

Implementación de una fuente de potencia con potencial aplicación para la evaporación multietapa en la fabricación de celdas solares de película delgada.

Autores

Angie Yaritza Sánchez Varela

Jorge Andrés Lara Porras

Trabajo de Grado para optar el título de ingeniero electricista

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos

Dra. En Ingeniería

Codirector

Mónica Andrea Botero Londoño

Dra. En Ciencias-Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Dedico este logro primeramente a Dios por darme salud y vida para llegar hasta este punto. A mi familia, especialmente a mi padre Florentino quien ha sido incondicional desde el inicio, por su ejemplo, sus consejos, su sacrificio, comprensión y por ser esa persona que me ha llenado de amor. A a mi madre Cecilia por enseñarme a enfrentar las situaciones con carácter, a mis hermanos por llevar toda una vida cuidando mis pasos, a mis sobrinos por llenarme de alegría e incentivarme a ser una mejor persona y a Milu por darme su compañía durante sus años de vida llenándome de felicidad y amor.

Esta es la oportunidad de agradecer a dos personas especiales Andrés y Jefferson que, por sus consejos, apoyo, paciencia y compañía fue posible culminar esta etapa y se han convertido en una segunda familia para mí. Gracias por creer en mi aun en aquellos momentos que dude de mis capacidades.

Finalmente agradezco a la directora de este proyecto de grado la profesora María Alejandra por su colaboración, ayuda y guía en el desarrollo de este proyecto de grado.

Angie Yaritza Sánchez Varela.

Dedico este logro principalmente a Dios por haberme dado la vida y permitirme haber llegado a este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre por ser el pilar más importante, por demostrarme su cariño y apoyo incondicional.

En memoria a mi padre, a pesar de nuestras distancias físicas siento que está conmigo, por sus enseñanzas que me ayudan a enfrentar la vida, por su ejemplo de ser una persona responsable y

trabajadora, se que este momento hubiera sido tan especial para el como lo es para mí. A mis hermanas por darme momentos de felicidad y a mi familia en general por compartir buenos y malos momentos.

A mi compañera de proyecto de grado Angie, por la paciencia y la ayuda que me brindo a lo largo de este proceso, por ayudarme a creer en mis capacidades y por haber logrado nuestro objetivo con mucha perseverancia.

Y a tres amigos, Sergio Mejía, Jefferson y Álvaro que, gracias a su apoyo, ayuda y conocimiento hicieron de esta experiencia una de la mejores.

Agradezco a la profesora maría directora de esta tesis por su ayuda, colaboración y asesoramiento a la realización de la misma.

Jorge Andrés Lara Porras.

Contenido.

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos.....	17
1.1.1. Objetivo general.....	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
2. Marco teórico.....	17
2.1. Planteamiento del problema.	18
2.2. Sistema de evaporación multietapa	19
2.2.1 Crisoles o contenedores de elementos precursores:.....	20
2.2.2.1 Etapa de potencia.	23
2.2.2.2 Etapa de control.....	24
2.2.2.3 Etapa de sensado.	24
3. Implementación	24
3.1. Hardware	25
3.1.1. Circuito de potencia.	25
3.1.1.1. Transformadores de potencia.	26
3.1.1.2. Convertidor AC-AC de fase controlada.	27
3.1.2. Circuitos de alimentación	28
3.1.2.1. Diseño de la fuente de ± 5 V.	28

IMPLEMENTACIÓN DE UNA FUENTE DE POTENCIA

8

3.1.2.2.	Diseño de la fuente de ± 15 voltios.....	30
3.1.3.	Circuitos de control.....	31
3.1.3.1.	Circuito para la detección de cruces por cero	31
3.1.3.2.	Circuito empleado para el disparo de los tiristores.	34
3.1.3.3.	Tarjeta de control	36
3.1.4.	Circuitos de instrumentación.	37
3.1.4.1.	Circuito de acondicionamiento de la señal generada por la termocupla.	37
3.1.4.2.	Circuito de acondicionamiento del el sensor de corriente.....	38
3.2.	Software.....	41
3.2.1.	Software 1: Control de los tiristores.	42
3.2.2.	Software 2: lectura del sensor LA 200-P y envío de información.....	42
3.3.	Caja o gabinete.	43
3.4.	Montaje de la fuente de potencia.....	44
4.	Resultados.....	49
4.1.	Prueba ángulo de conmutación versus corriente RMS.....	50
4.2.	Prueba sensor de temperatura.....	52
5.	Conclusiones.....	55
6.	Recomendaciones.....	57
	Referencias bibliográficas.	58

Lista de Tablas.

Tabla 1. Especificaciones de temperatura de elementos precursores	21
Tabla 2. Características de crisol fabricado con Tungsteno	21
Tabla 3. Datos de los transformadores de potencia	26
Tabla 4. Parámetros del optoacoplador 4N25	32
Tabla 5. Características del optoacoplador MOC 3081	35
Tabla 6. Elementos usados en la construcción de la fuente de potencia.....	45
Tabla 7. Datos de corriente RMS obtenidos con el sensor LA 200-P y la pinza amperimétrica Fluke 902 según la variación de los ángulos de conmutación.	51
Tabla 8. Prueba del sensor de temperatura	54

Lista de Figuras.

	Pág.
Figura 1. Esquema del sistema de evaporación multietapa.	20
Figura 2. Modelo del crisol de tungsteno implementado.....	22
Figura 3. Esquema general de la fuente de potencia multietapa.....	23
Figura 4. Circuito de potencia.....	26
Figura 5. Tiristor TIPO SKKT.....	27
Figura 6. Esquema del transformador empleado para la fuente de ± 5 [V] y de ± 15 [V].....	28
Figura 7. Esquema de la fuente de ± 5 [V] en PROTEUS.	29
Figura 8. Tarjeta impresa integrada por fuente de ± 5 [V], acondicionamiento de señal de la termocupla y acondicionamiento sensor de corriente.....	29
Figura 9. Esquema de fuente de ± 15 [V].	30
Figura 10. Circuito PCB de la fuente de ± 15 [V] D.C.....	31
Figura 11. Esquemático del detector de cruce por cero.	32
Figura 12. Señal de salida del rectificador de onda completa.....	33
Figura13. Señal obtenida del detector de cruce por cero. /Línea amarilla onda rectificada. Línea azul pulsos de cruce por cero.	33
Figura14. Circuitos PCB detector de cruce por cero y conexión de tiristores.....	34
Figura 15. Esquema de conexión de los tiristores.....	35
Figura 16. Forma de onda de la tensión de salida del convertidor AC-AC con un ángulo de conmutación de 100°	36
Figura 17. Arduino MEGA empleado.	37
Figura18. Circuito acondicionamiento de señal.....	38

Figura 19. Sensor de corriente, LA 200-P.	39
Figura 20. Señal de tensión en la carga (Línea amarilla), Señal de tensión a la salida del sensor de corriente (Línea Azul).....	40
Figura 21. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor de corriente.....	41
Figura 22. Diseño de caja o gabinete.	44
Figura23. Vista explosionada de diseño de caja o gabinete.....	44
Figura 24. Ensamble de los componentes de la fuente (interior de la caja).....	48
Figura 25. Ensamble de los componentes de la fuente (vista desde la parte exterior de la caja). 48	
Figura 26. Sistema de evaporación multietapa.	49
Figura 27. Comparación de datos obtenidos mediante el sensor LA 200-P y la pinza Fluke 902 en función del ángulo de conmutación del convertidor.....	50
Figura 28 Comportamiento de la tabla de calibración del termopar tipo K.....	53
Figura 29. Comportamiento de la temperatura según la variación del ángulo.	55

Lista de apéndices.

(Ver carpeta adjunta en el CD, pueden ser visualizados en la base de la Biblioteca UIS)

Apéndice A Hoja de datos de tiristor SKKT 92/16e.

Apéndice B Hoja de datos de tiristor SKKT 132/16e.

Apéndice C. Hoja de datos de LM7805-LM7815.

Apéndice D. Hoja de datos de LM7905- LM7915.

Apéndice E. PCB que integra los circuitos de la fuente de 5[V], adecuación de termocupla y de adecuación del sensor.

Apéndice F. Montaje de la PCB que integra los circuitos de la fuente de 5[V], adecuación de termocupla y de adecuación del sensor.

Apéndice G. Hoja de datos del sensor de corriente.

Apéndice H. PCB de la fuente de 15[V].

Apéndice I. Montaje de la PCB de la fuente de 15[V].

Apéndice J. Hoja de datos de CD40106.

Apéndice K. PCB que integra los circuitos de cruce por cero y conexión de los tiristores.

Apéndice L. Montaje de la PCB que integra los circuitos de cruce por cero y conexión de los tiristores.

Apéndice M. Hoja de datos del MOC3081M.

Apéndice N. Hoja de datos del AD620.

Apéndice O. Hoja de datos OP470.

Apéndice P. Algoritmo de la conmutación de los tiristores.

Apéndice Q. Algoritmo de sensado.

Apéndice R. Tabla de calibración para un termopar tipo K

Resumen

Título: Implementación de una fuente de potencia con potencial aplicación para la evaporación multietapa en la fabricación de celdas solares de película delgada.

Autor: Angie Yaritza Sánchez Varela, Jorge Andres Lara Porras.

Palabras clave: Convertidor AC-AC, control de temperatura, tiristor, evaporación multietapa.

DESCRIPCIÓN: En el siguiente documento se presenta el proceso de implementación de una fuente de potencia con potencial aplicación para la evaporación de los elementos precursores empleados en la fabricación de celdas tipo película delgada. La fuente de potencia implementada fue construida a base de convertidores AC-AC, mediante los cuales se realiza el control de la corriente que fluye por los diferentes crisoles de una cámara de evaporación multietapa.

Inicialmente se realizó una revisión de la tesis “*Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada*” desarrollada por los estudiantes Juan Pinto y Noé Anaya, en la que se encuentra el diseño de la fuente desarrollada en este proyecto. Asimismo, se hizo una revisión de los dispositivos necesarios para la construcción de la fuente tales como: transformadores, optoacopladores, tarjeta de control, sensores, conductores, tiristores, disipadores y demás elementos necesarios para los diferentes circuitos implementados. Posteriormente, se procedió a ensamblar los circuitos de potencia, control e instrumentación verificando el correcto funcionamiento de cada uno de ellos. Finalmente, se realizaron pruebas de la fuente de potencia mediante las cuales se verificó su correcto funcionamiento según lo establecido en el diseño previo del prototipo. En conjunto los circuitos implementados permiten realizar el control de la transferencia de potencia que se disipará en forma de calor en los crisoles.

Trabajo de Grado

Facultad de Ingeniería Fisicomecánica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director María Alejandra Mantilla Villalobos, Codirector Mónica Andrea Botero Londoño

Abstract

Title: Implementation of a power source with potential application to multi-stage evaporation in the thin film solar cells fabrication.

Authors: Angie Yaritza Sánchez Varela, Jorge Andres Lara Porras.

Key words: AC-AC converter, temperature control, thyristor, multi-stage evaporation.

DESCRIPTION: The next document will show the implementation process of a power source with a potential application in the evaporation of the precursor elements used to the fabrication of thin film photovoltaic cells. The implemented power source was build using AC-AC converters. Those are used to control the current that flows through the crucibles in a multi-stage evaporation chamber.

Initially a revision of the thesis named, “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” developed by the students Juan Pinto and Noé Anaya, this thesis designs the power source. Also, a revision of the necessary elements in the construction of the power source was made, elements like transformers, optocouplers, control cards, sensors, conductors, thyristors, coolers and some other elements used in the implemented circuits. Then, the power source construction started, the power, instrumentation, and control circuits were assembled to test each in order to verify their correct operation. At the end of the construction process, the assembled power source was tested to verify that the source works as was stablished in the previous design of the prototype. All the assembled circuits allow the transference control of the power that dissipates in heat form at the crucibles.

