = 6\ ohms$$

$$R_1 + R_2 = R_T = 13\ ohms$$

Siguiendo con la ley de ohm tenemos que la corriente es igual a:

$$A = I = \frac{V}{R_T} = \frac{127}{13ohms} = 9.8\ A$$

Tenemos 9.8 Aperes y mas el amperaje de los componenetes estimamos un 13 A maximo, sigiendo la tabla AWG escogimos cable calibre 14 que soporta 15A perfecto para el sistema, pero teniamos a la mano un pedazo de cable calibre 12, reforsado que aguanta 20A sigiendo la tabla AWG, sobrado para el sistema y como fue donado usamos ese, con una clabija de uso rudo y cable calibre 18 para el sistema en concreto, (como se mustra en imagen 28).



Imagen 28 - Cable uso rudo Cal. 12 con clavija

11. Diagrama del sistema

El diagrama del sistema RPU se hiso en el programa Proteus 8 quedando de la siguiente forma, como se muestra en la imagen 29.

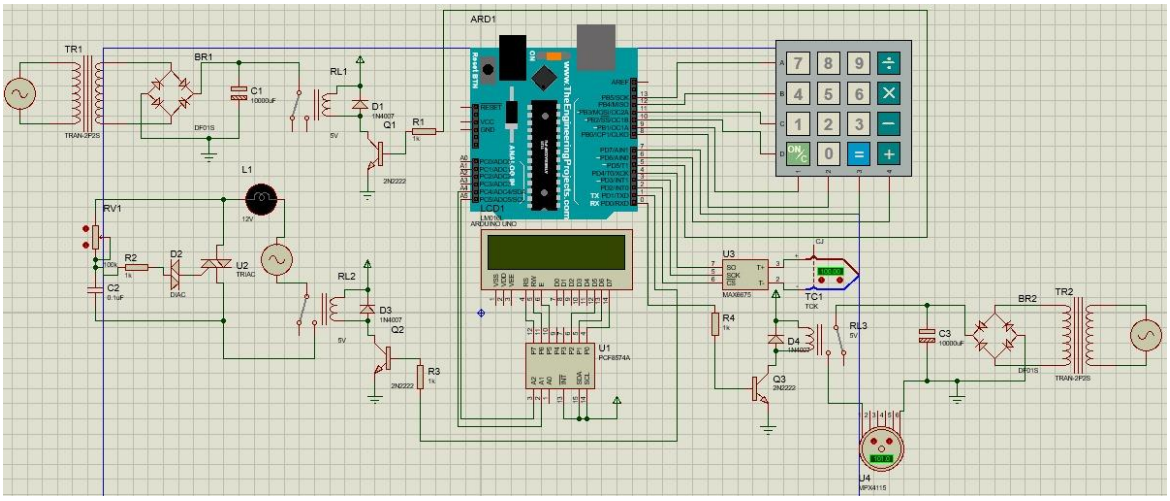


Imagen 29 – Diagrama del sistema

11.1. Descripción

Como se puede ver el circuito hay partes tanto en corriente AC y DC, empezando con fuentes de voltaje DC para la alimentación de microcontrolador, LCD, sensores, etc, y AC para la plancha y bomba de aire. El controlador tiene la función de PID sobre las variables de temperatura, presión y el nebulizador.

12. Emulación de componentes

Para probar el correcto estado de los componentes y del código para utilizar, se emularon todos los componentes para su debida aplicación y funcionamiento al sistema como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 30 - Emulación de componentes

Utilizamos un flujómetro para regular la presión del aire, conectada después de la bomba (ver imagen 26) y después del matraz de dos bocas. (Ver imagen 14)

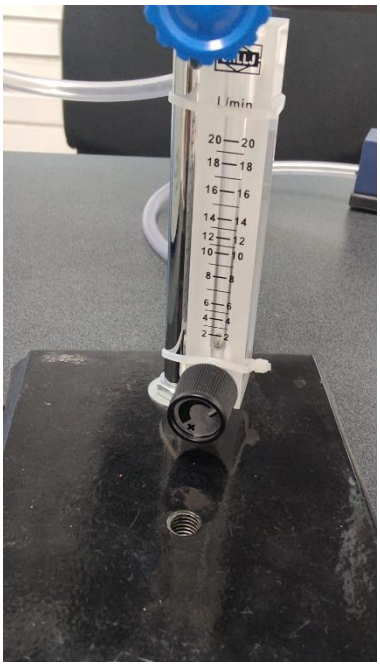


Imagen 31 - flujómetro

13. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

Para el procedimiento empezamos con la caja metálica que almacenará todo el sistema colocando los componentes de manera óptima para después su debida instalación fija como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 32 – Componentes y Caja metálica

Después se desarmo la caja metálica para hacer los agujeros correspondientes para su separación del chasis de los componentes, como se muestran en la siguiente imagen.

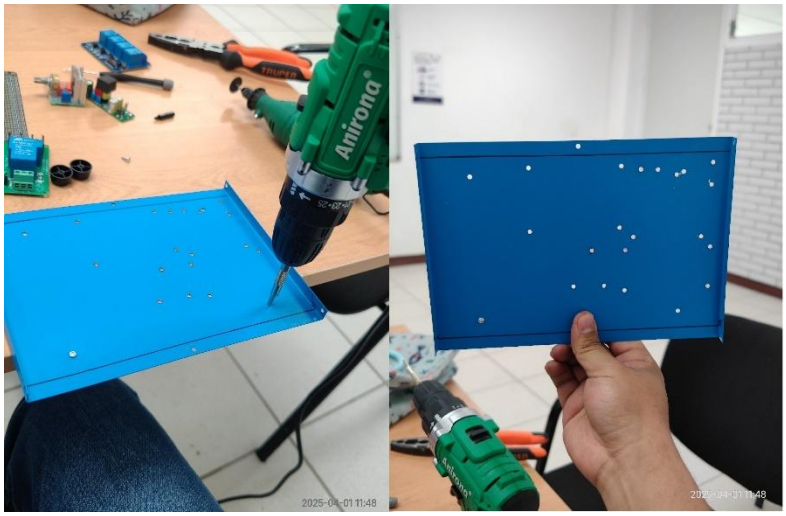


Imagen 33 – Perforación de placa de metal

Después se le insertaron espaciadores hexagonales de plástico negro M3 macho-hembra, tornillos y tuercas como se muestra en la siguiente imagen.

