

Desarrollo de un sistema de control para la fabricación de películas de perovskitas fotovoltaicas mediante la técnica de evaporación térmica

Anyelo Barreto Hernández y Vanny Sofía Lugo Vásquez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería

Codirector

Camilo Andrés Otalora García

Magister en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Programa Académico de Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por desde el inicio mostrarme el camino y acompañarme hasta este momento de la mano ayudándome a sortear cada obstáculo, también dedico este título a mí, la niña soñadora y estudiosa que siempre supo que esto no nos quedaría grande, a mis padres Hernando Lugo y Martha Vásquez que me apoyaron en este sueño y que al igual que a mi les llena de alegría y orgullo haber culminado esta etapa, a mis hermanos que en muchos momento de esta vida universitaria tuvieron una hermana ausente por ir tras este objetivo, dedico y agradezco a mi tía Yolanda y mi prima Paola que no dudaron en tenderme la mano cuando lo necesité, por último a mi compañero de tesis por ser tan obstinado y entregado a este proyecto.

Vanny Sofía Lugo Vásquez

A Dios al cual recurría y agradecía en cada oportunidad, a mis padres Oscar Barreto y Rosa Alba Hernández que siempre me apoyaron e hicieron su máximo esfuerzo, a mí que no me rendí a pesar de las dificultades y el pasar de los años, a mis hermanas que cada vez que recurrí a ellas me prestaron su ayuda, y especialmente a mi compañera de tesis por su entrega para poder culminar este trabajo de grado.

Anyelo Barreto Hernández

Agradecimientos

Agradecemos a Dios que nos concedió persistencia y dedicación para la culminación de este proyecto, agradecemos a nuestra directora y codirector por ser guías en nuestra tesis, al profesor Carlos Rondón por brindarnos un espacio de trabajo, compartirnos su conocimiento investigativo para así comprender el alcance y valor que tendría este proyecto en sus futuras investigaciones, también agradecemos a cada uno de los docentes que a lo largo de esta carrera nos transmitieron su conocimiento, en especial al profesor Oscar Reyes que marcó un antes y un después en mi forma de ver esta carrera, al profesor William Razvan, Jaime Barrero y Javier Mier por orientarnos de forma desinteresada cuando nos surgían dudas, a nuestros compañeros y amigos, a la Universidad Industrial de Santander y a cada persona dentro de ella que nos tendió la mano y facilitó nuestro recorrido e infinitas gracias a nuestras familias que con fe, amor, paciencia y sacrificio lograron que este sueño de ser Ingenieros Electrónicos de la UIS hoy fuese realidad. Dios los bendiga a todos.

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|-------------|
| Introducción | 11 |
| 1. Objetivos | 13 |
| 1.1. Objetivo General | 13 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 13 |
| 2. Marco teórico | 14 |
| 2.1. Sistemas de evaporación | 14 |
| 2.1.1. Co-evaporación | 15 |
| 2.1.2. Evaporación secuencial | 15 |
| 2.2. Crisoles y sustrato | 15 |
| 2.3. Sistemas de control y potencia..... | 17 |
| 2.4. Etapa de sensado | 18 |
| 2.5. Etapa de potencia | 19 |
| 2.6. Etapa de control..... | 21 |
| 2.7. Etapa de visualización y variación de parámetros..... | 21 |
| 3. Diseño e implementación | 23 |
| 3.1. Comportamiento del proceso de evaporación | 23 |
| 3.2. Modelo matemático de la planta(calentamiento) diseño de los controladores..... | 26 |
| 3.3. Hardware: Diseño de los circuitos | 30 |
| 3.3.1. Control de potencia | 30 |
| 3.3.1.1. Detección de cruce por cero | 30 |
| 3.3.1.2. Controlador CA-CA..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2. Otros circuitos necesarios..... | 34 |
| 3.3.2.1. Acondicionamiento de señal de termocupla..... | 34 |
| 3.3.2.2. Alimentación externa de 5V..... | 35 |
| 3.4. Montaje final | 36 |
| 4. Resultados | 36 |
| 4.1. Pruebas de ángulos de disparo | 36 |
| 4.2. Pruebas de control | 39 |
| 4.2.1. Co-evaporación..... | 39 |
| 4.2.2. Secuencial | 41 |
| 4.2.3. Sustrato | 43 |
| 5. Conclusiones | 44 |
| 6. Recomendaciones..... | 45 |
| Referencias Bibliográficas..... | 46 |
| Apéndices | 48 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Temperaturas de evaporación de los compuestos | 16 |
| Tabla 2. Propiedades térmicas y eléctricas del crisol de acero inoxidable 304..... | 16 |
| Tabla 3. Especificaciones del termopar tipo k | 18 |
| Tabla 4. Especificaciones del módulo MAX6675 | 19 |
| Tabla 5. Valores de voltaje y corriente medidos durante el calentamiento de los crisoles | 25 |
| Tabla 6. Datos de voltaje y corriente calentamiento del sustrato | 26 |
| Tabla 7. Funciones de transferencia obtenidas para los datos de calentamiento de los crisoles... | 27 |
| Tabla 8. Funciones de transferencia obtenidas para los datos de calentamiento del sustrato..... | 28 |
| Tabla 9. Controladores y sus parámetros para temperatura de referencia de 260°C..... | 29 |
| Tabla 10. Controladores y sus parámetros para temperatura de referencia de 340°C | 29 |
| Tabla 11. Controlador y sus parámetros para el calentamiento del sustrato | 30 |
| Tabla 12. Relación entre conteo y valor rms de salida para una alimentación de 120V | 38 |
| Tabla 13. Relación entre voltajes de entrada y tiempo en el que los crisoles llegan al setpoint .. | 38 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Esquema general del sistema de evaporación..... | 14 |
| Figura 2. Modelo de crisol y resistencia utilizados..... | 16 |
| Figura 3. Sustrato de vidrio..... | 17 |
| Figura 4. Etapas y relaciones representadas como diagramas de bloques | 17 |
| Figura 5. Controlador CA-CA monofásico | 20 |
| Figura 6. Circuito detector cruce por cero..... | 20 |
| Figura 7. Gráfica de tiempos de referencia | 20 |
| Figura 8. Placa arduino mega 2560..... | 22 |
| Figura 9. Pantalla LCD alfanumérica 20*4..... | 22 |
| Figura 10. Teclado matricial 4*4 | 23 |
| Figura 11. Circuito utilizado para realizar pruebas iniciales de calentamientos | 24 |
| Figura 12. Montaje dentro de la cámara de vacío | 24 |
| Figura 13. Curvas de temperatura durante el calentamiento de los crisoles, | 25 |
| Figura 14. Curvas de temperatura durante calentamiento de los sustratos | 26 |
| Figura 15. Modelo matemático vs. Datos reales para una entrada de 150 Vrms utilizando la System Identification Toolbox..... | 27 |
| Figura 16. Circuito detector cruce por cero..... | 30 |
| Figura 17. Simulación detector cruce por cero..... | 31 |
| Figura 18. Simulación detector cruce por cero..... | 32 |
| Figura 19. Circuito para el control de potencia..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 20. Controlador CA-CA implementado | 33 |
| Figura 21. Forma de onda de salida | 33 |
| Figura 22. Diagrama de bloques módulo MAX66675 | 34 |
| Figura 23. Esquemático LM2596..... | 35 |
| Figura 24. Montaje final..... | 36 |
| Figura 25. Curvas temperatura VS tiempo para fuente 1 setpoint 340°C..... | 40 |
| Figura 26. Curvas temperatura VS tiempo para fuente 2 setpoint 260°C..... | 40 |
| Figura 27. Curva temperatura VS tiempo para sustrato 60°C..... | 41 |
| Figura 28. Curva de temperatura evaporación secuencial para entrada de 150Vrms | 42 |
| Figura 29. Curva de temperatura evaporación secuencial para entrada de 206Vrms | 43 |

Resumen

Título: Desarrollo de un sistema de control para la fabricación de películas de perovskitas fotovoltaicas mediante la técnica de evaporación térmica *

Autor: Anyelo Barreto Hernández (1), Vanny Sofia Lugo Vásquez (2) **

Palabras Clave: Sistema de control, calentamiento, temperatura, técnicas de evaporación.

Descripción: El grupo de investigación GISEL ha estado trabajando en una línea de investigación enfocada en la fabricación de celdas solares emergentes, utilizando nuevos materiales fotovoltaicos. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema de control de temperatura para dos crisoles y un sustrato destinados a la síntesis de películas delgadas de perovskitas fotovoltaicas. El sistema permite variar los tiempos de calentamiento, seleccionar entre dos técnicas de evaporación, y monitorear en tiempo real los parámetros del proceso a través de una interfaz. El control de potencia fue implementado mediante convertidores CA-CA utilizando TRIAC, mientras las rutinas de adquisición de datos, control y gestión de la interfaz de usuario se hace utilizando una placa de Arduino Mega 2560. Este documento presenta en detalle el desarrollo completo del sistema, desde la etapa de diseño hasta la implementación y obtención de resultados. Los valores de temperatura de referencia se han establecido a partir de estudios previos, los cuales relacionan la presión de la cámara y las sustancias a evaporar.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Pregrado en Ingeniería Electrónica. Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Doctora en ingeniería. Codirector: Camilo Andrés Otalora García. Magister en ingeniería.

Abstract

Title: Development of a Control System for the Fabrication of Perovskite Photovoltaic Films Using Thermal Evaporation Technique *

Author(s): Anyelo Barreto Hernández (1), Vanny Sofia Lugo Vásquez (2)**

Key Words: Control System, heating, temperature, evaporation techniques.

Description: The GISEL research group has been working on a research line focused on the fabrication of emerging solar cells using novel photovoltaic materials. The main objective of this work is to develop a temperature control system for two crucibles and a substrate, intended for the synthesis of thin films of photovoltaic perovskites. The system allows for the configuration of heating times, the selection between two evaporation techniques, and real-time monitoring of process parameters through a user interface. Power control was implemented using AC-AC converters with TRIAC, while data acquisition, control routines, and user interface management are handled by an Arduino Mega 2560 board. This document presents the complete development of the system in detail, from the design stage to implementation and results. The reference temperature values were established based on previous studies, which relate the chamber pressure to the substances to be evaporated.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: Maria Alejandra Mantilla Villalobos, PhD in Engineering. Codirector: Camilo Andrés Otalora García, PhD in Engineering.