Degree Work

Facultad de Ingeniería Fisicomecánica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director María Alejandra Mantilla Villalobos, Codirector Mónica Andrea Botero Londoño

Introducción

En los últimos años la energía solar fotovoltaica ha generado gran interés y se ha destacado por encima de las demás fuentes de energía renovable (Murcia, H. R., 2008), teniendo como consecuencia una gran inversión en el estudio de la misma. Una de las ramas de investigación de este tipo de energía se concentra en su composición, específicamente en los materiales que componen las celdas que forman parte de los paneles fotovoltaicos, ya que estos determinan la eficiencia del mismo (Saha, Sudip, 2015.). Entre las diferentes tecnologías de celdas fotovoltaicas, este trabajo de grado se enfoca en las celdas de película delgada tipo kesterita.

En la fabricación de celdas de película delgada, se emplean materiales de alta pureza, en este caso Cu, Zn, Sn y S (Cleveland T., 2017). El proceso de fabricación mediante la técnica de evaporación es uno de los que más se destaca, debido a que permite realizar un control óptimo de los parámetros de síntesis y por tanto las películas presentan propiedades físicas, químicas y ópticas adecuadas para su uso en celdas solares.

Para la implementación de un sistema que lleve a cabo este proceso de fabricación, se requiere de una serie de componentes que hagan uso de la electrónica de potencia, sistemas de control y circuitos de instrumentación, con el fin de proveer las señales necesarias para la evaporación de los elementos precursores. En este caso, el sistema de control se encarga de enviar pulsos a los convertidores electrónicos de potencia, con el fin de variar la cantidad de potencia que se transferirá en forma de calor a los crisoles dependiendo del material a tratar.

A continuación, se mostrará detalladamente el proceso de implementación de una fuente de potencia multietapa empleada para el calentamiento de crisoles, con potencial aplicación en la evaporación de elementos precursores para la fabricación de películas delgadas tipo kesterita. La fuente implementada en este trabajo se basó en el diseño preliminar presentado en el proyecto de grado “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” por los estudiantes Juan Wilfredo Pinto Uribe y Noé Fernando Anaya Riaño. Este diseño preliminar fue ajustado, modificado e implementado en el presente trabajo según los requerimientos de la fuente de evaporación.

1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general.

Construir una fuente de potencia mediante convertidores AC-AC con potencial aplicación para el calentamiento de crisoles empleados en sistemas de evaporación multietapa para procesos de síntesis de películas delgadas semiconductoras tipo kesterita.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Implementar un sistema de convertidores AC-AC de frecuencia constante y tensión RMS variable para su posterior uso en el calentamiento de crisoles empleados en la evaporación de los elementos precursores cobre, zinc, estaño y azufre para la síntesis de películas delgadas tipo kesterita.
2. Implementar en un microcontrolador Atmega un sistema para el control en lazo abierto de la corriente del circuito de potencia mediante la variación de los ángulos de conmutación de los convertidores AC-AC.
3. Validar el funcionamiento del circuito de potencia implementado contrastando con mediciones realizadas mediante una pinza amperimétrica.

2. Marco teórico

2.1. Planteamiento del problema.

En la actualidad, aproximadamente el 70% de la producción de energía eléctrica en Colombia proviene de centrales hidroeléctricas (UPME, 2018), las cuales proveen energía en gran cantidad y de manera constante sin verse afectada a corto plazo por eventos climáticos, sin embargo, en periodos más largos de tiempo, en donde la cantidad de precipitación es baja, se puede presentar escasez del recurso energético, esto puede acarrear problemas debido a la poca diversificación de la matriz energética del país. Una solución a esta problemática es la integración de fuentes no convencionales de energía tales como la eólica, mareomotriz, solar, entre otras.

Una de las opciones más viables en el país, debido a la abundancia del recurso, es la energía solar fotovoltaica, la cual es amigable con el medio ambiente. Las películas delgadas son una de las tecnologías que más llama la atención debido a que emplean menor material, son menos costosas y se prevé un gran crecimiento de la misma, lo anterior debido principalmente a los avances desarrollados en CdTe (fotovoltaica de telururo de cadmio) y CIGS (*Copper indium gallium selenide*).

Una de las desventajas que tienen las celdas de película delgada es que para su construcción se hace uso de materiales precursores con cierto nivel de toxicidad, además de tener un alto costo. Para evitar esto se propone el uso de celdas tipo película delgada con estructura cristalina de tipo kesterita, las cuales tiene una densidad de corriente mayor, además del uso de materiales de bajo costo. Por esto el grupo de investigación GISEL de la Universidad Industrial de Santander se propone investigar más sobre las mismas, para lo cual se pretende implementar uno de los métodos de fabricación para este tipo de películas delgadas; en este caso será usado el proceso de evaporación donde se necesita la construcción de una fuente de potencia controlada para el calentamiento de los crisoles.

Haciendo uso de la electrónica de potencia implementó un diseño a base de convertidores AC/AC que permita variar la corriente RMS que fluye por los crisoles, mediante el control del ángulo de conmutación de los tiristores que componen los convertidores, logrando alcanzar altos valores de corriente que generarán la temperatura apropiada para la evaporación de los elementos precursores, lo cual ayudará a producir este tipo de películas delgadas.

2.2. Sistema de evaporación multietapa

El sistema que se observa en la figura 1, tiene como fin evaporar los elementos que conforman la película delgada tipo Kesterita ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) en diferentes etapas. En cada etapa se evaporará uno de estos materiales (Cu, Zn, Sn y S) durante un determinado periodo de tiempo (Platzer-Björkman, 2017, p.84)

Para llevar a cabo este proceso se hace uso de una cámara de vacío que consiste en un recipiente con paredes rígidas del cual se extrae el aire y los diferentes gases que pueden encontrarse dentro de este, mediante el uso de un sistema de vacío, en donde se especifica la presión a la cual se desea llevar la cámara (Lavilla Álvarez, Y. J., (2017), p125), en este caso es del orden de 10^{-4} [mbar], que a su vez sirve para tener un ambiente controlado garantizando la ausencia de agentes que puedan afectar el correcto calentamiento de los crisoles. Los crisoles se conectan a la fuente de potencia que tiene como función elevar su temperatura mediante una corriente que fluye a través de ellos.

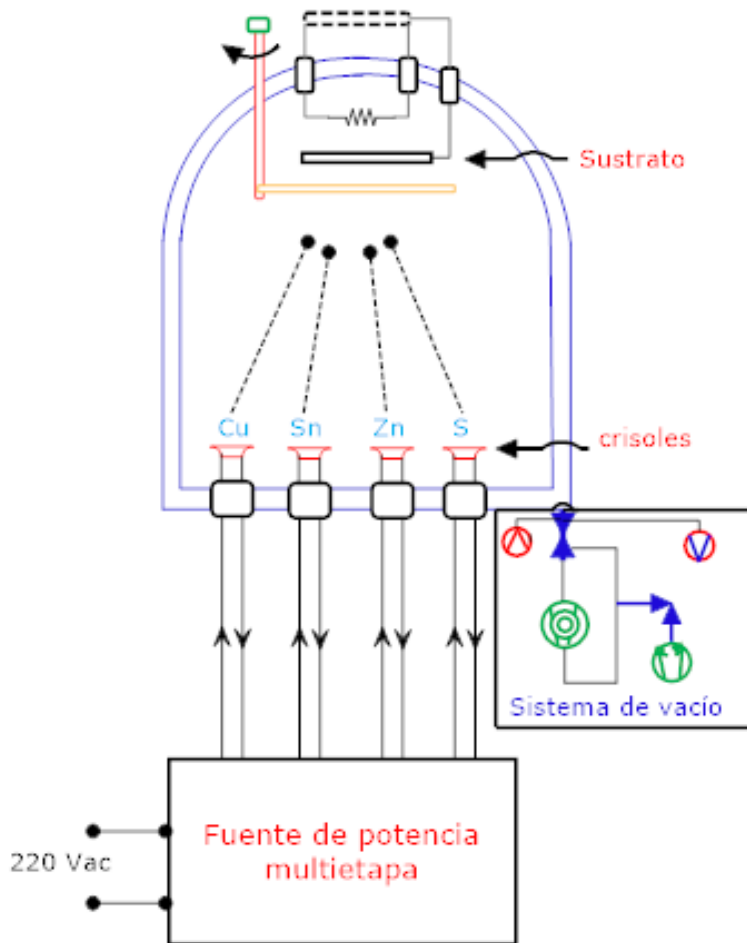


Figura 1. Esquema del sistema de evaporación multietapa. Fuente Autores.

2.2.1 Crisoles o contenedores de elementos precursores: Un crisol es un recipiente que se fabrica con materiales refractarios, utilizado para la fundición de ciertas sustancias o elementos a alta temperatura. Los contenedores en los que se depositaron los elementos precursores (Cobre, Zinc Estaño y Azufre cuyas temperaturas de evaporación se encuentran en la tabla 1), son de Tungsteno, debido a que dicho material tiene un alto punto de fusión, buena resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, resistente al desgaste, buena conductividad térmica, su coeficiente de expansión térmica es pequeño y buena templabilidad; su temperatura ambiente de trabajo generalmente es superior a 2000 °C (Giant Metal (s.f)). Las principales características del

crisol se presentan en la tabla 2 (Pinto y Anaya, 2017, p.39). En la figura 2 se presenta un modelo del crisol de tungsteno empleado.

Tabla 1.

Especificaciones de temperatura de los elementos precursores

Elemento	Temperatura para presión de vapor [°C]
Cobre	1017
Zinc	250
Estaño	997
Azufre	150

Nota: * Especificaciones de temperatura recomendada para evaporación. Adaptado de “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2017

Tabla 2.

Características de crisol fabricado con Tungsteno

Crisol	Temperatura [°C]	Corriente [A]	Tensión [V]	Espesor	Costo [US]
Tungsteno	1800	173	5.4	0.01	\$ 43

Nota: * Especificaciones de tungsteno para evaporación de Cu y Sn. Adaptado de “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2017.

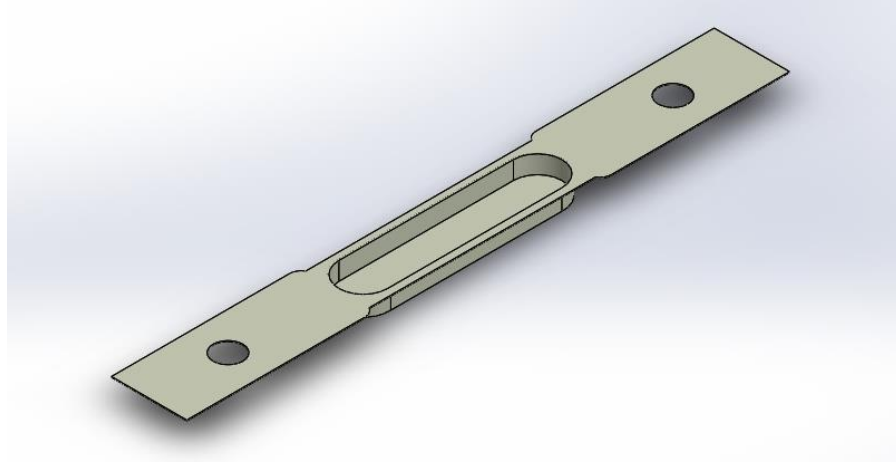


Figura 2. Modelo del crisol de tungsteno implementado. Fuente Autores

2.2.2 Fuente de potencia multietapa Esta fuente es la encargada de entregar la potencia requerida para el calentamiento de los crisoles, evaporando los elementos precursores que se encuentran en estos (Pinto y Anaya, 2017, p.37). Para lograr esto, la fuente de potencia manejará una corriente RMS de 0 a 130 [A], con este rango de corriente se pretende calentar los crisoles a temperaturas de hasta 1070 [°C], siendo suficiente para la evaporación del Cu, Zn, Sn y S.

La fuente implementada en este trabajo de grado, ver figura 3, está conformada por: dos transformadores de potencia, dos tarjetas de control Arduino Mega (una que envía las señales de control a los actuadores y la otra que recibe datos de lectura del sensor de corriente), un sistema para la detección de cruces por cero, sistemas para el sensado de corriente y temperatura en los crisoles y un sistema de cuatro convertidores AC-AC monofásicos construidos a base de tiristores con su correspondiente sistema de adecuación de las señales de control.