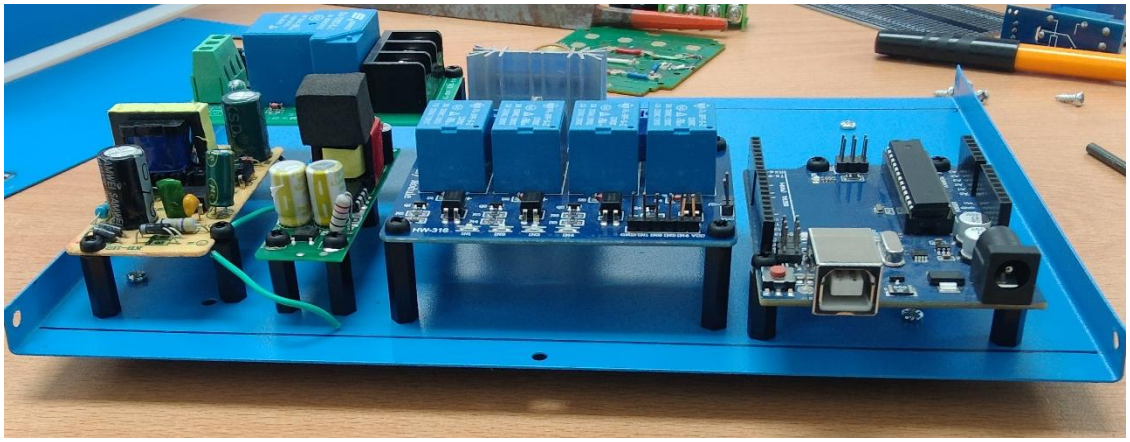


Imagen 34 - Espaciadores hexagonales

Para la parte frontal de la caja de metal se incorporó el teclado matricial 4x4, la pantalla LCD 16x2 con su módulo de conversión I2C y el interruptor rojo con vástago 10A, como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 35 - Parte frontal de sistema RPU

A los dos eliminadores uno de 12v 2.5A y uno de 24v y 500mA como se ve en la imagen 19, se les quito la carcasa de plástico para poder implementarlos en la caja de metal como se muestra en la siguiente imagen.

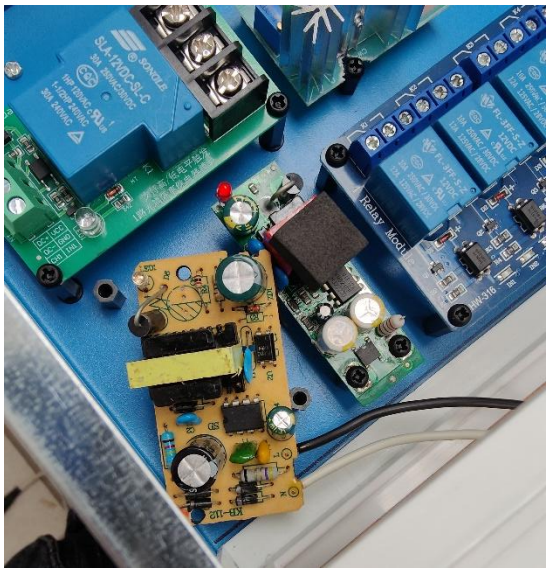


Imagen 36 - Eliminadores de 12v 2.5A y de 24v y 500mA

Siguiendo el diagrama establecido como se muestra en la imagen 25 se realizaron las conexiones correspondientes como se ve en la siguiente figura.

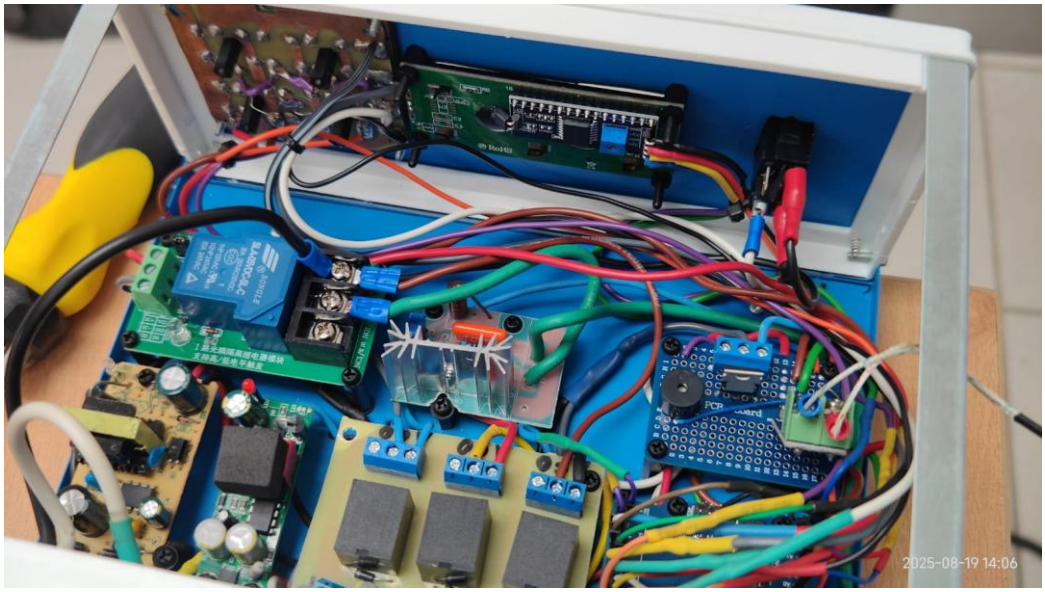


Imagen 37 - Conexiones

En la plancha se pondrá una placa de porcelana con un acabado especial para distribuir mejor el calor de la plancha eléctrica, también se le hiso un agujero para que pasara por ahí el sensor te temperatura (termopar tipo K). Como se muestra en la siguiente imagen.

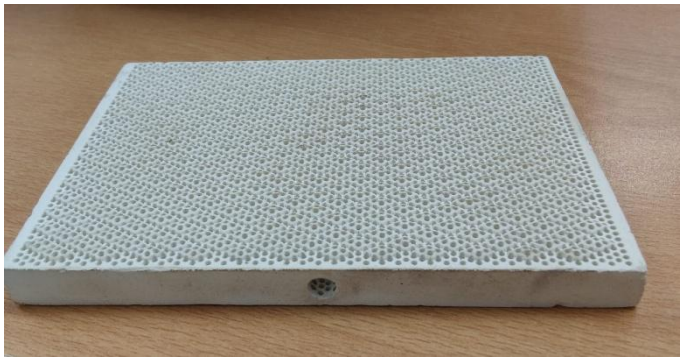


Imagen 38 - Pieza de porcelana

Para el transporte de la cavitación del sustrato se usó una manguera de PVC flexible transparente.



Imagen 39 - Manguera de PVC flexible transparente

14. Primeras Pruebas

Después de cablear todo el sistema hicimos sus debidas pruebas con lo que fue la plancha térmica, la bomba y el nebulizador.