Introducción

La transición energética global ha impulsado la búsqueda de fuentes renovables que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles y garanticen la seguridad energética. En Colombia, aunque la generación hidroeléctrica representa la mayor parte de la matriz energética, la participación de fuentes renovables no convencionales ha ido en aumento. Según Adrián Correa, director de la Unidad de Planeación Minero-Energética (Upme) del Ministerio de Minas y Energía “Un poco más del 10% de la energía que consumimos los colombianos ya es generada por el sol en las horas cercanas al mediodía”, (Presidencia de la República de Colombia, 2025), y se espera que esta capacidad aumente hasta un 12% con la entrada en operación de nuevos proyectos de mediana y gran escala (SER Colombia, 2025). A pesar de este avance, la dependencia de la generación hidroeléctrica sigue siendo un desafío, ya que su disponibilidad está condicionada por variaciones climáticas, lo que genera vulnerabilidad en el suministro energético y evidencia la necesidad de diversificación mediante fuentes alternativas confiables y sostenibles.

Entre estas alternativas, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las más prometedoras gracias a su disponibilidad y avances tecnológicos. Sin embargo, la implementación masiva de sistemas fotovoltaicos aún enfrenta desafíos significativos, principalmente en términos de costos y eficiencia de conversión. Las tecnologías de película delgada, como el telururo de cadmio (CdTe) y los seleniuros de cobre, indio y galio (CIGS), han demostrado avances en este campo, pero su adopción a gran escala se ha visto limitada por la toxicidad y escasez de algunos de sus materiales constituyentes, lo que ha motivado la exploración de alternativas más viables (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2024a).

En este contexto, las celdas solares basadas en perovskitas emergen como una solución innovadora debido a su rápido progreso en eficiencia de conversión de energía (PCE) y su bajo costo

de fabricación. Estudios recientes han reportado eficiencias superiores al 25%, lo que las convierte en una tecnología altamente competitiva (NREL, 2024b). No obstante, su escalabilidad industrial aún requiere optimización en los métodos de síntesis y deposición para garantizar la estabilidad y reproducibilidad de las películas delgadas. La evaporación térmica ha surgido como una técnica prometedora en este ámbito, ya que permite un control preciso sobre la morfología y composición de las capas de perovskita, favoreciendo su aplicabilidad en dispositivos fotovoltaicos de nueva generación (Park et al., 2023).

En esta tesis, se presenta el diseño, desarrollo y verificación experimental de un sistema de control de temperatura para la evaporación térmica de perovskitas fotovoltaicas, una línea de investigación abordada por el grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) desde 2019. Se ha implementado un sistema de regulación térmica que permite el control de temperatura en dos crisoles de evaporación y un portasustratos dentro de una cámara de vacío. Este desarrollo apunta a mejorar la reproducibilidad y eficiencia del proceso, además contribuye al fortalecimiento de esta línea de investigación en el grupo GISEL.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de control de los parámetros de síntesis de películas de perovskitas fotovoltaicas depositadas mediante evaporación térmica.

1.2 Objetivos Específicos

Diseñar un sistema de control de temperatura para 2 crisoles de evaporación y un portasustratos.

Implementar el sistema de control para una cámara de evaporación térmica empleada en la fabricación de películas de perovskitas fotovoltaicas.

Desarrollar una interfaz para el ajuste y visualización de los parámetros de control del sistema implementado.

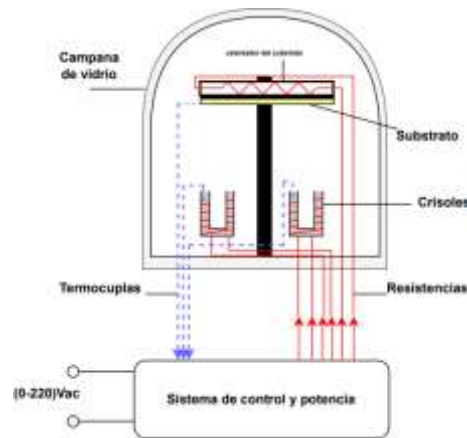
2. Marco teórico

Este capítulo presenta los conceptos fundamentales necesarios para comprender el funcionamiento de un sistema de evaporación con dos fuentes. Se introducen conceptos relacionados con los materiales utilizados en la síntesis de perovskitas, así como consideraciones generales sobre los procesos de evaporación térmica. También se describen las características básicas de las fuentes de potencia empleadas y los componentes que las integran, información clave para entender la lógica de diseño del sistema propuesto.

2.1 Sistema de evaporación

Figura 1

Esquema general del sistema de evaporación, tomado de los autores.



El sistema está diseñado para evaporar los compuestos precursores que conforman la película de perovskita fotovoltaica (MAPbI_3) mediante dos técnicas de evaporación: (1) co- evaporación y (2) evaporación secuencial. Con este enfoque, se busca fabricar y caracterizar películas delgadas de perovskita fotovoltaica, optimizando sus propiedades. En la Figura 1 se presenta el esquema general de sistema de evaporación empleado para este propósito.

Para llevar a cabo este proceso, es fundamental el uso de una cámara de vacío, la cual garantiza un ambiente libre de gases o sustancias que puedan interferir en la evaporación. Además, esta cámara

mantiene una presión inferior a la atmosférica, establecida en 1×10^{-5} mbar (Camilo et al., 2021).

El calentamiento se logrará mediante resistencias térmicas conectadas a fuentes de potencia (ver Figura 2), que inducirán calor en los crisoles a través del flujo de corriente. Estas fuentes serán controladas con el fin de regular la velocidad de calentamiento y alcanzar la temperatura deseada con precisión.

2.1.1 Co-evaporación

La co-evaporación es una técnica de deposición de películas delgadas en la que dos o más materiales se evaporan simultáneamente desde fuentes independientes dentro de una cámara de vacío. Los vapores de estos materiales se combinan y se condensan sobre un sustrato, formando una película con una composición uniforme y controlada (Ohring, 2001).

2.1.2 Evaporación secuencial

La evaporación secuencial es una técnica de deposición de películas delgadas en la que los materiales precursores se evaporan y depositan en capas sucesivas sobre un sustrato, en lugar de evaporarse simultáneamente (Smith, 1995).

2.2 Crisoles y sustrato

Para garantizar una evaporación limpia de los precursores, es esencial emplear un crisol capaz de soportar temperaturas superiores a las requeridas en el proceso. Estos recipientes, fabricados con materiales de alta resistencia térmica, previenen reacciones no deseadas e impurezas. La elección del crisol adecuado dependerá de las características térmicas y químicas de los materiales a evaporar.

En la siguiente tabla se presentan las temperaturas de evaporación de los compuestos precursores: PbI_2 (yoduro de plomo), $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (yoduro de metilamonio) y $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Br}$ (bromuro de metilamonio), a una presión de 1×10^{-5} mbar, que será la presión utilizada en la cámara de vacío.

Tabla 1

Temperaturas de evaporación de los compuestos, tomado de Wang et al. (2021).

| Compuestos precursores | Temperatura |
|---------------------------------------|-------------|
| PbI_2 (Yoduro de plomo) | 340°C |
| CH_3NH_3I (Yoduro de metilamonio) | 260°C |
| CH_3NH_3Br (Bromuro de metilamonio) | 260°C |

El crisol, en el cual se depositarán los precursores (ver Figura 2), está conformado por una pieza fabricada a partir de una barra de acero inoxidable 304, cuyas propiedades térmicas y eléctricas se describen en la Tabla 2. Esta pieza cuenta con dos perforaciones: una para introducir el compuesto a evaporar y otra, más pequeña, para fijar la termocupla. El crisol se calentará mediante una resistencia de abrazadera que lo rodea, a través de la cual fluirá la corriente proveniente de las fuentes.

Tabla 2

Propiedades térmicas y eléctricas del crisol de acero inoxidable 304, tomado de Carbono (sf).

| Crisol | T _{máx} [°C] | Resistividad eléctrica a 20°C [μΩ.m] | Conductividad térmica [W/m*K] |
|----------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Inox 304 | 1398-1454 | 0.72-0.73 | 15/16 |

Figura 2

Modelo de crisol y resistencia utilizados, tomado de los autores.



También es importante mencionar el sustrato (ver Figura 3), una pequeña lámina de vidrio sobre la cual los compuestos se irán depositando a medida que se evaporan, formando así la película delgada. Para garantizar una adecuada adhesión, el sustrato debe mantenerse a una temperatura entre 30°C y 100°C (Camilo et al., 2021).

Figura 3

Sustrato de vidrio, tomado de los autores.

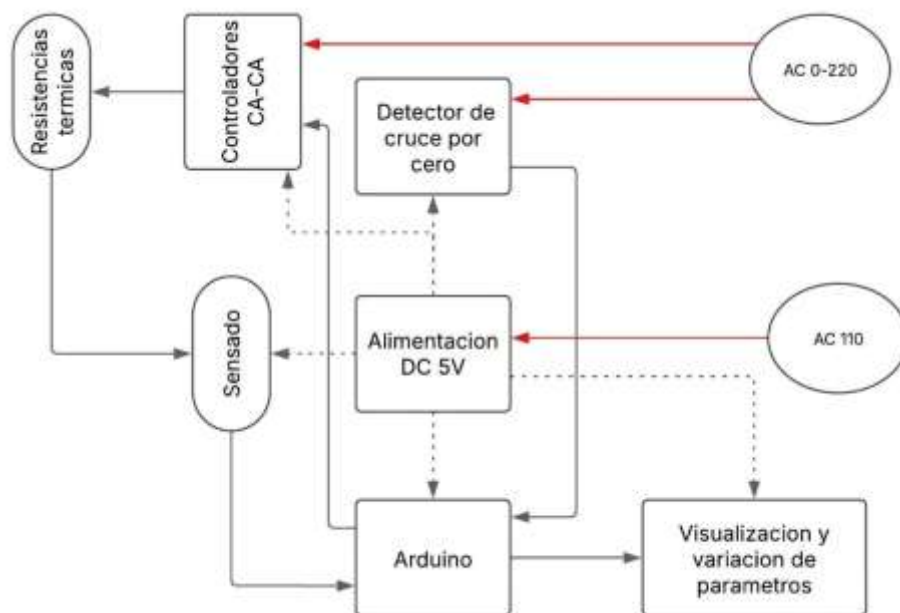


2.3 Sistema de control y potencia

Para llevar a cabo la evaporación de los compuestos de manera adecuada, es necesario contar con dos fuentes de alimentación capaces de llevar los crisoles a alcanzar temperaturas de hasta 340 °C, operando con corrientes hasta de 1.7A. Además, el sistema debe permitir la evaporación de los compuestos de forma secuencial (uno después del otro) o por co-evaporación (simultáneamente). Para el calentamiento del sustrato, se requiere una fuente que permita operar el sustrato en temperaturas entre 30°C y 100 °C, asegurando así la correcta adhesión de los compuestos en la formación de las películas delgadas. Un esquema general del sistema de control y potencia propuesto para la cámara de evaporación se presenta en la Figura 4. El sistema está estructurado en etapas para facilitar un diseño ordenado y eficiente. A continuación, se describen cada una de las etapas que lo constituyen.

Figura 4

Etapas y relaciones representadas como diagramas de bloques, tomado de los autores.