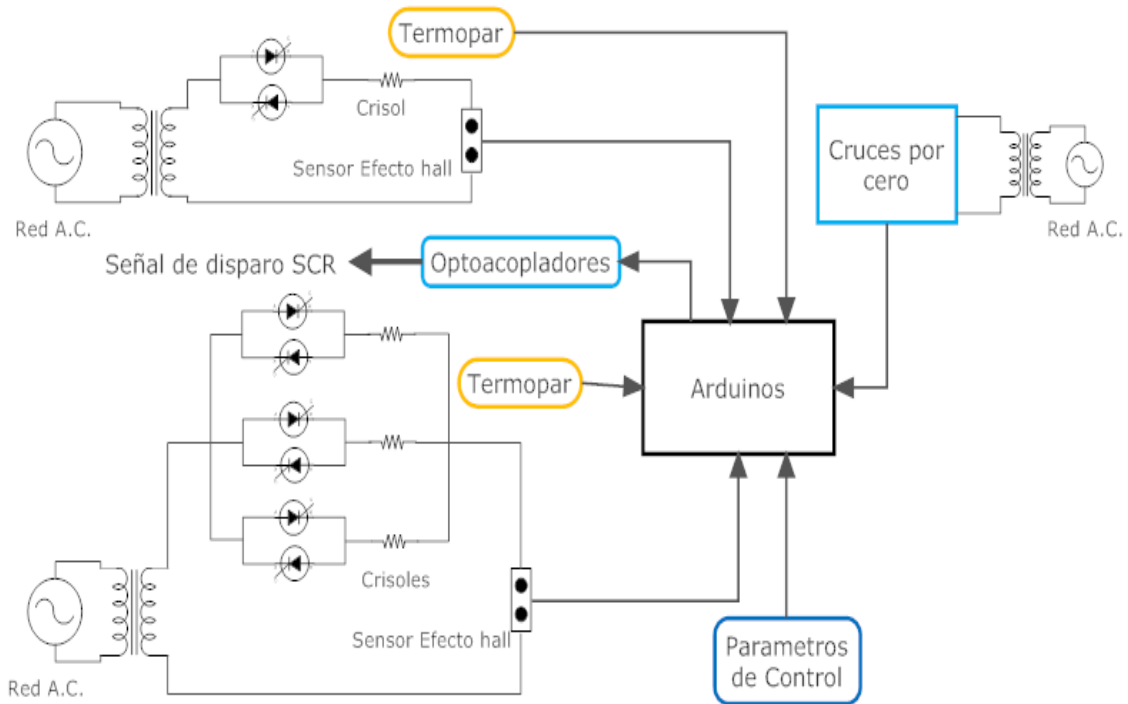


Figura 3. Esquema general de la fuente de potencia multietapa. Fuente Autores.

Asimismo, esta fuente se divide en tres etapas, una etapa de potencia, una etapa de control y una etapa de sensado, las cuales se describen a continuación.

2.2.2.1 Etapa de potencia. Esta etapa está compuesta por el transformador, los tiristores y los crisoles; es la encargada de transferir la potencia necesaria a los crisoles mediante la acción controlada por el Arduino, este último usa la señal generada por el circuito de cruce por cero con el propósito de sincronizar la señal de la red con los disparos de conmutación que llegan al gate de los actuadores que en este caso son los tiristores, variando de esta forma la tensión RMS en un rango de 0 a 5 [V] y la corriente RMS de 0 a 200 [A] esto debido a las características del transformador implementado el cual se conecta a la red (220 [Vrms] a 60 [Hz]).

2.2.2.2 Etapa de control. Esta etapa se encarga de la conmutación de los tiristores mediante la variación del ángulo de conmutación, definido en el software implementado en la tarjeta Arduino Mega cuya explicación se encuentra en el ítem 3.2.1. Esta etapa inicia cuando el microcontralador recibe la señal de pulsos generada por el circuito del detector de cruce por cero, esta señal es tomada como referencia para generar una nueva señal de pulsos definida por un tiempo, que es representado mediante un ángulo de conmutación variable, para posteriormente ser enviada a las compuertas de cada tiristor permitiendo de esta manera el flujo de corriente en el circuito de potencia.

2.2.2.3 Etapa de sensado. Esta etapa es la encargada de la medición de la corriente RMS y la variación de la temperatura que se genera en la carga gracias a la variación de los ángulos de conmutación de los tiristores. Para la medición de corriente se implementó un sensor LA 200-P que entrega una señal de tensión gracias a la resistencia recomendada en su hoja de datos, dicha tensión posteriormente se escalara en un rango de 0 a 5 [V] mediante un circuito de acondicionamiento de señal, para su lectura en el puerto analógico del Arduino que serán interpretadas mediante el código descrito en el ítem 3.2.2, dando así el valor de la corriente RMS. Para la medición de la temperatura se implementó un termopar tipo K el cual tiene en su punto un aislador cerámico con el fin de evitar el contacto directo con el crisol, en los terminales de este termopar se presenta una diferencia de temperatura la cual genera una diferencia de potencial que se interpreta como una tensión en el orden de los [mV] y mediante una tabla de calibración propia de este tipo de termopar se logra establecer la temperatura a la cual corresponde dicha tensión.

3. Implementación

Para la implementación de la fuente de potencia se partió del diseño preliminar de cada uno de los circuitos establecidos en la tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” por los estudiantes Juan Wilfredo Pinto Uribe y Noé Fernando Anaya Riaño. Se realizaron algunos ajustes al diseño inicial tales como la conexión en paralelo de tres tiristores esto con el fin de no realizar cambios en las conexiones de los cables de potencia, se implementaron los diferentes circuitos que componen la fuente de potencia y, asimismo, se implementó el software necesario para el funcionamiento de los convertidores AC-AC y el sensado de la corriente.

A continuación, se describe la implementación y funcionamiento de cada una de las partes que conforma la fuente, así como el software y los circuitos de potencia, control e instrumentación.

3.1. Hardware

3.1.1. Circuito de potencia. El circuito que se observa en la figura 4 tiene como propósito transferir potencia a los crisoles o navecillas en forma de calor mediante la acción controlada de los tiristores (Pinto y Anaya, 2017, p.31).

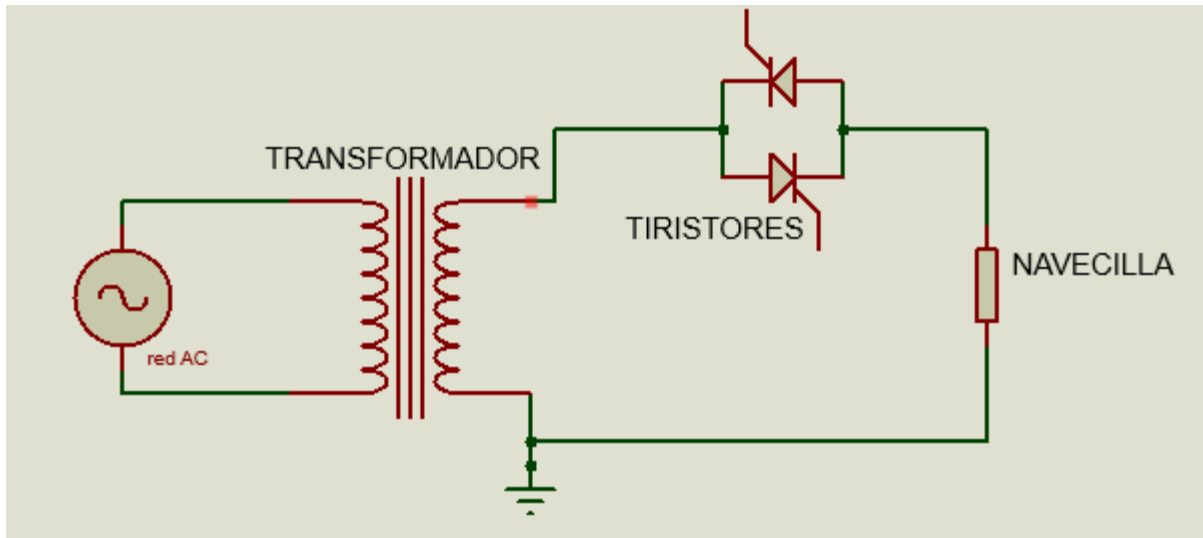


Figura 4. Circuito de potencia. Adaptado de Tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada”

3.1.1.1. Transformadores de potencia. Debido a que la fuente necesita calentar los crisoles a temperaturas que pueden superar los mil grados centígrados ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), fue necesario adquirir dos transformadores con las características mostradas en la tabla 4, los cuales permiten alcanzar las corrientes necesarias para lograr las temperaturas deseadas dentro del sistema, teniendo en cuenta que la navecilla tiene una resistencia de aproximadamente $17.322\text{ [m}\Omega\text{]}$ y los conductores $1.45\text{ [m}\Omega\text{]}$.

Tabla 3

Datos de los transformadores de potencia

Potencia [VA]	Entrada [V]	Salida [V]	Corriente nominal secundario [A]	Frecuencia [Hz]
1000	220	5	200	60
350	220	4	87,5	60

3.1.1.2. Convertidor AC-AC de fase controlada. Los convertidores AC-AC son empleados para variar la tensión eficaz de salida mediante un control de fase. En la fuente implementada se utilizaron 4 convertidores AC-AC monofásicos, cada uno de estos fue implementado mediante dos SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) conectados en antiparalelo (DELORENZO., (s.f.), p.70). El control del convertidor se realiza mediante la modificación del ángulo de los pulsos de disparo que llegan a la compuerta de los tiristores, mediante un conjunto de circuitos electrónicos, lo que conlleva a la variación de la corriente eficaz que fluye a través de sus terminales.

Como ya se ha mencionado, para la evaporación de los elementos se requieren temperaturas muy elevadas, por lo tanto, la fuente debe contar con la capacidad de manejar corrientes de aproximadamente 150 [A]. Por tanto, se optó por utilizar los tiristores de referencia SKKT 92/16e (figura 5) y SKKT 132/16e del fabricante SEMIKRON, cuyas hojas de datos se encuentran en los apéndices A y B, respectivamente, el último de estos cuenta con una mayor capacidad puesto que la temperatura que se debe lograr en la navecilla conectada en este sub-circuito sobrepasa los 1000°C y por consecuencia la corriente que pasa a través de este es más elevada.



Figura 5. Tiristor TIPO SKKT. Tomada de Newark.

3.1.2. Circuitos de alimentación

3.1.2.1. Diseño de la fuente de ± 5 V. Para los circuitos que requieren de una alimentación externa, tal como el circuito de detección de cruces por cero y los circuitos de acondicionamiento de señal para los sensores de temperatura y corriente, se implementó una fuente de alimentación DC con salidas de 5 [V] y -5 [V].

Se consideró el esquema mostrado en la figura 7, para el cual se empleó un transformador con entrada de 220 [Vrms] y salidas de 7 [Vrms] y 14 [Vrms] con derivación central (figura 6).

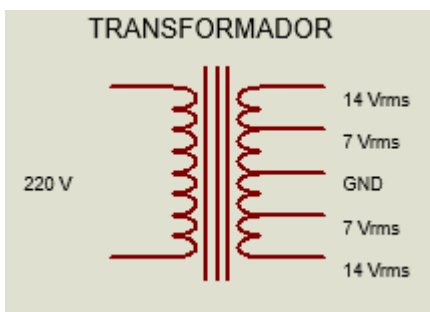


Figura 6. Esquema del transformador empleado para la fuente de ± 5 [V] y de ± 15 [V]. Fuente Autores

Para esta fuente se usó la derivación de 7 [Vrms]. Se empleó un puente rectificador, cuatro capacitores cerámicos de 100 [nF], dos capacitores electrolíticos de 100 [μ F] y dos capacitores electrolíticos de 2200 [μ F], los cuales se encargan de atenuar el rizado de la señal que se obtiene a la salida del puente rectificador, un regulador de tensión LM7805 (apéndice C) el cual estabiliza la tensión positiva en 5 [V] con capacidad de corriente de hasta 1 [A] y un regulador de tensión LM7905 (apéndice D) que estabiliza la tensión negativa en -5 [V], también con capacidad de corriente de hasta 1 [A] (Rashid M, 2001).