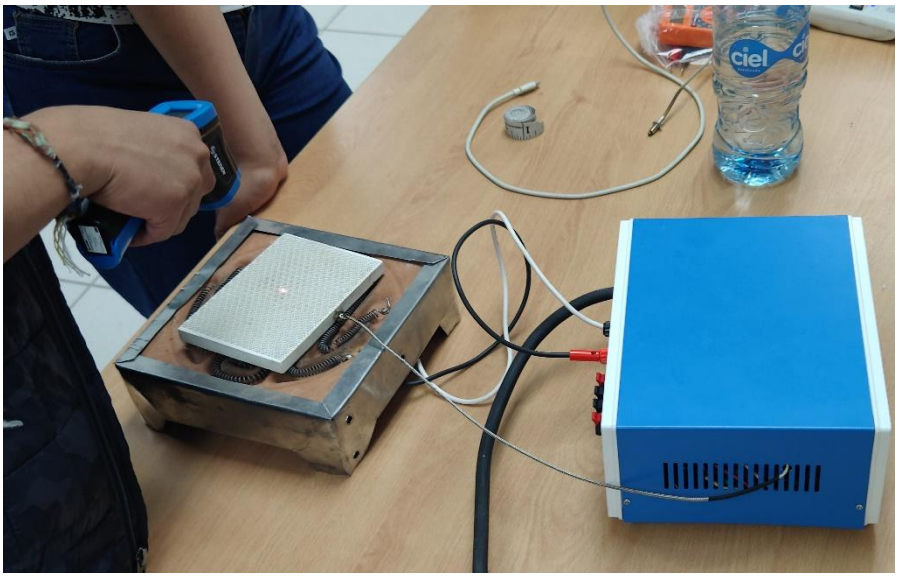


Imagen 40 - Pruebas correspondientes

Al terminar el procedimiento seguimos calibrando unas cosas como, por ejemplo, la posición de la plancha térmica, tiempo, temperatura, mediciones, etc.

15. Cambios Inesperados

16.1. Arduino Uno

Al momento de hacer las pruebas de funcionamiento el microcontrolador se quemó provocando que el sistema dejara de funcionar, haciendo que el microcontrolador no funcionara de manera eficiente, descubriendo el erro notamos que el regulador interno de la placa del microcontrolador (Arduino Uno), se había quemado dejando al microcontrolador sin voltaje.

Para que esto no volviera a pasar, investigando en internet y en la página de Arduino. Se encontró que podíamos ingresar los 5v con una corriente estable con un LM 7805 utilizando la fuente de 12v que ya tenía, ingresándolo directamente en el pin de 5v sin dañar al microcontrolador. (José Bagur, 2024)

Como se ve en la imagen 41.

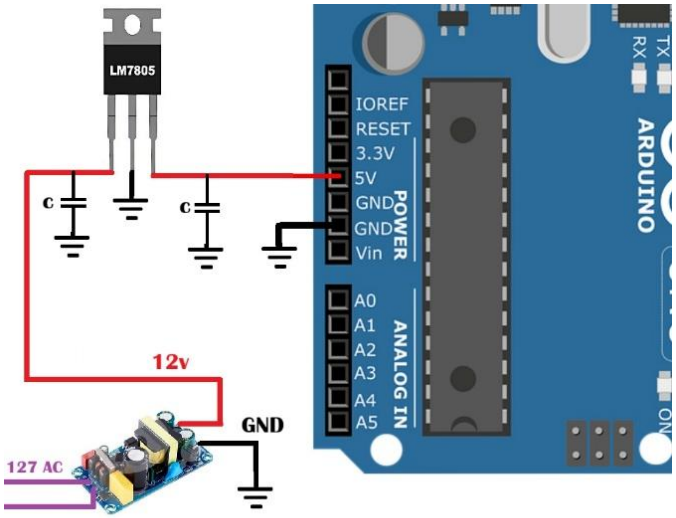


Imagen 41 - Conexión para fuente de voltaje externe

15.2. NEBULIZADOR ULTRASONICO HOSPITALARIO WH-802

Asu vez nos direron un nebulizador ultrasonico wh-802 de la marca “YUEHUA” que servira para la funcion de cabitacion ultrasónica remplazando al Generador de niebla para pecera (imagen 25) (Yuehua, 2025).



Imagen 42 - Nebulizador Ultrasónico WH-802

Cuenta con las siguientes caracteristicas:

- 1~5 micrones de nebulizacion (Yuehua, 2025)
- facilita la absorción de medicina al paciente, las partículas líquidas demedicina atomizada pueden entrar en las partes inflamadas del tracto respiratorio (Yuehua, 2025)
- Timer de 0 ~ 60 minutos (Yuehua, 2025)
- Forma agradable y ligera (Yuehua, 2025)
- Ajuste preciso del tiempo de nebulización (Yuehua, 2025)
- Desagüe rápido (Yuehua, 2025)
- Nebulización ajustable (Yuehua, 2025)
- Manija conveniente (Yuehua, 2025)
- Nebulización máxima: ~ 4 ml / min (Yuehua, 2025)
- Capacidad de la taza: 60ml (Yuehua, 2025)
- Tamaño y peso: 160 x 310 x 270[mm] y 4.2 [kg] (Yuehua, 2025)
- Capacidad para 250 cc de agua. (Yuehua, 2025)
- Frecuencia detrabajo de 1.7 mhz (Yuehua, 2025)
- Diámetro de partícula de 1 ~ 5micras (Yuehua, 2025)
- Consumo de energía de 60 watts máximos (Yuehua, 2025)
- Trae tubo de boca (Yuehua, 2025)
- Trae Mangueras (Yuehua, 2025)
- Trae Membrana repuesto (Yuehua, 2025)
- Trae Manual operación (Yuehua, 2025)

15.3. Controlador de Temperatura PID REX-C100

Tambien se incorporo un Controlador de temperatura PID REX-C100 con su respectivo termopar tipo K y relay SSR 40A, para la funcion de la resistencia termica de la plancha (ver imagen 15).



Imagen 43 - Controlador de temperatura PID REX-C100

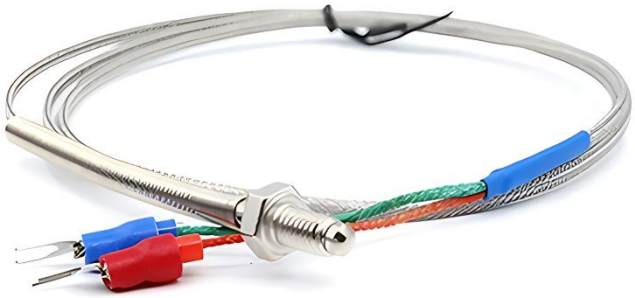


Imagen 44 - Termopar tipo K



Imagen 45 - Relay SSR 40A

15.4. Cambios en el circuito del sistema y diagrama

También se hicieron cambios en el circuito propuesto ahora se divide en dos secciones Control de Temperatura y control del sustrato, en las imágenes 46 y 47 se pueden apreciar los circuitos correspondientes Arduino uno y Temperatura PID REX-C100.

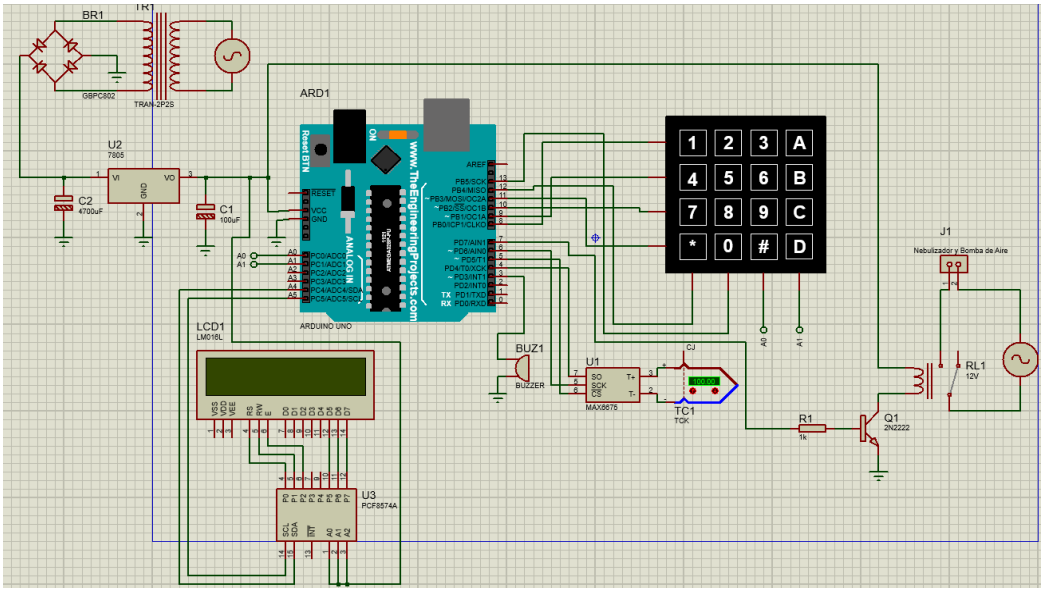


Imagen 44 - Diagrama 1era Parte

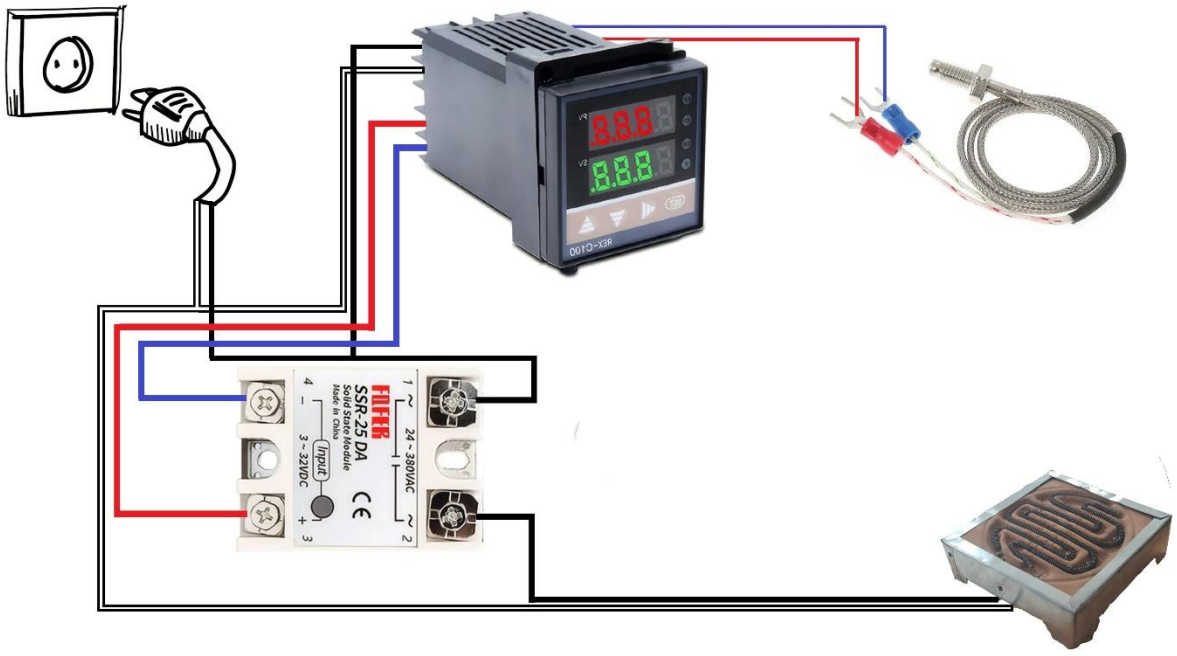


Imagen 45 - Diagrama 2da Parte

15.5. Diseño nuevo y funciones

La caja de almacenamiento también tubo ligeros cambios, como, por ejemplo, en la parte delantera, el switch de encendido y apagado se reubico ahora en la trasera de atrás dando espacio para el controlador de temperatura PID REX-C100.



Imagen 46 - nuevo diseño y reubicación

Como las dos partes necesitan su termopar tipo k se cambió las salidas de la bomba y nebulizar por las entradas de los dos termopares.

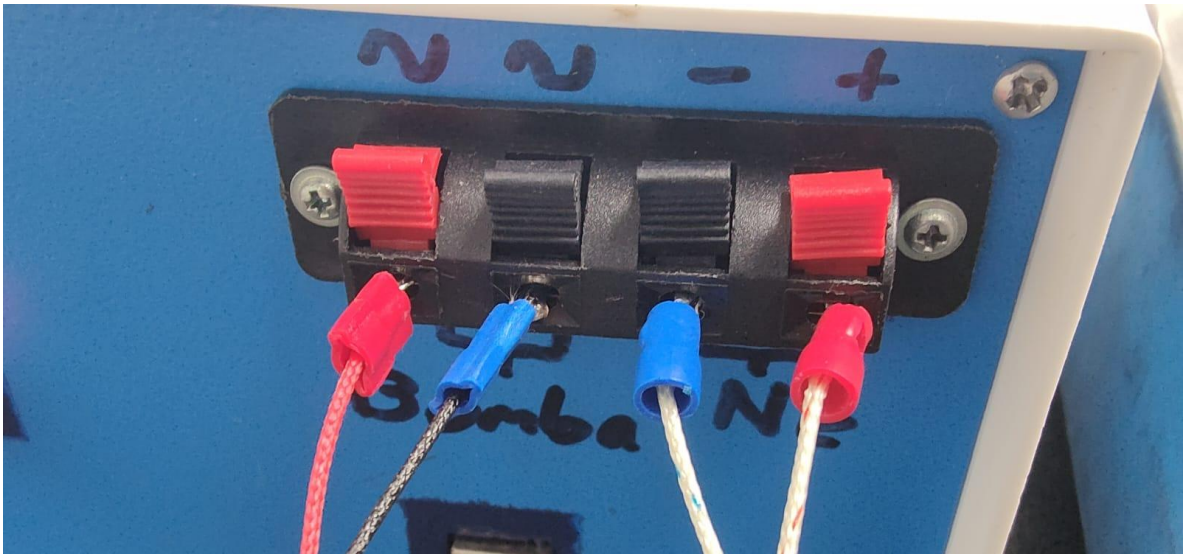


Imagen 47 - Nuevas entradas de termopares

La salida del relevador está en la entrada de la corriente para el sistema, para conectar además de la bomba de aire, el nebulizador con un multicontacto, teniendo en cuenta su respectiva corriente calculada para evitar calentamiento por sobrecorriente.

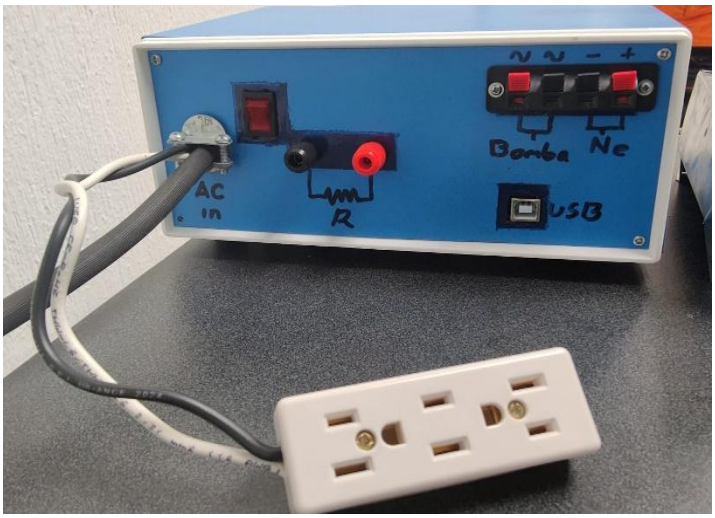


Imagen 48 - Salidas en AC

En la parte de atrás también tiene un USB tipo B para la conexión del Arduino uno a la PC por sus posibles cambios a lo largo del tiempo.



Imagen 49 - USB tipo B

15.6. Pruebas

Volviendo a hacer las respectivas pruebas de funcionamiento el sistema funciona nuevamente.



Imagen 50 – Sistema de control funcionando

15.7. Código de Arduino IDE

Se cambió el código del microcontrolador por el nuevo diseño y diagrama, véase en el (**Anexo II**).

16. Armado Completo del Sistema de Rocío Pirolítico Ultrasónico

Después de comprobar el funcionamiento del sistema, es hora de armar todo el sistema completo, empezando con el sistema de control (ver imagen 52), conectándolo a la corriente AC con el cable (ver imagen 28), siguiendo con la bomba (ver imagen 26), conectada por el tubo transparente (ver imagen 39), al flujómetro (ver imagen 31) y del flujómetro al matraz de dos bocas (ver imagen 14) y del matraz de dos bocas a la trampa (ver imagen 27), y de la trampa a la Boquilla de vidrio (ver imagen 53), para al final caer en la placa de porcelana con un acabado especial (ver imagen 38).



Imagen 51 - Boquilla de vidrio

El armado completo consiste en el funcionamiento total de todo el sistema de RPU, como se ve en la (imagen 55) y la (imagen 54).

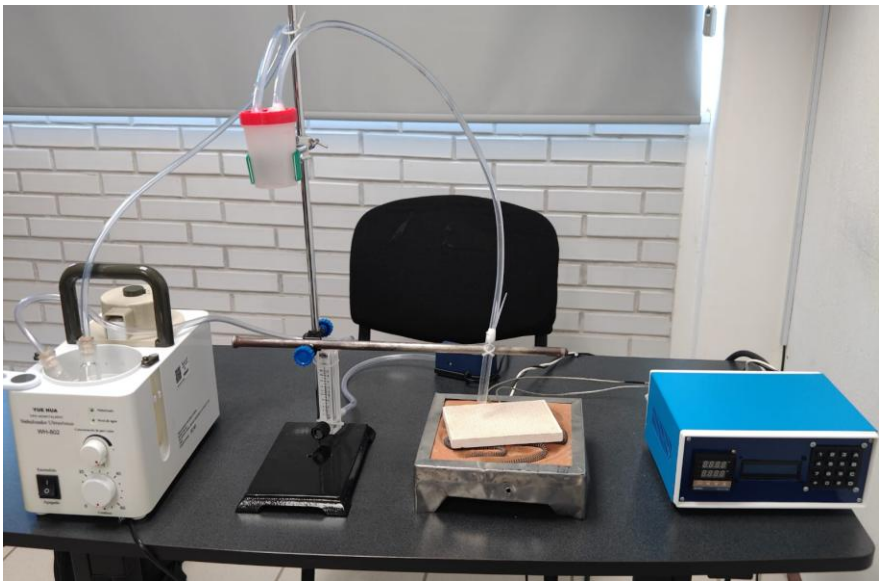


Imagen 53 - Sistema RPU

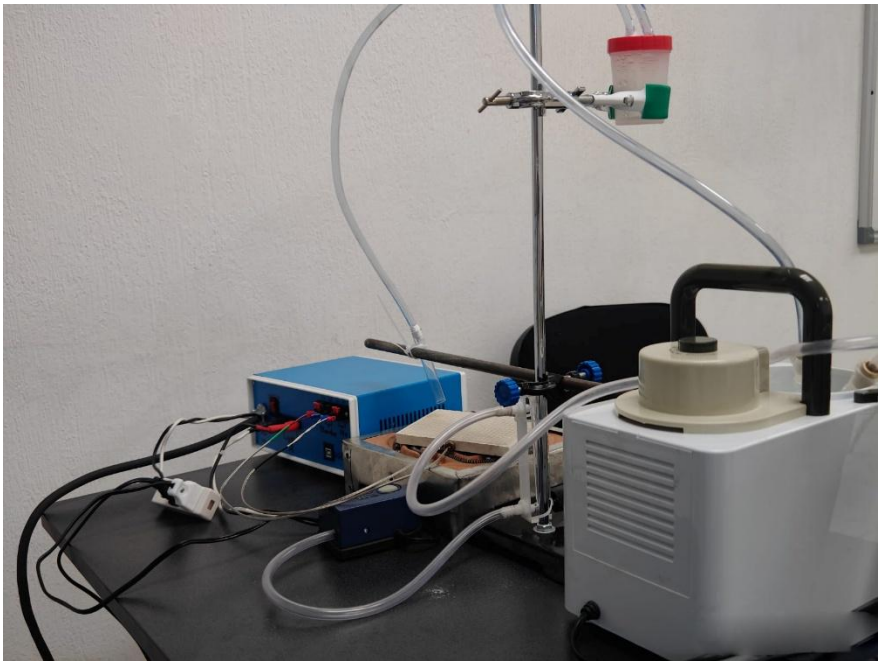


Imagen 52 - Sistema RPU por detrás

17. Conclusión

El desarrollo del proyecto *"Automatización y Control de un Sistema de Deposito de Películas Delgadas"* representa un avance significativo en la implementación de sistemas de bajo costo para la investigación científica dentro de instituciones educativas. A través del diseño, construcción y validación de un prototipo automatizado, se logró integrar de manera eficiente con diversos componentes electrónicos y de control, como el microcontrolador Arduino Uno, sensores de temperatura tipo K, control PID REX-C100, relevadores, bomba de aire y nebulizador ultrasónico, logrando una operación estable, y confiable.

El sistema propuesto permitió regular parámetros críticos del proceso, tales como la temperatura, el flujo de aire y el tiempo de exposición, factores determinantes en la calidad de las películas delgadas obtenidas. Esta automatización no solo facilita la reproducibilidad del experimento, sino que también optimiza el consumo de recursos y reduce la intervención humana, elevando así la precisión y consistencia de los resultados.

Uno de los logros más relevantes fue la adaptación de materiales y dispositivos comerciales accesibles, lo que demuestra que la innovación tecnológica no necesariamente requiere de grandes inversiones económicas. Este enfoque democratiza el acceso a tecnologías de deposición avanzadas, beneficiando a universidades y centros de investigación con recursos limitados, y fomentando el aprendizaje práctico de los estudiantes en áreas de control, instrumentación y materiales avanzados.

Asimismo, la experiencia adquirida permitió profundizar en la comprensión del proceso RPU, errores y cambios inesperados, destacando su versatilidad para la fabricación de recubrimientos funcionales con propiedades ópticas y eléctronicas. En conclusión, el proyecto cumplió satisfactoriamente sus objetivos al desarrollar un sistema funcional, escalable y de bajo costo, capaz de servir como herramienta experimental y formativa en el campo de la ingeniería aplicada a la ciencia de materiales y quimica impulsando la innovación y la autosuficiencia tecnológica en el ámbito académico nacional.

Referencias

- Innovación e Investigación. (s.f.). *Películas delgadas*. Secretaría de Educación Pública.
- Patiño Rodríguez, D. A. (2013). *Diseño y fabricación de un sistema de deposición de películas delgadas y nanopartículas por la técnica de rocío pirolítico*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ramajo, L. A., Parra, R., & Villegas Gómez, E. A. (2024). *Depósito y control de películas delgadas por técnicas sol-gel/nebulización*. Revista Mexicana de Física.
- Revistas UTP. (2014). *Diseño de un equipo semiautomatizado para síntesis de películas delgadas de SnO_2:F por spray-pirolítico*. Revista Tecnología e Innovación.
- Villegas Gómez, E. A., Parra, R., & Ramajo, L. A. (2018). *Métodos de medición de espesores de películas delgadas basadas en óxidos semiconductores*. Revista Mexicana de Física.
- SEP. (2018). *Modelo Mexicano de Formación Dual*. Secretaría de Educación Pública. https://www.gob.mx/sep/documentos/modelo-mexicano-de-formacion-dual
- TecNM. (2020). *Historia del Instituto Tecnológico de Apizaco*. Tecnológico Nacional de México. https://apizaco.tecnm.mx/historia
- TecNM. (2023). *Oferta educativa del Instituto Tecnológico de Apizaco*.
- Ardekani, S. R., Ghasemi, A., & Rahimi, M. (2019). A comprehensive review on ultrasonic spray pyrolysis technique: mechanism, main parameters and applications in condensed matter. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 141, 104631. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104631
- Falcony, C. (2018). Spray pyrolysis technique; high-K dielectric films and other applications. Micromachines, 9(8), 414. https://doi.org/10.3390/mi9080414
- Majerič, P., et al. (2020). Advances in ultrasonic spray pyrolysis processing of nanoparticles and thin films. Materials, 13(16), 3485. https://doi.org/10.3390/ma13163485
- Research. https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.ms.12.080182.000501
- SPDLab. (n.d.). KV-25 Spray Pyrolysis Deposition Machine — Heater controlled by cascade PID controller. SPDLab product page. https://www.spdlab.com/English/KV-25.html
- MTI-KJ Group. (n.d.). Ultrasonic Spray Pyrolysis Assisted OTF-1200X-USPA (specs). https://mti-kjgroup.com/UltrasonicSprayPyrolysisAssistedOTF-1200X-USPA.aspx
- Holmarc. (n.d.). Spray Pyrolysis Equipment — Systems for research laboratories. Holmarc. https://www.holmarc.com/spray_pyrolysis_equipment.php
- Alibaba. (2024). Ultrasonic spray pyrolysis equipment — product listings and price ranges. https://www.alibaba.com/showroom/ultrasonic-spray-pyrolysis-equipment.html
- Falcony, C. (2018). Spray pyrolysis: avances y aplicaciones en la fabricación de materiales funcionales. Micromachines, 9(8), 414. https://doi.org/10.3390/mi9080414
- Miranda, H., Watson, A., Abrego, I., & Ching-Prado, E. (2016). Preparación y caracterización de películas delgadas de SnO_2:F depositadas mediante la técnica de rocío pirolítico y sus aplicaciones como TCO's. I+D Tecnológico. https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/592

- Portillo, L. (2014). Depósito de películas delgadas de CdS mediante la técnica de spray pyrolysis para aplicaciones fotovoltaicas. Tesis de Licenciatura, Universidad de El Salvador. http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/907
- Patiño Rodríguez, D. A. (2013). Diseño y fabricación de un sistema de deposición de películas delgadas por rocío pirolítico. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. https://tesisdigitales.umich.mx/items/cf6f83a7-7c98-4ed0-aa17-c88d140e333c
- Obregón, O., Rosales, P., Luna, J., & Domínguez, M. A. (2021). Transistores de película delgada basados en óxido de zinc por spray pyrolysis ultrasónico de alta frecuencia. Revista Mexicana de Física, 67(4), 041003. https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf/article/view/5619
- Calle Gíl, V. H. (2007). *Crecimiento de películas delgadas de $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ por medio de la técnica pulverización catódica "Sputtering"* (Tesis de maestría). Universidad del Quindío. https://hdl.handle.net/20.500.14550/252
- Magaña, C. R. (2002). *Obtención y caracterización de películas delgadas electrocrómicas de óxido de níquel a partir de la técnica de magnetrón sputtering o pulverización catódica* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000306156
- Salvador-Cruz, C. J. (2024). *Depósito de películas delgadas de AlN mediante técnica de sputtering DC reactivo: diseño y análisis de proceso* (Tesis de doctorado). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1393
- Universidad Nacional de La Plata. (2025). *Laboratorio de crecimiento de películas delgadas por pulverización catódica (Sputtering)*. Instituto de Física La Plata. https://www.iflp.unlp.edu.ar
- Unidad de Análisis Estructural-Molecular UAM. (2025). *Difracción de rayos X de policristal: principios y aplicaciones.* Universidad Autónoma de Madrid.
- UABC. (2023). *Difracción de rayos X como técnica de caracterización de materiales cristalinos.* Universidad Autónoma de Baja California.
- Superficies y Vacío. (2012). Caracterización de fases cristalinas de nitruro de boro por difracción de rayos X. *Superficies y Vacío, 25*(3), 194-198.
- Ramírez-Amador, R., Alvarado-Pulido, J., Martínez-Hernández, H. P., Cortés-Maldonado, R., Alcántara-Iniesta, S., Flores-Carrasco, G., & others. (2023). *Study of fluorine-doped tin oxide thin films deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis: a direct comparison*. **Materials Research Express, 10**(6), 066402. Disponible en DOAJ: https://doaj.org/article/c646272034ce47c9ab4a8e6705a666a3
- Universidad Veracruzana. (2021). Películas delgadas y recubrimientos (Documento técnico). Universidad Veracruzana. https://www.uv.mx/veracruz/mmicrona/files/2021/05/Peliculas-delgadas-y-recubrimientos.pdf

- MerckMillipore. (2020). Chemical vapor deposition (CVD) — Applications and principles (página técnica). Merck Millipore. https://www.merckmillipore.com/CR/es/applications/materials-science-and-engineering/chemical-vapor-deposition
- Ardila Vargas, A. M., Bernal, A. M., & Vega-Verdugo, M. (2016). Fabricación y estudio de películas delgadas conductoras y transparentes de nano-hilos metálicos preparadas por spin coating. *Ingeniería y Competitividad, 18*(2), 125–132. https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2159
- Rojas-Aguilera, J. S. (2016). Diseño de equipo para el depósito de películas delgadas mediante el método de rotación o spin-coating. Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, USM. https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/7838
- Ramírez-Amador, R., Alvarado-Pulido, J., Martínez-Hernández, H. P., Cortés-Maldonado, R., Alcántara-Iniesta, S., Flores-Carrasco, G., Ojeda-Durán, E., Malik, O., Morales-de la Garza, L., Méndez-Rojas, M. Á., Panecatl-Bernal, Y., Luna-López, J. A., & López-Salazar, P. (2023). *Study of fluorine-doped tin oxide thin films deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis: a direct comparison.* Materials Research Express, 10(6), 066402. https://doi.org/10.1088/2053-1591/acda1a
- Ramírez-Amador, R., Alcántara-Iniesta, S., Balcón-Camacho, J., Teniza-García, O., Mercado-Aguilar, E., Rodríguez-González, J., et al. (2019). *Structural, morphological, optical and electrical characterization of fluorine-doped tin oxide (FTO) thin films synthesized by pneumatic spray pyrolysis.* ResearchGate.

ANEXOS

Anexo I

Código de Arduino IDE

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>
#include "max6675.h"
int control = 1;
// Pines del MAX6675
int thermoDO = 4;
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 6;
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
// LCD I2C
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// Teclado 4x4
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {7, 8, 9, 10};
byte colPins[COLS] = {11, 12, A0, A1};
Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);
```

```
// Pines
const int relay1Pin = 2;
const int relay2Pin = 3;
const int buzzerPin = A2;
// Variables de temperatura límite
float tempThreshold1 = 100.0;
float tempThreshold2 = 102.0;
// Estados de relés
bool relay1Active = false;
bool relay2TimerRunning = false;
unsigned long relay2StartTime = 0;
String inputBuffer = "";
bool settingRelay1 = false;
bool settingRelay2 = false;
bool settingRelay2Time = false;
unsigned long relay2Duration = 20000;
// Nueva variable para congelar/descongelar
bool systemFrozen = false;
void setup() {
  pinMode(relay1Pin, OUTPUT);
  pinMode(relay2Pin, OUTPUT);
  pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
  digitalWrite(relay1Pin, LOW);
  digitalWrite(relay2Pin, LOW);
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
```

```
  lcd.print("Iniciando...");
  delay(1000);
  lcd.clear();
}
void loop() {
  if (systemFrozen) return;
  float temperature = thermocouple.readCelsius();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp: ");
  lcd.print(temperature);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C   ");
  char key = keypad.getKey();
  if (key) {
    tone(buzzerPin, 1000, 100);
    handleKeyPress(key);
  }
  // Relé 1: mantener temperatura
  if (temperature < tempThreshold1 && !relay1Active) {
    digitalWrite(relay1Pin, HIGH);
    relay1Active = true;
  } else if (temperature >= tempThreshold1 && relay1Active) {
    digitalWrite(relay1Pin, LOW);
    relay1Active = false;
  }
  // Relé 2 activación temporal
  if (temperature >= tempThreshold2 && control == 1) {
    digitalWrite(relay2Pin, HIGH);
```

```
    relay2StartTime = millis();
    relay2TimerRunning = true;
    tone(buzzerPin, 2000, 1000);
    control = 2;
    delay(relay2Duration);
    digitalWrite(relay2Pin, LOW);
    tone(buzzerPin, 2000, 1000);
  }
  delay(200);
}
void handleKeyPress(char key) {
  // Control congelar/descongelar
  if (key == '#') {
    systemFrozen = !systemFrozen;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    if (systemFrozen) {
      lcd.print("Sistema Congelado");
      digitalWrite(relay1Pin, LOW);
      digitalWrite(relay2Pin, LOW);
    } else {
      lcd.print("Sistema Reanudado");
    }
    tone(buzzerPin, 1500, 300);
    delay(1500);
    lcd.clear();
    return;
  }
```

```
if (systemFrozen) return;
if (key == 'A') {
  if (!settingRelay1) {
    inputBuffer = "";
    settingRelay1 = true;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Set R1 Temp:     ");
  } else {
    tempThreshold1 = inputBuffer.toFloat();
    settingRelay1 = false;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("R1 Temp: ");
    lcd.print(tempThreshold1);
    lcd.print("C   ");
  }
} else if (key == 'B') {
  if (!settingRelay2) {
    inputBuffer = "";
    settingRelay2 = true;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Set R2 Temp:     ");
  } else {
    tempThreshold2 = inputBuffer.toFloat();
    settingRelay2 = false;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("R2 Temp: ");
    lcd.print(tempThreshold2);
```

```
    lcd.print("C   ");
   }
 } else if (key == 'C') {
   if (!settingRelay2Time) {
    inputBuffer = "";
    settingRelay2Time = true;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Set R2 Time(s):  ");
   } else {
    relay2Duration = inputBuffer.toInt() * 1000UL;
    settingRelay2Time = false;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("R2 Time: ");
    lcd.print(relay2Duration / 1000);
    lcd.print("s     ");
   }
 } else if (key == '*') {
   relay1Active = false;
   relay2TimerRunning = false;
   digitalWrite(relay1Pin, LOW);
   digitalWrite(relay2Pin, LOW);
   lcd.clear();
   lcd.setCursor(0, 0);
   lcd.print("Reiniciado...");
   delay(1000);
   lcd.clear();
   control = 1;
 } else if (isDigit(key)) {
```

```
    inputBuffer += key;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Input: ");
    lcd.print(inputBuffer);
    lcd.print("      ");
  }
}
```

Anexo II

Nuevo Código de Arduino IDE

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>
#include "max6675.h"
// -------------------- CONFIGURACIÓN LCD --------------------
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// -------------------- CONFIGURACIÓN TECLADO 4x4 --------------------
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {8, 9, 10, 11};
byte colPins[COLS] = {12, 13, A0, A1};
Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);
// -------------------- CONFIGURACIÓN MAX6675 --------------------
int thermoDO = 4;
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 6;
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
// -------------------- PINES SALIDA --------------------
const int ledPin = 7;
const int buzzerPin = 3;
```

```
// -------------------- VARIABLES DEL SISTEMA --------------------
float temperaturaActual = 0;
int temperaturaDeseada = 0;
int tiempoEncendido = 0;  // en segundos
bool asignandoTemp = false;
bool asignandoTiempo = false;
String bufferEntrada = "";
bool sistemaActivo = true;
bool tiempoFinalizado = false;  // <-- nueva variable
unsigned long ledEncendidoMillis = 0;
bool ledEncendido = false;
void setup() {
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Sistema Iniciado");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Temp: 0.0 C");
  sonidoSistemaEncendido();
  delay(2000);
  lcd.clear();
}
void loop() {
  // Leer temperatura
  temperaturaActual = thermocouple.readCelsius();
```

```
// Mostrar temperatura solo si no estamos en modo asignación
if (!asignandoTemp && !asignandoTiempo) {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp:");
  lcd.print(temperaturaActual);
  lcd.print((char)223); // símbolo de grados
  lcd.print("C   ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Set:");
  lcd.print(temperaturaDeseada);
  lcd.print((char)223);
  lcd.print("C T:");
  lcd.print(tiempoEncendido);
  lcd.print("s ");
}
// Revisar si hay tecla presionada
char tecla = keypad.getKey();
if (tecla) {
  sonidoTecla();
  if (tecla == 'A') { // Asignar temperatura
    asignandoTemp = !asignandoTemp;
    asignandoTiempo = false;
    if (asignandoTemp) {
      bufferEntrada = "";
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Asignar");
      lcd.setCursor(0, 1);
```

```
    lcd.print("temperatura:");
   } else {
    if (bufferEntrada.length() > 0) {
     temperaturaDeseada = bufferEntrada.toInt();
     bufferEntrada = "";
    }
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Temperatura");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Establecida");
    delay(1500);
    lcd.clear();
   }
  }
  else if (tecla == 'B') { // Asignar tiempo
   asignandoTiempo = !asignandoTiempo;
   asignandoTemp = false;
   if (asignandoTiempo) {
    bufferEntrada = "";
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Asignar");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("tiempo (s):");
   } else {
    if (bufferEntrada.length() > 0) {
     tiempoEncendido = bufferEntrada.toInt();
```

```
      bufferEntrada = "";
      tiempoFinalizado = false;   // <-- reset al asignar nuevo tiempo
    }
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tiempo");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Establecido");
    delay(1500);
    lcd.clear();
  }
}
else if (tecla == '*') { // Detener sistema
  sistemaActivo = false;
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  ledEncendido = false;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Sistema Detenido");
  sonidoLedOff();
  delay(2000);
  lcd.clear();
}
else if (tecla == '#') { // Reiniciar sistema
  sistemaActivo = true;
  temperaturaDeseada = 0;
  tiempoEncendido = 0;
  tiempoFinalizado = false;   // <-- reset
```

```
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    ledEncendido = false;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Sistema Reiniciado");
    sonidoSistemaEncendido();
    delay(2000);
    lcd.clear();
  }
  else if (isdigit(tecla)) { // Capturar números en modo asignación
    bufferEntrada += tecla;
    if (asignandoTemp || asignandoTiempo) {
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(bufferEntrada + "   "); // mostrar lo digitado
    }
  }
}
// Control del LED
if (sistemaActivo && !tiempoFinalizado && temperaturaDeseada > 0 && tiempoEncendido > 0) {
  if (temperaturaActual >= temperaturaDeseada && !ledEncendido) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    ledEncendido = true;
    ledEncendidoMillis = millis();
    sonidoLedOn();
  }
  if (ledEncendido && (millis() - ledEncendidoMillis >= (tiempoEncendido * 1000))) {
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    ledEncendido = false;
```

```
      tiempoFinalizado = true;   // <-- marcar que ya se cumplió
      sonidoLedOff();
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Tiempo Terminado");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("Reinicie (#)");
      delay(2000);
      lcd.clear();
    }
  }
  delay(200);
}
// ---------- FUNCIONES DE SONIDO ----------
void sonidoTecla() {
  tone(buzzerPin, 1000, 50);
}
void sonidoSistemaEncendido() {
  tone(buzzerPin, 1500, 300);
  delay(300);
  tone(buzzerPin, 2000, 300);
}
void sonidoLedOn() {
  tone(buzzerPin, 1200, 150);
}
void sonidoLedOff() {
  tone(buzzerPin, 800, 150);
}
```