2.4 Etapa de sensado

En esta etapa, es necesario medir la temperatura en los recipientes donde se evaporan los compuestos precursores y en el sustrato. Para ello, el instrumento de medición debe ajustarse de manera óptima a los requerimientos del proceso. Se ha seleccionado un termopar tipo K, ya que su rango de temperatura es adecuado para esta aplicación, además de ser un dispositivo sencillo y de bajo costo (Smith et al., 2018). El principio de funcionamiento del termopar se basa en la unión de dos metales distintos, lo que genera una pequeña diferencia de potencial en milivoltios, la cual depende de la diferencia de temperatura entre sus extremos. Uno de estos extremos se denomina punto caliente o de medida, mientras que el otro es el punto frío (García & Pérez, 2020). En la Tabla 3 se presentan las especificaciones del termopar tipo K empleado en este trabajo.

Tabla 3

Especificaciones el termopar tipo k, tomado de Thermometrics Corporation, s.f.

| Tipo | Metales de unión | Rango de Temperatura[°C] | Precisión[°C] |
|------|-------------------------------|--------------------------|---------------|
| K | níquel/cromo- níquel/aluminio | -200 - 1200 | 2.2 |

Para garantizar una correcta adquisición de datos, se utilizó el módulo MAX6675 en conjunto con arduino. Este módulo, permite la lectura directa de la temperatura sin necesidad de recurrir a tablas de conversión (Microchip Technology, 2019). En la siguiente tabla se presentan las especificaciones de este módulo.

Tabla 4

Especificaciones del módulo MAX6675, tomada de hoja de datos.

| Resolución | Rango de temperatura operación [°C] | Rango de sensado de temperatura [°C] | Voltaje de alimentación [V] |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 12 bits, 0.25°C | -20 - 85 | 0 - 1024 | 5 |

2.5 Etapa de potencia

Esta etapa se encarga de transferir la potencia necesaria para el calentamiento de los crisoles y el sustrato de manera controlada. Se plantea diseñar e implementar un convertidor CA- CA monofásico controlado por fase, como se observa en la Figura 5. Este circuito está compuesto principalmente por un optoacoplador, el cual permite aislar eléctricamente las etapas de potencia y control, por otra parte, los TRIAC o triodos para corriente alterna (CA) que se encargan de variar el voltaje de salida a partir de señales de disparo recibidas en sus compuertas.

Para sincronizar las señales de disparo generadas por la etapa de control, se emplea un circuito de cruce por cero (ver Figura 6) para detectar el instante exacto en que la señal de la red eléctrica atraviesa este punto. Este momento se utiliza como referencia para disparar el TRIAC. Una vez detectado el cruce por cero, el TRIAC permanece apagado durante un tiempo determinado (t_1) antes de ser activado mediante un pulso de voltaje generado por el microcontrolador, tal como se observa en la Figura 7..

Una vez encendido, el TRIAC continúa conduciendo corriente sin necesidad de mantener el

pulso en la compuerta, y se apaga automáticamente en el siguiente cruce por cero de la corriente de la carga, si no recibe un nuevo pulso. Por tanto, no es necesario forzar su apagado; basta con evitar su reactivación. Es fundamental que el pulso de disparo tenga una duración mínima adecuada (t_2 en la Figura 7), ya que, si es demasiado corto, el TRIAC podría no activarse correctamente.

Al variar el ángulo de disparo, se controla la tensión eficaz entregada por las fuentes, en un rango de 0 a 220 V RMS, y la corriente, de 0 a 1.70 A RMS, considerando que el sistema opera conectado a la red eléctrica de 220 V RMS a 60 Hz.

Figura 5
Controlador CA-CA monofásico, tomado de los autores.

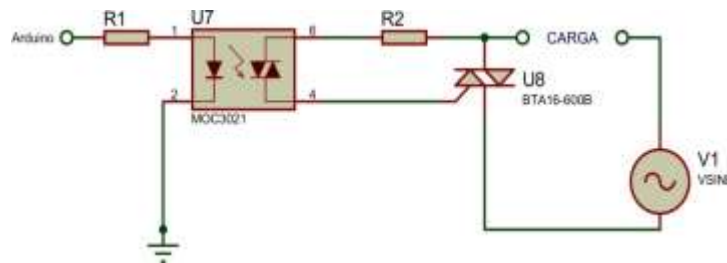


Figura 6
Circuito detector cruce por cero, tomado de los autores.

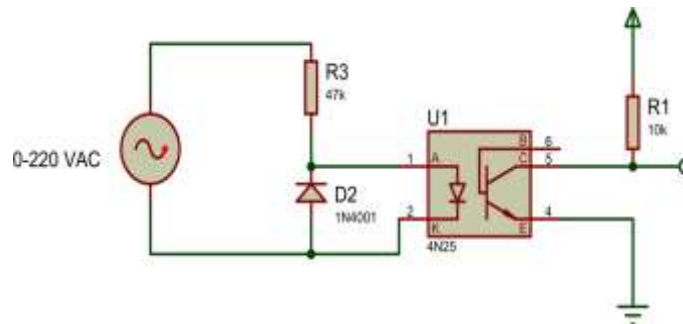
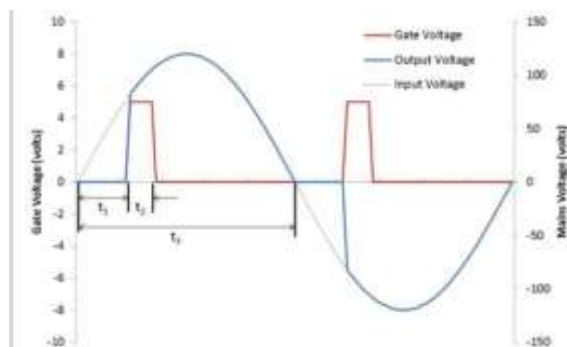


Figura 7
Gráfica de tiempos de referencia, tomado de Arduino (s.f)



2.6 Etapa de control

La etapa de control es responsable de mantener la temperatura deseada, actuando directamente sobre la etapa de potencia para regular el flujo de corriente necesario en el proceso de evaporación. Para diseñar un controlador adecuado para este proceso, es esencial determinar la función de transferencia del sistema de calentamiento. Esta función se utilizará posteriormente en el análisis mediante herramientas de software y métodos matemáticos. La obtención de la función de transferencia se realizará a través de pruebas experimentales, aplicando diferentes valores de voltaje sobre la planta y analizando los datos resultantes.

Se ha optado por implementar un controlador Proporcional-Integral (PI), ya que la acción integral ayuda a reducir la señal de error, mejorando la precisión en el control de la temperatura. Según Åström y Hägglund (2006), los controladores PI son ampliamente utilizados en sistemas térmicos debido a su capacidad para minimizar el error en estado estacionario sin introducir una oscilación excesiva en la respuesta del sistema.

Dorf y Bishop (2017) definen la función de transferencia del controlador PI como:

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (1)$$

Donde:

- $G(s)$ es la función de transferencia del sistema,
- k_i es la ganancia integral,
- s es la variable de Laplace,
- k_p es la ganancia proporcional.

Para la implementación de este sistema de control de temperatura, se emplea la placa Arduino Mega 2560 presentada en la Figura 8.

Figura 10

*Teclado matricial 4*4, tomada de Electrónica Made (s.f).*

**3. Diseño e implementación**

Este capítulo recopila la información y los circuitos empleados en el diseño e implementación de las fuentes de potencia. Se presentan las pruebas realizadas en laboratorio, la teoría de circuitos, los sistemas de control y simulaciones efectuadas mediante software.

3.1 Comportamiento del proceso de evaporación

Para iniciar el diseño de las fuentes de potencia, es fundamental comprender el comportamiento del sistema de calentamiento de los crisoles y los sustratos. Como se mencionó en el capítulo anterior, las fuentes destinadas a la evaporación de los compuestos deben permitir la variación de la velocidad de calentamiento, mientras que, en el caso del sustrato, es necesario mantener una temperatura controlada entre 30 °C y 100 °C.

Con este objetivo, se realizaron pruebas experimentales en el laboratorio, replicando un entorno lo más similar posible al sistema final para obtener datos precisos y confiables. Es importante señalar que estas pruebas iniciales se llevaron a cabo sin considerar el vacío final previsto en el proceso.

El sistema de calentamiento utilizado en las pruebas está compuesto por una fuente de voltaje alterno, implementada mediante un autotransformador, conductores eléctricos y una resistencia de abrazadera (ver Figura 12). A través de esta resistencia circula la corriente, generando calor por efecto

Joule, que luego se transfiere al crisol y al sustrato.

El calentamiento de los crisoles se llevó a cabo mediante resistencias idénticas de 130Ω ($R_{1,2}$), mientras que para el sustrato se usó una de 215Ω (R_3). En la Figura 11 se presenta un esquema básico del sistema, en el que R toma los valores mencionados según la carga en cada prueba. Asimismo, en la Figura 12 se pueden observar imágenes de las resistencias utilizadas y el montaje experimental dentro de la cámara de prueba.

Figura 11

Circuito utilizado para realizar pruebas iniciales de calentamientos, tomada de los autores.

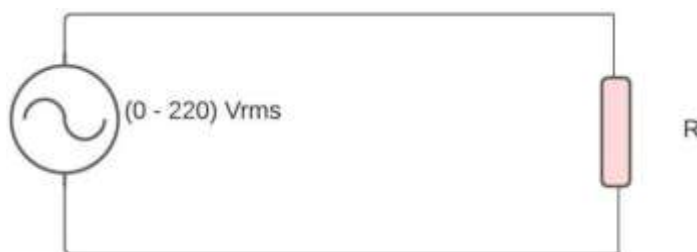


Figura 12

Montaje dentro de la cámara de vacío, tomada de los autores.



En el caso de las fuentes, es fundamental que la velocidad de calentamiento sea ajustable para que la temperatura máxima de $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ se alcance en un rango de aproximadamente 5 a 10 minutos. Para lograrlo, se reguló el voltaje de la fuente de corriente alterna, registrando los valores de voltaje y corriente

que permitieron cumplir con esta condición. Este proceso se basa en el efecto Joule, donde el paso de corriente a través de una resistencia genera calor proporcional a la potencia disipada (Kothandaraman & Subramanyan, 2012).

En la Figura 13 se presenta una gráfica con las curvas de temperatura, los valores correspondientes de corriente y voltaje se describen en la Tabla 5.

Figura 13

Curvas de temperatura durante el calentamiento de los crisoles, tomada de los autores.