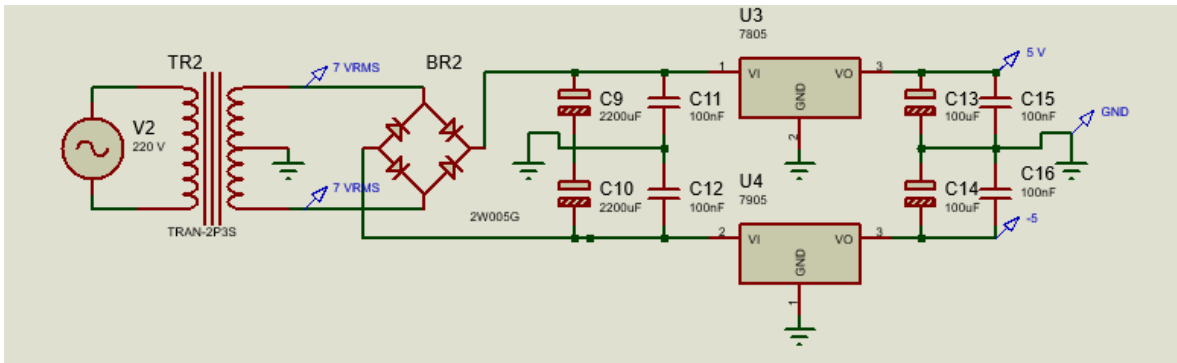


Figura 7. Esquema de la fuente de ± 5 [V]. Fuente Autores.

Se diseñó la PCB (*Printed Circuit Board*), ver Apéndices E y F, que integra este circuito con los empleados para el acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores de temperatura y corriente, como se muestra en la figura 8, forma que se optó para reducir espacio.

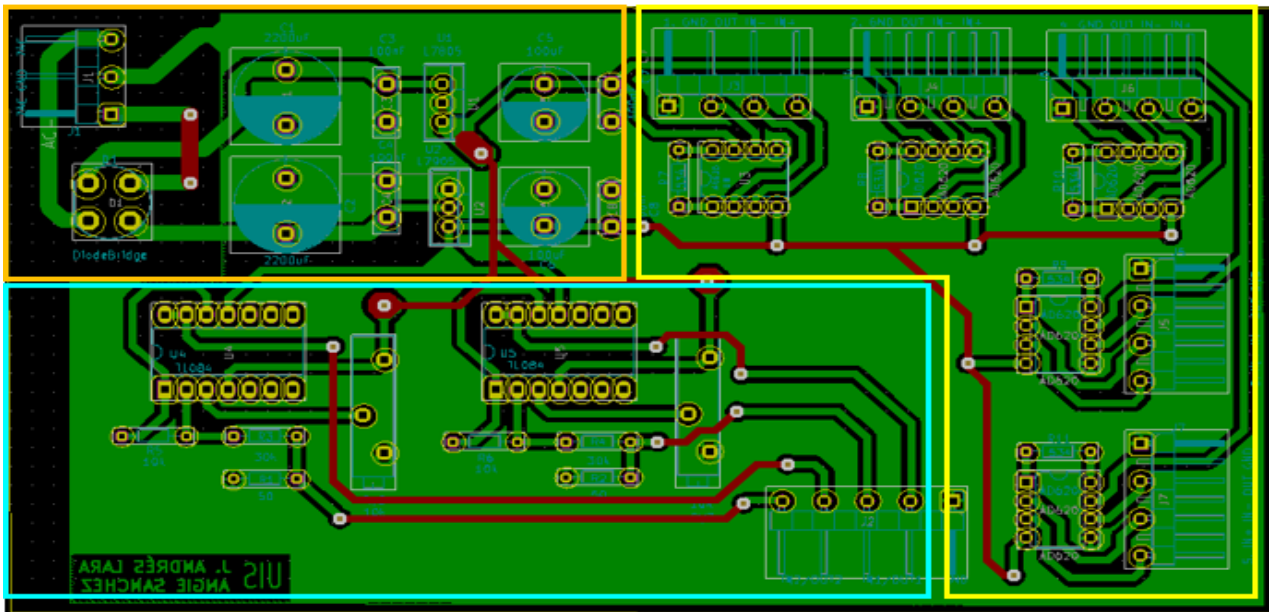


Figura 8. Tarjeta impresa integrada por fuente de ± 5 [V], acondicionamiento de señal de la termocupla y acondicionamiento sensor de corriente. /Fragmento encerrado color naranja: Fuente de ± 5 volt. Fragmento encerrado color menta: Acondicionamiento sensor de corriente. Fragmento encerrado color amarillo: Acondicionamiento de señal de termocupla. Fuente Autores.

3.1.2.2. Diseño de la fuente de ± 15 voltios. El sensor de corriente empleado en este trabajo (apéndice G), requiere una alimentación externa mediante una fuente de DC con salidas de 15 [V] y -15 [V], ver figura 9.

Para este circuito se utilizó el transformador descrito anteriormente en el diseño de la fuente de ± 5 [V], usando en este caso la derivación de 14 [Vrms] (figura 5). Asimismo, se empleó un puente rectificador, cuatro capacitores cerámicos con valor de 100 [nF], dos capacitores electrolíticos de 100 [μ F], dos capacitores electrolíticos de 2200 [μ F], un regulador de tensión LM7815 (apéndice C) el cual se encarga de estabilizar la tensión positiva en 15 [V] con capacidad de hasta 1 [A] y un regulador de tensión LM7915 (apéndice D) que regula la tensión negativa en -15 [V], también con capacidad de hasta 1 [A] (Rashid M., 2001).

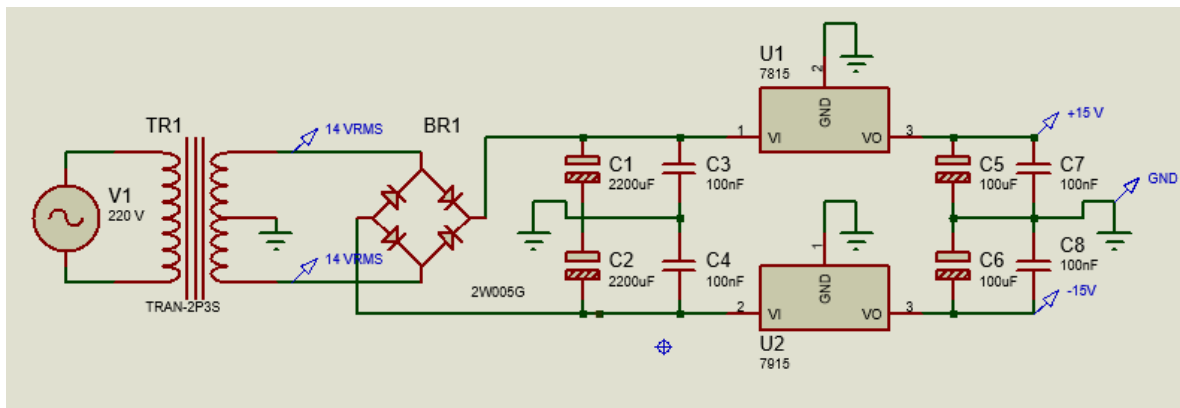


Figura 9. Esquema de fuente de ± 15 [V]. Fuente Autores.

Se diseñó la PCB (apéndice H) de la fuente de ± 15 [V] (figura 10) y con los elementos mencionados anteriormente se hizo el ensamblaje en la PCB (apéndice I).

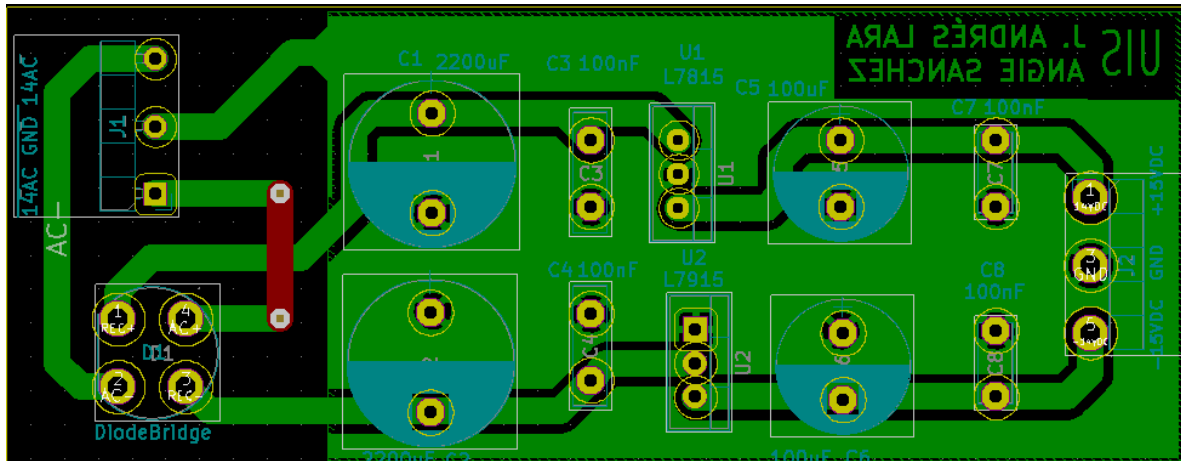


Figura 10. Circuito PCB de la fuente de ± 15 [V] D.C. Fuente Autores.

3.1.3. Circuitos de control.

3.1.3.1. Circuito para la detección de cruces por cero. La función principal de este circuito (figura 11) es detectar el paso por cero de la onda sinusoidal proveniente de la red, para posteriormente realizar la sincronización de la señal de control de los convertidores AC-AC. Para su construcción se tomó la señal proveniente de un transformador con tensión de 5 [Vrms] en su devanado secundario a la frecuencia estándar de la red eléctrica colombiana (60[Hz]). Un puente de diodos rectifica la señal de salida del transformador obteniendo así una señal al doble de la frecuencia de entrada (120[Hz]), como se ve en la figura 12. Mediante una resistencia de 220[Ω] se acopla la señal de salida del rectificador al LED del optoacoplador 4N25, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 4. El LED del optoacoplador se apaga cuando la señal en sus terminales es menor a su voltaje mínimo de encendido (1.15[V]), provocando así que el transistor de salida deje de conducir corriente proveniente de una fuente de 5[V] a través de la resistencia de 10[k Ω] conectada en paralelo con una compuerta NOT 40106 (apéndice J), la cual generará un pulso positivo de 5[V] cuando la señal de entrada sea 0[V] (Pinto y Anaya, 2017, p.47).

Este pulso positivo es enviado a las entradas digitales de la tarjeta de control Arduino, para así ser usado como referencia para realizar el disparo de los tiristores según el ángulo de disparo con el cual se desea trabajar.

Tabla 4.

Parámetros del optoacoplador 4N25

OPTOACOPLADOR 4N25	
I_{Fmax} (Corriente de entrada promedio máxima en el emisor)	60 [mA]
Caída de tensión en el emisor (Tensión en directa a $I_F=10mA$)	1.15 [V]

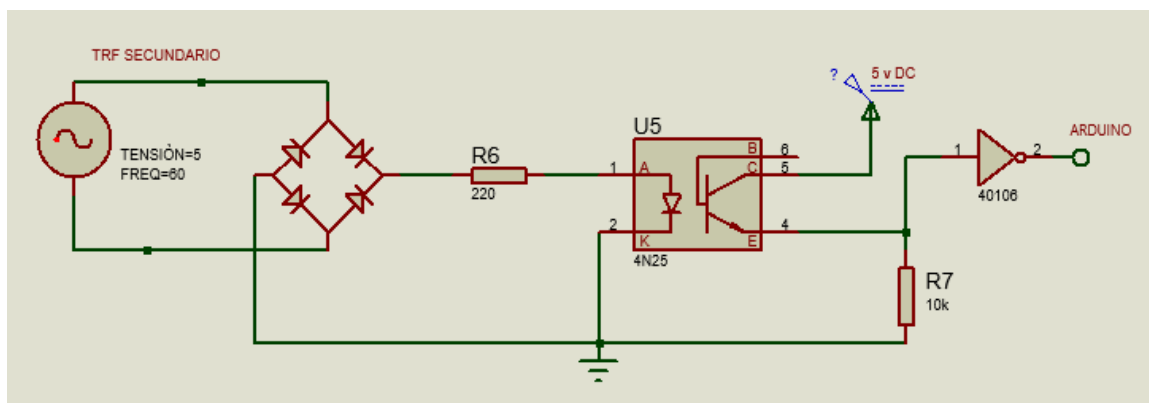


Figura 11. Esquemático del detector de cruce por cero. Adaptado de Tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada”

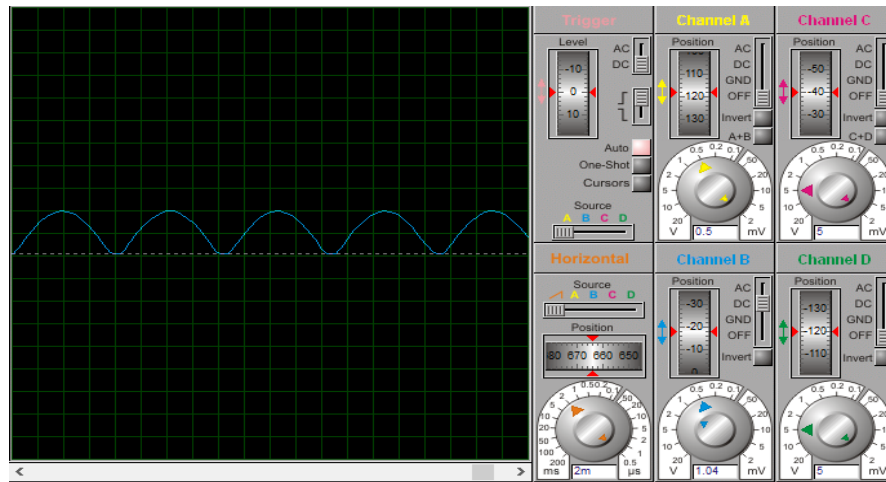


Figura 12. Señal de salida del rectificador de onda completa. Fuente Autores.

Se realizó el montaje para verificar su funcionamiento. En la figura 13 se presentan las señales de tensión obtenidas a la salida del puente rectificador (señal amarilla) y a la salida de la compuerta NOT (señal azul), donde se corrobora el correcto funcionamiento del detector de cruces por cero.

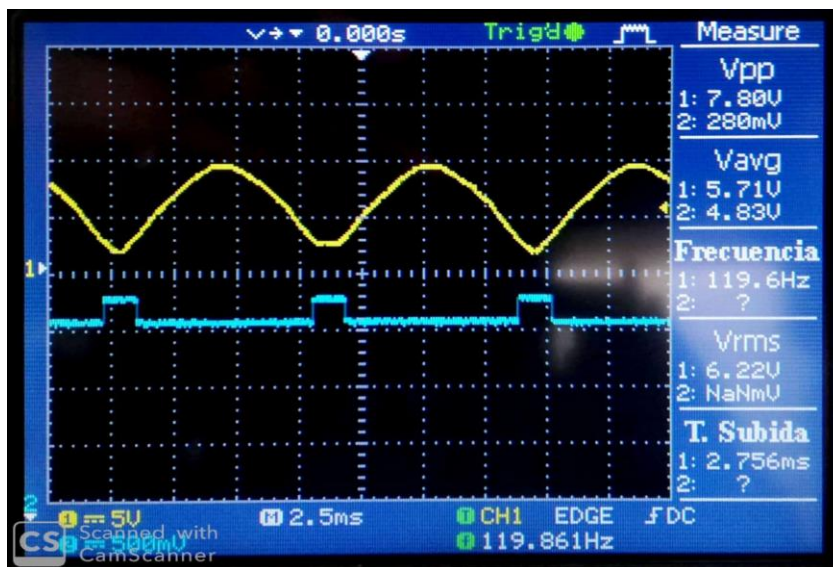


Figura 13. Señal obtenida del detector de cruce por cero. /Línea amarilla onda rectificada. Línea azul pulsos de cruce por cero. Fuente Autores.

En el diseño de la PCB (apéndice K) se integra el circuito para el disparo de los tiristores y el circuito de detector de cruce por cero, como se puede observar en la figura 14. Finalmente se insertaron y fijaron los componentes en dicha PCB, visto en el apéndice L.

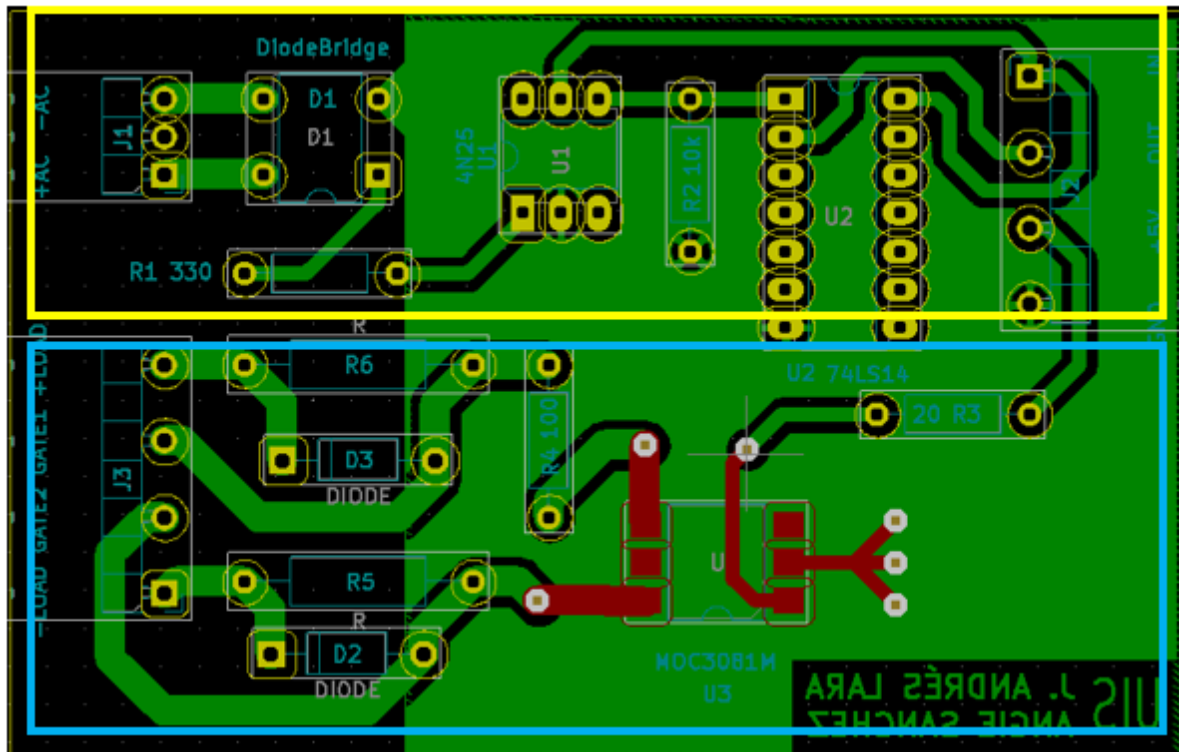


Figura 14. Circuitos PCB detector de cruce por cero y conexión de tiristores. /Fragmento encerrado color amarillo: PCB circuito cruce por cero. Fragmento encerrado color menta: PCB circuito para el disparo de los tiristores. Fuente Autores.

3.1.3.2. Circuito empleado para el disparo de los tiristores. Para adecuar las señales de disparo de los tiristores, provenientes de la tarjeta de control Arduino, se emplea el circuito presentado en la figura 15.

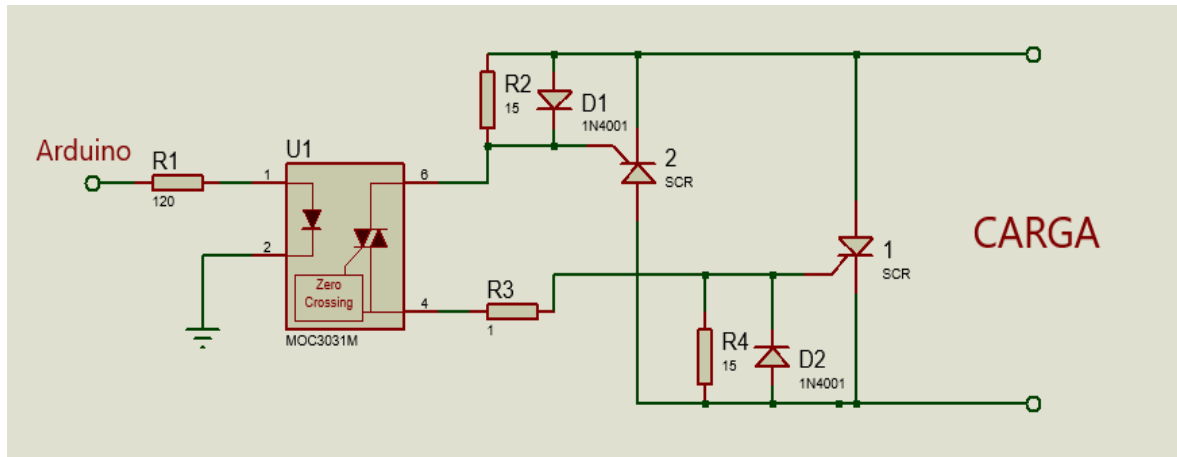


Figura 15. Esquema de conexión de los tiristores. Adaptado de Circuit Design Gopher-Engineering ideas.

La señal de disparo (producida por el Arduino) es enviada al optoacoplador MOC3081 (Apéndice M), el cual sirve como sistema de aislamiento entre la etapa de potencia y la de control. A continuación, se genera un pulso que es enviado a las compuertas de cada tiristor, permitiendo finalmente que estos enganchen logrando así la comodidad de modificar su ángulo de disparo que establece la corriente necesaria para elevar la temperatura de la navecilla. Algunas de las características eléctricas del MOC3081 se presentan en la tabla 5.

Tabla 5.

Características del optoacoplador MOC 3081.

OPTOACOPLADOR MOC 3081	
I_{Fmax} (Corriente de entrada promedio máxima en el emisor)	60 [mA]
Caída de tensión en el emisor (Tensión en directa a $I_F=30mA$)	1.3 [V]

Este esquema de conexión de los tiristores se integró con el circuito de cruce por cero para el diseño de la PCB (apéndice K), obteniendo lo que se muestra en la figura 14.



Figura 17. Arduino MEGA empleado. Tomado de LA RED ELECTRONICA S.A.S.

3.1.4. Circuitos de instrumentación.

3.1.4.1. Circuito de acondicionamiento de la señal generada por la termocupla. El circuito que se muestra en la figura 18, toma la tensión generada por la termocupla tipo k por medio del amplificador de instrumentación AD620AN, con el propósito de obtener la señal adecuada para su posterior lectura mediante el puerto analógico de la interfaz Arduino, teniendo en cuenta que la tensión generada por la termocupla entrega valores en un rango que va desde 0 [mV] hasta 54.88 [mV].

En la tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” se estableció que para este circuito se debe escoger el valor de la resistencia R_G para ajustar la ganancia de tal manera que la señal de salida del amplificador AD620AN (Apéndice N) esté en el rango de 0 a 5 [V], que son los voltajes de lectura del puerto ADC (*Analog Digital Converter*) del Arduino.