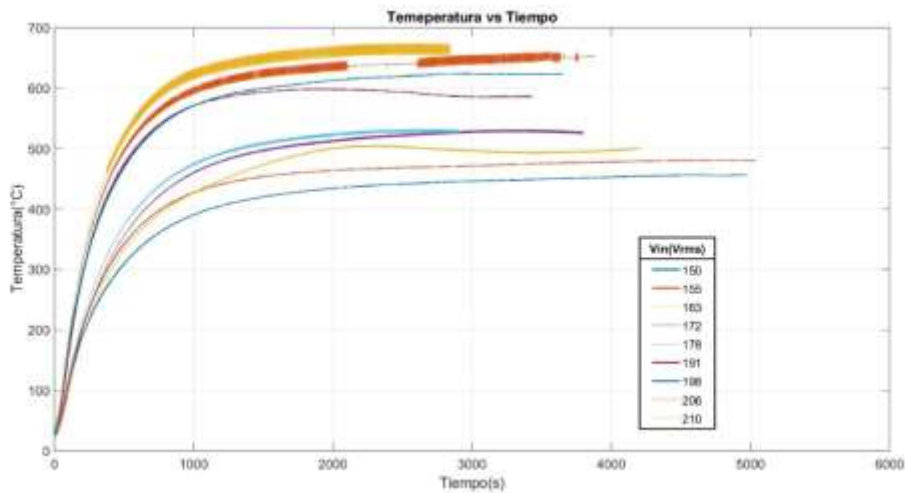


Tabla 5

Valores de voltaje y corriente medidos durante el calentamiento de los crisoles, tomada de los autores

| VOLTAJE [Vrms] | CORRIENTE [Arms] |
|----------------|------------------|
| 150 | 1,15 |
| 155 | 1,21 |
| 163 | 1,25 |
| 172 | 1,32 |
| 178 | 1,36 |
| 191 | 1,50 |
| 198 | 1,50 |
| 206 | 1,57 |
| 210 | 1,64 |

Para el calentamiento de los sustratos, como se mencionó anteriormente, es fundamental mantener la temperatura dentro del rango de 30 °C a 100 °C. Este control debe efectuarse antes de que la velocidad de calentamiento más rápida eleve la temperatura por encima de los 260 °C, lo cual ocurre en aproximadamente 3,16 minutos. En la Figura 14 se presenta una gráfica con las distintas curvas de temperatura y la Tabla 6 contiene los valores registrados de corriente y voltaje.

Figura 14

Curvas de temperatura durante el calentamiento del sustrato, tomada de los autores.

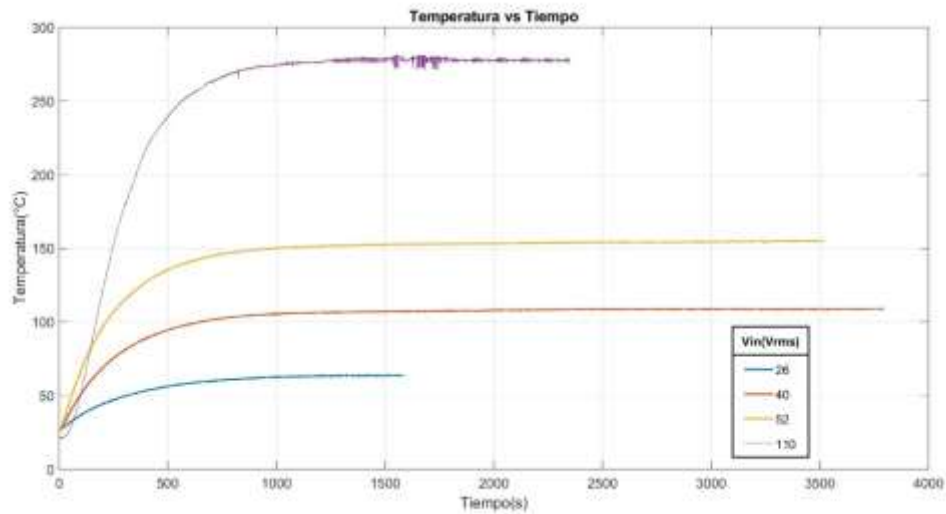


Tabla 6. *Datos de voltaje y corriente del calentamiento del sustrato, tomada de los autores.*

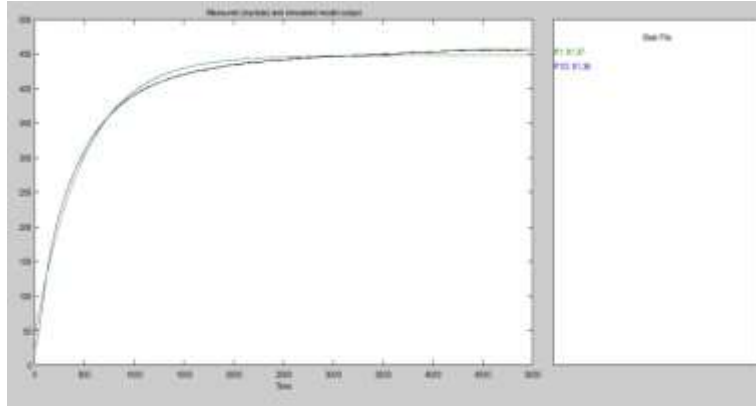
| <u>VOLTAJE [Vrms]</u> | <u>CORRIENTE [Arms]</u> |
|-----------------------|-------------------------|
| 26 | 0,12 |
| 40 | 0,19 |
| 52 | 0,24 |
| 110 | 0,56 |

3.2 Modelo matemático de la planta y diseño de los controladores

Después de obtener los datos experimentales, se utiliza la herramienta *Toolbox System Identification* de MATLAB para importar los datos de entrada y salida y estimar una función de transferencia que modele el comportamiento del proceso de calentamiento. Luego, con la herramienta *SISOTool* (ver Figura 15), se diseñan y ajustan los controladores según los parámetros especificados.

Figura 15

Modelo matemático vs. datos reales para una entrada de 150 Vrms utilizando la System Identification Toolbox, tomada de los autores.



Se estableció como criterio que el modelo obtenido debía presentar un porcentaje de concordancia del 90 % o superior con los datos experimentales. En las Tablas 7 y 8 se muestran las funciones de transferencia resultantes.

Tabla 7. *Funciones de transferencia obtenidas para los datos de calentamiento de los crisoles.*

| VOLTAJE [Vrms] | F(s) |
|----------------|---------------------------------|
| 150 | $\frac{0.006136}{s + 0.002056}$ |
| 155 | $\frac{0.007237}{s + 0.00237}$ |
| 163 | $\frac{0.006241}{s + 0.002039}$ |
| 172 | $\frac{0.006511}{s + 0.002138}$ |
| 178 | $\frac{0.00705}{s + 0.002383}$ |
| 191 | $\frac{0.009892}{s + 0.003159}$ |
| 198 | $\frac{0.009197}{s + 0.003032}$ |
| 206 | $\frac{0.00887}{s + 0.00286}$ |
| 210 | $\frac{0.009657}{s + 0.003076}$ |

Tabla 8. *Funciones de transferencia obtenidas para los datos de calentamiento del sustrato.*

| VOLTAJE [Vrms] | F(s) |
|-------------------|-----------------------------------|
| 26 | $\frac{0.007811}{(s + 0.003167)}$ |
| 40 | $\frac{0.009753}{(s + 0.003604)}$ |
| 52 | $\frac{0.001163}{(s + 0.003937)}$ |
| 110 | $\frac{0.02146}{(s + 0.00913)}$ |

Para el diseño de los controladores, se consideraron dos parámetros clave: el tiempo de asentamiento (t_s) y el porcentaje de sobrealto ($\%O_v$). El tiempo de asentamiento se ajustó de manera que coincidiera aproximadamente con el instante en que las curvas sin controlador alcanzaban las temperaturas de referencia (260 °C y 340 °C), garantizando que la variación entre estos tiempos fuera proporcional al voltaje de entrada (v_{rms}) (Ogata, 2020). En cuanto al porcentaje de sobrealto, se estableció como criterio que no superara el 3 % (Dorf & Bishop, 2017).

Los controladores fueron diseñados en el dominio discreto, ya que inicialmente se había previsto su implementación digital mediante ecuaciones en diferencias. Sin embargo, posteriormente se decidió utilizar la librería PID de arduino (PID_v1_bc by David Forrest, Arduino Reference), debido a su facilidad de implementación. Para adaptar el diseño, se realizó la conversión del controlador al dominio continuo, utilizando un tiempo de muestreo de 0.5s, correspondiente al intervalo de adquisición de datos.

En la Tabla 9 y 10 se muestran los controladores diseñados y sus respectivos parámetros, organizados según la temperatura de referencia.

Tabla 9. Controladores y sus parámetros para temperatura de referencia de 260°C.

| VOLTAJE [Vrms] | C(z) | C(s) | PARÁMETROS |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 150 | $\frac{3.4941(z - 0.9985)}{z - 1}$ | $\frac{3.4941(s + 0.003)}{s}$ | ts =360s; %Ov =2.32 |
| 155 | $\frac{2.7531(z - 0.99837)}{z - 1}$ | $\frac{2.7531(s + 0.00326)}{s}$ | ts =341s; %Ov =2.15 |
| 163 | $\frac{3.9031(z - 0.9985)}{z - 1}$ | $\frac{3.9031(s + 0.003)}{s}$ | ts =310s; %Ov =2.2 |
| 172 | $\frac{4.546(z - 0.99834)}{z - 1}$ | $\frac{4.546(s + 0.00332)}{s}$ | ts =280s; %Ov =2.33 |
| 178 | $\frac{2.7727(z - 0.9973)}{z - 1}$ | $\frac{2.7727(s + 0.0054)}{s}$ | ts =253s; %Ov =2.07 |
| 191 | $\frac{3.6928(z - 0.99767)}{z - 1}$ | $\frac{3.6928(s + 0.00466)}{s}$ | ts =210s; %Ov =2.26 |
| 198 | $\frac{4.1379(z - 0.998)}{z - 1}$ | $\frac{4.1379(s + 0.004)}{s}$ | ts =183s; %Ov =2.01 |
| 206 | $\frac{4.88(z - 0.99785)}{z - 1}$ | $\frac{4.88(s + 0.0043)}{s}$ | ts =154s; %Ov =2.01 |
| 210 | $\frac{5.1605(z - 0.99765)}{z - 1}$ | $\frac{5.1605(s + 0.0047)}{s}$ | ts =140s; %Ov =2.03 |

Tabla 10. Controladores y sus parámetros para temperatura de referencia de 340°C.

| VOLTAJE [Vrms] | C(z) | C(s) | PARÁMETROS |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 150 | $\frac{1.6082(z - 0.9986)}{z - 1}$ | $\frac{1.6082(s + 0.0028)}{s}$ | ts =594s ; %Ov =2.1 |
| 155 | $\frac{1.5752(z - 0.99842)}{z - 1}$ | $\frac{1.5752(s + 0.00316)}{s}$ | ts =560s ; %Ov =2.34 |
| 163 | $\frac{1.9635(z - 0.99865)}{z - 1}$ | $\frac{1.9635(s + 0.0027)}{s}$ | ts =510s ; %Ov =2.12 |
| 172 | $\frac{2.3477(z - 0.99854)}{z - 1}$ | $\frac{2.3477(s + 0.00292)}{s}$ | ts =450s ; %Ov =2.25 |
| 178 | $\frac{1.6863(z - 0.998)}{z - 1}$ | $\frac{1.6863(s + 0.004)}{s}$ | ts =410s ; %Ov =2.25 |
| 191 | $\frac{1.8567(z - 0.99793)}{z - 1}$ | $\frac{1.8567(s + 0.00414)}{s}$ | ts =327s ; %Ov =2.04 |
| 198 | $\frac{3.2136(z - 0.99803)}{z - 1}$ | $\frac{3.2136(s + 0.00394)}{s}$ | ts =281s ; %Ov =2.33 |
| 206 | $\frac{3.8975(z - 0.99785)}{z - 1}$ | $\frac{3.8975(s + 0.0043)}{s}$ | ts =230s ; %Ov =2.32 |
| 210 | $\frac{4.149(z - 0.99765)}{z - 1}$ | $\frac{4.149(s + 0.0047)}{s}$ | ts =204s ; %Ov =2.34 |

Para el caso del sustrato, se diseñó un único controlador (ver Tabla 11), ya que no se requiere regular la velocidad de calentamiento.

Tabla 11. Controlador y sus parámetros para el calentamiento del sustrato.

| VOLTAJE [Vrms] | C(z) | C(s) | Parámetros |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 110 | $3.6011(z - 0.99735) / (z - 1)$ | $(3.6011(s + 0.01321)) / s$ | $t_s = 100s; \%O_v = 2.51$ |

3.3 Hardware: Diseño de los circuitos.

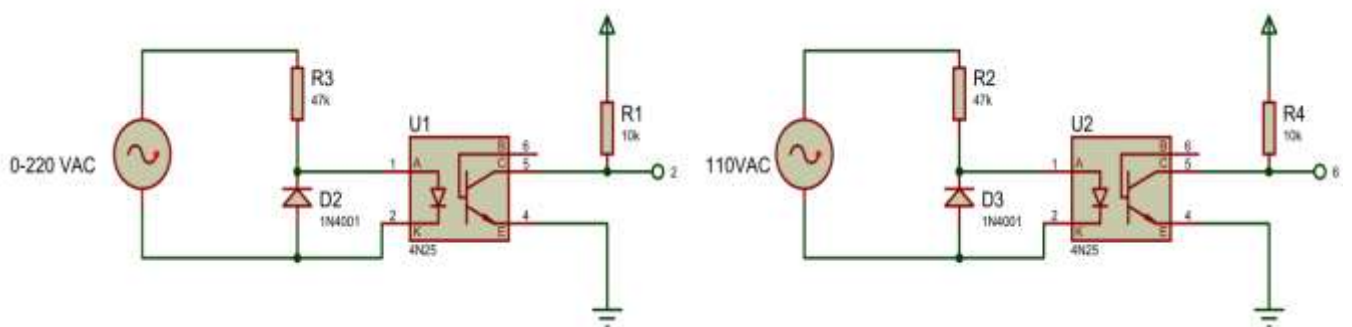
3.3.1 Control de potencia

Como se mencionó en el capítulo anterior, el sistema de control está compuesto principalmente por convertidores CA-CA, cuya función es modificar la tensión eficaz suministrada. Para una mejor comprensión de su implementación, el sistema se dividirá en dos secciones: La primera se encargará de la detección de los cruces por cero de la señal de alimentación, los cuales servirán como referencia para la correcta ejecución de los ángulos de disparo, mientras que la segunda se encargará de la regulación de la tensión eficaz.

3.3.1.1 Detección de cruce por cero

Figura 16

Circuito detector cruce por cero, tomada de los autores.



En la figura anterior, la señal de tensión proveniente de la fuente de alimentación atraviesa una resistencia de $47k\Omega$, la cual reduce el nivel de tensión para evitar daños en los componentes posteriores.

A continuación, se emplea un diodo 1N4001 (*Apéndice A*) como elemento de protección, permitiendo únicamente el paso de la parte positiva de la señal hacia el LED interno del optoacoplador 4N25 (*Apéndice B*).

El led del optoacoplador se enciende cuando la tensión en sus terminales supera su tensión de encendido (aproximadamente 1.15V según la hoja de datos). Cuando esto sucede, el fototransistor del optoacoplador se activa, permitiendo el paso de corriente y estableciendo la salida en nivel bajo (cerca a 0V).

Cuando la señal de entrada cae por debajo del umbral de encendido del LED, este se apaga, provocando que el fototransistor deje de conducir. En este estado, la resistencia de $10k\Omega$ conectada a una fuente de 5V mantiene la salida en nivel alto 5V, generando un pulso positivo. En la Figura 17 se observa la simulación del circuito en el software proteus, y en la Figura 18 la prueba experimental del circuito utilizando un osciloscopio.

Figura 17

Simulación detector cruce por cero, tomada de los autores.

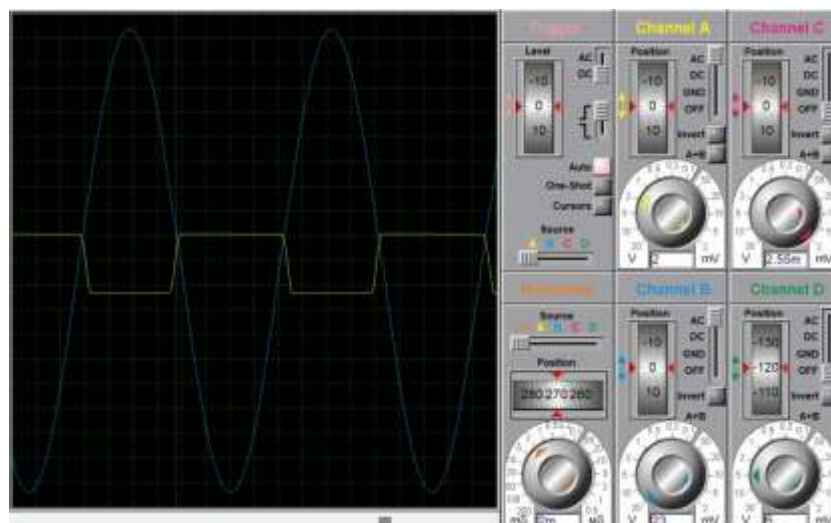
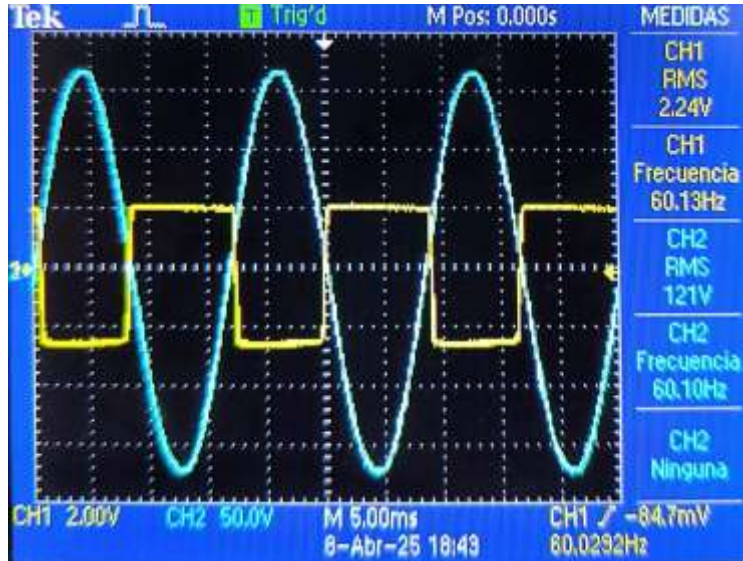


Figura 18

Forma de onda detector cruce por cero (señal amarilla) vs señal de entrada (señal azul), tomada de los autores.



3.3.1.2 Controlador CA-CA

Este circuito regula el voltaje eficaz suministrado por las fuentes mediante un control preciso de los ángulos de disparo. Para ello, utiliza como referencia la señal generada por el circuito de cruces por cero (Figura 16), garantizando una sincronización precisa en la conmutación de los TRIAC. La Figura 19 muestra el esquemático utilizado de los controladores CA-CA y la Figura 20 su implementación final en PCB (por las siglas en inglés de *Printed Circuit Board*).

Figura 19

Circuito para el control de potencia, tomada de los autores.

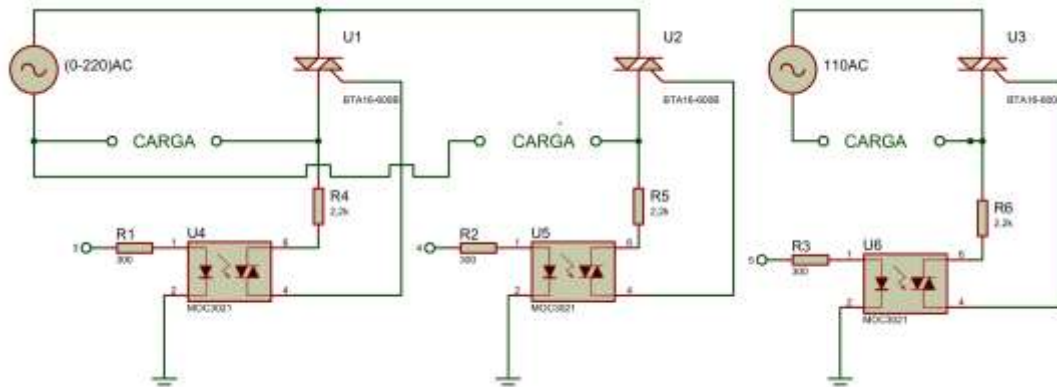


Figura 20

Controlador CA-CA implementado, tomada de los autores.

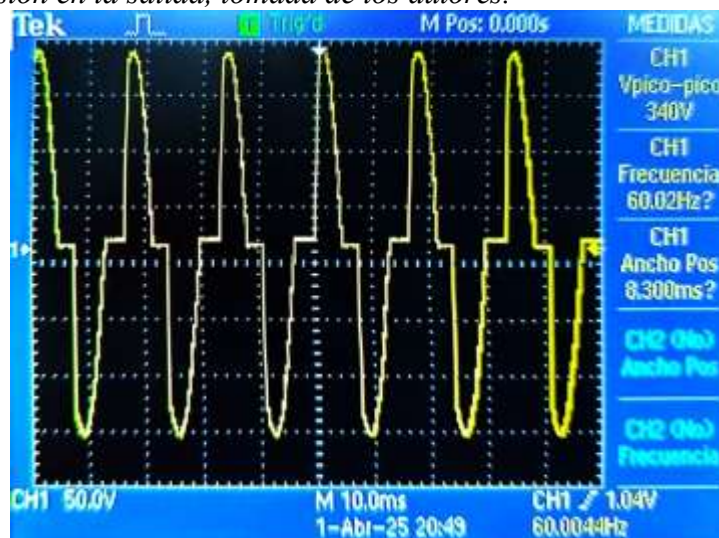


La señal de disparo generada es enviada a través del optoacoplador MOC3021 (Apéndice C), el cual proporciona aislamiento eléctrico entre la etapa de control y la de potencia, garantizando la seguridad del circuito. El MOC3021 genera un pulso de activación que se dirige a las compuertas de los TRIAC BTA16 (Apéndice D), permitiendo el paso de corriente en el instante determinado por el ángulo de disparo programado. De esta manera, se regula el voltaje eficaz aplicado a la carga, ajustándose dinámicamente según la temperatura requerida, se puede observar un ejemplo de la señal de voltaje obtenida en la carga en las pruebas experimentales.