El valor de dicha resistencia es $534[\Omega]$, el cual fue calculado con la ecuación 1 y la ecuación 2 establecidas en la tesis anteriormente mencionada en la cual está basado este proyecto.

$$G = \frac{V_o}{V_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$R = \frac{49.4K\Omega}{G-1} \quad \text{Ecuación 2}$$

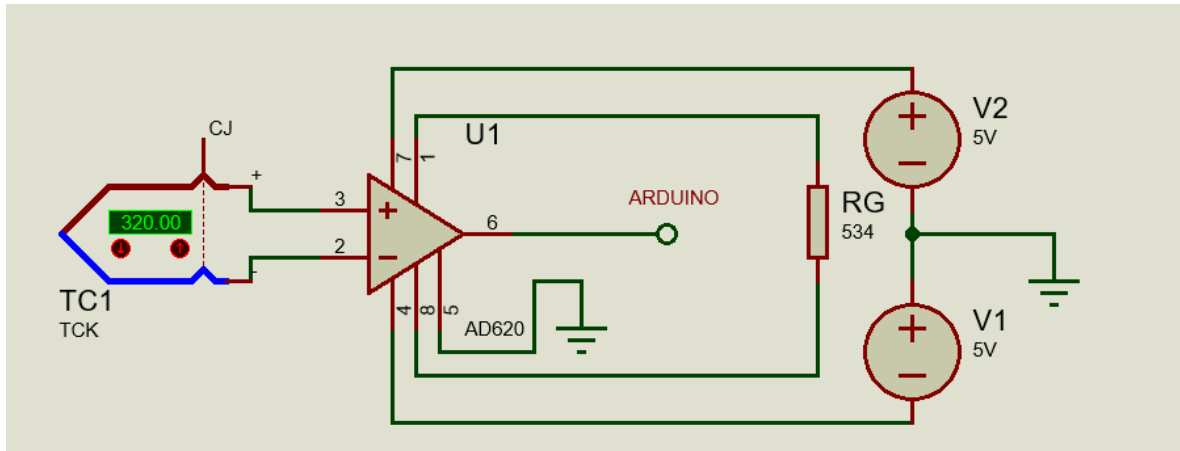


Figura 18. Circuito acondicionamiento de señal. Adaptado de Tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada”

El circuito se implementó en una PCB junto a otros circuitos con el propósito de optimizar el espacio disponible donde se realizará el montaje de todo el sistema (Observar lo encerrado con la línea amarilla en la figura 8).

3.1.4.2. Circuito de acondicionamiento del el sensor de corriente. Se añadió al diseño previo presentado en la tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada”, un sistema para el sensado de la corriente del circuito de potencia mediante el sensor de corriente LA 200-P, ver figura 19 (apéndice G). La medición de esta variable es recomendada tanto por seguridad, como para determinar una caracterización de la corriente RMS por los crisoles con respecto al ángulo de

disparo de los tiristores, en caso de no contar con un circuito adecuado para el sensado de temperatura dentro de la cámara de evaporación.

Este sensor permite medir la intensidad de corriente que pasa por el cable de conexión entre los tiristores y el transformador. Su funcionamiento se basa en el efecto Hall y permite la medición de corrientes de hasta 300 [A] pico, con un ancho de banda que comprende el rango DC hasta los 100 [kHz].

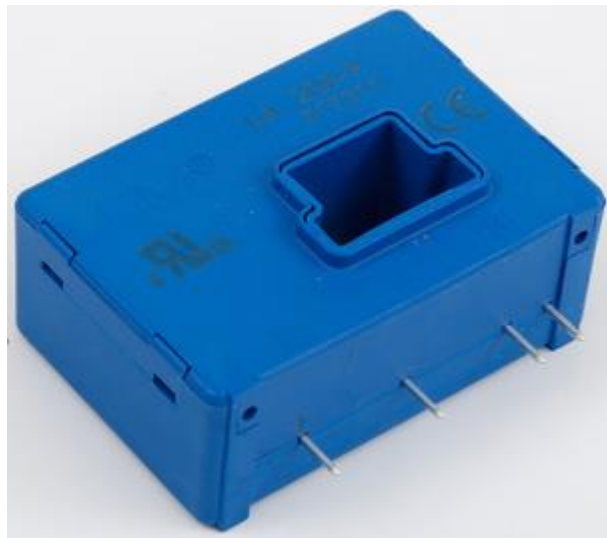


Figura 19. Sensor de corriente, LA 200-P. Tomado de Infinite-electronic

Para verificar el funcionamiento del sensor de corriente, se procedió a visualizar mediante el osciloscopio la señal de tensión en la carga y la señal de tensión obtenida del sensor mientras la fuente estaba en funcionamiento, tal y como se observa en la figura 20.

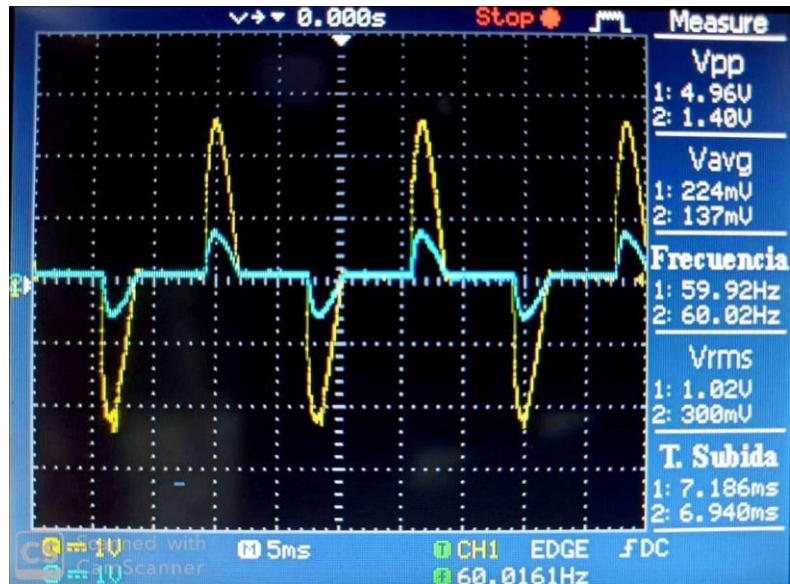


Figura 20. Señal de tensión en la carga (Línea amarilla), Señal de tensión a la salida del sensor de corriente (Línea Azul).

En la figura 21 se presenta el circuito de acondicionamiento de la señal de salida del sensor de corriente para su posterior lectura por medio de la tarjeta Arduino. Debido a que el sensor de corriente funciona con un radio de conversión de 1:2000, es decir, tiene una ganancia de 0.0005 y teniendo en cuenta que el valor máximo medido por el sensor es de 300 [A], se conectó a la salida del corriente del sensor (M), una resistencia de 50[Ω] obteniendo así un rango de voltaje a la salida entre -7.5[V] y 7.5[V], como se ve en la ecuación 3 para la tensión máxima (V_{out}).

$$V_{out} = 0.0005 \times 300[A] \times 50[\Omega] = 7.5[V] \quad \text{Ecuación 3}$$

Para escalar los rangos de tensión de la salida del sensor de corriente a las tensiones de medida del ADC del Arduino (0[V] a 5[V]), se utilizó un circuito de acondicionamiento compuesto por un OPAMP OP470 (apéndice O), como se muestra en la figura 20, obteniendo la relación presentada en la ecuación 4.

$$V_{final} = V_{in} \left(\frac{10 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} + 1 \right) - V_{out} \frac{10 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $V_{in} = 2.625$

Como se aprecia en las anteriores ecuaciones, el nivel de tensión en DC de la tensión de salida se puede configurar mediante la resistencia variable RX, la cual permite modificar la tensión V_{in} .

Posteriormente se procedió a realizar el diseño de la PCB como se observa en la figura 8 (encerrado con el color menta).

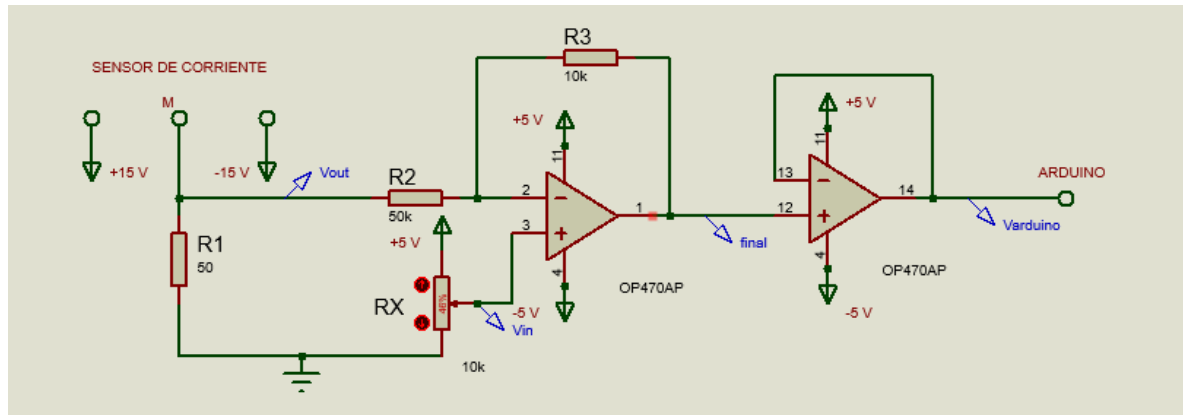


Figura 21. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor de corriente. Fuente Autores

3.2. Software.

En este trabajo de grado se empleó la plataforma de desarrollo ARDUINO que permite una configuración sencilla y rápida en el momento de implementar e integrar los sistemas que componen la fuente.

Se contempló el uso de dos tarjetas de control. La primera tarjeta está dedicada al control de los ángulos de disparo de cada tiristor. La segunda tarjeta se enfoca en la lectura del sensor de corriente para enviar estos datos por el puerto serial al computador y poder visualizar el resultado de la

medición. Se emplearon dos tarjetas de control con el objetivo de poder adquirir un mayor número de muestras por periodo en la medición de corriente, así como no interrumpir el control del circuito de potencia.

3.2.1. Software 1: Control de los tiristores. Este primer algoritmo (Apéndice P) permite mediante el uso de la función de interrupción externa del Arduino, determinar el cruce por cero de la onda de tensión de alimentación de la fuente; creando así una variable bandera que se pone en alto cuando la función de interrupción ha sido llamada.

Según los ángulos de disparo de los tiristores, se determinan los tiempos de inicio de los pulsos correspondientes para la conmutación de cada tiristor a partir del cruce por cero de la tensión de alimentación. Mediante un algoritmo se organizan de menor a mayor dichos tiempos y así se procede a cronometrar los pulsos de disparo que se envían por puertos digitales del Arduino hacia los tiristores. Esto se hace mediante la función *delay()* a la que se le introduce un tiempo de retardo para realizar el disparo (ARDUINO, (s.f.)), la primera con el tiempo de disparo menor y a partir de esta, sumando las diferencias entre cada tiempo de disparo. Al finalizar la variable bandera vuelve a estado bajo hasta que la interrupción sea nuevamente activada.

3.2.2. Software 2: lectura del sensor LA 200-P y envío de información. El segundo microcontrolador es el encargado exclusivamente de recopilar la información proveniente del circuito de sensado de corriente (señal entre 0 y 5 [V]) mediante el puerto Analógico A0, el cual utiliza el convertidor analógico a digital (ADC) que incorpora el Arduino y obtiene un valor resultante entre 0 y 1023. Para obtener el valor de la corriente medida, se realiza una conversión de la señal adquirida (V_{ADC}), siguiendo la ecuación 5.

$$V_{ADC} \times \frac{5}{1023} = \frac{I \times 0.02515}{5} + 1.28 \quad \text{Ecuación 5}$$

Usando la función *micros()* de Arduino (ARDUINO, (s.f.)), el microcontrolador se configuró para obtener las muestras de la señal y almacenarlas en un vector durante tres periodos, es decir durante 50 ms, para posteriormente encontrar el valor RMS de la misma.

De esta manera, el valor RMS de la señal se obtiene haciendo uso de la ecuación (6), en donde N es el número de muestras adquiridas durante 50 ms e I(n) es la n-ésima muestra del vector que almacena los valores de corriente. El algoritmo descrito en este ítem se encuentra en el apéndice Q.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N I(n)^2}{N}} \quad \text{Ecuación 6}$$

3.3.Caja o gabinete.

Para el ensamble de todos los elementos que constituyen la fuente de potencia, se realizó el diseño de una caja eléctrica (ver figuras 22 y 23), donde se tuvieron en cuenta diferentes propiedades para su correcto funcionamiento, como tipo de material y recubrimiento. Se usó lámina galvanizada calibre 14 para darle un mejor acabado y un recubrimiento con pintura electrostática. La caja tiene de frente 44 [cm], de profundidad 50 [cm] y de alto 30 [cm].