Este ajuste de voltaje dependerá directamente de la velocidad de calentamiento deseada y de la temperatura de referencia, permitiendo un control preciso del proceso.

Figura 21

Forma de onda de tensión en la salida, tomada de los autores.



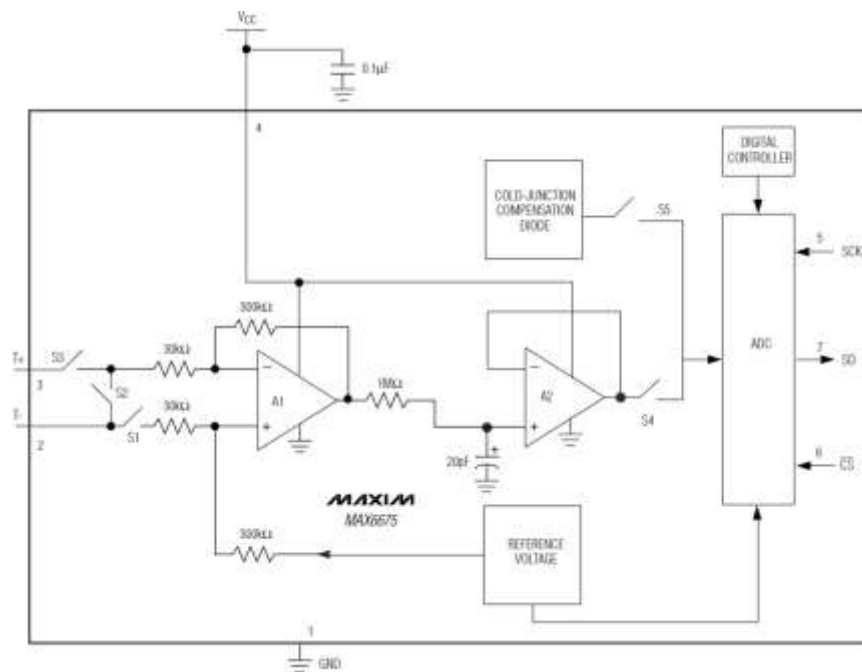
3.3.2 Otros circuitos y dispositivos necesarios

3.3.2.1 Acondicionamiento de las señales de las termocuplas

Para la adquisición de las señales generadas por las termocuplas, es fundamental emplear dispositivos de acondicionamiento y procesamiento que garanticen una medición precisa de la temperatura. Para este propósito, se ha utilizado el módulo MAX6675 representado en diagrama de bloques en la Figura 22, un convertidor termopar-digital que incorpora un convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits, mejorando la precisión y estabilidad de la medición (Maxim Integrated, 2021).

Figura 22

Diagrama de bloques módulo MAX6675, tomada de la hoja de datos.



Las entradas T+ y T- se conectan a circuitos internos que reducen la introducción de errores de ruido procedentes de los cables del termopar. Antes de convertir los voltajes termoeléctricos en valores de temperatura equivalentes, es necesario compensar la diferencia entre el lado de la unión del termopar (temperatura ambiente del MAX6675) y una referencia virtual de 0°C. Para un termopar de tipo K, la tensión cambia en una relación de $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, lo que aproxima la característica del termopar con la

siguiente ecuación lineal (*Apéndice E*). La relación entre la tensión de salida y la variación de temperatura en un termopar tipo K se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_{OUT} = (41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}) \times (T_R - T_{AMB}) \quad (2)$$

donde V_{OUT} es el voltaje generado, T_R es la temperatura de referencia y T_{AMB} es la temperatura ambiente. Esta ecuación se basa en la sensibilidad típica de los termopares tipo K, que es de aproximadamente $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (Thermometrics Corporation, s.f.).

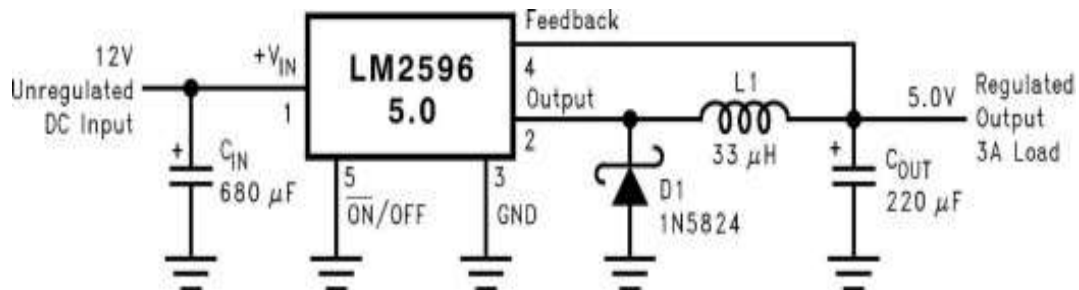
Finalmente, utilizando la biblioteca MAX6675 de Arduino, es posible visualizar en tiempo real la variación de temperatura detectada por las termocuplas.

3.3.2.2 Alimentación externa de 5V

Algunos de los dispositivos y circuitos utilizados requieren una fuente de alimentación de 5V DC, como el módulo MAX6675, el optoacoplador 4N25 y la placa Arduino, la cual no será alimentada desde un ordenador. Para este propósito, se hace necesaria una fuente de alimentación externa. En este caso, se empleó el regulador de voltaje LM2596 (*Apéndice F*), el cual permite obtener una salida estable de 5V DC a partir de la señal de entrada en DC obtenida de un adaptador AC/DC con un rango de entrada de 100-240V AC, tal como se observa en la Figura 23.

Figura 23

Esquemático LM2596, tomada de Texas Instruments, s.f.



3.4 Montaje Final

Para el montaje final (ver Figura 24), se integraron todas las etapas y circuitos previamente mencionados, utilizando la placa Arduino Mega 2560 como unidad central para el control del sistema. Además, se incorporó un interruptor de riel bipolar (2 X 6 AMP 6 kA) para proteger el circuito y controlar el paso de la señal de alimentación del sistema.

Figura 24

Montaje completo, tomada de autores.



4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la evaluación del sistema completo, empleando los circuitos e interfaz diseñados, con el propósito de verificar el cumplimiento de los objetivos inicialmente propuestos.

4.1 Pruebas de ángulos de disparo

La red eléctrica opera a una frecuencia de 60 Hz, lo que implica que cada semiciclo de la señal de corriente alterna (CA) dura aproximadamente 8,33 milisegundos. Por su parte, el microcontrolador de la placa arduino funciona con un reloj de 16 MHz, lo que se traduce en un tiempo de 0,0625 microsegundos por ciclo.

Si se calcula el número de ciclos de reloj de la placa arduino en un semiciclo de la señal de CA de la red eléctrica, se obtiene un total cercano a 133333 ciclos. Si se emplea un temporizador con un preescalador de 256, el resultado es aproximadamente 521 conteos efectivos del temporizador por cada semiciclo de 60 Hz:

$$\frac{133333}{256} \approx 521 \quad (3)$$

Este valor representa la cantidad de conteos aproximados que el temporizador debe realizar para abarcar un semiciclo de la señal de CA (Arduino, s.f.). Este dato permite relacionar aproximadamente el ángulo de disparo del TRIAC con el valor RMS deseado.

Para lograr un control preciso del TRIAC, se emplean interrupciones y temporizadores en el microcontrolador, permitiendo una sincronización entre la señal de control y la señal de corriente alterna (CA). Esta sincronización comienza con la detección del cruce por cero de la señal de CA, utilizando un pin de interrupción externa de la placa Arduino. Cuando se detecta un flanco (ascendente o descendente), se reinician los contadores de los temporizadores para iniciar un nuevo ciclo de control o comenzar un nuevo conteo. El momento en que se dispara cada TRIAC depende del valor cargado en los registros (valor de conteo), cada temporizador comienza a contar desde cero hasta alcanzar el valor definido en su registro correspondiente. Al llegar a ese valor, se genera una interrupción que se encarga de activar el TRIAC enviando un pulso alto al pin correspondiente.

Al mismo tiempo, se activa una bandera que inicia un contador encargado de mantener el pulso durante un breve lapso (ancho del pulso). Una vez transcurrido este tiempo, la señal se apaga, pero el TRIAC continúa conduciendo hasta el siguiente cruce por cero, gracias a su comportamiento interno.

Para el inicio de las pruebas, se conectó la resistencia que calienta el sustrato con el objetivo de realizar un barrido inicial en el rango de conteo entre **10** (rango mínimo de seguridad) a **500 ciclos**. Para ello, se empleó un código de programación (*Apéndice G*) con la lógica anteriormente explicada.

En la Figura 25 se observa la forma de onda de tensión de salida recortada con los respectivos pulsos de disparo del TRIAC, que corresponde a una de las pruebas experimentales realizadas, y en la Tabla 12 están relacionados los datos de voltaje de salida RMS con sus respectivos ángulos de disparo, utilizando una señal de entrada en AC de 120 Vrms.

Figura 25

Forma de onda de tensión de salida (señal amarilla) y pulsos de disparo (señal azul), tomada de los autores.