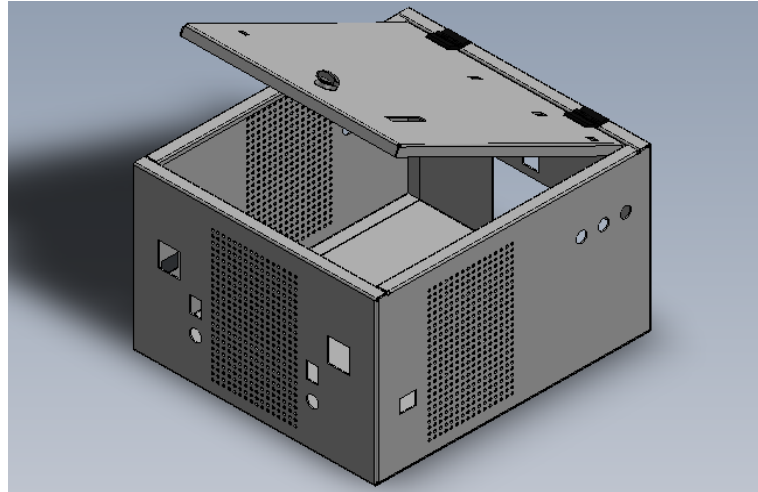


Figura 22. Diseño de caja o gabinete. Fuente Autores

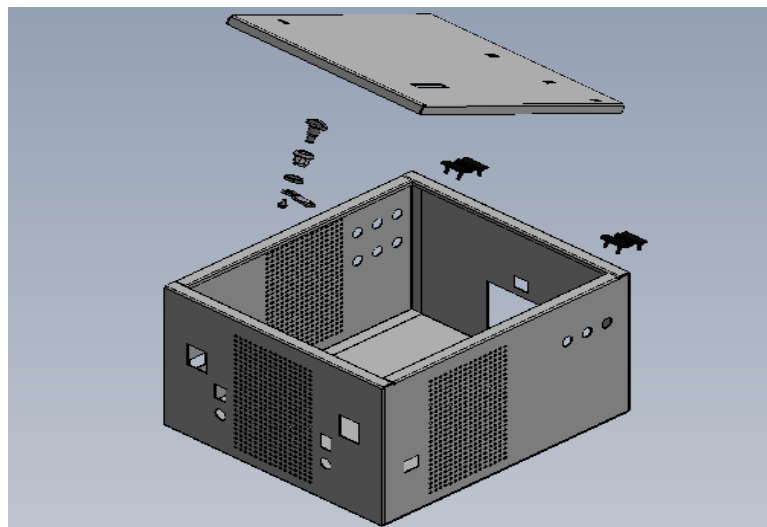


Figura23. Vista explosionada de diseño de caja o gabinete. Fuente Autores.

3.4. Montaje de la fuente de potencia.

Adicionalmente a los elementos descritos anteriormente, se utilizaron elementos para la protección, conexión de elementos, ventilación y disipación de calor, tales como:

- *Breakers*: estos elementos fueron seleccionados según la corriente máxima permitida en el lado de alta de los transformadores garantizando la operación de la fuente dentro de unos parámetros seguros.
- Interruptores
- Conductores para los circuitos de potencia (calibre 1/0) y conductores para los circuitos de control e instrumentación.
- Luces LED señalizadoras.
- Disipadores con sus respectivos ventiladores refrigerantes
- Dos piezas rectangulares de aluminio que permitieron la conexión de los tiristores y una pieza en aluminio que permite la facilidad de montar el sensor de corriente.

En la tabla 6 se presenta un listado de los elementos empleados para la implementación y montaje de la fuente de potencia.

Tabla 6.

Elementos usados en la construcción de la fuente de potencia.

Descripción de elemento	Cantidad
SWITCH PANEL ON-OFF	2 [Uni]
TOMA 3 POLOS CHASIS	4 [Uni]
CABLE DE PODER CON POLO A TIERRA	4 [Uni]
TERMOENCOGIBLE 5MM NEGRO	5 [m]
TERMOENCOGIBLE 22MM NEGRO	5 [m]
CABLE CALIBRE 1/0 THHN/THWN	6 [m]

INDICADOR LED VERDE 110-220 [V]	2 [Uni]
TIRISTOR SKKT 92/16e SEMIKRON	3 [Uni]
TIRISTOR SKKT 132/16e SEMIKRON	2 [Uni]
VENTILADOR REFRIGERANTE	2 [Uni]
DISIPADORES PARA TIRISTORES	2 [Uni]
CABLE CALIBRE 22 AWG	5 [m]
SWITCH PANEL ON-OFF 12 A	3 [Uni]
REGULADOR Lm7815	1 [Uni]
REGULADOR lm7805	1 [Uni]
REGULADOR lm7915	1 [Uni]
REGULADOR lm7905	1 [Uni]
CAPACITOR 100 [uF]	4 [Uni]
CAPACITOR 2200 [uF]	4 [Uni]
CAPACITOR CERAMICO 100 [nf]	8 [Uni]
PUENTE RECTIFICADOR DE DIODOS	4 [Uni]
LA200-P	2 [Uni]
AMPLIFICADOR OP470	2 [Uni]
RESISTENCIA 30 [KΩ]	2 [Uni]
RESISTENCIA 10 [KΩ]	4 [Uni]
TRIMER 10 [KΩ]	2 [Uni]
RESISTENCIA DE PRECISIÓN 51 [Ω]	2 [Uni]
RESISTENCIA 220 [Ω]	2 [Uni]
OPTOACOPLADOR 4N25	2 [Uni]

RESISTENCIA 15 [Ω]	8 [Uni]
RESISTENCIA 1 [Ω]	4 [Uni]
DIODO 1N4001	8 [Uni]
OPTOACOPLADOR MOC 3081	4 [Uni]
TERMOCUPLA TIPO K	1 [Uni]
AMPLIFICADOR AD620	4 [Uni]
RESISTENCIA PRESIÓN 534 [Ω]	4 [Uni]
COMPUERTA NOT 40106	2 [Uni]
RESISTENCIA 120[Ω]	4 [Uni]
TRANSFORMADOR 220-5 [Vrms] 200[A]	1 [Uni]
TRANSFORMADOR 220-4[Vrms] 87.5 [A]	1 [Uni]
TRANSFORMADOR 220-5[Vrms] 1 [A]	2 [Uni]
TRANSFORMADOR 220-7-14-GND[Vrms]	1 [Uni]
CAJA O GABINETE	1 [Uni]
PROTECION BREAKER 2 POLOS 4 [A]	1 [Uni]

Todos los circuitos y demás componentes explicados anteriormente fueron ensamblados y conectados dentro de la caja, como se observa en las figuras 24 y 25, construyendo así la fuente de potencia. Dicha caja fue aterrizada por seguridad y para evitar descargas eléctricas.

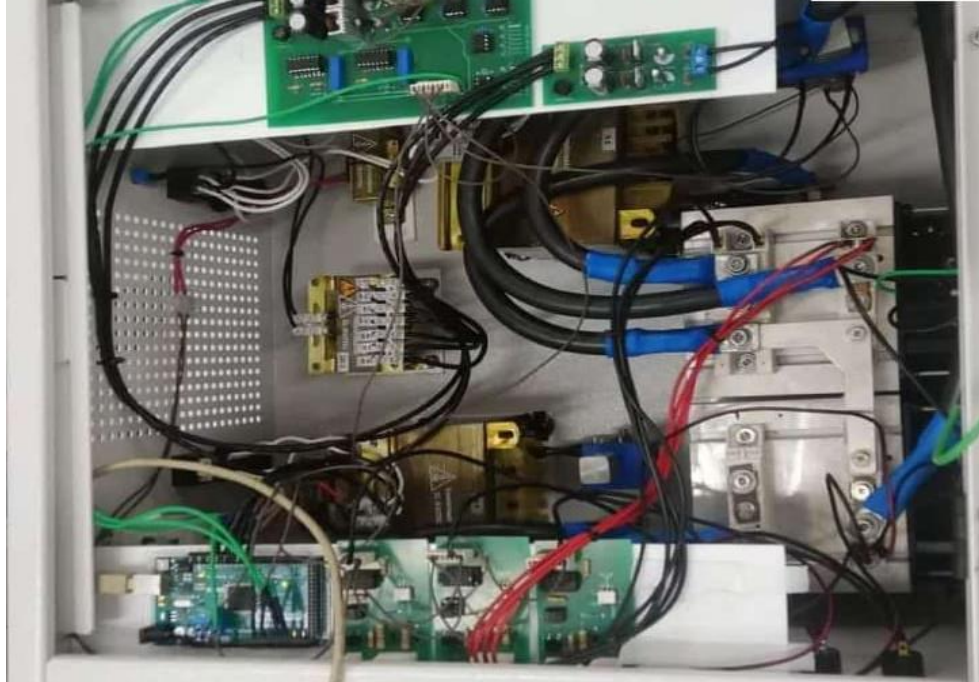


Figura 24. Ensamble de los componentes de la fuente (interior de la caja). Fuente Autores.



Figura 25. Ensamble de los componentes de la fuente (vista desde la parte exterior de la caja). Fuente Autores

4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la puesta en funcionamiento de la fuente de potencia conectada al sistema de evaporación multietapa (ver figura 26). Las pruebas a partir de las cuales se obtuvieron dichos resultados se realizaron considerando como carga los crisoles ubicados dentro de la cámara de evaporación que se usará para el posterior calentamiento de los materiales precursores (Pinto y Anaya, 2017, p.31).



Figura 26. Sistema de evaporación multietapa. Fuente Autores.

4.1. Prueba ángulo de conmutación versus corriente RMS

Se realizó una prueba para caracterizar la corriente RMS que fluye por los crisoles en función del ángulo de conmutación del convertidor AC-AC. En este caso, se varió el ángulo de conmutación del convertidor desde 166° hasta 122° en pasos de -2° . Las mediciones de corriente RMS se realizaron mediante una pinza amperimétrica de referencia Fluke 902 y el sensor de corriente implementado mediante el dispositivo LA 200-P. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 7.

Con los datos obtenidos se desarrolló un *script* en Matlab, obteniendo la gráfica presentada en la figura 27, en donde se observa que el aumento de la corriente es inversamente proporcional al aumento del ángulo.

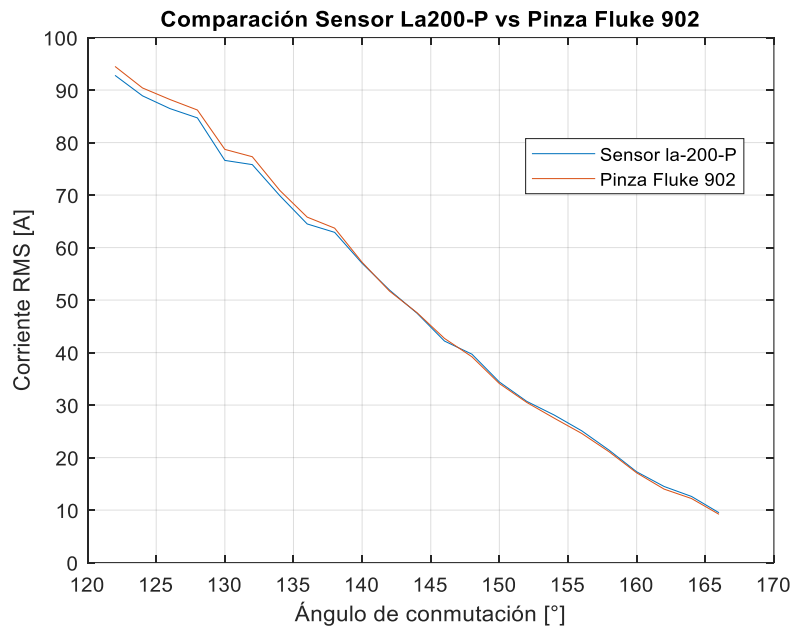


Figura 27. Comparación de datos obtenidos mediante el sensor LA 200-P y la pinza Fluke 902 en función del ángulo de conmutación del convertidor. Fuente Autores.

Tabla 7.

Datos de corriente RMS obtenidos con el sensor LA 200-P y la pinza amperimétrica Fluke 902 según la variación de los ángulos de conmutación.