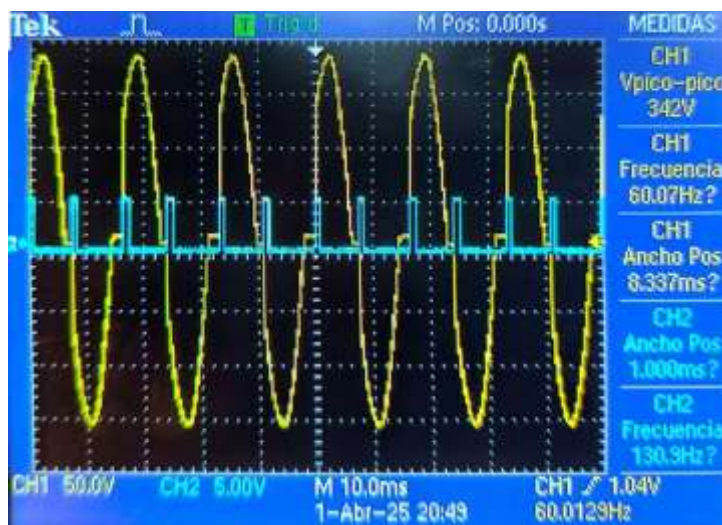


Tabla 12. *Relación entre el valor de conteo y tensión eficaz de salida para una alimentación de 120 Vrms. Tomada de los autores.*

| VALOR CUENTA (Unidades) | ANGULO (Grados°) | VOLTAJE SALIDA (Vrms) |
|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 10 | 3 | 119 |
| 50 | 17 | 115 |
| 100 | 35 | 111 |
| 150 | 52 | 105 |
| 200 | 69 | 93 |
| 250 | 86 | 86 |
| 300 | 104 | 76 |
| 350 | 121 | 68 |
| 400 | 138 | 55 |
| 450 | 155 | 39 |
| 500 | 173 | 4 |

Los resultados obtenidos fueron consistentes con las expectativas teóricas, considerando que, para una cuenta de 0, el voltaje de salida es equivalente al voltaje de alimentación 120 Vrms. Por otro lado, cuando la cuenta alcanza un valor de 500, la salida se reduce a aproximadamente 0 V.

4.2 Pruebas de Control

Se diseñó una rutina de control de temperatura utilizando como base el código de control de disparos implementando controladores PI usando la librería PID_v1_bc.h (*Apéndice H*). El rango de salida de los controladores está entre 0 y 100, que está relacionado con el porcentaje de potencia que debe entregarse a la carga de acuerdo con el cálculo del error. Con la función map(), se establece una relación inversa con el rango de conteo (10 – 500) anteriormente descrito, es decir, entre mayor sea el valor de salida del controlador PI (mayor potencia requerida) menor será el ángulo de disparo requerido.

Se utilizó como entrada del sistema el autotransformador mencionado en el apartado 4.1 y el controlador CA-CA como actuador. Cada fuente recibe el mismo voltaje de entrada, pero con *setpoints* distintos según las temperaturas de los compuestos.

4.2.1 Co-evaporación

Inicialmente, se evaluó la técnica de co-evaporación, en la cual ambas fuentes operan para conseguir una evaporación simultáneamente. Para optimizar el control, se ajustaron los coeficientes de los controladores diseñado reduciendo el error, ver (*Apéndice I*). Para la ejecución de las pruebas, se implementó una interfaz (*Apéndice J*). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los distintos valores de voltaje de entrada.

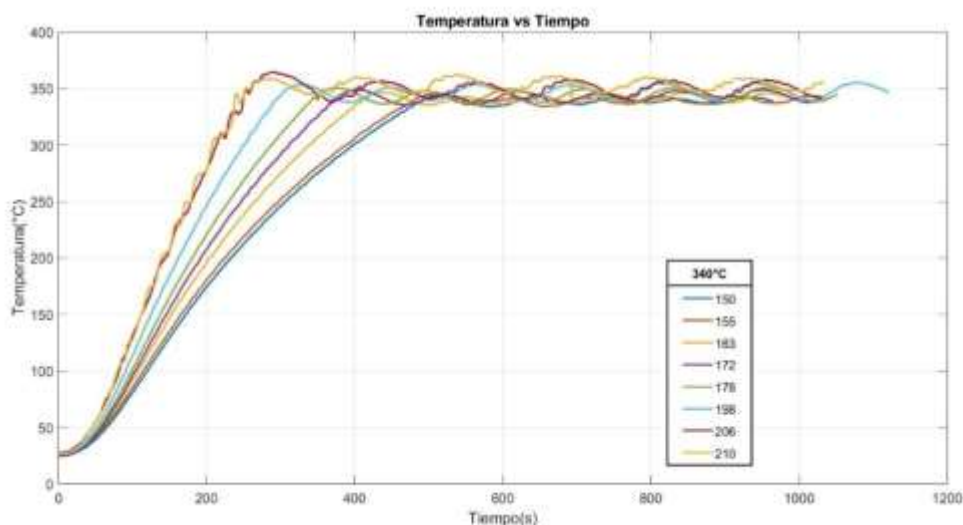
Tabla 13. *Relación entre voltajes de entrada y tiempo en el que los crisoles llegan al set point, tomado de los autores.*

| VALOR VOLTAJE DE ENTRADA [Vrms] | TIEMPO PARA 260°C [s] | TIEMPO PARA 340°C [s] |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 150 | 356 | 500 |
| 155 | 338 | 480 |
| 163 | 298 | 412 |
| 172 | 274 | 374 |

| | | |
|-----|-----|-----|
| 178 | 254 | 343 |
| 191 | 223 | 294 |
| 198 | 207 | 274 |
| 206 | 197 | 250 |
| 210 | 187 | 235 |

Figura 25

Curvas temperatura vs. tiempo para fuente 1 setpoint 340 °C, tomada de los autores.

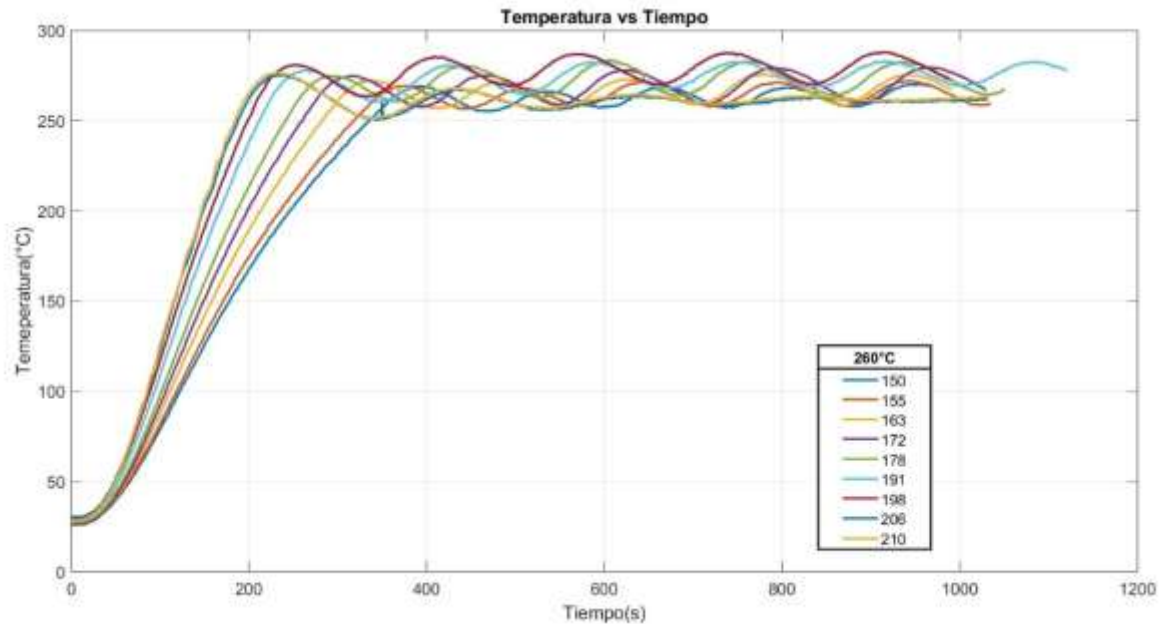


Tal como se observa en las figuras 25 y 26, el sistema alcanza distintas velocidades de calentamiento, cumpliendo con el objetivo planteado. Además, se identifica que, a medida que se incrementa el voltaje de entrada, la capacidad del sistema para mantener el setpoint se ve comprometida. Esto se debe a la naturaleza del sistema, ya que un mayor voltaje de entrada implica un aumento en la corriente, lo que a su vez genera una mayor disipación térmica.

Así mismo, dado que la transferencia de calor en el crisol ocurre desde la resistencia hacia el material contenido en su interior, y considerando que el sensor de temperatura se encuentra ubicado cerca del centro del crisol, se genera un retraso en la respuesta del control. Este retardo térmico es consecuencia de la propagación del calor desde el borde del crisol hacia su centro, afectando la estabilidad y precisión del control de temperatura.

Figura 26

Curvas temperatura vs. tiempo para fuente 2 setpoint 260 °C, tomada de los autores.



En la segunda fuente, también se obtienen distintas velocidades de calentamiento (ver Figura 26). En este caso, el efecto sobre el control del setpoint es más notable, debido a la menor temperatura que debe mantenerse.

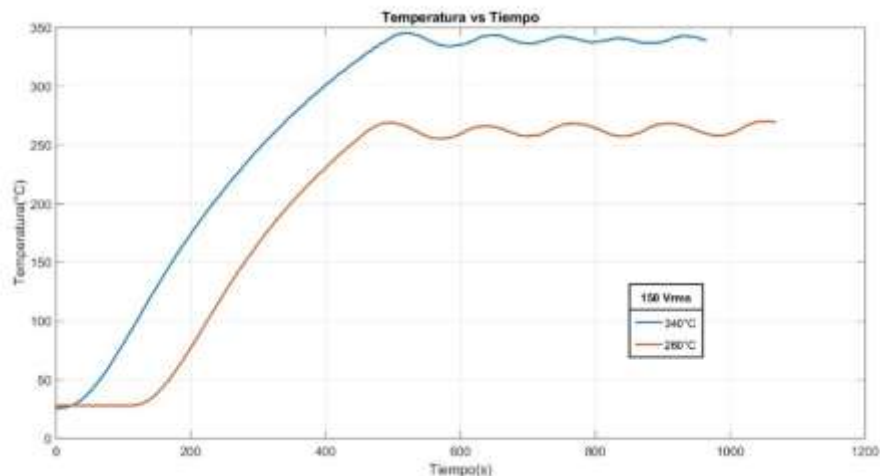
4.2.2 Secuencial

Para implementar la técnica secuencial, es fundamental gestionar qué fuente se activa y en qué momento, ya que, a diferencia de la co-evaporación, se requiere que ambas no inicien la evaporación simultáneamente, aunque se mantenga la variación en las velocidades de calentamiento.

El procedimiento consiste en seleccionar inicialmente un voltaje de entrada acorde con la velocidad de calentamiento deseada y luego definir qué fuente se activa primero y el tiempo de retraso antes de encender la segunda (ver Figura 27).

Figura 27

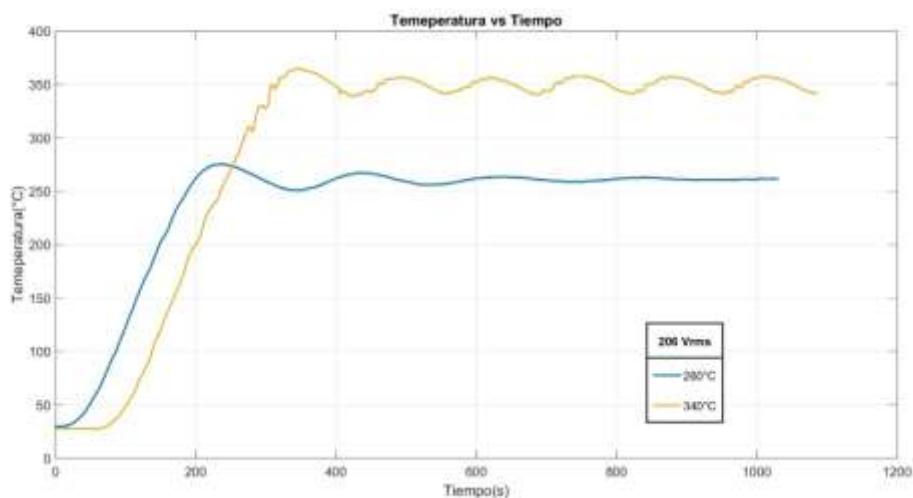
Curva de temperatura evaporación secuencial para entrada de 150 Vrms, tomada de los autores.



Para la primera prueba se empleó una tensión de entrada de 150 Vrms y se configuró un retardo de 105 s para la activación de la fuente 2. Tal como se observa en la Figura 27, se evidencia un desfase en el inicio del incremento de temperatura del crisol 2. Es relevante aclarar que los 105 s corresponden al intervalo de tiempo que el controlador espera, posterior a la activación de la fuente 1, antes de habilitar el disparo del TRIAC asociado a la fuente 2 e iniciar la rutina de control del crisol 2. Este valor no representa el instante en que la temperatura comienza a incrementarse, sino el momento de activación lógica del sistema de control para dicho crisol.

Figura 28

Curva de temperatura evaporación secuencial para una entrada de 206Vrms, tomada de los autores.

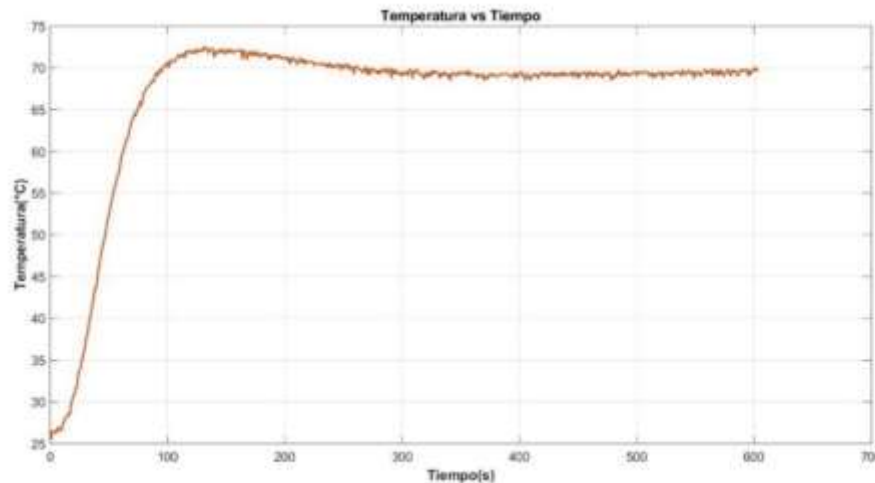


En la segunda prueba (Figura 28) se aplicó una tensión de entrada de 206 Vrms. En esta configuración, la fuente 2 se encuentra activa desde el inicio, y se establece un retardo de 55 s para la activación de la fuente 1.

4.2.3 Sustrato

Figura 29

Curva temperatura vs. tiempo para el sustrato setpoint 70 °C, tomada de los autores



En el caso del sustrato, las condiciones requeridas consisten en mantener la temperatura dentro de un rango de 30 a 100 °C, asegurando que dicho valor se alcance antes de iniciar el proceso de evaporación de los compuestos. Tal como se muestra en la Figura 29, estas condiciones se cumplieron de manera adecuada durante las pruebas. Se observó que, debido a la transferencia de calor más directa hacia el sustrato, la única anotación en su control térmico radica en la acumulación de calor dentro de la cámara, una variable que no puede ser controlada de forma directa por el sistema. No obstante, esto no representó un inconveniente significativo, ya que, según las especificaciones del proceso, el sustrato debía mantenerse dentro del rango previamente establecido, y en ningún momento durante los ensayos experimentales se superaron dichos límites.

En el *Apéndice K* se encuentra un manual de uso para entender la manera correcta de utilizar la interfaz diseñada.

5. Conclusiones

En este trabajo de grado se implementó un sistema de control de temperatura para dos crisoles y un sustrato en una cámara, utilizando fuentes de potencia que operan mediante dos técnicas de evaporación: co-evaporación y secuencial. El sistema, diseñado con versatilidad y facilidad de uso, incorpora una interfaz que permite visualizar en tiempo real la variación de temperaturas y seleccionar el método de evaporación, además de integrar un esquema de control independiente para cada curva de temperatura requerida.

Teniendo en cuenta estudios previos realizados por el codirector de este trabajo, cuya experiencia fue determinante para identificar los requerimientos necesarios, se implementaron soluciones que optimizan el proceso de fabricación de películas mediante técnicas innovadoras. Aunque no se realizaron pruebas bajo condiciones de vacío, la experiencia obtenida y los ajustes implementados confirman la eficacia y adaptabilidad del sistema.

Al tener contacto directo con esta línea investigativa, se prevé que la solución planteada es un punto de inicio que será de gran utilidad en el ámbito académico para futuras investigaciones. Comprendiendo los desafíos inherentes a este tipo de estudios, se implementó una propuesta inicial que responde a las necesidades identificadas y abre nuevas oportunidades para el desarrollo y optimización de procesos en el control de la evaporación.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas en condiciones de vacío para evaluar el comportamiento del sistema en un entorno más cercano a su aplicación real y validar su desempeño en estas condiciones.

Además, se sugiere implementar técnicas de control mejoradas o avanzadas que tengan en cuenta los tiempos de retardo inherentes a la naturaleza del sistema y la velocidad de calentamiento requerida, eliminando el uso del autotransformador y permitiendo que el controlador CA-CA regule la temperatura de los crisoles según las necesidades del sistema. Esta diversificación haría que el sistema sea más adaptable y dinámico para distintas aplicaciones y condiciones de operación.

Por último, se recomienda el desarrollo de una interfaz gráfica más interactiva e intuitiva, que facilite la visualización y ajuste de parámetros, mejorando la experiencia del usuario y la operatividad del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Arduino. (s.f.-a). Arduino Uno Rev3 - Datasheet. Arduino Documentation. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
- Arduino. (s.f.-b). AC phase control. Arduino Playground. <https://playground.arduino.cc/Main/ACPhaseControl/>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). Advanced PID Control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- BricoPantalla LCD 20x4 píxeles. Bric<https://tienda.bricogeek.com/descatalogado/178-pantalla-lcd-20x4-caracteres.html>
- Camilo, O., Botero, M., Mantilla, M. A., Petit, J. F., Rogelio, O., & Gerardo, G. (2021). Hybrid perovskite films deposited by thermal evaporation from a single source. *Journal of Materials Science. Materials in Electronics*, 32(9), 12151-12163. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05844-3>
- Carbono. (sf). Ficha técnica acero inoxidable. Carbono. <https://www.carbone-data.com/pdf/shopify/ficha-tecnica-acero-inoxidable.pdf>
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.
- Electronic Clinic. (s.f.). MOC3021 light dimmer triac BTA16 zero crossing detector Arduino. Electronic Clinic. <https://www.electronicclinic.com/moc3021-light-dimmer-triac-bta16-zero-crossing-detector-arduino/>
- Electrónica hecha. (s.f.). Teclado matricial 4x4: Guía completa. ele<https://electronicamade.com/teclado-matricial-4x4/>
- García, R., & Pérez, M. (2020). *Sensores de temperatura y su aplicación en sistemas de control térmico*. Editorial Científica.
- Kothandaraman, C. P., & Subramanyan, S. (2012). *Heat and mass transfer data book*. New Age International.
- Microchip Technology. (2019). MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple to Digital Converter [Datasheet].
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Transición energética en Colombia*. https://www.minenergia.gov.co/documents/5856/TRANSICION_ENERGETICA_COLOMBIA_BID-MINENERGIA-2403.pdf
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2012). *Power electronics: Converters, applications, and design* (3rd ed.). Wiley.

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024a). CdTe and CIGS photovoltaics research. <https://www.nrel.gov/pv/cdte-cigs.html>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024b). Perovskite solar cells. <https://www.nrel.gov/pv/perovskite-solar-cells.html>
- Ogata, K. (2020). Ingeniería de control moderna (6th ed.). Pearson.
- Ohring, M. (2001). Materials science of thin films. Academic Press. o3-mini
- Park, S., Lee, H., & Kim, J. (2023). Advances in thermal evaporation techniques for perovskite solar cells. *ACS Energy Letters*, 8(4), 1456-1465. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsenergylett.3c01234>
- Presidencia de la República de Colombia. (2024, 10 de febrero). Avance en transición energética: Más del 10 % de la energía consumida en Colombia ya es solar. <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Avance-en-Transicion-Energetica-mas-del-10-porciento-de-la-energia-consumida-en-Colombia-ya-es-solar-250210.aspx>
- Reinoso, M. Á., Otálora, C. A., & Gordillo, G. (2019). Propiedades de mejora de películas delgadas de perovskita de haluro híbrido preparadas por evaporación secuencial para células solares planas. *Materials*, 12(9), 1394. <https://doi.org/10.3390/ma12091394>
- SER Colombia. (2025, febrero). Informe de avance de proyectos FNCER 2025. <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2025/02/informefeb2025.pdf>
- Smith, D. L. (1995). Thin film deposition: Principles and practice. McGraw-Hill.
- Smith, J., Brown, K., & Taylor, P. (2018). Measurement and Instrumentation: Principles and Applications. Elsevier.
- Texas Instruments. (s.f.). LM2596: SIMPLE SWITCHER® 150-kHz, 3-A Step-Down Voltage Regulator [Ficha técnica]. Recuperado de <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- Thermometrics Corporation. (s.f.). Type K Thermocouple (Chromel / Alumel). Recuperado de <https://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>
- Wang, K., Ecker, B., Huang, J., & Gao, Y. (2021). Evaporation of methylammonium iodide in thermal deposition of MAPbI₃. *Nanomaterials*, 11(10), 2532. <https://doi.org/10.3390/nano11102532>

Apéndices

Los apéndices están adjuntos

Apéndice A. Hoja de datos diodo 1N4001

Apéndice B. Hoja de datos optoacoplador 4N25

Apéndice C. Hoja de datos optoacoplador MOC3021

Apéndice D. Hoja de datos BTA16

Apéndice E. Hoja de datos MAX6675

Apéndice F. Hoja de datos LM2596

Apéndice G. Código arduino disparos.

Apéndice H. Código arduino controladores PI.

Apéndice I. Lista de controladores implementados.

Apéndice J. Código arduino interfaz.

Apéndice K. Manual de uso.