Ángulo de conmutación [grados]	Corriente RMS pinza Fluke 902 [A]	Corriente RMS sensor LA 200-P [A]	%Error relativo
166	9,5	9,7	2,0618
164	12,2	12,6	3,2786
162	14	14,5	3,5714
160	17,1	17,3	1,1695
158	21,4	21,1	1,4218
156	24,6	25,1	2,0325
154	27,6	28,1	2,1818
152	30,5	30,7	0,6557
150	34,1	34,4	0,8798
148	39,2	39,7	1,2755
146	42,7	42,2	1,171
144	47,6	47,5	0,2101
142	51,7	51,9	0,3868
140	57,2	57	0,3497
138	63,7	62,9	1,2559
136	65,8	64,5	1,9757
134	70,9	69,9	1,4104
132	77,3	75,8	1,9405
130	78,7	76,6	2,6684

128	86,2	84,7	1,7401
126	88,1	86,47	1.8501
124	90,4	88,9	1.6592
122	94,5	92,8	1.7989

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 7, se puede concluir que los valores de corriente RMS obtenidos mediante el sensor implementado con el dispositivo LA 200-P tienen gran similitud con los obtenidos con la pinza Fluke 902, pues su porcentaje de error oscila entre el 1 y el 4 por ciento. Asimismo, para el rango de corriente de interés (corrientes mayores a 50 [A]) el porcentaje de error es menor al 2.7%.

4.2. Prueba sensor de temperatura

El sensor de temperatura considerado en este trabajo es una termocupla tipo k, la cual es empleada para determinar la temperatura en el crisol. Las termocuplas de este tipo tienen en su punta dos materiales que son bronce y aluminio, los cuales al estar en contacto directo con el crisol detectan un diferencial de temperatura que produce una tensión en el orden de los mV, esto debido al efecto termoeléctrico llamado efecto Peltier-Seebeck, estas tensiones se encuentran relacionadas en una tabla de calibración correspondiente a este tipo de termopar, esta tabla se encuentra en el apéndice R y tiene un comportamiento como el que se muestra en la figura 28; el termopar tipo k permite un rango de sensado hasta los 1250 grados centígrados [°C].

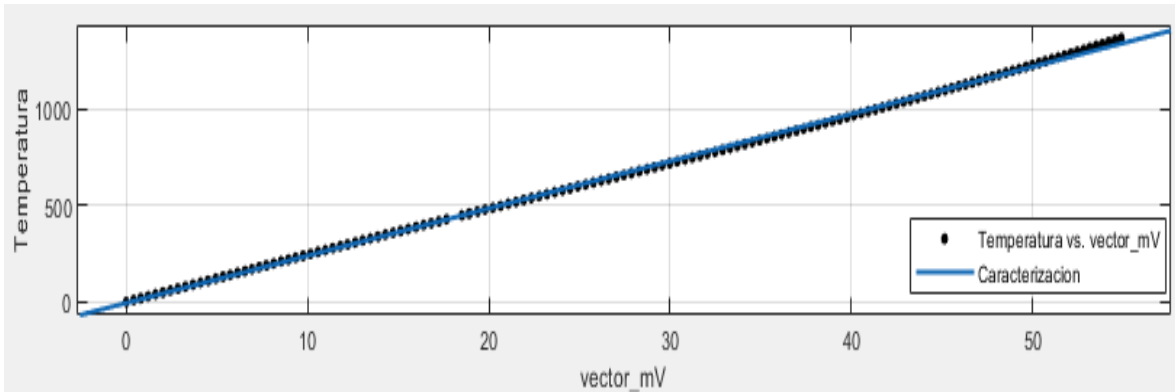


Figura 28 Comportamiento de la tabla de calibración del termopar tipo K. Fuente Autores.

Para la medición de la temperatura en los crisoles fue necesario colocar en la punta de la termocupla un aislamiento cerámico con el fin de prevenir que la corriente que fluye por los crisoles afecte el sensor, lo cual podría ocasionar un daño en los circuitos de adecuamiento de la señal y como tal en el funcionamiento de la fuente de potencia.

Con el fin de evaluar el comportamiento del circuito de sensado de temperatura, se realizaron mediciones usando la termocupla tipo k y una pistola térmica *hold peak* HP-2732 que fue configurada según el material a sensar, en este caso tungsteno; se configuró el valor de la emisividad del mismo para así llevar a cabo la medición de temperatura. Teniendo en cuenta que al utilizar la pistola térmica no es posible realizar la medición manteniendo la cámara de evaporación cerrada en condiciones de vacío, las mediciones se realizaron con la cámara abierta.

Se tomaron medidas de la temperatura en uno de los crisoles mediante la medición de la tensión inducida por la termocupla y también empleando la pistola térmica. Estas mediciones fueron tomadas ante la variación en el ángulo de conmutación, tal como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8.

Prueba del sensor de temperatura

Ángulo de conmutación [grados]	Tensión medida en la termocupla [mV]	Temperatura medida con holdpeak HP- 2732 [°C]	Temperatura termopar tipo k [°C]	% de error temperatura
162	0,579	37,5	14,4	61.7647
160	0,711	38,1	17,6	53.8058
158	1,228	39,2	30,12	23.1632
156	1,645	40,2	40,28	0.199
154	2.018	58,8	49,38	16.0204
152	2,37	55,7	48	13.824
150	3,41	63,3	83,73	32.2749
148	4,37	84,9	117,3	38.1625
146	5,57	134,5	137	1.8587
144	7,93	193	195	1.0363
142	11,13	270,3	273,2	1.0729
140	13,15	328,3	322	1.9190

Como se puede observar en la tabla 8 el error que hay entre la temperatura sensada con el termopar tipo K y la pistola térmica es un error variable y muy alto, esto pudo ser generado debido a que no fue posible que el termopar estuviera en contacto directo con el crisol.

En la figura 28 se observa el comportamiento de la temperatura sensada con la termocupla en [°C] y la temperatura sensada con la pistola térmica hold peak HP-2732 con respecto a la variación del ángulo de conmutación.

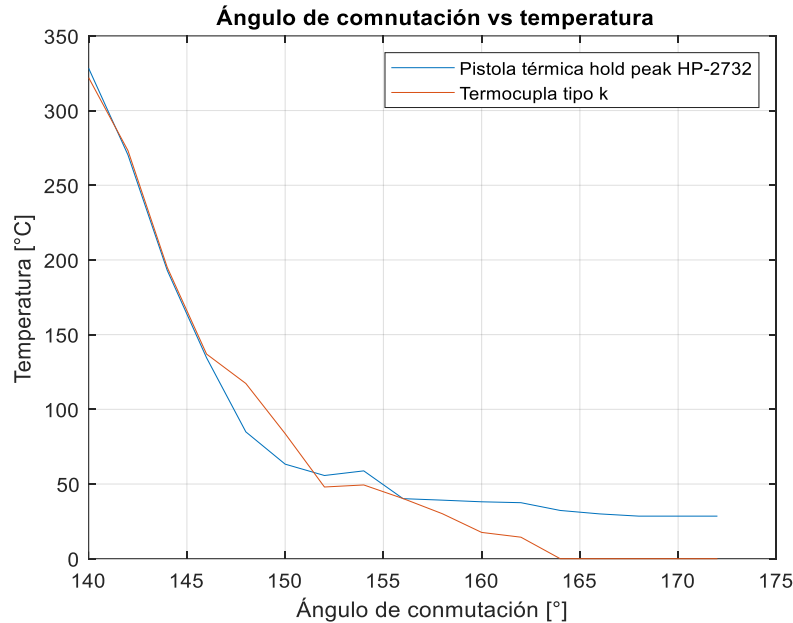


Figura 29. Comportamiento de la temperatura según la variación del ángulo.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, se decidió descartar la medición de la temperatura mediante el uso de la termocupla debido al impedimento de realizar una prueba en condiciones de vacío dentro de la cámara de evaporación con dos métodos diferentes de forma simultánea (termocupla y pistola térmica), la razón de esto radica en que dentro de la cámara de evaporación no se cuenta con una base o soporte que permita alojar la pistola térmica. Adicionalmente dentro de la cámara se generan ambientes con temperaturas altas y se produce la evaporación de los elementos precursores, impidiendo garantizar la integridad del instrumento de medida.

5. Conclusiones.

En este trabajo de grado se presentó la implementación de una fuente de potencia con potencial aplicación para la evaporación multietapa empleada en la fabricación de celdas tipo película delgada. El componente principal de la fuente de potencia implementada fue el convertidor AC-

AC, mediante el cual fue posible realizar el control de lazo abierto de la corriente RMS en los crisoles ubicados dentro de la cámara de evaporación multietapa.

Para lograr el funcionamiento multietapa, se propuso un sistema compuesto de cuatro convertidores AC-AC, uno para cada crisol, evitando la necesidad de realizar cambios en las conexiones de los cables de potencia y permitir un control de la fuente desde el computador.

Se concluye que el diseño de la fuente de potencia plasmado en la tesis “Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada” es correcto en su mayoría puesto que permitió la construcción de la fuente de potencia y se logró que funcionara de manera adecuada, calentando los crisoles haciendo uso del método de conducción.

Por otro lado, no se logró realizar el control de temperatura establecido en la tesis anteriormente mencionada debido a que no se contó con un instrumento de medida adecuado para la aplicación y por lo tanto el margen de error obtenido fue elevado principalmente debido a la necesidad de usar un aislamiento cerámico en la termocupla con el fin de prevenir que la corriente que fluía por los crisoles afectara el sensor.

Se implementó un sistema de control en lazo abierto para la corriente RMS que fluye por los crisoles. Por lo tanto, se realizó una caracterización de corriente en los crisoles con respecto al ángulo de disparo de los convertidores AC-AC.

Se observó que era necesario añadir una fuente de alimentación de ± 5 [V] para alimentar el circuito de cruce por cero y los circuitos de acondicionamiento de señal para el sensor de temperatura y una fuente de ± 15 V para la alimentación del sensor de corriente, dichas fuentes no estaban contempladas en el diseño en el que se basó este proyecto por lo tanto se incorporaron en la implementación.

6. Recomendaciones

Para proyectos futuros se recomienda incorporar a la fuente de potencia un instrumento de medida que permita sensor la temperatura de manera segura y eficiente dentro de la cámara de evaporación en condiciones de vacío, para así lograr implementar un sistema de control en lazo cerrado respecto a esta variable.

Asimismo, se propone diseñar e implementar una interfaz amigable con el usuario, la cual facilite la manipulación de los parámetros que se encargan de controlar la corriente y/o temperatura de los crisoles.

De igual forma se recomienda implementar los programas diseñados en este proyecto en una sola tarjeta de control, esto con el fin de facilitar el diseño y la implementación de la interfaz anteriormente mencionada.

Referencias bibliográficas.

- Arduino(s.f.). Arduino Products. Disponible en la web. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
- Arduino (s.f.). Reference-Language-Functions-Time-Delay. Disponible en la web. Recuperado de <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/time/delay/>
- Arduin(2020). Reference-Language-Functions-Time-Millis. Disponible en la web. Recuperado de <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/time/millis/>
- Charlotte Platzer-Björkman, (2017), Kesterite compound semiconductors for thin film solar cells, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry
- Cleveland T. (2017). Health and Safety Impacts of Solar Photovoltaics. NC State University. Disponible en la web.
- De Lorenzo. (s.f.). Conversión CA-CA - TRIAC y control de fase. Disponible en la web. Recuperado de <https://www.delorenzogloba.com/es/electronica-de-potencia/control-fase/>.
- Giant, Metal. (s.f.). Tungsten crucible. Disponible en la web. Recuperado el 6 de diciembre de 2019 de <http://www.giant-metals.com/tungsten-crucible.html>.
- Lavilla Álvarez, Y. J. (2017). Diseño e implementación del sistema de control de pruebas de temperatura en vacío para la cámara térmica del nano satélite UNSAAC SAT - I. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú.
- Murcia, H. (2018). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de ingeniería, 83-89.

Pinto, J, y Anaya, N. (2017). Diseño del sistema de control de temperatura empleado en un proceso de evaporación para fabricar celdas tipo película delgada (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Rashid, M. (Segunda edición). (2001), Electrónica de potencia, México, Prentice Hall.

Saha, Sudip. (2015). Materials Research and Opportunities in Solar (Photovoltaic) Cells. Proceedings of the Indian National Science Academy.

Upme. (2018), Boletín estadístico de minas y energía. Disponible en la web. Recuperado de https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf