

**PROTOTIPO DE CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO PARA EL
ANODIZADO DE ALUMINIO**

**LUIS ALBERTO ALMONACID DELGADO
JORGE ELIÉCER GÓMEZ PINTO
JEISSON ELIÉCER OCHOA DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

**PROTOTIPO DE CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO PARA EL
ANODIZADO DE ALUMINIO**

**LUIS ALBERTO ALMONACID DELGADO
JORGE ELIÉCER GÓMEZ PINTO
JEISSON ELIÉCER OCHOA DIAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Directora:

**MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniera electrónica, MSc, Dra.**

Codirector:

**JAIME GILLERMO BARRERO PEREZ
Ingeniero electrónico, MSc
FABIAN ALIRIO RIOS ANGARITA
Químico, MSc, Dr.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres Francine Almonacid Cuenca y María Orla Delgado Gonzales Quienes me apoyaron incondicionalmente durante todo el proceso.

A mis hermanos quienes me brindaron apoyo y confianza.

A mi novia por su incondicional apoyo en los momentos difíciles de mi vida y ser parte esencial en la culminación de mi carrera.

A mis compañeros quienes contribuyeron con su experiencia y dedicación, por no desfallecer en las dificultades que se presentaron y por la responsabilidad para así culminar con éxito este logro en común.

Luis Alberto Almonacid Delgado

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por permitirme concluir esta etapa de mi vida, darme sabiduría y fortaleza para mantenerme siempre en pie ante cualquier adversidad.

A mi mamá Luz Marina, por ser mi apoyo incondicional, y motivarme a ser una mejor persona, superándome cada día.

A mi papa Gregorio por enseñarme a ser perseverante y no rendirme ante la primera derrota.

A mi hermana Eliana por enseñarme cualidades de rectitud y honestidad.

A mi novia Ana por tenerme paciencia y brindarme su amor en todo momento.

A mis compañeros de carrera, por permitirme compartir gratos momentos en esta etapa académica, por enseñarme con pequeños actos a ser una mejor persona, y por aportar un grano de arena en la construcción de mi conocimiento.

A mis profesores, por instruirme en esta hermosa carrera, por la exigencia cuando fue necesario y la motivación para dar lo mejor de mí en cada trabajo, incentivando mi espíritu creador.

A mi respetada Universidad Industrial de Santander, por abrirme sus puertas para formarme como un profesional íntegro, apto para cualquier reto profesional.

Y a todos mis amigos y demás familiares, que han contribuido de alguna manera, a que esta etapa sea culminada con éxito y gratitud.

George Eliécer Gómez Pinto

DEDICATORIA

He terminado uno de los logros más importantes de mi vida y estoy preparado para afrontar nuevos retos.

Agradezco a mi padre, Forge, por creer en mí, por su constancia fuerte y dedicación para quererme sacar adelante sin importar las adversidades.

A mi madre, Elsa, por confiar en mis sueños, tener fe en mí y ser ese motor que me inspiró en cada momento a seguir adelante. Gracias por ser esa voz que me tranquilizaba en mis momentos de euforia y desesperación.

A mis hermanitas, Karito y Laura, mujeres hermosas que me apoyaron, fueron cómplices de mis aventuras, de mis momentos buenos y malos. Y siempre estuvieron allí incondicionalmente para mí.

A mis compañeros y amigos de grado por permitirme ser partícipe de un buen proyecto. Espero encontrarlos en mi vida profesional.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en este camino de enseñanza.

Jeisson Eliécer Ochoa Díaz

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. ANODIZADO DE ALUMINIO	23
2. TROCEADOR O CONVERTIDOR DC-DC	25
2.1 Convertidor DC-DC reductor o Buck converter	25
3. FINALIDAD DEL TRABAJO DE GRADO	29
4. DISEÑO DEL PROTOTIPO	30
4.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN	30
4.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA	34
4.2.1 Especificaciones de diseño:	34
4.2.2 Diseño de bobina:	36
4.2.3 Etapa de desacoplamiento y adecuación de la señal de disparo del MOSFET:	37
4.2.4 MOSFET y diodo Schottky:	38
4.2.5 Simulación troceador reductor:	40
4.3 ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS (TENSIÓN Y CORRIENTE)	46
4.3.1 Transductor de tensión:	47
4.3.2 Transductor de corriente:	50
4.4 SISTEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO	53
4.4.1 Generador de modulación por ancho de pulso (PWM):	56
4.5 INTERFAZ DEL USUARIO	56
5. RESULTADOS	59
5.1 PRUEBA DE GENERACIÓN PWM	60
5.2 PRUEBA A CARGA MÁXIMA Y MÍNIMA CON CICLO DE TRABAJO VARIABLE	61
5.3 POTENCIA Y EFICIENCIA DEL PROTOTIPO FINAL	75
5.4 PRUEBA FINAL CON CONTROL EN EL PROCESO DE ANODIZADO.	77
6. OBSERVACIONES Y MEJORAS FUTURAS	80
7. CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Montaje utilizado para el desarrollo del proceso de anodizado de aluminio.	22
Figura 2 Capa barrera del anodizado de aluminio.	24
Figura 3 Anodizado suave y anodizado duro.	24
Figura 4 Convertidor reductor topología clásica.....	26
Figura 5 Circuito equivalente interruptor operando modo cerrado.	27
Figura 6 Circuito equivalente interruptor operando modo abierto.	28
Figura 7 Forma de onda troceador reductor. (a) Onda de activación del MOSFET. (b) Tensión de salida y tensión en la bobina. (c) corriente en la bobina.	29
Figura 8 Diagrama de prototipo convertidor reductor a implementar.	30
Figura 9 Topología fuente regulada típica.	31
Figura 10 Transformador implementado para el prototipo.	32
Figura 11 Fuente regulada completa del prototipo.....	33
Figura 12 Topología convertidor reductor o Buck converter.	34
Figura 13 Bobina construida para prototipo convertidor de potencia.	37
Figura 14 Topología Opto-Driver de referencia 1EDI20I12AF implementada.....	38
Figura 15 Esquemático del convertidor reductor realizado en el software LTspice VII.	40
Figura 16 Simulación de la señal de encendido del MOSFET puerta-surtidor proporcionada por el Opto-Driver con D del 50%.	41
Figura 17 Simulación tensión Drenador-Surtidor del MOSFET de potencia con D del 50%.....	41
Figura 18 Simulación tensión en el diodo Schottky con D del 50%.....	42
Figura 19 Simulación tensión a la salida del convertidor de potencia para Rmin de 50 [Ω] y D del 50%.	43
Figura 20 Simulación del rizo de tensión a la salida con Rmin de 50[Ω] y D del 50%.	43
Figura 21 Tensión de salida del Troceador para carga variable y D variable.	44

Figura 22 Eficiencia obtenida en el simulador LTspice VII.....	45
Figura 23 Corriente a la salida del convertidor de potencia para Rmin de 50 [Ω] y D del 50%.....	45
Figura 24 Rizo de corriente a la salida con Rmin de 50[Ω] y D del 50%.....	46
Figura 25 Esquema de adquisición de datos.	47
Figura 26 Imagen del Transductor de tensión LV25P.....	48
Figura 27 Circuito de conexión del transductor de tensión LV25P.....	49
Figura 28 Imagen del Transductor de Corriente LA25-NP.....	51
Figura 29 Circuito de conexión del transductor de tensión LA25-NP.....	51
Figura 30 Diagrama de bloques control implementado.....	53
Figura 31 Diagrama de flujo para control de troceador.....	55
Figura 32 Generación del PWM.....	56
Figura 33 Diagrama de flujo de adquisición en Python.....	58
Figura 34 Prototipo final implementado para el anodizado de aluminio.....	59
Figura 35 Resultados experimentales Tensión salida PWM pin digital 3 del microcontrolador ATmega328p.....	60
Figura 36 Resultados experimentales Tensión de salida del Opto-Driver sin carga en el prototipo implementado.....	60
Figura 37 Resultados experimentales Tiempo de subida y bajada generadas en la señal PWM a la salida del Opto-Driver.	61
Figura 38 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para Rmin de 50 [Ω] y D del 20% obtenida en la simulación.	62
Figura 39 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 20%.....	62
Figura 40 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para Rmin de 50 [Ω] y D del 20% obtenida en la simulación.	63
Figura 41 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 20%.....	63

Figura 42 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión -Drenador-Surtidor (verde) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% obtenida en simulación.	64
Figura 43 Resultados experimentales Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% sin varistor.....	64
Figura 44 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% con varistor.	65
Figura 45 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% obtenida en simulación.	65
Figura 46 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% sin varistor.	66
Figura 47 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% con varistor.	66
Figura 48 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para Rmax 200 [Ω] y D del 20% obtenida en simulación.	67
Figura 49 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 200 [Ω] y D del 20%.	67
Figura 50 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para Rmax de 200 [Ω] y D del 20% obtenida en simulación.	68
Figura 51 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) Tensión ampliada Drenador-Surtidor (amarilla) para una Rmax de 200 [Ω] y D del 20%.	68
Figura 52 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para una Rmax de 200 [Ω] y un D del 70% obtenida en simulación.	69
Figura 53 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para una Rmax de 200 [Ω] y D del 70%.	69
Figura 54 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para Rmax de 200 [Ω] y D del 70% obtenida en simulación.	70

Figura 55 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor y Tensión ampliada Drenador-Surtidor para una R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70%.....	70
Figura 56 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20% obtenida en simulación.....	71
Figura 57 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20%.....	72
Figura 58 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% obtenida en simulación.....	72
Figura 59 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70%.....	73
Figura 60 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 20% obtenida en simulación.....	73
Figura 61 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 20%.....	74
Figura 62 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70% obtenida en simulación.....	74
Figura 63 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70%.....	75
Figura 64 Eficiencia del prototipo con ciclo de trabajo variable y carga variable obtenida en simulación.....	76
Figura 65 Resultados experimentales de la eficiencia del prototipo con ciclo de trabajo variable y carga variable.....	77
Figura 66 Montaje en solución química para la realización del anodizado.....	78
Figura 67 Modificación de tensión y tiempo en la interfaz para el proceso de anodizado.....	78
Figura 68 Proceso final de anodizado de aluminio.....	79
Figura 69 Gráfica de tiempo, tensión y corriente proporcionada por la interfaz en tiempo real.....	79
Figura 70 Fuente regulada de 5 [V].	84
Figura 71 Fuente regulada de 12 [V].	84

Figura 72 Fuente regulada de 15 [V].	85
Figura 73 Fuente regulada de 340 [V].	85
Figura 74 Esquemático fuentes de alimentación.	86
Figura 75 PCB fuentes de alimentación.....	87
Figura 76 Implementación fuente regulada de alimentación.....	88
Figura 77 Hoja de datos permeabilidad de la ferrita.	89
Figura 78 Hoja de datos driver de potencia.	90
Figura 79 Hoja de datos del MOSFET implementado.....	91
Figura 80 Hoja de datos del diodo Schottky.	92
Figura 81 Hoja de datos sensor tensión LV-25.	93
Figura 82 Circuito de acondicionamiento del transductor de tensión LV25-NP.	94
Figura 83 PCB circuito acondicionamiento del Transductor de tensión LV25-NP..	94
Figura 84 Hoja de datos sensor de corriente LA-25.....	95
Figura 85 Circuito de acondicionamiento del Transductor de Corriente LA25-NP.	96
Figura 86 Configuraciones de corriente para LA-25.	96
Figura 87 Implementación de los sensores de corriente y tensión.	97
Figura 88 Hoja de datos Microcontrolador ATmega328P modo Fast PWM.....	98
Figura 89 Interfaz en Python 3.4 para el control del prototipo.	101
Figura 90 Tarjeta implementada del troceador reductor.	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Componentes seleccionados fuente de alimentación del prototipo.	32
Tabla 2 Especificaciones de diseño convertidor para el proceso de anodizado. ...	34
Tabla 3 Parámetros diseño de inductancia.	35
Tabla 4 Principales características del sensor LEM LV 25-P.	48
Tabla 5 Principales características del sensor LEM LA 25-P.	52
Tabla 6 Tensión de salida para ciclo de 20% y 70% para una tensión de entrada 120[V].	71
Tabla 7 Tensión de salida con ciclo variable para carga Rmin y Rmax.	75
Tabla 8 Eficiencia y potencia del prototipo de convertidor de potencia para el anodizado de aluminio.	76

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	Fuente de alimentación	84
ANEXO B	Diagrama fuente de alimentación	86
ANEXO C	Tarjeta de la fuente de alimentación	88
ANEXO D	Hoja de datos núcleo EE-80	89
ANEXO E	Hoja de datos driver 1EDI20N12AF	90
ANEXO F	Hoja de datos MOSFET SPB12N50C3	91
ANEXO G	Hoja de datos diodo schottky SCS212AG	92
ANEXO H	Hoja de datos sensor de tensión LV-25	93
ANEXO I	Diagrama y PCB del sensor de tensión	94
ANEXO J	Hoja de datos sensor de corriente LA-25	95
ANEXO K	Diagrama y PCB del sensor de corriente	96
ANEXO L	Tarjeta de sensores LV-25 y LA-25	97
ANEXO M	Modo de trabajo Fast PWM	98
ANEXO N	Algoritmo de comunicación implementado	99
ANEXO O	Algoritmo de control implementado	100
ANEXO P	Interfaz del usuario	101
ANEXO Q	Tarjeta del convertidor DC-DC reductor	102
ANEXO R	Manual del prototipo	103

RESUMEN

TÍTULO: PROTOTIPO DE CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO PARA EL ANODIZADO DE ALUMINIO*

AUTORES: LUIS ALBERTO ALMONACID DELGADO
JORGE ELIECER GOMEZ PINTO
JEISSON ELIECER OCHOA DIAZ**

PALABRAS CLAVES: Convertidor DC-DC, Anodizado, Control, Interfaz

DESCRIPCIÓN:

El prototipo convertidor de potencia surge ante el creciente interés científico del proceso de anodizado para la fabricación de membranas de alúmina, por sus potenciales aplicaciones y a las necesidades propuestas por investigadores químicos de la Universidad Industrial de Santander para obtener diferentes espesores y diámetros de los poros de la membranas modificando las variables del proceso.

En este proyecto se empleó una topología correspondiente a un convertidor DC-DC tipo reductor que proporciona al usuario un dispositivo seguro, eficiente y de fácil manejo. El control de la tensión de salida del convertidor se realiza por medio de un algoritmo de lazo cerrado basado en la técnica de perturbar y observar, que permite seguir una tensión de referencia impuesta por el usuario mediante el uso de sensores de tensión y corriente. El prototipo implementado cuenta con una conexión de tipo USB para conectar con el ordenador donde se encontrará con una interfaz amigable, que permite visualizar la tensión de salida y corriente, las gráficas en tiempo real y se tiene la opción de guardar los datos de tensión, corriente y tiempo del proceso para posteriormente ser analizados. La implementación del prototipo obtuvo como resultado un rango de operación de 30 a 200 [V] y es capaz de suministrar una corriente de hasta 4 [A]. Además, permite realizar varios procesos en paralelo, siendo esto una ventaja para implementar de forma industrial el proceso de anodizado de aluminio.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Directora: Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos
Codirector: MSc Jaime Guillermo Barrero Pérez
Codirector: Dr. Fabián Alirio Ríos Angarita

ABSTRACT

TITLE: CONTROLLED POWER CONVERTER PROTOTYPE FOR ALUMINUM ANODIZED*

AUTHORS: LUIS ALBERTO ALMONACID DELGADO
JORGE ELIECER GOMEZ PINTO
JEISSON ELIECER OCHOA DIAZ**

KEYWORDS: DC-DC Converter, Anodized, Control, Interface.

DESCRIPTION:

The prototype power converter arises from the growing scientific interest on the anodizing process for the manufacture of alumina membranes, because it is growing potential applications and needs proposed by chemical researchers from the Universidad Industrial de Santander in order to obtain different thicknesses and diameters of the pores of the membranes modifying the process variables.

In this project a topology corresponding to a DC-DC converter type reducer was used that provides the user with an safe, efficient and easy to use device. The converter output voltage is controlled through a closed-loop algorithm based on the disturb and observe technique which allows it to follow a reference voltage imposed by the user using voltage and current sensors. The prototype implemented has a USB type connection to connect to the computer where you will find a friendly interface, where it is visualized output voltage and current, the graphics in real time and it has the option of saving the voltage, current and time data of the process to be later analysis. The implementation of the prototype resulted in a range of operation 30 to 200 [V] and can supply a current up to 4 [A]. Also allows to realize some processes in parallel being this a benefit to implement of industrial form the aluminum anodizing process.

* Graduate Project.

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering's, Electronics and Telecommunications.

Director: Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos.
Codirector: MSc Jaime Guillermo Barrero Pérez
Codirector: Dr. Fabián Alirio Ríos Angarita

INTRODUCCIÓN

En 1857, Buff fue el primero en observar que se podía oxidar electroquímicamente el aluminio en una solución acuosa obteniendo una capa de óxido más delgada que la del óxido nativo (generado por el contacto con el oxígeno)¹. En la década de 1920 este fenómeno comenzó a ser explorado con fines tecnológicos, como por ejemplo para proteger de la corrosión por agua marina el metal de los aeroplanos. Luego, surgieron del óxido poroso propiedades ingenieriles útiles como es una mayor rigidez, y la adhesión de pinturas debido a la naturaleza porosa. Actualmente, estos productos anodizados son accesibles para el uso cotidiano: capacitores electrolíticos, vehículos y materiales de arquitectura, entre otros².

Hoy en día el proceso de anodizado de aluminio se ha hecho muy común ya que proporciona y garantiza una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste frecuente, su utilización abarca desde el sector industrial hasta el sector sanitario y medioambiental. El anodizado se lleva a cabo en una celda compuesta por dos electrodos, el cátodo constituido por la lámina de aluminio, y el ánodo constituido por un cilindro delgado de acero inoxidable en una solución de ácido, con una tensión variable aplicada en los electrodos, empleando un determinado tiempo y temperatura según el usuario. Terminado el proceso se forma una delgada capa de óxido que pasa a formar parte integral del material, esta capa anódica creada aumenta de forma notable la dureza y resistencia natural del metal, conservando así muchas de sus propiedades y convirtiendo la superficie del metal en aislante eléctrico³.

¹ BUFF, Heinrich. Interpretación de la obra de arte. Ueber das electrische Verhalten des Aluminiums. Justus Liebigs Ann. Chem, 1857, Vol 102, p. 265–284.

² BENGOUGH, Stuart. Improved process of protectingsurfaces of aluminium of aluminium alloys. U.K. Patent 223, 994., August 2, 1923

³ RAMIREZ, Jose. RAMIREZ, Lindon. Efecto del anodizado sobre la razón de desgaste de una aleación de aluminio 6061. Trabajo de grado., Ciudad Universitaria. Universidad de el salvador. : Facultad de ingeniería y arquitectura, 2009.

El espesor de la delgada capa está determinado por diversas variables como lo son la temperatura, la tensión aplicada y el tiempo de anodizado. Por esta razón para llevar a cabo un proceso de anodizado correctamente se requiere de una fuente controlada. En el presente trabajo se realizará el diseño e implementación de este dispositivo que suministre una corriente deseada a los electrodos en un tiempo determinado. Además, el prototipo contará con un interfaz con el usuario para la configuración de tensión y tiempo dependiendo de las condiciones de las pruebas obteniendo la visualización de los datos.

Por otro lado, el proceso de anodización para la fabricación de óxidos porosos ha cobrado interés científico en el campo de la nano ciencia, por sus potenciales aplicaciones en la síntesis de nuevos materiales. Así, la anodización es un método que ha sido empleado en numerosos estudios para la modificación de superficies, humectación de plantillas, desarrollo de máscaras, entre otros fines⁴.

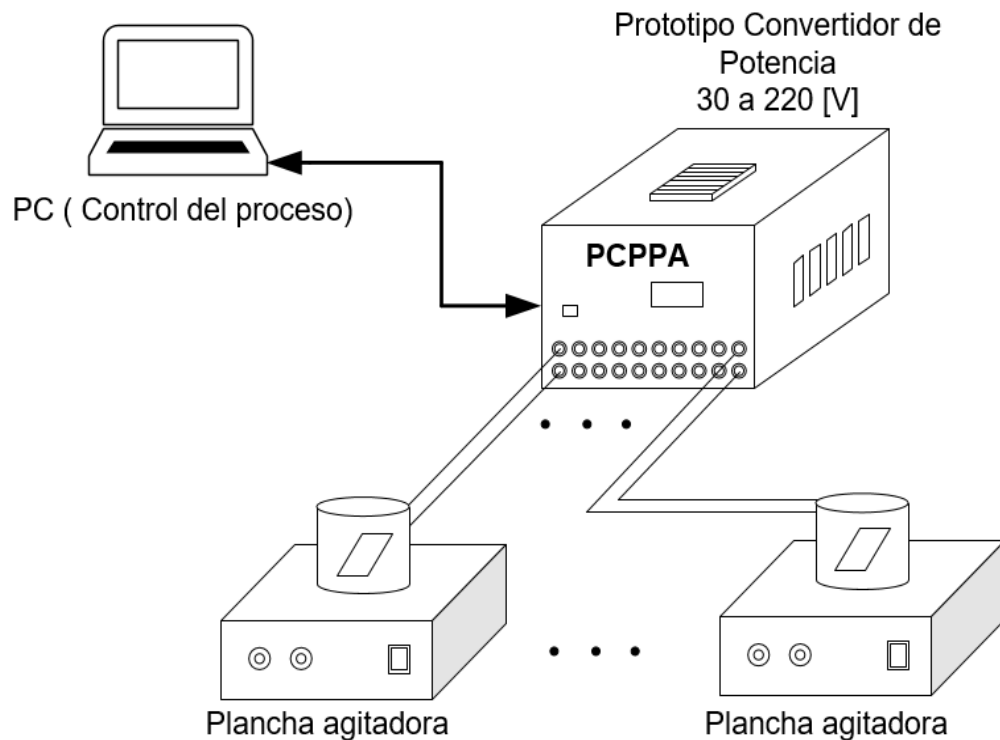
En el proceso se utiliza un material como ánodo y otro como cátodo, sumergidos en una solución electrolítica, los cuales se encuentran conectados a una fuente de tensión continua. El ánodo es aquel que está conectado al polo positivo de la fuente y entrega electrones a la película.

Este trabajo aborda el diseño e implementación de un prototipo convertidor DC-DC de tipo reductor, el cual sigue tensiones entre 30 y 200 [V], alcanzado una corriente máxima de hasta 4 [A]. Además, se cuenta con la capacidad de realizar 10 procesos de anodizado en paralelo, así como se presenta en la Figura 1, de esta forma permitiendo procesos a nivel industrial. El prototipo permite regular una de las variables de operación de mayor influencia como es la tensión suministrada en los electrodos, necesaria en el proceso según las necesidades del usuario. En este sentido el prototipo a implementar contará con una interfaz que usa el protocolo de

⁴ GRZEGORZ, Sulka LESZEK, Zaraska. WOJCIECH, Stępniewski. Anodic Porous Alumina as a Template for Nanofabrication. In Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology,, 2nd ed.; Nalwa, H. S., Ed. American Scientific

comunicación serial por medio de la utilización de la herramienta de programación Python donde se realiza la adquisición y visualización de los datos en tiempo real desde una plataforma de hardware libre, obteniendo los datos de los sensores que se conectan a dichos periféricos, además donde se realiza el envío de las variables de control del prototipo.

Figura 1 Montaje utilizado para el desarrollo del proceso de anodizado de aluminio.



Fuente. Autores

A continuación, se presenta una descripción sobre el proceso de anodizado de aluminio y el convertidor de potencia considerado para la implementación del prototipo.

1. ANODIZADO DE ALUMINIO

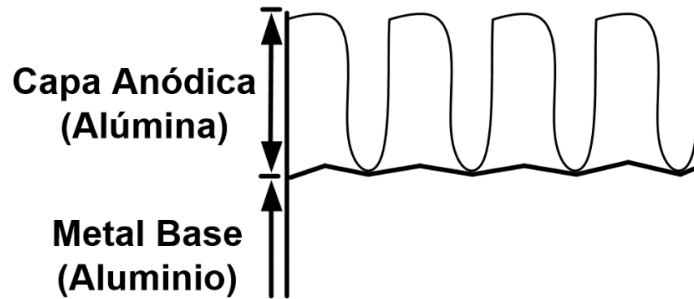
Las primeras patentes registradas en anodizado de aluminio fueron alrededor del año 1911, donde Saint-Martin, a partir de una solución a base de ácido sulfúrico logra su primer proceso anódico. Años más tarde, se generan patentes con ácido crómico por Bengough y Stewart, a su vez Hojin y Rikagaku también forman bases con ácido oxálico. Actualmente la mayoría de procesos de anodizado se realizan con estos componentes químicos⁵

El anodizado de aluminio es un proceso superficial que consiste en modificar la superficie del aluminio y sus aleaciones. Este proceso consiste en obtener de manera artificial películas de óxido de mayor espesor y con mejores características de protección que las capas naturales. Las capas de oxidación se obtienen de manera controlada al aplicar tensión a una solución electrolítica neutra y su crecimiento depende de variables controladas como son tiempo, temperatura, densidad de corriente, pureza del material entre otras.

El mecanismo de oxidación anódica está formado por 2 capas. Una capa interna fina, densa y compacta, llamada capa barrera y una capa externa porosa. La capa barrera se forma en los primeros minutos del proceso a una tensión elevada y es directamente proporcional a la tensión de trabajo, esta estructura no es porosa y es conductora de corriente. Sobre la capa barrera se forma una capa porosa o externa, la cual tiene punto de crecimiento en la parte inferior de los poros, siendo el ion de aluminio el que emigra a través de la capa barrera. Los poros que se van formando son en forma de celdillas paralelas y normales a la superficie del metal como se ve en la Figura 2.

⁵ HERNÁNDEZ, Jeanette. LEAL, Carlos. Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones de aluminio AA 6063 y AA 8011, utilizando diferentes métodos de sellado., Venezuela. 2011.: Vol. 2 No.5., En: REPID: UNEXPO. VRB. .

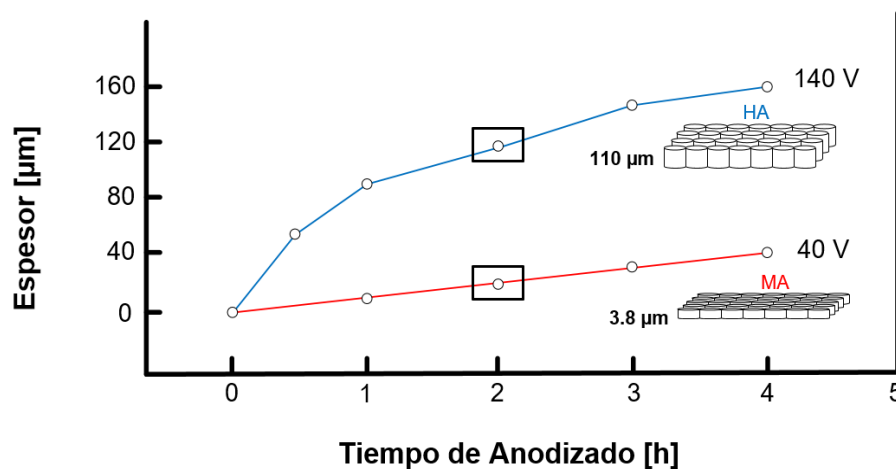
Figura 2 Capa barrera del anodizado de aluminio.



Fuente. Imagen tomada de Efecto del anodizado sobre la razón de desgaste de una aleación de aluminio 6061

El anodizado de aluminio se encuentra dividido por anodizado suave y anodizado duro. El anodizado suave consiste en capas de óxido menores a 30 μm , estas capas se generan con tensiones menores a los 60 [V] y son utilizadas para acabados y embellecimiento de espacios interiores y exteriores. Para procesos industriales, submarinos y recubrimiento de superficies de ambientes hostiles se utiliza anodizado fuerte el cual tiene capas de 30 a 100 μm y en casos especiales de mayor tamaño. Estas capas se generan con tensiones mayores a los 120 [V], ver en la Figura 3.

Figura 3 Anodizado suave y anodizado duro.



Fuente. Imagen tomada de Fast Fabrication of Long-Range Ordered Porous Alumina Membranes by Hard Anodization

2. TROCEADOR O CONVERTIDOR DC-DC

Los convertidores DC-DC son circuitos que convierten una tensión continua no regulada en un nivel deseado de tensión regulada continua. Existen diferentes tipos de convertidores, como son reductores, elevadores y reductor-elevador, a la vez cada uno de ellos presenta diferentes topologías que son aplicadas en fuentes de alimentación reguladas, cargadores de batería y ordenadores, entre otros.

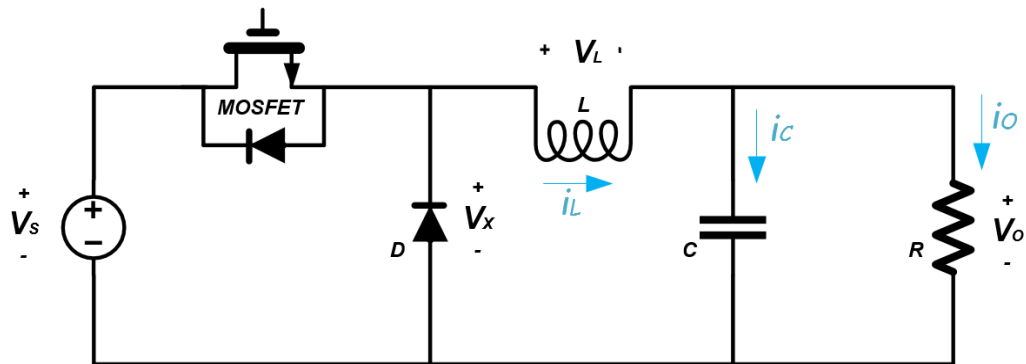
Los convertidores son usualmente usados en la industria, para reducir o aumentar un nivel de tensión. Un convertidor DC convierte directamente la señal de entrada DC en otra DC a la salida.

Una fuente de alimentación se define como un dispositivo electrónico, el cual tiene como propósito generar una o varias tensiones, que puede tener una o dos polarizaciones. Estas fuentes son diseñadas y utilizadas según el área de trabajo que se tenga y las especificaciones requeridas en cuanto a tensión, corriente y eficiencia.

2.1 CONVERTIDOR DC-DC REDUCTOR O BUCK CONVERTER

En el circuito de la Figura 4, se muestra la configuración típica de un convertidor reductor, donde un transistor funciona como interruptor y la conmutación de dicho dispositivo se debe a la señal de activación que este recibe entre la compuerta y la fuente, para el caso particular de un MOSFET, dicha señal es de tipo modulación por ancho de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*).

Figura 4 Convertidor reductor topología clásica.



Fuente. Autores

Este circuito puede operar en dos posibles modos: modo continuo y modo discontinuo, dependiendo si la corriente por el inductor cae a cero o no en cada periodo de conmutación. Para la implementación del prototipo se considera la operación del convertidor en modo continuo.

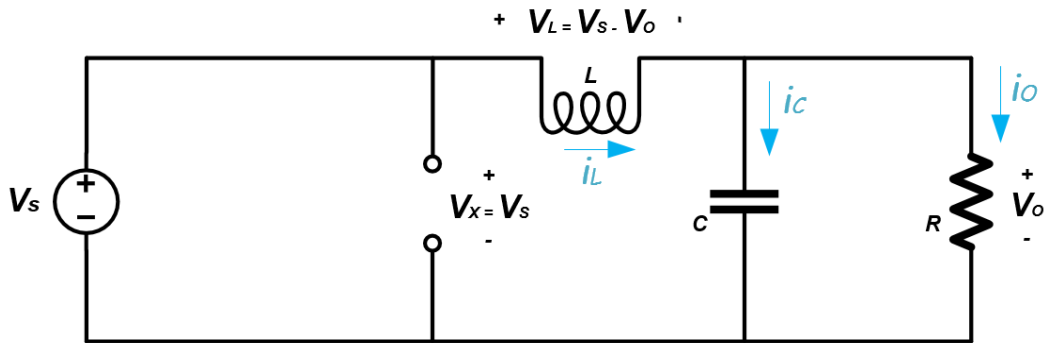
Operación en modo continuo: Para el análisis de este circuito, primero se tienen en cuenta los 2 posibles estados del MOSFET, cuando actúa como un interruptor abierto y como un interruptor cerrado: Si se tiene un periodo de conmutación T , se puede definir el tiempo que el MOSFET permanece cerrado como DT , de lo contrario si está abierto se define como $(1-D) T$ donde D ($0 \leq D \leq 1$) es el ciclo útil de trabajo. En este modo se opera como continuo, es decir, el valor de la corriente por la bobina es positivo y diferente de cero.

En el intervalo donde el transistor opera en el rango de $(0 \leq t \leq DT)$ como se muestra en la Figura 5, la tensión en la bobina esta descrita por la ecuación (1) De esta ecuación se obtiene la variación de la corriente en la bobina tal como se presenta en la ecuación (2).

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_o \quad (1)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_s - V_o}{L} DT \quad (2)$$

Figura 5 Circuito equivalente interruptor operando modo cerrado.



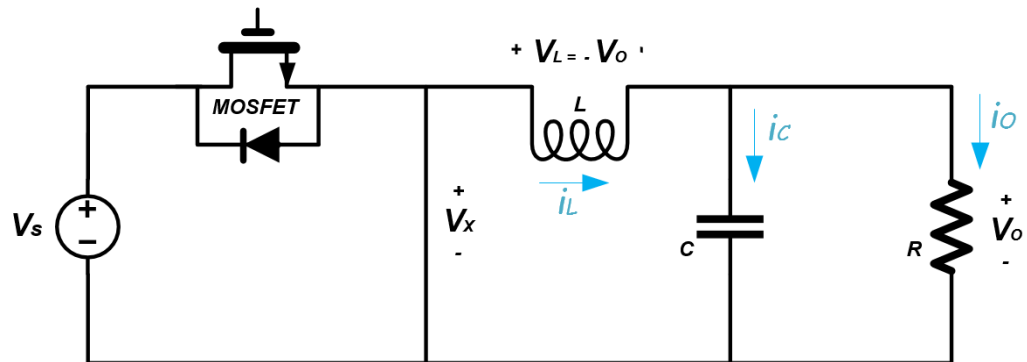
Fuente. Autores

En el intervalo cuando se abre el interruptor ($DT < t < T$) el circuito es equivalente al presentado en la Figura 6 y la tensión en el inductor está dada por la ecuación (3). Esta ecuación al igual que en el caso del interruptor cerrado es evaluada e igualada para obtener la variación de la corriente en la ecuación (4).

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (3)$$

$$\Delta i_L = \frac{-V_o}{L} (1 - D)T \quad (4)$$

Figura 6 Circuito equivalente interruptor operando modo abierto.



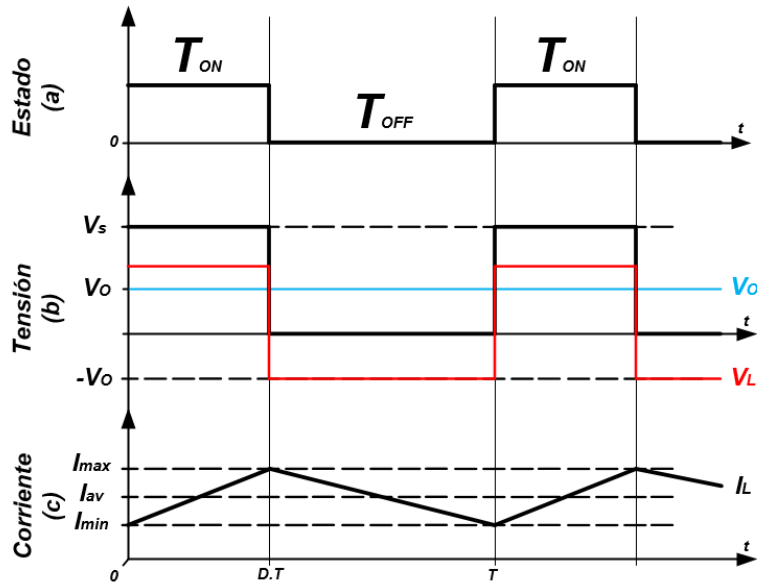
Fuente. Autores

Igualando las ecuaciones (2) y (4), se llega a la relación de un convertidor reductor según la ecuación (5).

$$V_o = V_s D \quad (5)$$

En la Figura 7, se pueden apreciar las formas de onda del troceador reductor. En el instante donde el MOSFET actúa en modo cerrado, la corriente por la bobina aumenta de forma lineal y cuando actúa en modo abierto, la bobina es quien suministra corriente al circuito y empieza a descargarse como se ve en la Figura 7(c) hasta el instante donde nuevamente se activa la puerta del MOSFET.

Figura 7 Forma de onda troceador reductor. (a) Onda de activación del MOSFET. (b) Tensión de salida y tensión en la bobina. (c) corriente en la bobina.



Fuente. Imagen tomada y modificada Electrónica de potencia segunda edición.

3. FINALIDAD DEL TRABAJO DE GRADO

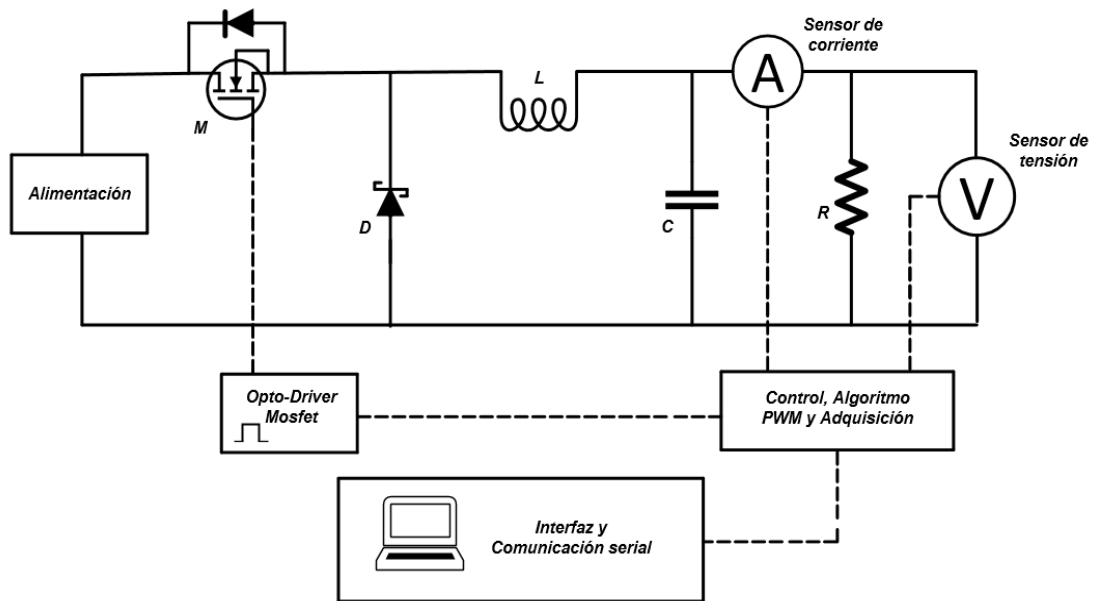
Este trabajo tiene como principal objetivo diseñar e implementar un prototipo controlado de un convertidor de potencia para el anodizado de aluminio el cual incluya adquisición y visualización de datos. Para llevar a cabo este trabajo se realizarán las siguientes tareas:

- Simular el convertidor de potencia para determinar los componentes requeridos para su implementación.
- Programar un sistema digital que controle el convertidor de potencia con el fin de seguir una tensión de referencia.
- Incluir al prototipo una interfaz de comunicaciones con el computador para la visualización y configuración de los parámetros del proceso.
- Implementar el prototipo de convertidor de potencia para el proceso de anodizado.

4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño e implementación del prototipo se divide en 5 etapas: Fuente de alimentación, diseño y simulación del convertidor DC/DC reductor, adquisición de parámetros eléctricos de tensión y corriente, sistema de control y finalmente interfaz de usuario. A continuación, en la Figura 8 se muestran los esquemas de cada etapa.

Figura 8 Diagrama de prototipo convertidor reductor a implementar.



Fuente. Autores

4.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Gran cantidad de dispositivos electrónicos emplean tensiones de alimentación de corriente continua, las cuales deben estar aisladas de la tensión de red y del circuito de potencia para evitar posibles accidentes.

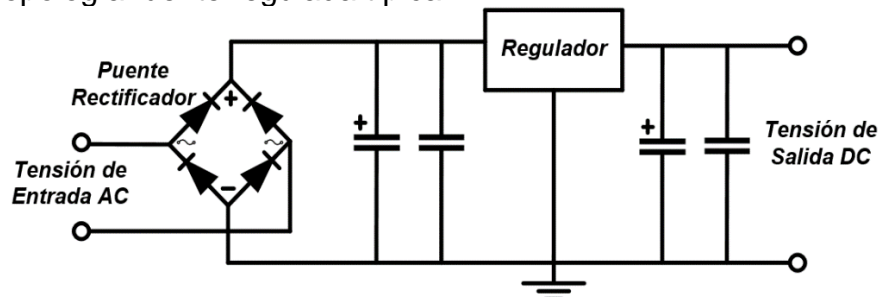
Para este prototipo los requerimientos son 6 salidas, la primera de +340 [V] a 4 [A] para la alimentación del reductor, otra salida de +15 [V] a 1,5 [A] para alimentar el driver del MOSFET, otra salida de +12 [V] a 1 [A] para alimentar el extractor de calor del prototipo, dos salidas duales de +12[V] y -12[V] a 0,5 [A] para la

alimentación de los sensores de tensión y corriente y finalmente una salida de +5[V] a 0,5 [A] para la alimentación de la etapa ADC de los sensores y el microcontrolador.

Se diseñó e implementó una fuente regulada para obtener la alimentación deseada, de esta forma se asegura la estabilidad de las tensiones de alimentación a diferentes perturbaciones de la red eléctrica. Inicialmente se implementa una etapa de rectificación, luego filtrado y finalmente regulación.

Se toma como base una fuente regulada típica como lo muestra la Figura 9 de igual forma como la fuente entrega varios niveles de tensión se emplea un transformador con 6 salidas de +243[Vrms] a 4[A], +18[Vrms] a 1,5 [A], +15[Vrms] a 1[A], +15[Vrms] a 0,5[A], -15[Vrms] a 0,5[A], +8[Vrms] a 0,5 [A] respectivamente como se muestra en la Figura 9 .

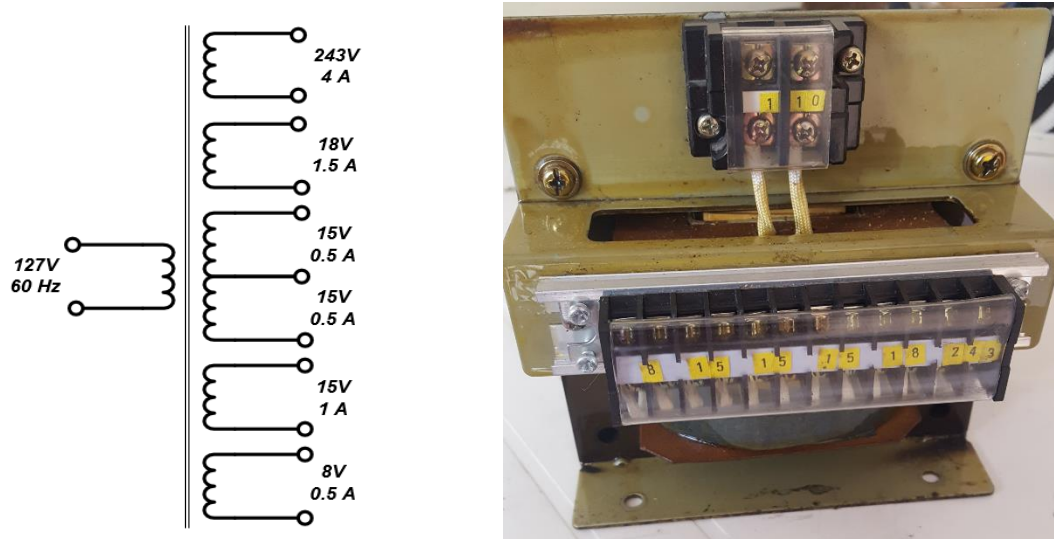
Figura 9 Topología fuente regulada típica.



Fuente. Autores

Siguiendo los requerimientos del prototipo y basándose en la topología básica se diseñó y simuló la fuente deseada (ver ANEXO A) utilizando reguladores lineales L78S15CV para +15[V], LM7812 para +12[V], LM7912 para -12[V], y LM7805 para +5[V]. Su elección se basa en el fácil acceso en el mercado y su bajo costo, de igual forma son elementos adecuados para realizar la fuente regulada para el prototipo.

Figura 10 Transformador implementado para el prototipo.



Fuente. Autores

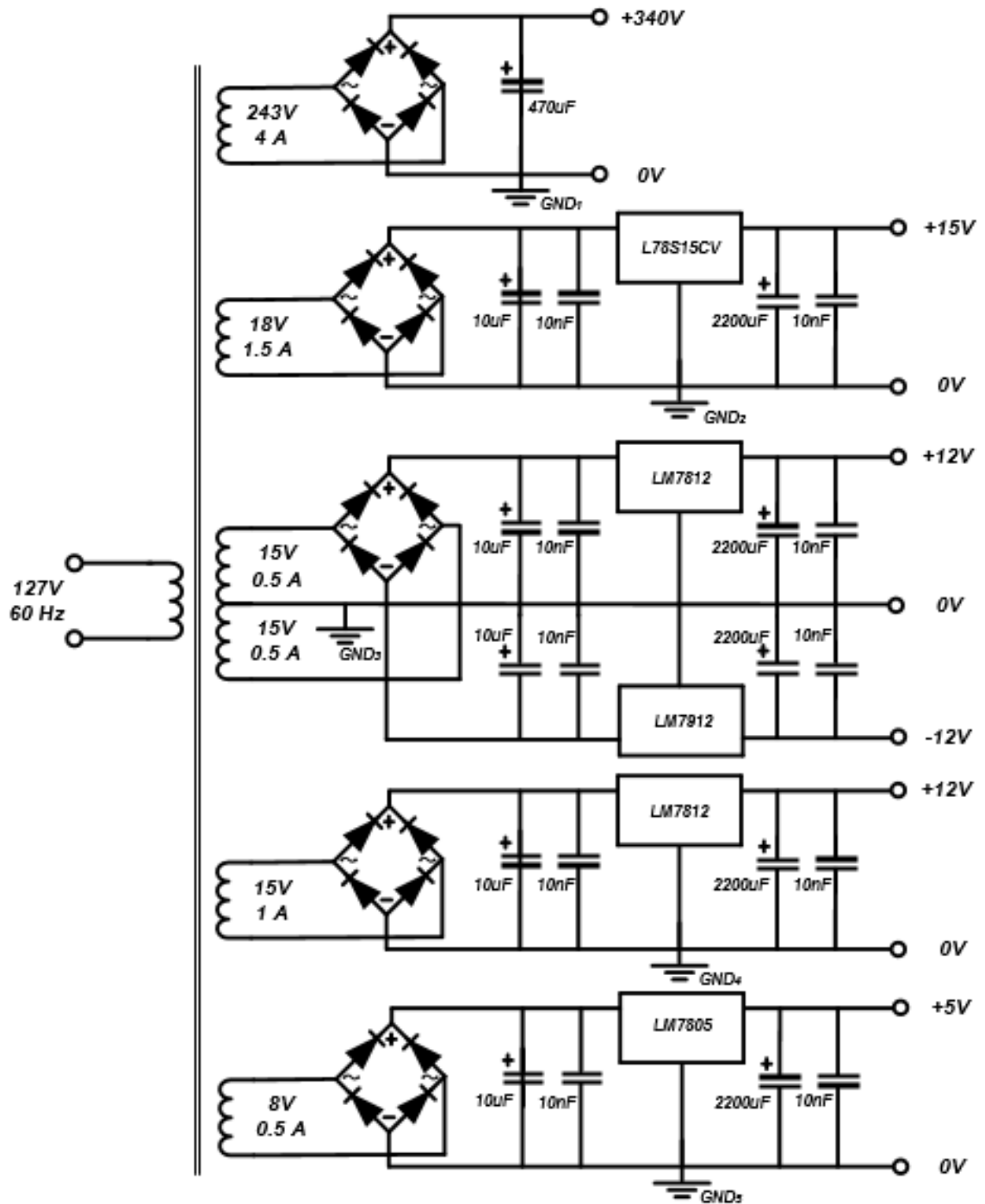
Se procede a implementar la fuente regulada como lo muestra la Figura 11 el esquemático y la PCB se muestran en el ANEXO B, los componentes electrónicos seleccionados se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1 Componentes seleccionados fuente de alimentación del prototipo.

Elemento	Cantidad	Valor o Referencia
Conector	6	Dos vías
Borneras	2	Seis vías
Puente rectificador	1	15[A]
Puente rectificador	1	8[A]
Puente rectificador	3	3[A]
Condensador cerámico	10	10[nF]
Condensador electrolítico	5	10[uF]/35[V],25[V],20[V]
Condensador electrolítico	5	2200[uF]/35[V],25[V],20[V]
Regulador +15[V]	1	L78S15CV
Regulador +12[V]	2	LM7812
Regulador -12[V]	1	LM7912
Regulador +5[V]	1	LM7805

Fuente. Autores

Figura 11 Fuente regulada completa del prototipo.



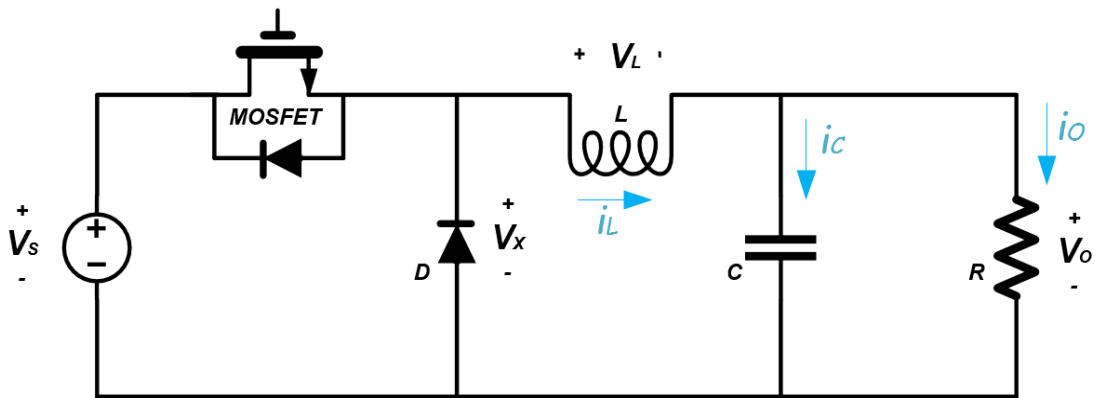
Fuente. Autores

El circuito de alimentación implementado se muestra en el ANEXO C.

4.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA

En esta fase se realizó el diseño y simulación de un convertidor reductor como lo muestra la Figura 12, que cumple con los parámetros de diseño necesarios para el funcionamiento del prototipo convertidor de potencia para el anodizado de aluminio.

Figura 12 Topología convertidor reductor o Buck converter.



Fuente. Autores

4.2.1 Especificaciones de diseño: Las especificaciones propuestas para el diseño del troceador por el proceso de anodizado de aluminio para 10 procesos en paralelo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Especificaciones de diseño convertidor para el proceso de anodizado.

Parámetros	Valor
Tensión de entrada, V_s	340[V]
Ciclo de trabajo, D	Variable
Frecuencia de conmutación, f	62.5[kHz]
Resistencia de salida (Carga), R	50-200[Ω]
Tensión de salida, V_o	30-200[V]
Corriente de salida, I_o	0.01-4[A]

Fuente. Autores

La tensión de entrada de 340 [V] se obtiene de un transformador de relación 1:2.2. El ciclo de trabajo (D) es variable ya que en el anodizado de aluminio la tensión debe ir aumentando a medida que el proceso avanza y según el valor de referencia indicado por el usuario. La tensión de salida será variable de 30 a 200 [V] con una corriente de 0.1 a 4 [A] y se considera una frecuencia de conmutación de 62.5 [kHz].

La selección del inductor y de la capacitancia se realizó teniendo en cuenta que el troceador funciona en modo continuo. El inductor se calcula a través de la ecuación (6) teniendo en cuenta que la frecuencia de trabajo es de 62.5kHz, el ciclo de trabajo es variable y la resistencia de carga máxima es de 200 Ω , que es el valor de resistencia crítico de las placas de aluminio.

$$L = \frac{V_s D(1 - D)}{\Delta I f} \quad (6)$$

Donde ΔI se puede obtener reemplazando la ecuación (7) en (8)

$$iL_{prom} = \frac{V_s D}{R} \quad (7)$$

$$\Delta I = (\%rizado)(iL_{prom}) \quad (8)$$

En la Tabla 3. se muestran los valores obtenidos en el diseño de la inductancia para diferentes ciclos de trabajo considerando una tensión de entrada de 340 [V].

Tabla 3 Parámetros diseño de inductancia.

I_o [A]	D	V_s [V]	V_o [V]	f [kHz]	$L_{Diseño}$ [H]
0.01	0.9	340	306	62.5	48.96m
0.01	0.1	340	34	62.5	48.96m
0.01	0.5	340	170	62.5	136m

Fuente. Autores

Se obtiene un valor de $L = 136\text{mH}$. Añadiendo un margen de seguridad del 20% se procede a la construcción de la bobina con un valor de $L=160\text{mH}$.

El valor del condensador se obtiene con la ecuación (9), que depende de la tensión de rizado. Se considera un valor de rizo del 0.01%. Para este caso se obtiene un capacitor de 11.76nF , tomando el valor comercial más cercano se opta por un capacitor de 10nF .

$$\frac{(\Delta V_0)}{V_0} = \frac{(1 - D)}{8LCf^2} \quad (9)$$

Cabe aclarar que la corriente que va a pasar por el circuito es de aproximadamente 4 [A] y el valor de la inductancia para puntos críticos es de 160mH a 62.5kHz . Esta inductancia no es posible encontrarla en el mercado fácilmente, así que se dio a la tarea de diseñar la bobina y construirla.

4.2.2 Diseño de bobina: El núcleo de la bobina debido a la velocidad de conmutación debe ser de ferrita de alta frecuencia. Se optó por un núcleo EE80 por su tamaño y características de operación de alta frecuencia. El cálculo del inductor se da por la ecuación (10), donde A_L es la permeabilidad de la ferrita (ver ANEXO D), donde N es el número de vueltas en el núcleo y L es el valor de la inductancia a obtener. Para el núcleo EE80 se obtiene la ecuación (11).

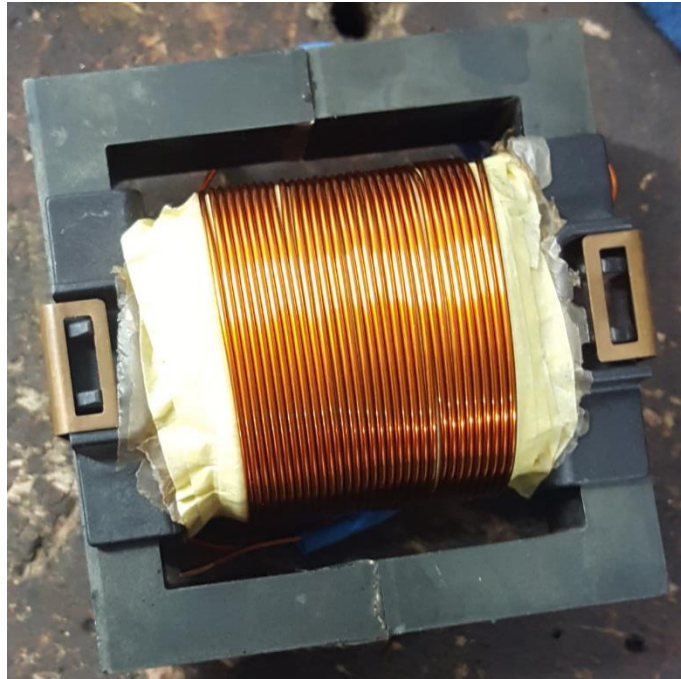
$$L = A_L N^2 \quad (10)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{160\text{mH}}{6100\text{nH}}} \quad (11)$$

De la ecuación (11) se obtiene un total de $N = 161.9$ vueltas como valor mínimo teórico. En el momento de construir la bobina se obtuvieron $N = 204$ vueltas para

un valor de inductancia de $L = 160.4[\text{mH}]$. La bobina construida para el prototipo se muestra en la Figura 13.

Figura 13 Bobina construida para prototipo convertidor de potencia.

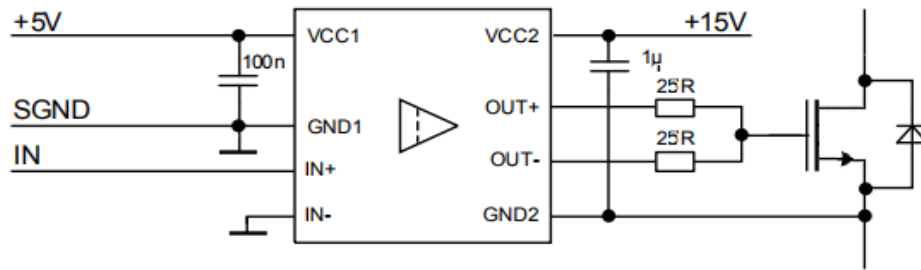


Fuente. Autores

4.2.3 Etapa de desacoplamiento y adecuación de la señal de disparo del MOSFET: Las salidas digitales del microcontrolador de referencia ATmega328p no exceden los 5 [V] y 50 [mA], es decir no proporcionan la suficiente tensión y corriente requerida para encender el MOSFET, por esto se utiliza un sistema de adecuación de la señal capaz de aumentar y desacoplar la señal por seguridad del microcontrolador y el usuario.

Para la implementación de esta etapa se utiliza un Opto-Driver de marca INFINEON de referencia 1EDI20I12AF que se encuentra en el ANEXO E. Este dispositivo aumenta la señal de conmutación a niveles de 0 a 15 [V] de acuerdo con la topología implementada como se muestra en la Figura 14.

Figura 14 Topología Opto-Driver de referencia 1EDI20I12AF implementada.



Fuente. Tomada de hoja de datos 1EDI20I12AF del fabricante INFINEON.

4.2.4 MOSFET y diodo Schottky: Para la selección del MOSFET se tuvieron en cuenta parámetros como la tensión Drenador-Surtidor, la velocidad de conmutación, es decir el tiempo de encendido y apagado del MOSFET, la corriente máxima de drenador y el costo del dispositivo.

Para la implementación del convertidor se utilizará un MOSFET de potencia de canal N. Para determinar las especificaciones se deben hallar los valores máximos a los que será sometido en su funcionamiento normal. De acuerdo a la ecuación (12) y (13) se obtiene la corriente promedio y la corriente de drenador máxima del transistor a utilizar.

$$I_{Qprom} = I_{Omax}D_{max} = (4)(0.7) = 2.8 [A] \quad (12)$$

$$I_Q = 4 [A] \quad (13)$$

Por lo que se debe seleccionar un MOSFET con un valor mayor al indicado en la ecuación anterior. Otro aspecto importante es el voltaje máximo de drenador y surtidor, ya que en las simulaciones se obtienen tensiones de 340 [V] entre drenador y surtidor, y la tensión entre puerta-surtidor es proporcionada por el Opto-driver como se mencionó anteriormente. De igual forma se debe tener en cuenta la disipación de potencia del dispositivo, la cual se denomina como pérdidas y se

destacan dos tipos: las pérdidas por conmutación y las pérdidas por conducción. Las pérdidas por conducción, como lo muestra la ecuación (14), son generadas cuando el dispositivo se encuentra encendido.

$$P_{CON}^Q = R_{DS(on)} I_{Qprom}^2 \quad (14)$$

donde $R_{DS(on)}$ es la resistencia entre drenador y surtidor del MOSFET en estado de encendido. Las pérdidas por conmutación dependen de parámetros como temperatura, corrientes parásitas, entre otras. Una aproximación de estas pérdidas durante el encendido y el apagado del MOSFET se muestran en las ecuaciones (15) y (16), respectivamente.

$$P_{ON}^Q = \frac{1}{2} V_{DS} I_{Qprom} t_r f_s \quad (15)$$

$$P_{OFF}^Q = \frac{1}{2} V_{DS} I_{Qprom} t_f f_s \quad (16)$$

Donde t_r y t_f son los tiempos de subida y bajada del MOSFET. Finalmente, las pérdidas totales por conmutación y conducción en el MOSFET se muestran en la ecuación (17).

$$P_Q = P_{CON}^Q + P_{ON}^Q + P_{OFF}^Q = R_{DS(on)} I_{Qprom}^2 + \frac{1}{2} V_{DS} I_{Qprom} f_s (t_r + t_f) \quad (17)$$

Entonces la potencia disipada aproximada es de $P_Q = 2.97 [W]$. Analizando las diferentes especificaciones para el MOSFET se optó por la referencia SPB12N50C3 (ver ANEXO F), con $V_{DS} = 560 [V]$, $R_{DS(on)} = 0.38[\Omega]$, $T_r = 8 [ns]$, $T_f = 8 [ns]$ e $I_D = 11.6 [A]$ a 25°C .

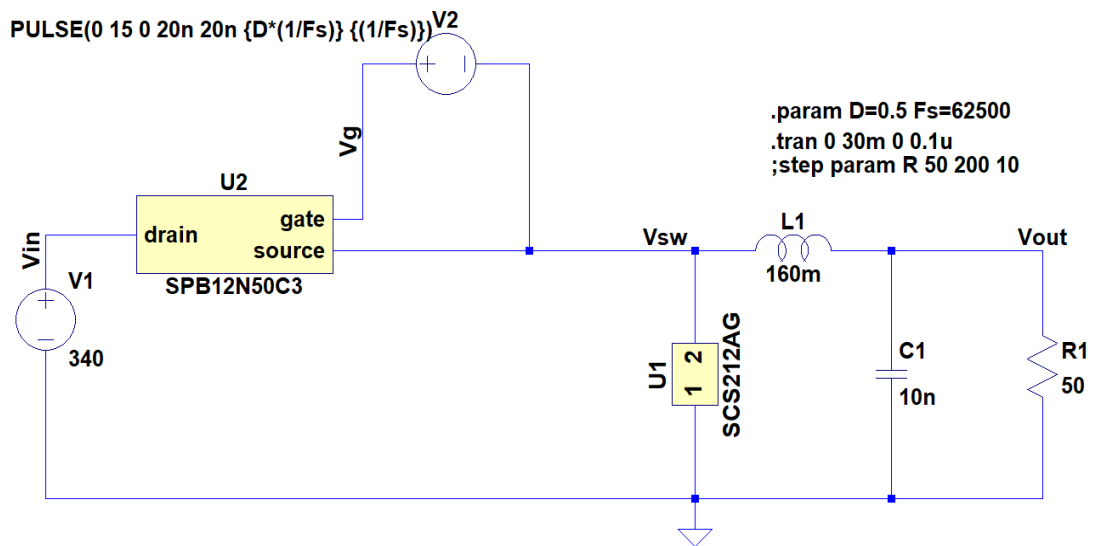
De igual forma en la elección del diodo Schottky se tiene en cuenta la tensión inversa, la corriente directa y la velocidad de conmutación ya que este diodo debe

conmutar a la misma velocidad que el MOSFET. Se optó por el diodo de referencia SCS212AG (ver ANEXO G) con $V_R = 650 [V]$, $T_c = 16 [ns]$ y $I_F = 12 [A]$.

4.2.5 Simulación troceador reductor: Para la simulación del Troceador reductor se empleó el software libre proporcionado por la empresa ‘Linear Technology’ llamado LTspice VII, un simulador de circuitos electrónicos de alto rendimiento basado en Spice1.

En la simulación del convertidor de potencia se encuentran los modelos del MOSFET y el diodo schottky proporcionados por la empresa Infineon y ROHM Semiconductor, respectivamente, para realizar simulaciones más precisas y evidenciar con más detalle el comportamiento de los mismos. A continuación, se muestra en la Figura 15 el esquemático realizado en el software LTspice VII.

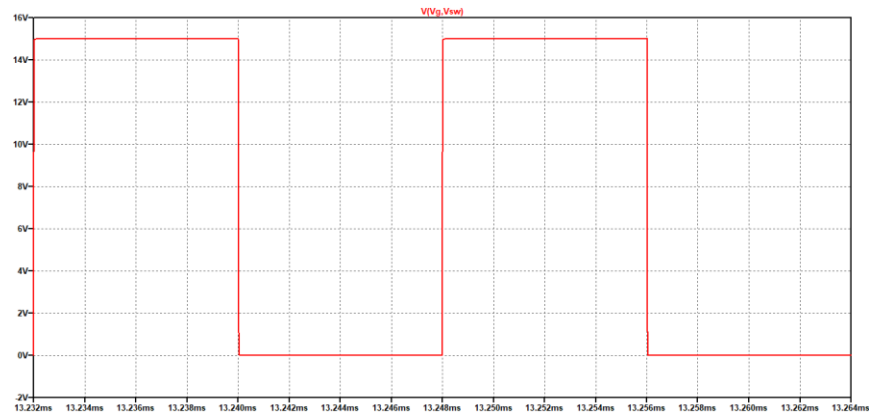
Figura 15 Esquemático del convertidor reductor realizado en el software LTspice VII.



Fuente. Autores

La señal a la salida del Opto-driver en la simulación se obtiene a través de una fuente de pulsos con amplitud de 15 [V] como lo muestra la Figura 16.

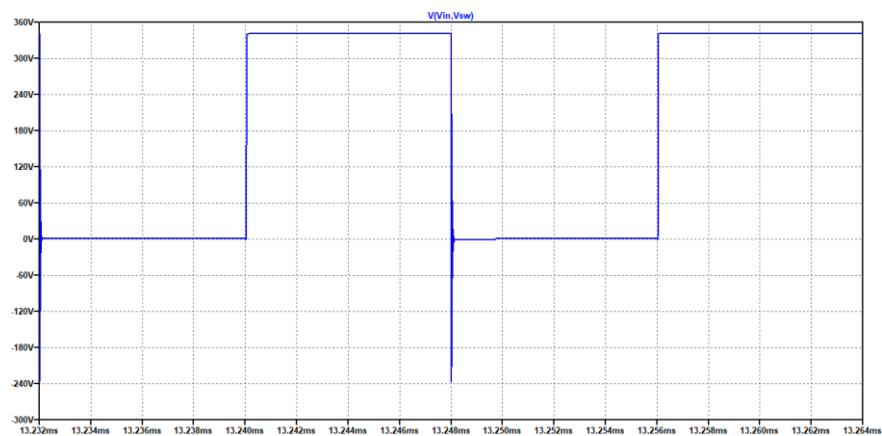
Figura 16 Simulación de la señal de encendido del MOSFET puerta-surtidor proporcionada por el Opto-Driver con D del 50%.



Fuente Autores

Los resultados de simulación correspondientes a la tensión Drenador-Surtidor muestran la existencia de picos de tensión que pueden ocasionar daños en el MOSFET de potencia como lo muestra la Figura 17. Como seguridad para la implementación se opta por un MOSFET con $V_{(BR)DS}$ mayor o igual a 500 [V].

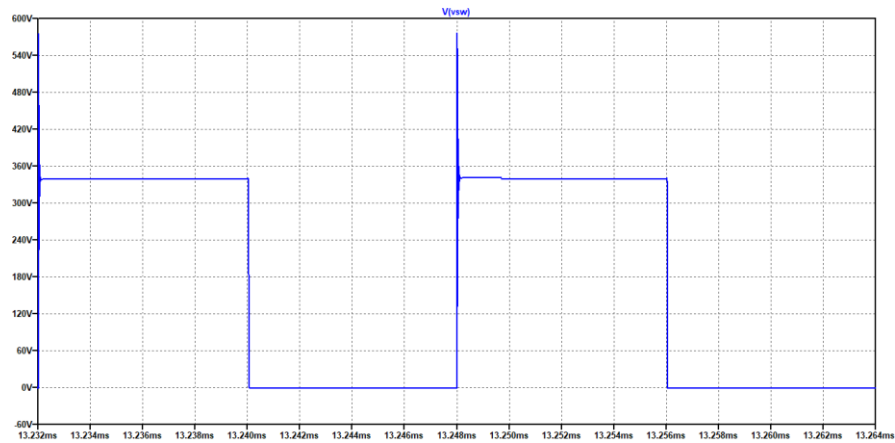
Figura 17 Simulación tensión Drenador-Surtidor del MOSFET de potencia con D del 50%.



Fuente. Autores

De igual forma en la Figura 18, se observan picos de tensión en el diodo que pueden ocasionar daños en el diodo Schottky. Se recomienda por seguridad en el momento de implementación optar por un diodo con $V_R \geq 600$ [V].

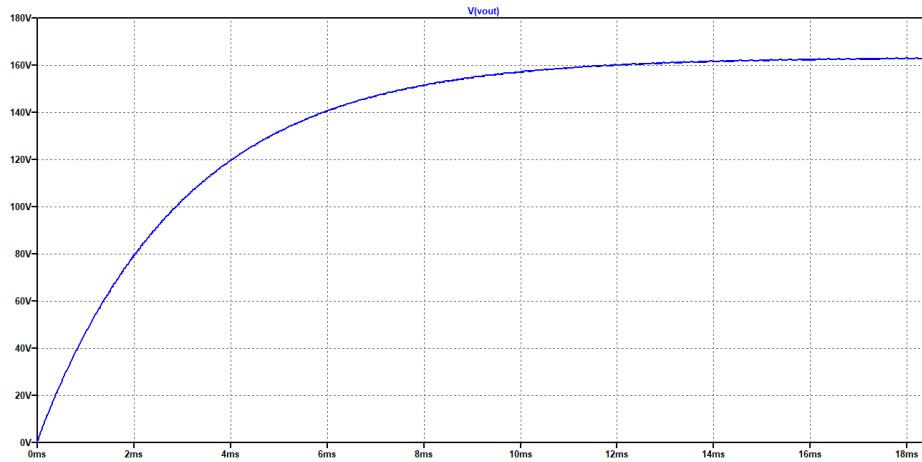
Figura 18 Simulación tensión en el diodo Schocttky con D del 50%.



Fuente. Autores

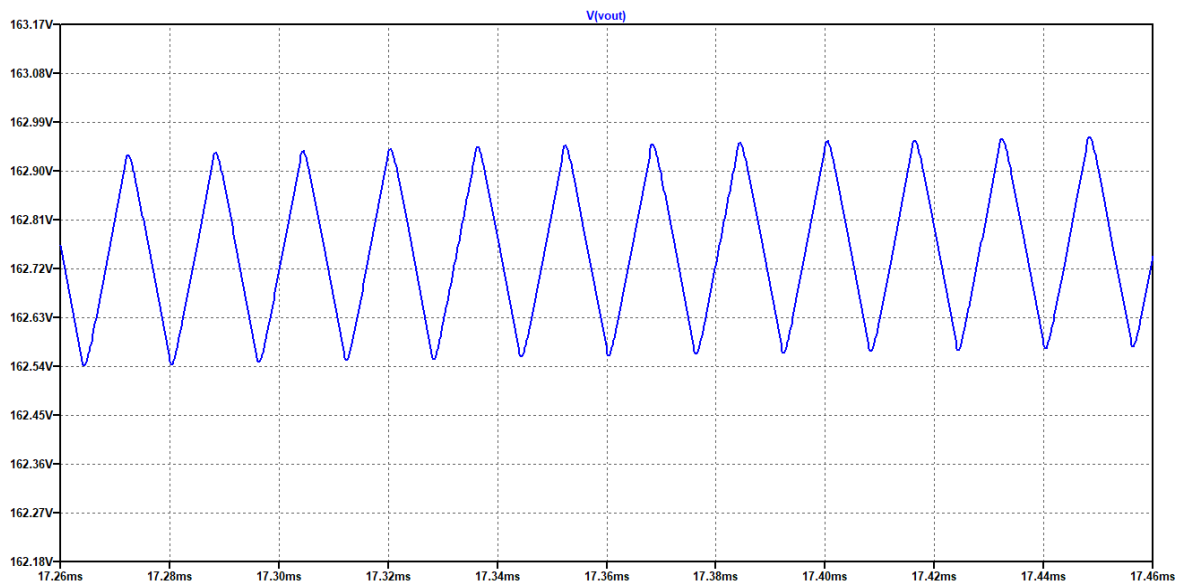
La tensión de salida del convertidor para un ciclo de trabajo del 50% y una resistencia de carga de 50Ω se observa en la Figura 19. Se obtiene una tensión de salida $V_o = 162.745$ [V] con un rizo de tensión $\Delta V_o = 0.155$ [V] (ver Figura 20). Tal como se observa en la Figura 19, para la resistencia mínima de carga de $50[\Omega]$ el tiempo de establecimiento de la tensión de salida es aproximadamente 18[ms]. Este tiempo de establecimiento es menor entre mayor sea la resistencia de carga.

Figura 19 Simulación tensión a la salida del convertidor de potencia para R_{min} de $50\ \Omega$ y D del 50%.



Fuente. Autores

Figura 20 Simulación del rizo de tensión a la salida con R_{min} de $50\ \Omega$ y D del 50%.



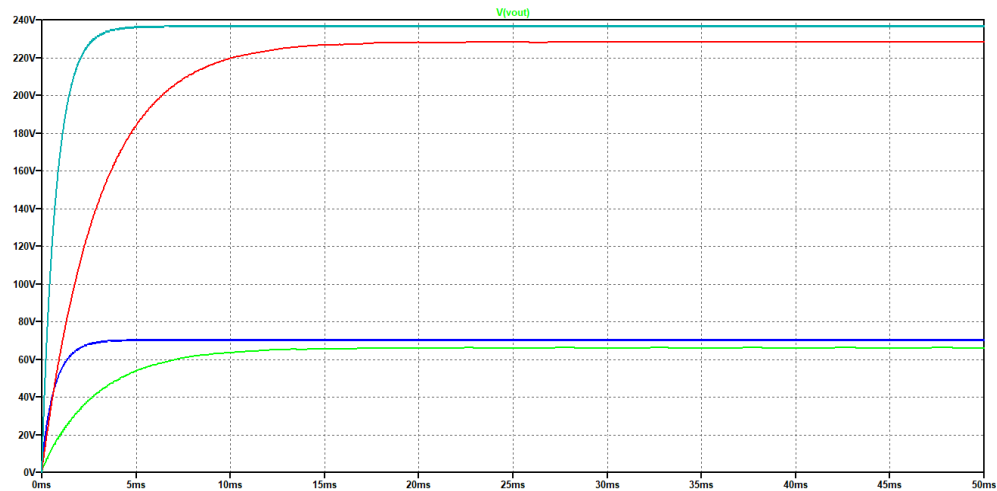
Fuente. Autores

A continuación se muestra la tensión de salida del troceador para una carga variable y un ciclo de trabajo variable, en la Figura 21, la gráfica en color verde corresponde a la tensión de salida para un ciclo de trabajo del 20% y una carga mínima de $50\ \Omega$ con un tiempo de establecimiento aproximado de 13ms.

La gráfica en color azul corresponde a la tensión de salida para un ciclo de trabajo del 20% y una carga máxima de 200Ω con un tiempo de establecimiento aproximado de 3ms, la gráfica en color rojo corresponde a la tensión de salida para un ciclo de trabajo del 70% y una carga mínima de 50Ω con un tiempo de establecimiento de 15ms.

La gráfica en color celeste corresponde a la tensión de salida para un ciclo de trabajo del 70% y una carga máxima de 200Ω con un tiempo de establecimiento de 5ms.

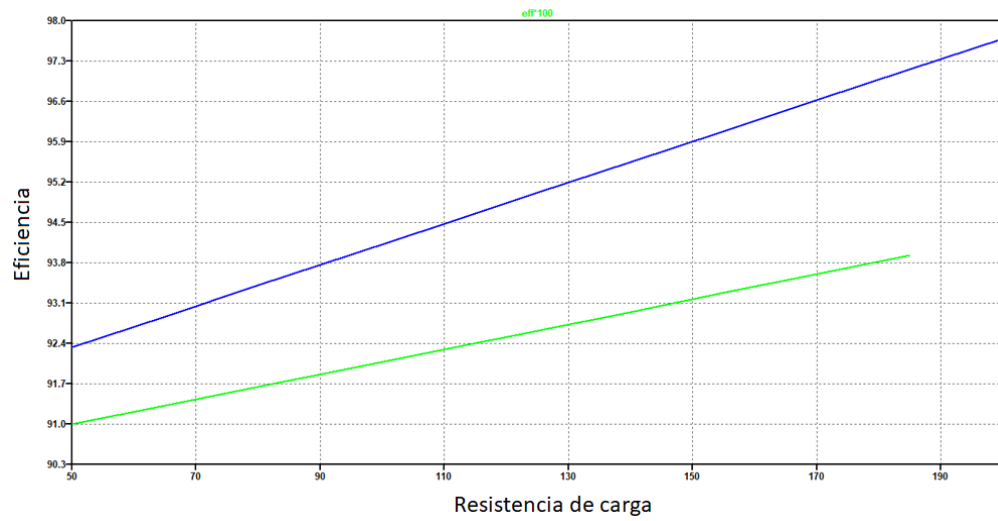
Figura 21 Tensión de salida del Troceador para carga variable y D variable.



Fuente. Autores

La eficiencia del convertidor obtenida se muestra en la Figura 22, en la gráfica de color verde se muestra la eficiencia para un ciclo de trabajo del 20% y en la gráfica de color azul para un ciclo de trabajo del 70%. La eficiencia incrementa a medida que la carga aumenta proporcionalmente de su valor mínimo a máximo.

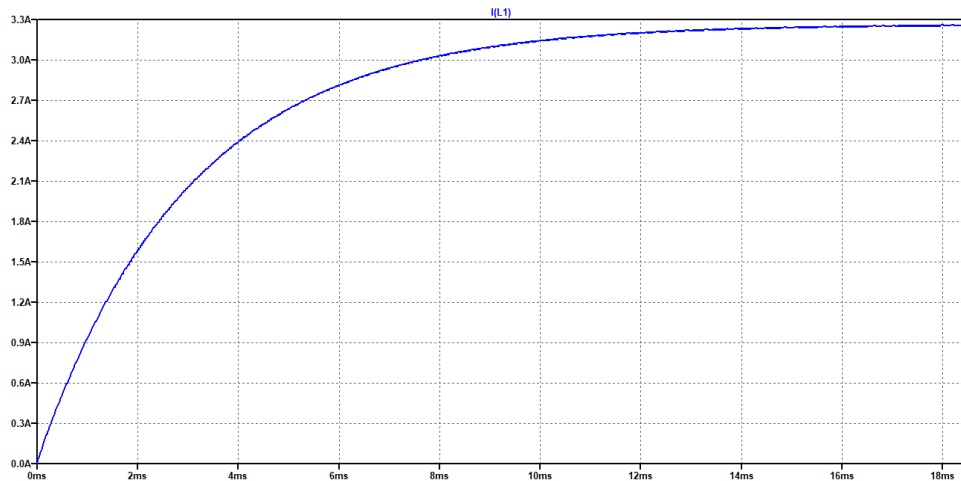
Figura 22 Eficiencia obtenida en el simulador LTspice VII.



Fuente. Autores

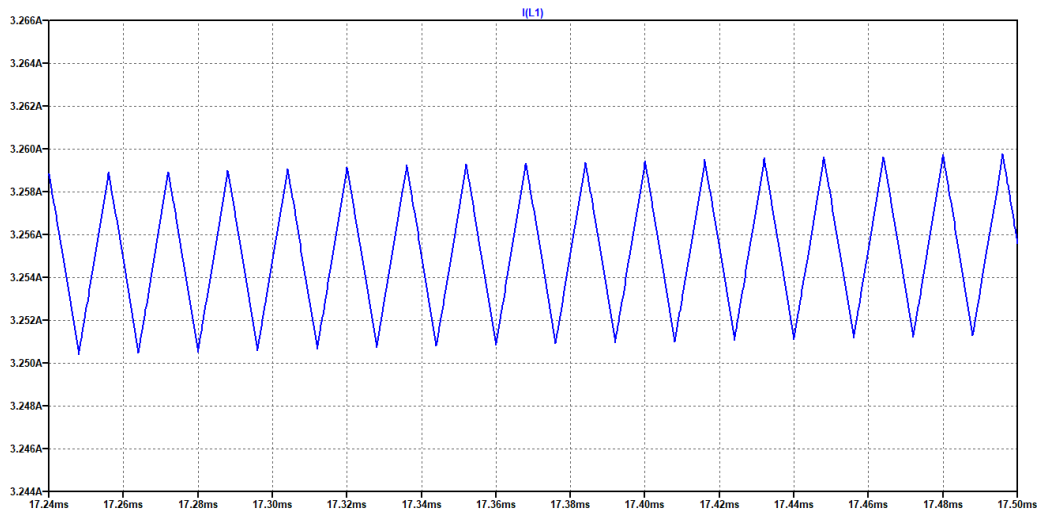
La corriente en la carga del convertidor para un ciclo de trabajo del 50% y carga mínima de 50Ω se muestra en la Figura 23. Se obtiene una corriente de carga $I_o = 3.255$ [A] con un rizo de corriente $\Delta I_o = 3$ [mA] como lo muestra la Figura 24.

Figura 23 Corriente a la salida del convertidor de potencia para Rmin de 50Ω y D del 50%.



Fuente. Autores

Figura 24 Rizo de corriente a la salida con R_{min} de $50[\Omega]$ y D del 50%.



Fuente. Autores

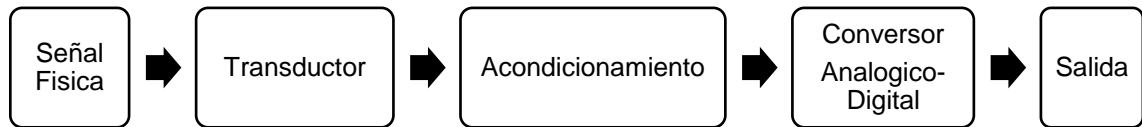
En el ANEXO Q, se muestra la implementación del troceador reductor.

4.3 ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS (TENSIÓN Y CORRIENTE)

El circuito de control del convertidor de potencia requiere conocer los valores de las variables eléctricas a controlar como la tensión y corriente en la carga. Para ello esta etapa está constituida por una serie de circuitos que junto con los transductores permiten captar los variables eléctricas, donde cada transductor de medida lleva consigo un circuito de adecuación de señal que se encarga de tratar la señal analógica obtenida del sensor y adecuarla de tal forma que los rangos de salida estén entre 0 y 5[V]. Esta limitación viene impuesta por las entradas ADC (Analog Digital Converter) del microcontrolador el cual solo puede convertir señales que se encuentren entre estos límites.

Para realizar la medición es necesario un sistema para adquirir y adecuar los datos a controlar. En la Figura 25, se muestra el esquema en bloques que componen el sistema de adquisición de datos.

Figura 25 Esquema de adquisición de datos.



Fuente. Autores

La magnitud física que se desea medir pasa a través de un transductor que convierte la señal para que pueda ser procesada. Luego la parte del acondicionamiento se encarga de adecuar la señal que sale del transductor a la entrada del convertidor Analógico/Digital.

4.3.1 Transductor de tensión: Para el monitoreo y/o control del convertidor de potencia, se requiere de la medición de ciertas variables eléctricas, una de ellas es la tensión. El dispositivo utilizado para la medición de esta variable eléctrica es un transductor de tensión modelo LV-25P fabricado por la empresa LEM (ver la Figura 26). Este transductor de tensión para montaje en PCB, basado en el efecto Hall, es adecuado para la medición electrónica de tensiones DC y AC ya que proporciona aislamiento galvánico entre el circuito primario y secundario para poder medir una tensión.

Figura 26 Imagen del Transductor de tensión LV25P.



Fuente. Tomado de hoja de datos LV 25-P del fabricante LEM

Las principales características del transductor se muestran en la Tabla 4.

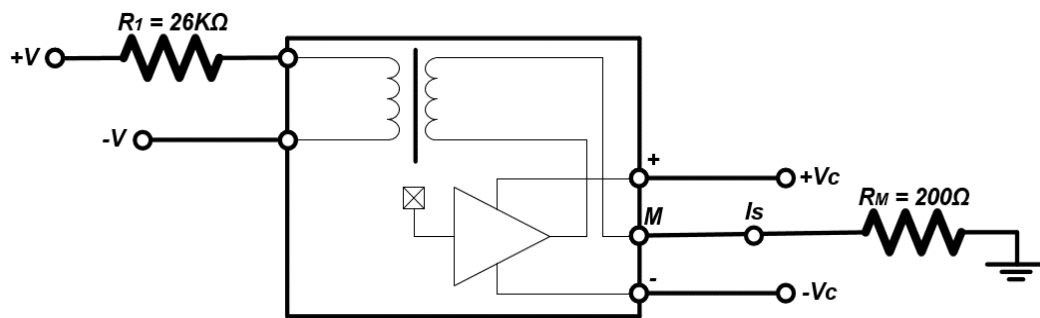
Tabla 4 Principales características del sensor LEM LV 25-P.

Características generales	
Tipo de salida	Instantánea
Corriente nominal I_N	10mA
Corriente nominal de salida analógica	25mA
Tensión nominal del circuito primario	10-500V
Rango de conversión	2500/1000
Ancho de banda	0-150kHz
Precisión	0.9%
Relación de espiras	2500:100
Precisión global a +25°C	$\pm 0.6\%$ de I_N
Tensión de alimentación	$\pm 15v$ ($\pm 5\%$)
Aislamiento	2.5kVrms/50Hz/1 min.
Linealidad	<0.2%
Tiempo de respuesta	40 μ s con una $R_i = 25k\Omega$
Temperatura de funcionamiento	0°C a +70°C
Temperatura de almacenaje	De -25°C a +85°C
Consumo de corriente	10mA + corriente de salida
Resistencia interna del primario	250 Ω
Resistencia interna del secundario	110 Ω
Peso	22g

Fuente. Tomado de hoja de datos LV 25-P del fabricante LEM

Este dispositivo requiere de un circuito de conexión mostrado en la Figura 27, el cual consta de dos elementos resistivos situados a la entrada y salida del sensor. La resistencia R1 tiene como función transformar la tensión que se requiere medir en una corriente Is. La resistencia RM, situada a la salida del sensor, permite adaptar la corriente de salida que proporciona el transductor, a los valores de tensión de salida según los requerimientos de diseño. En este caso las terminales +HT y -HT corresponden a las terminales de la tensión a medir (ver ANEXO H).

Figura 27 Circuito de conexión del transductor de tensión LV25P.



Fuente. Tomado de hoja de datos LV 25-P del fabricante LEM

El sensor se adecuó para medir tensiones de hasta 260[V] con ayuda de las hojas de datos del dispositivo proporcionado por el fabricante, se observa que la corriente por el primario debe ser máximo de 10 [mA]. El cálculo se realizó de tal manera que la tensión máxima del punto de medida lleve al primario del transductor a la corriente nominal de entrada. El valor obtenido de la resistencia R1 es de 26kΩ, se utilizó un arreglo de 26 resistencias SMD de 1kΩ de precisión en serie para cada transductor. Un aspecto importante que se tuvo para la elección de las resistencias es la potencia máxima disipada, que será el producto de la tensión máxima por la corriente que circula por las resistencias, es decir:

$$R1 = \frac{260[V]}{10[mA]} = 26[k\Omega] \quad (18)$$

$$PR1 = (260[V])(10[mA]) = 2.6[W] \quad (19)$$

$$PR1_{unidad} = \frac{2.6 [W]}{26 resistencias} = \frac{0.1[W]}{resistencia} \quad (20)$$

Dados estos valores resistivos a la entrada de los transductores, el rango de tensión de medida de los mismos es de 10[V] a 260[V]. Ahora para el cálculo de RM se debe tener presente algunas especificaciones, según la hoja de datos para una alimentación de $\pm 12 [V]$ RM debe estar en el rango 30[Ω] y 200[Ω].

En el prototipo se implementó un valor RM de 200 Ω para obtener a la salida del sensor una tensión máxima de 5 [V].

$$V_{secundario_max} = (I_{secundario_max})(RM) \quad (21)$$

$$V_{secundario_max} = (25[mA])(200[\Omega]) \quad (22)$$

$$V_{secundario_max} = 5[V] \quad (23)$$

Con la tensión máxima de salida de transductor se logra que la tensión se encuentre entre los límites aceptables por el microcontrolador, para poder acoplar la tensión de salida con las entradas ADC del microcontrolador, adicionalmente se le agrega un seguidor de tensión con el amplificador operacional de referencia OPA743N como se observa en el circuito implementado mostrado en el ANEXO I.

4.3.2 Transductor de corriente: Para el monitoreo y/o control del convertidor potencia, se requiere de la medición de la corriente. El dispositivo utilizado para la medición es un transductor de corriente modelo LA25-NP fabricado por la empresa LEM mostrado en la Figura 28, este transductor de corriente para montaje en PCB, basado en el efecto Hall, proporciona aislamiento entre el circuito de potencia y la

medida obtenida, sensa corrientes DC y AC, es inmune al ruido, bidireccional y de rápida respuesta (ver ANEXO J).

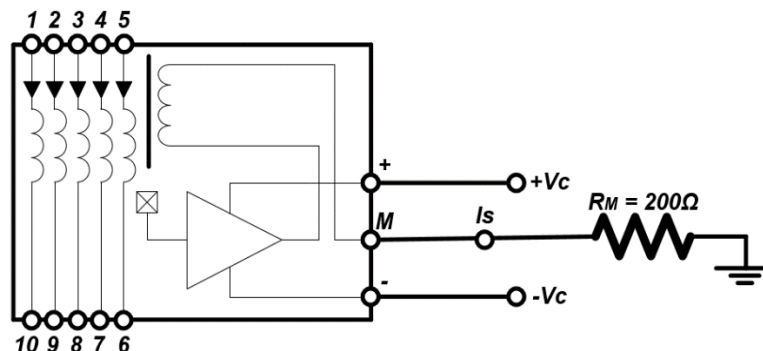
Figura 28 Imagen del Transductor de Corriente LA25-NP



Fuente. Tomado de hoja de datos LA 25NP del fabricante LEM

El transductor de corriente elegido fue el LA 25NP, el esquema de conexión se muestra en la Figura 29.

Figura 29 Circuito de conexión del transductor de tensión LA25-NP.



Fuente. Tomado de hoja de datos LA 25NP del fabricante LEM

El transductor requiere un circuito de conexión mostrado en el ANEXO K, el cual consta de elementos resistivos situados a la salida del sensor. La resistencia R_M ,

situada a la salida del sensor, es necesaria para obtener una correcta lectura de la corriente. Debe ser calculado con respecto a las características del fabricante, que se adapta perfectamente a las necesidades de sistema, configurado para medir distintos rangos de corriente vistos en la Tabla 5. El sensor necesita una alimentación bipolar ± 12 [V] y su salida está configurada adecuadamente para entregar corrientes dentro del rango de ± 25 [mA].

Tabla 5 Principales características del sensor LEM LA 25-P.

Características generales	
Rango máximo de corriente	$\pm 36^a$
Corriente nominal RMS	25^a
Tensión de alimentación	$\pm 15V_{cd}$
Rango de conversión	[1-2-3-4-5]/1000
Tiempo de respuesta	$1\mu s$
Temperatura de operación	$-25+85^{\circ}C$
Resistencia de aislamiento a 500v	$TA=25^{\circ}C > 1500M\Omega$
Ancho de banda de la frecuencia	DC 150KHZ
Precisión	$\pm 0.5\%$

Fuente. Tomado de hoja de datos LA 25NP del fabricante LEM

Al configurar dichos pines lo que se hace es cambiar la constante de proporcionalidad (K_n) de la relación existente entre el primario y el secundario, para el proyecto se seleccionó la conexión 5 (ver ANEXO K) ya que la corriente es de 5 [A] en régimen nominal soportando hasta 7 [A], utilizando esta conexión tenemos un K_n de 5/1000. Para una corriente de 4 [A] en el primario se calcula la tensión de salida del sensor con la siguiente ecuación:

$$V_{out} = (I_{primario})(K_n)(R_M) \quad (24)$$

El nivel de corriente medido es igual al nivel de tensión entregado por el sensor, usando un valor R_M de 200Ω .

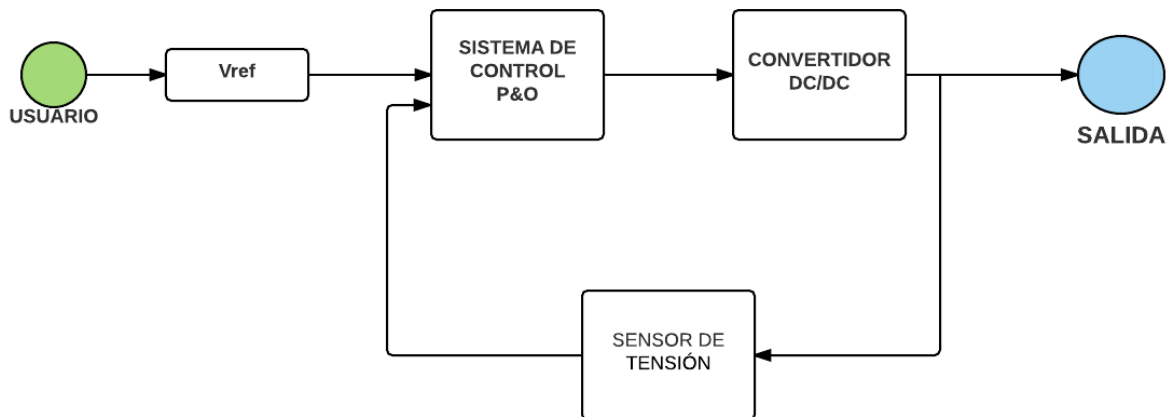
$$V_{out} = (4)\left(\frac{5}{1000}\right)(200) = 4 [V] \quad (25)$$

El circuito de sensado implementado se muestra en el ANEXO L.

4.4 SISTEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO

El control del troceador reductor, se desarrolla en un lenguaje estándar C++ y es programado en un microcontrolador Atmega328P. El sistema de control implementado se basa en la técnica de perturbación y observación (ver Figura 30) y permite seguir una tensión de referencia impuesta por el usuario durante un tiempo determinado.

Figura 30 Diagrama de bloques control implementado.



Fuente. Autores

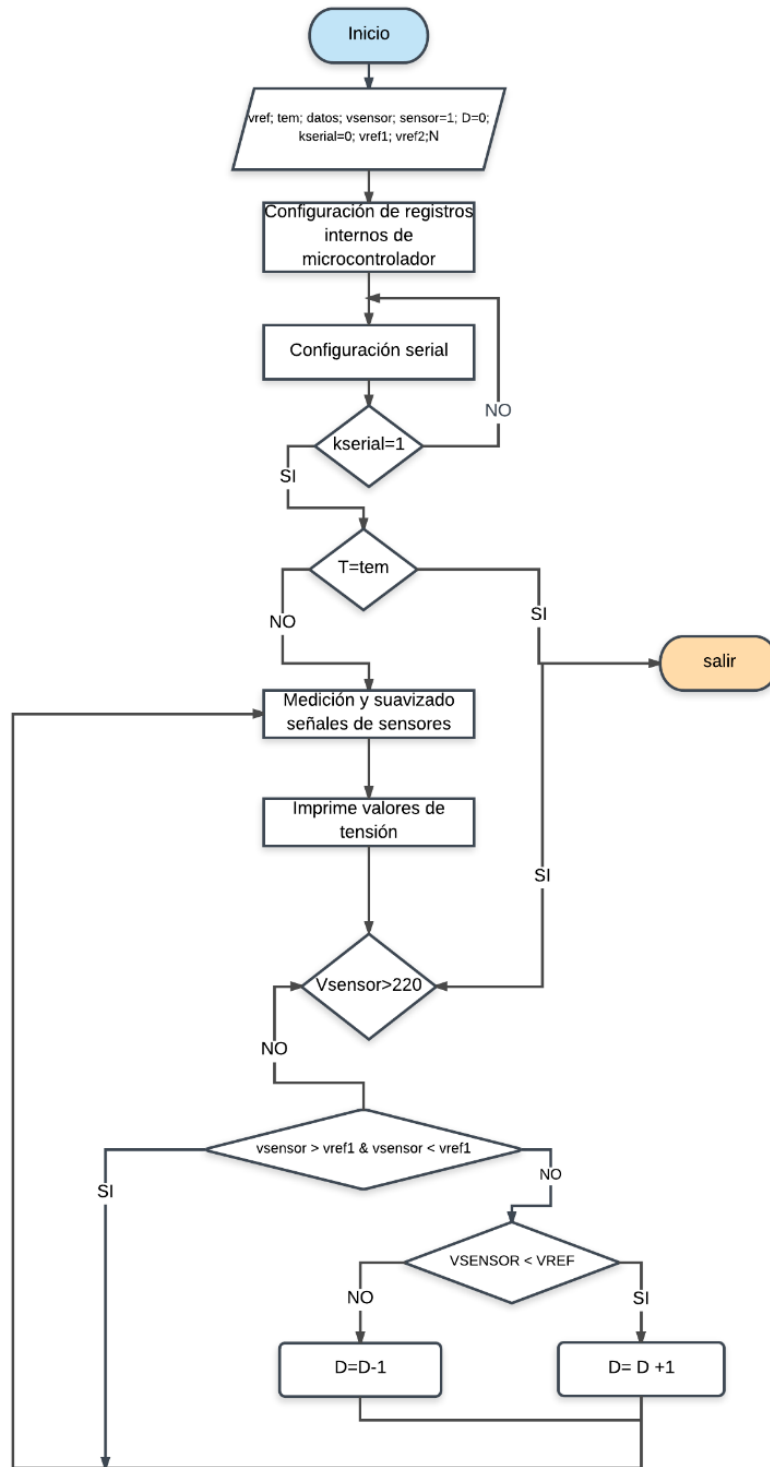
El prototipo inicia con un ciclo de trabajo (D) del 0.4% y permanece en este valor en espera a que lleguen datos por parte del usuario. Cuando se identifica un valor de referencia (Vref), se procesan los datos y se establece un rango de aceptación de $\pm 1.5 [V]$, este rango se debe a que la resolución del microcontrolador es de 8 bits. Esta resolución permite variar el ciclo de trabajo del troceador en 0.4% y es equivalente a cambios de tensión a la salida de 1.32 [V].

Para evitar picos de tensión bruscos en el sistema se hacen perturbaciones mínimas en el ciclo de trabajo y se observa el valor de los sensores para tomar la decisión de aumentar o disminuir el ciclo según sea necesario y se genera la señal PWM que controla la puerta del MOSFET del troceador reductor. Como el prototipo tiene un voltaje de salida máximo de 200 [V], se tiene un condicional para deshabilitar la señal de conmutación del MOSFET si la tensión a la salida del prototipo es mayor a 220 [V] como medida de protección.

La finalización de la etapa de control se da cuando se ha cumplido el tiempo establecido previamente por el usuario. Cuando este tiempo se ha cumplido el valor actual del ciclo de trabajo cambia y nuevamente queda en 0.4%.

En la Figura 31 se presenta el diagrama completo de control implementado. Se dispone a inicializar los registros internos del microcontrolador para obtener una frecuencia de trabajo de aproximadamente de 62.5kHz, esta será la frecuencia de trabajo del troceador reductor. El ciclo de trabajo con el que se inicia es del 0.4% y se procede a esperar los datos del usuario, si el usuario no ingresa valores este permanecerá invariante. Cuando se identifican datos en el puerto serial, el valor de kserial aumenta y permite continuar con la sentencia. Si la tensión (vsensor) vista por el sensor está entre los rangos de aceptación (los rangos de aceptación son el valor de referencia del usuario con un margen de error de $\pm 1V$) la sentencia es verdadera y no se modifica el ciclo de trabajo. Nuevamente se hace la lectura del sensor de tensión, en el caso que la sentencia sea negativa se analiza si la lectura es mayor o menor a la tensión de referencia, para aumentar o disminuir en una unidad la variable D que es proporcional al ciclo del trabajo del troceador, es decir, para un ciclo de trabajo de 0.4% se tiene un valor $D=0$ y para un ciclo de trabajo del 100% se tiene un valor $D = 255$. Este proceso se repetirá hasta que se complete el tiempo predeterminado por el usuario.

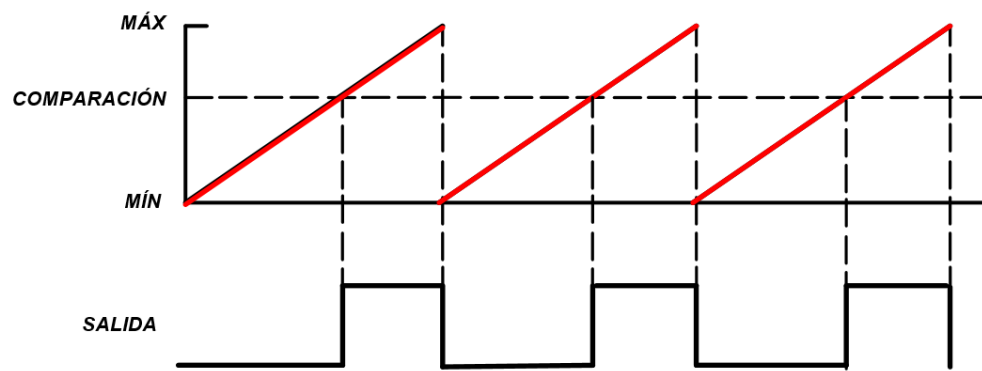
Figura 31 Diagrama de flujo para control de troceador.



Fuente. Autores

4.4.1 Generador de modulación por ancho de pulso (PWM): El PWM se genera a través de la variación de los registros internos del microcontrolador Atmega328P (ver ANEXO M), haciendo uso del modo Fast PWM, el cual consiste en un conteo repetitivo de 0 a 255. El temporizador inicia cuando está en 0 y se apaga cuando intercepta con el registro de comparación como lo muestra la Figura 32. Cuanto mayor sea el valor del registro de comparación menor será el ciclo de trabajo.

Figura 32 Generación del PWM.



Fuente. Tomado de hoja de datos ATmega328P del fabricante ATMEL

Para este proyecto se varía la configuración del Timer 2 del microcontrolador para obtener una frecuencia de trabajo de 62.5 [kHz], este valor se obtiene a partir de la ecuación (26), donde N es el valor del preescalar que se va a utilizar y para este caso es de 1. La máxima resolución del registro es de 8 bits y la frecuencia del Atmega328P es de 16[MHz].

$$f_{Trabajo} = \frac{f_{Microcontrolador}}{N \cdot 256} \quad (26)$$

4.5 INTERFAZ DEL USUARIO

Ya realizado el diseño y construcción de hardware, se procede a realizar la adquisición de datos en el ordenador, utilizando el software de código abierto Python, que es un lenguaje de scripting independiente de plataforma y orientado a

objeto, donde se creó un script, como lo muestra el ANEXO N. El propósito de este script es obtener los valores del ADC del Arduino a través del puerto serie con el fin de visualizar los valores de tensión y corriente del proceso, además poder enviar la tensión de referencia para realizar el control.

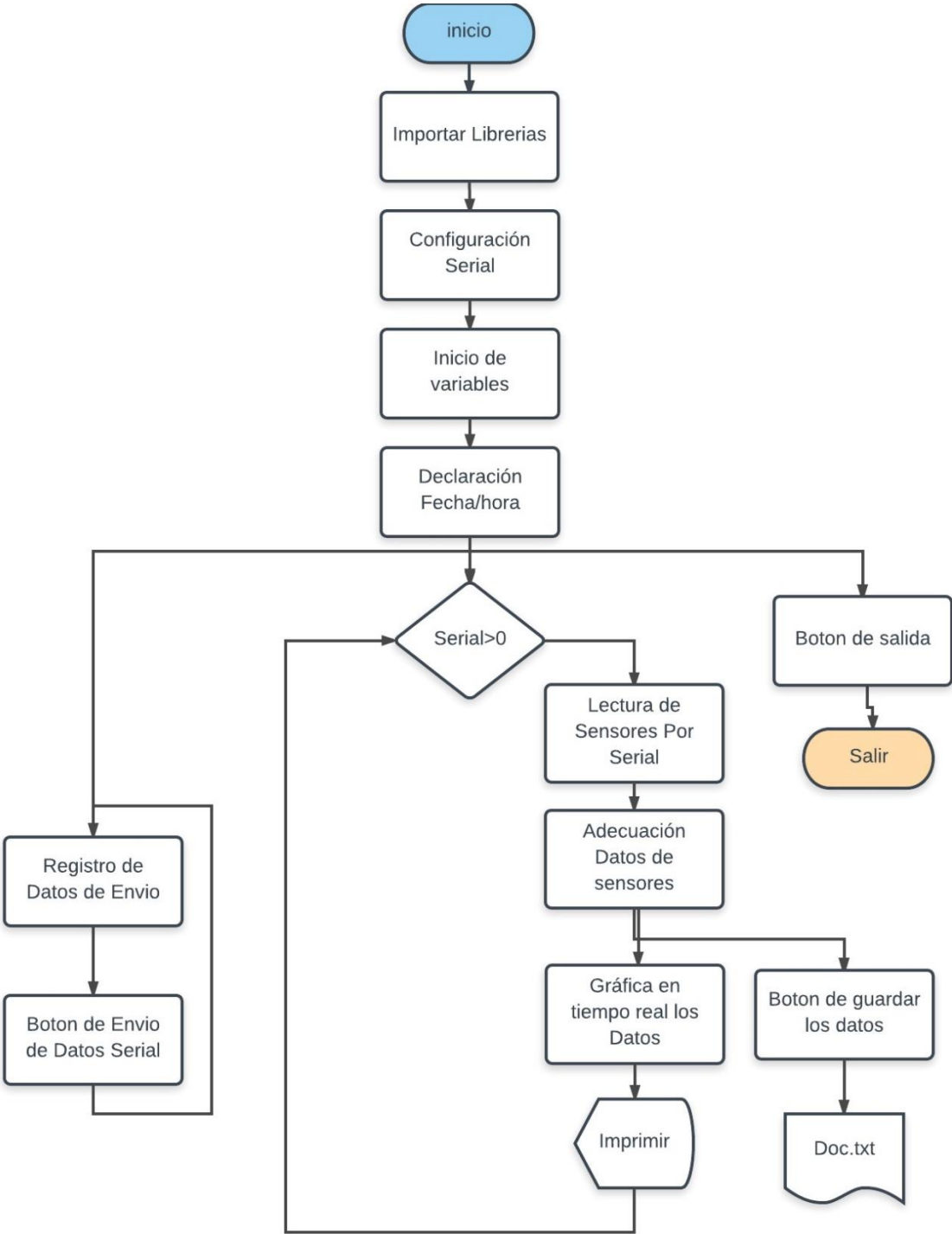
El puerto serial del ordenador, utiliza el protocolo RS-232 para comunicarse con dispositivos externos en este caso con Arduino, la librería de Python que proporciona la capacidad de utilizar los puertos seriales del ordenador para comunicarse con otros dispositivos se denomina PySerial y fue creada por Chris Liechti al igual que Python, PySerial es compatible con muchas plataformas o sistemas operativos que permite emplear de forma sencilla el puerto serie.

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se utiliza Tkinter, es un estándar para la interfaz gráfica de usuario (GUI), donde se implementan funciones para establecer el tamaño de la ventana, botones, etiquetas de texto, color de texto, soportando imágenes en formato .gif, además del uso de messagebox.

Este algoritmo de Python está vinculado con el código de Arduino, de esta manera cuando el usuario envía la tensión de referencia y el tiempo que dura la prueba, da la orden de inicio desde Python y comienza a ejecutarse el código en el Arduino (ver ANEXO O). De esta manera se ejecuta el script de Arduino que contiene el control y la variación del PWM y adquiere los datos de sensor, y los envía a Python. Los datos son recibidos en serie y espaciados por comas para poder visualizarlos en la interfaz (ver ANEXO P).

El diagrama de la Figura 33, muestra la lógica del algoritmo realizado en Python para la adquisición de datos.

Figura 33 Diagrama de flujo de adquisición en Python.



Fuente. Autores

5. RESULTADOS

El prototipo final implementado bajo las especificaciones nombradas anteriormente se muestra en la Figura 34. A continuación, se presentan y se analizarán los resultados de las pruebas experimentales del prototipo.

Figura 34 Prototipo final implementado para el anodizado de aluminio.



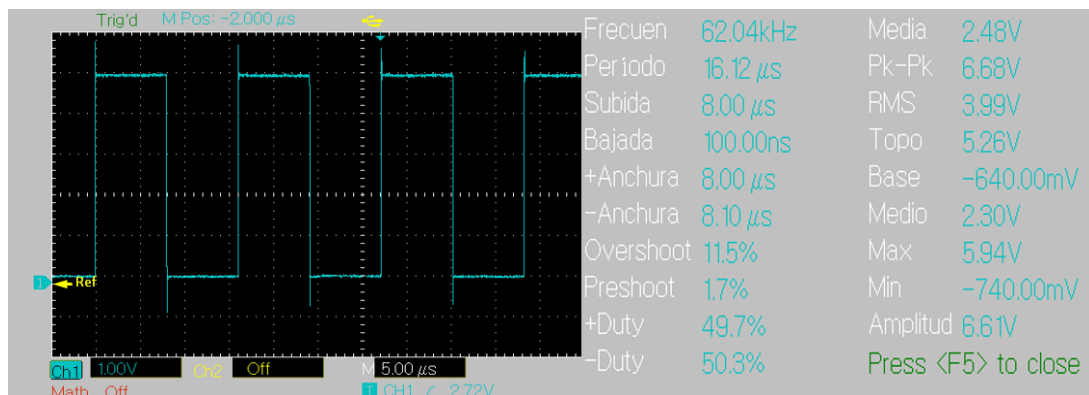
Fuente. Autores

Para verificar su correcto funcionamiento se llevaron a cabo 4 pruebas: prueba de generación de PWM, prueba a carga máxima y mínima con ciclo de trabajo variable y entrada de 120 [V], prueba para el cálculo de potencia y eficiencia del prototipo con entrada de 340 [V] y prueba final con control en el proceso de anodizado.

5.1 PRUEBA DE GENERACIÓN PWM

A continuación, se muestra en la Figura 35, la tensión PWM que genera el ATmega328P a la salida del timer OCR2B en el pin digital 3 con un ciclo de trabajo del 50% en el prototipo implementado.

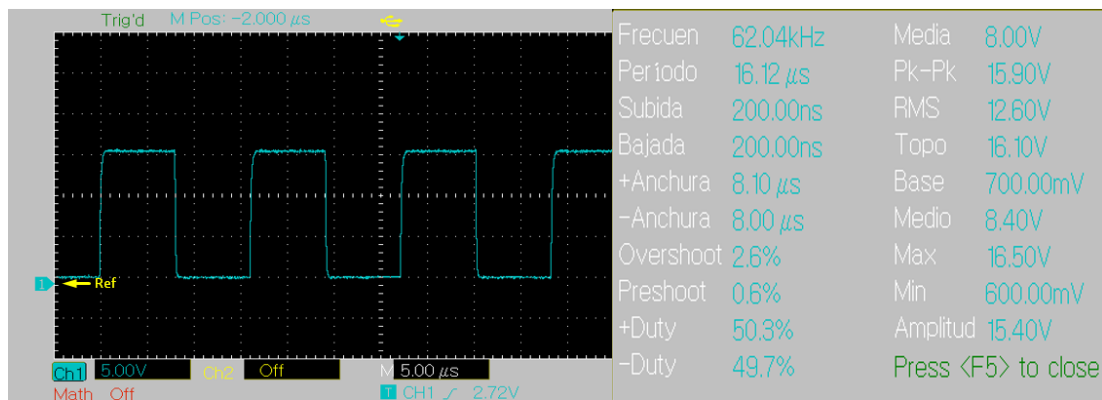
Figura 35 Resultados experimentales Tensión salida PWM pin digital 3 del microcontrolador ATmega328p.



Fuente. Autores

Esta señal ingresa al Opto-Driver donde se amplifica a 15 [V], tensión necesaria para encender el MOSFET de potencia del prototipo como se muestra en la Figura 36, para un ciclo de trabajo del 50% sin carga.

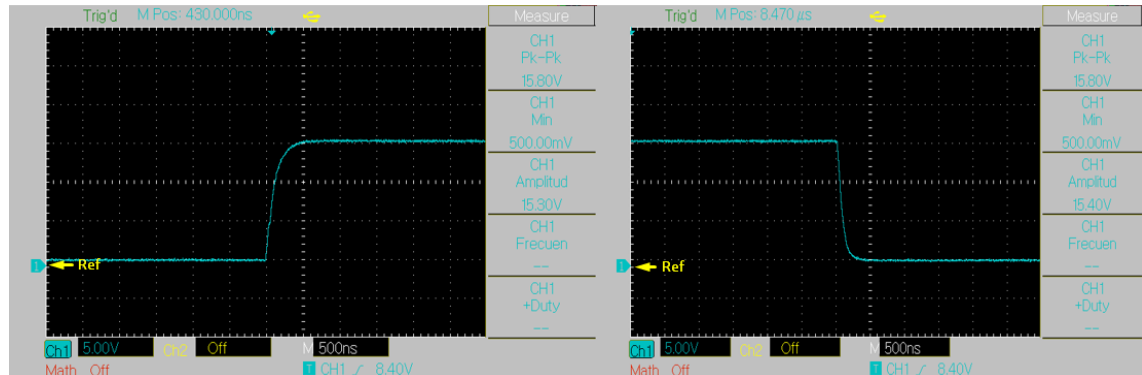
Figura 36 Resultados experimentales Tensión de salida del Opto-Driver sin carga en el prototipo implementado.



Fuente. Autores

El tiempo de subida de la onda cuadrada es de aproximadamente 180 [ns] mientras que el tiempo de bajada es de aproximadamente 200 [ns]. Los tiempos de subida y bajada se muestran en la Figura 37.

Figura 37 Resultados experimentales Tiempo de subida y bajada generadas en la señal PWM a la salida del Opto-Driver.



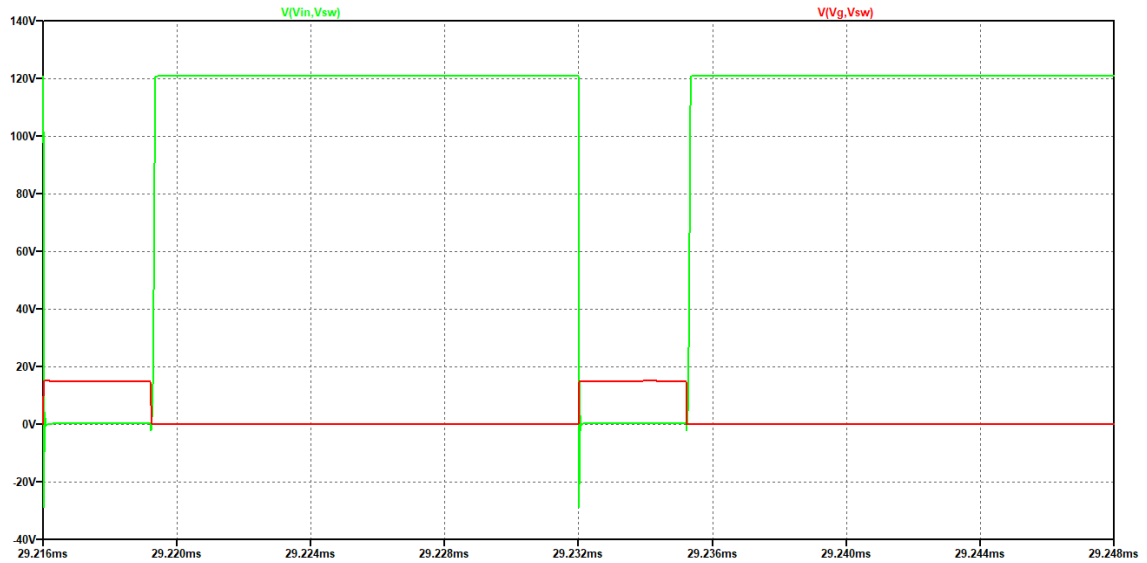
Fuente. Autores

5.2 PRUEBA A CARGA MÁXIMA Y MÍNIMA CON CICLO DE TRABAJO VARIABLE

Para poder corroborar los resultados de simulación, se realizó una prueba a escala por motivo que el osciloscopio del laboratorio no permite mediciones mayores a 300 [V]. Se procede a cambiar la fuente de entrada del troceador reductor por una fuente de 120 [V] obtenida conectando dos fuentes de 60 [V] en serie. A continuación, se muestran los resultados comparando la tensión Puerta-Surtidor con la tensión Drenador-Surtidor para una carga mínima de 50 [Ω] y una carga máxima de 200[Ω], de igual forma para un ciclo de trabajo mínimo de 20% y máximo de 70%.

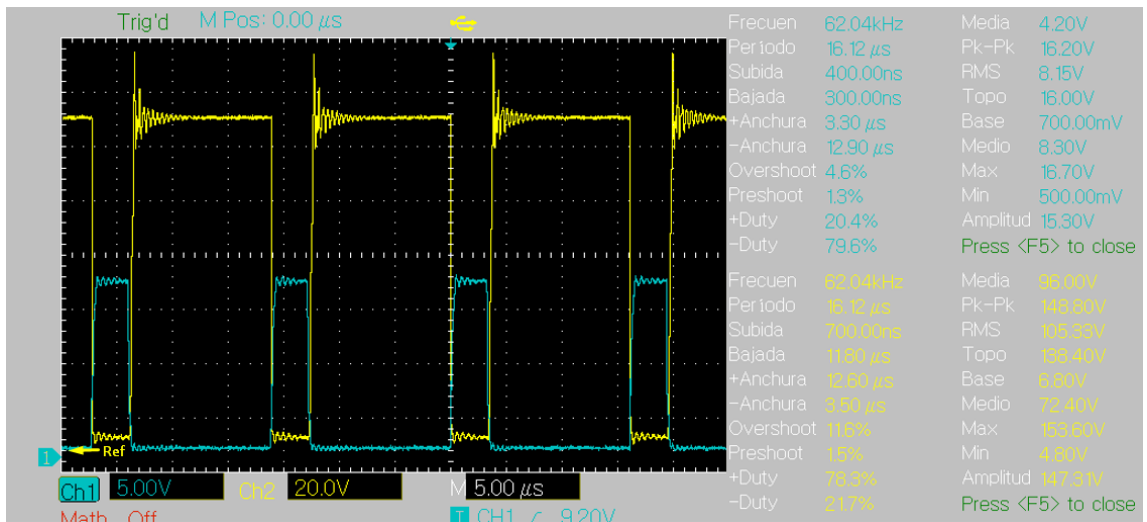
En la Figura 38 se ve las tensiones V_{gs} y V_{ds} para una carga mínima de 50 [Ω] y ciclo de trabajo de 20%.

Figura 38 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20% obtenida en la simulación.



Fuente. Autores

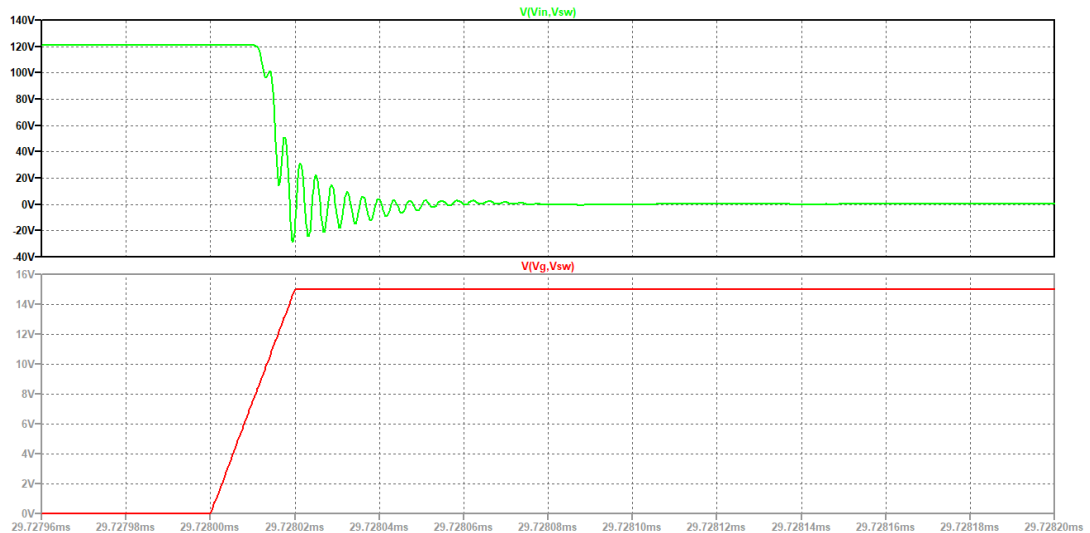
Figura 39 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20%.



Fuente. Autores

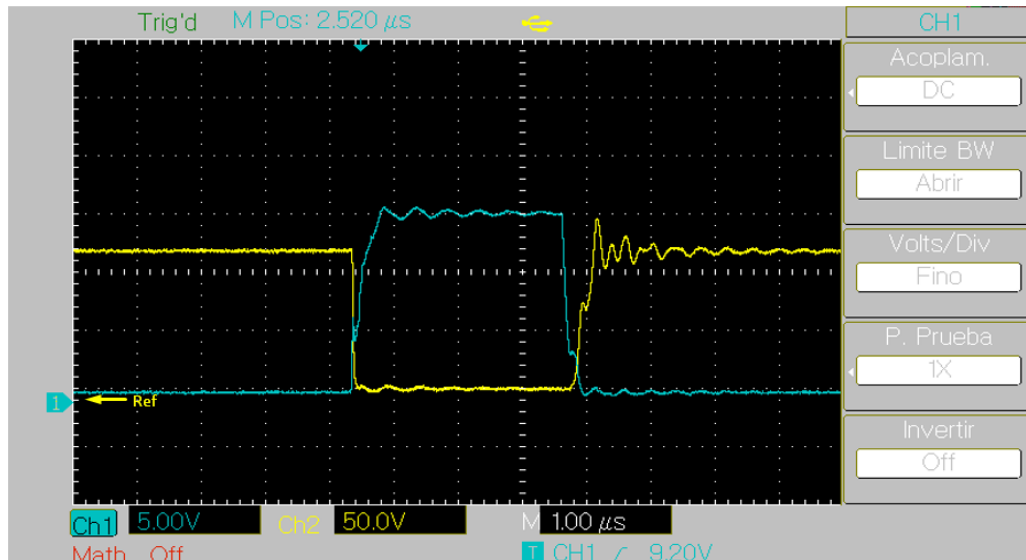
En la siguiente Figura 40 y la Figura 41, se ve con más claridad el tipo de forma del transitorio.

Figura 40 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20% obtenida en la simulación.



Fuente. Autores

Figura 41 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20%.

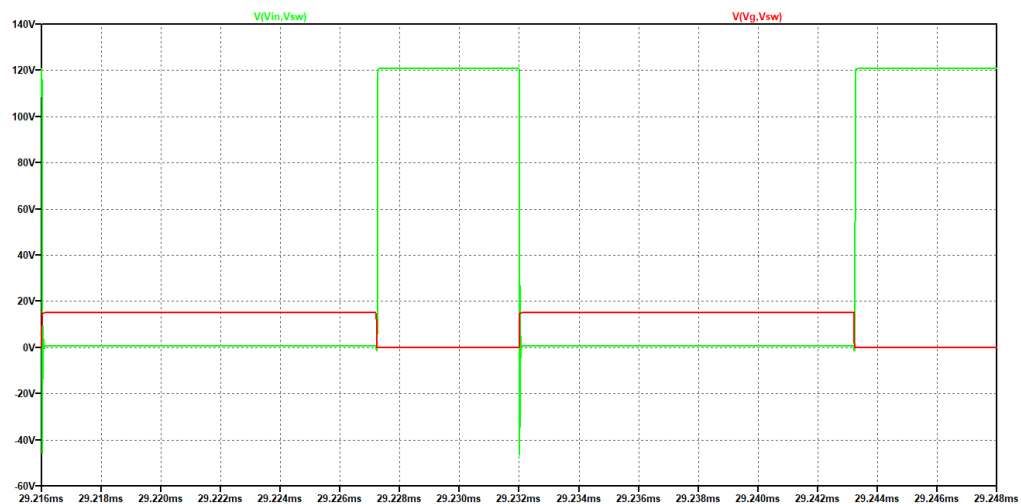


Fuente. Autores

La Figura 42 muestra las tensiones V_{gs} y V_{ds} para una carga mínima de 50 $[\Omega]$ y un ciclo de trabajo de 70%. Para este caso ocurre un pico de tensión Drenador-

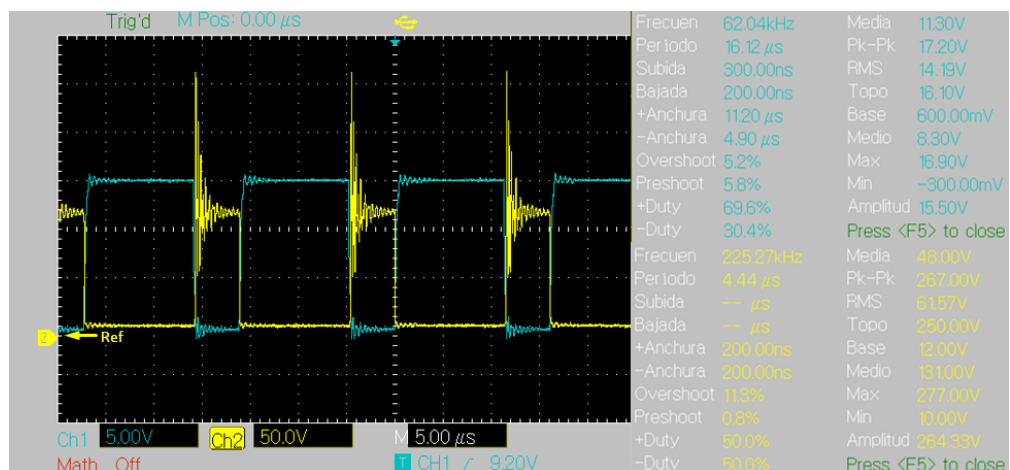
Surtidor de 277 [V], más del doble de la tensión suministrada por las fuentes DC que alimentan el troceador, como solución a este pico de tensión se instaló un varistor de 200 [V] para la prueba escala y un varistor de 500 [V] para el prototipo final. Este varistor elimina estos picos de tensión que ocasionarían daños al MOSFET de potencia.

Figura 42 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión -Drenador-Surtidor (verde) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% obtenida en simulación.



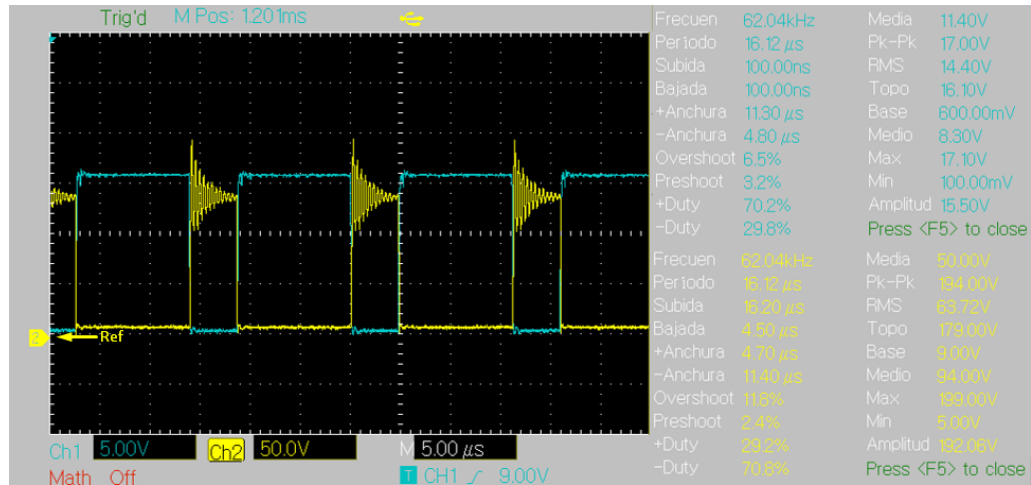
Fuente. Autores

Figura 43 Resultados experimentales Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para Rmin de 50 [Ω] y D del 70% sin varistor



Fuente. Autores

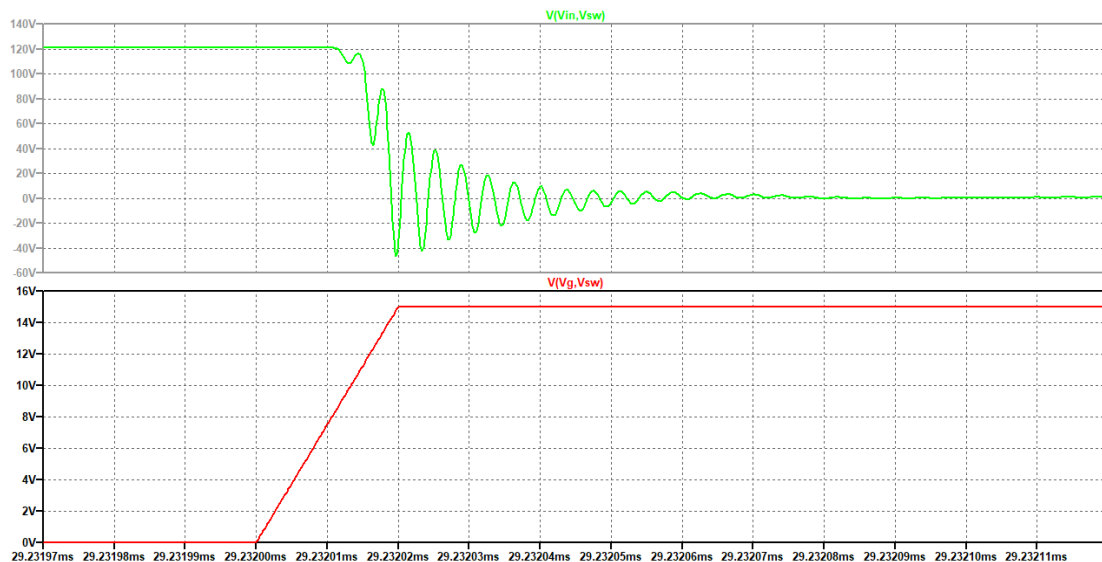
Figura 44 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% con varistor.



Fuente. Autores

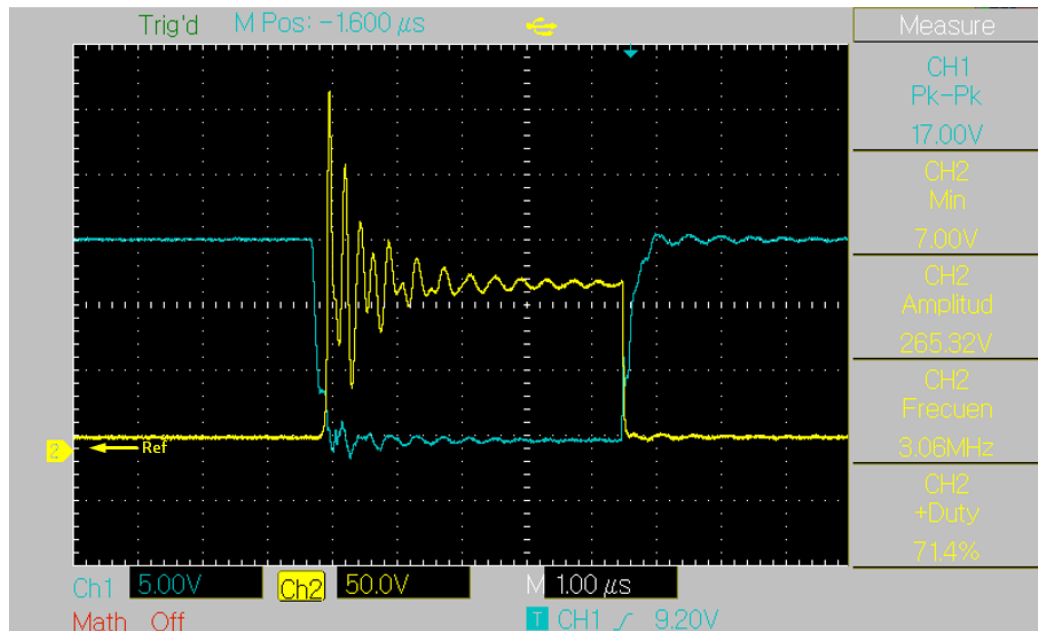
En la Figura 45 , la Figura 46 y Figura 47, se ve con más claridad el tipo de forma del transitorio.

Figura 45 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% obtenida en simulación.



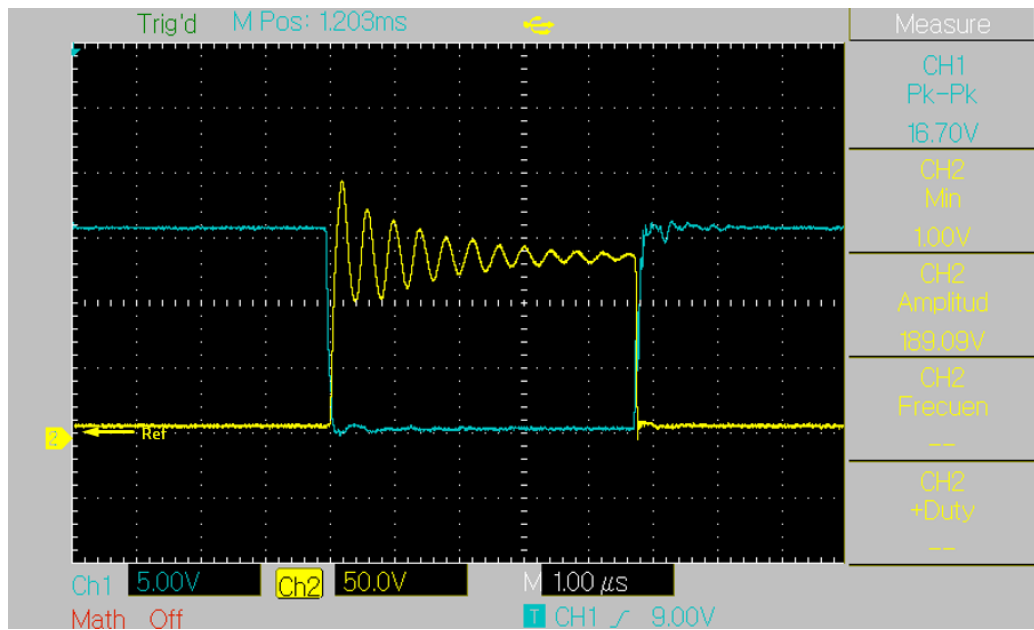
Fuente. Autores

Figura 46 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% sin varistor.



Fuente. Autores

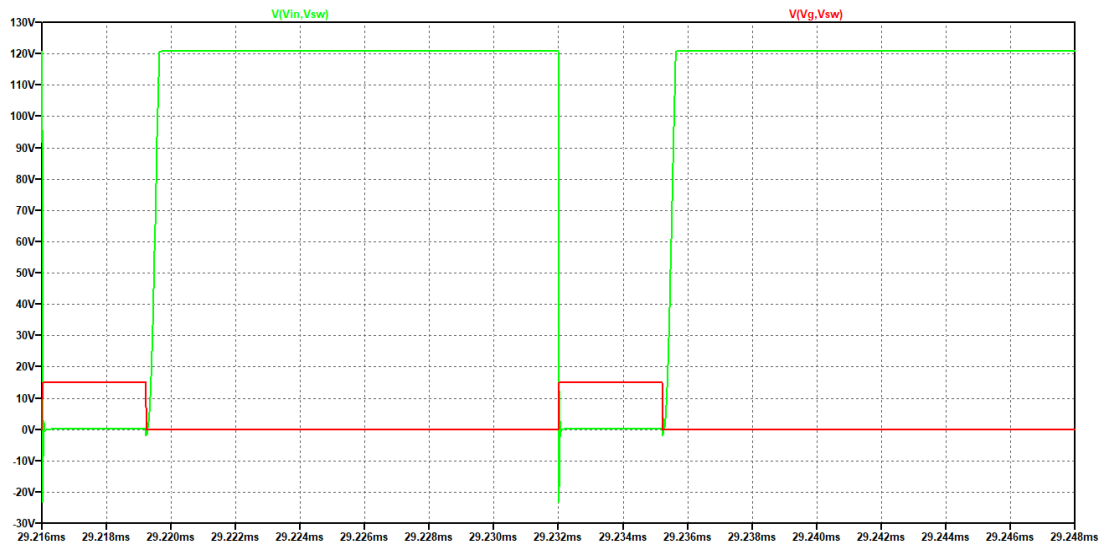
Figura 47 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% con varistor.



Fuente. Autores

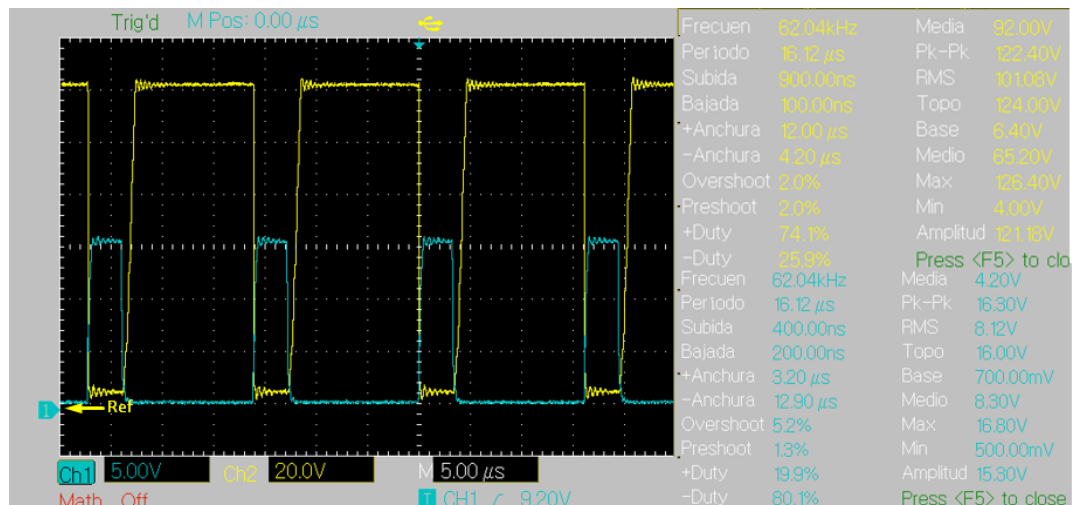
En la Figura 48 se muestran las tensiones V_{gs} y V_{ds} para una carga máxima de $200\ \Omega$ y D del 20%.

Figura 48 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para R_{max} $200\ \Omega$ y D del 20% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

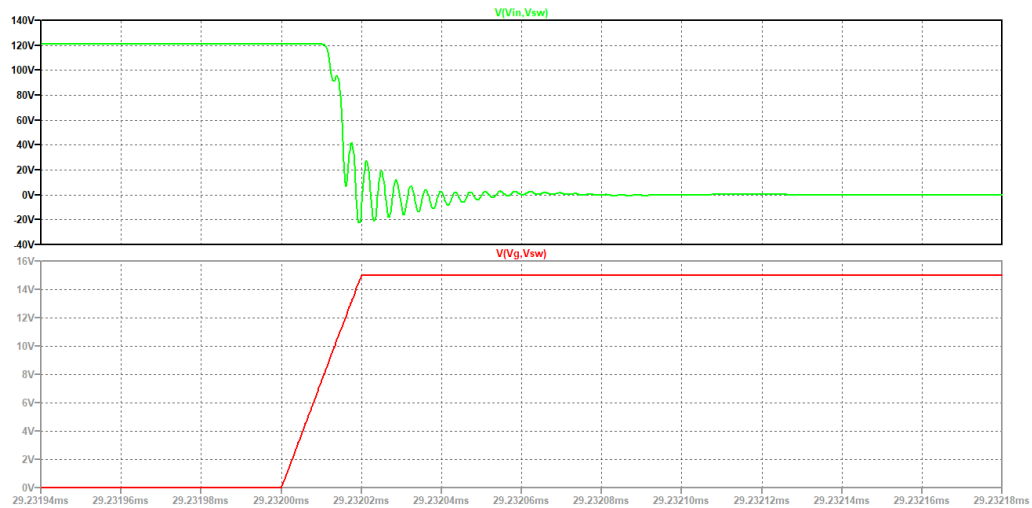
Figura 49 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para R_{min} de $200\ \Omega$ y D del 20%.



Fuente. Autores

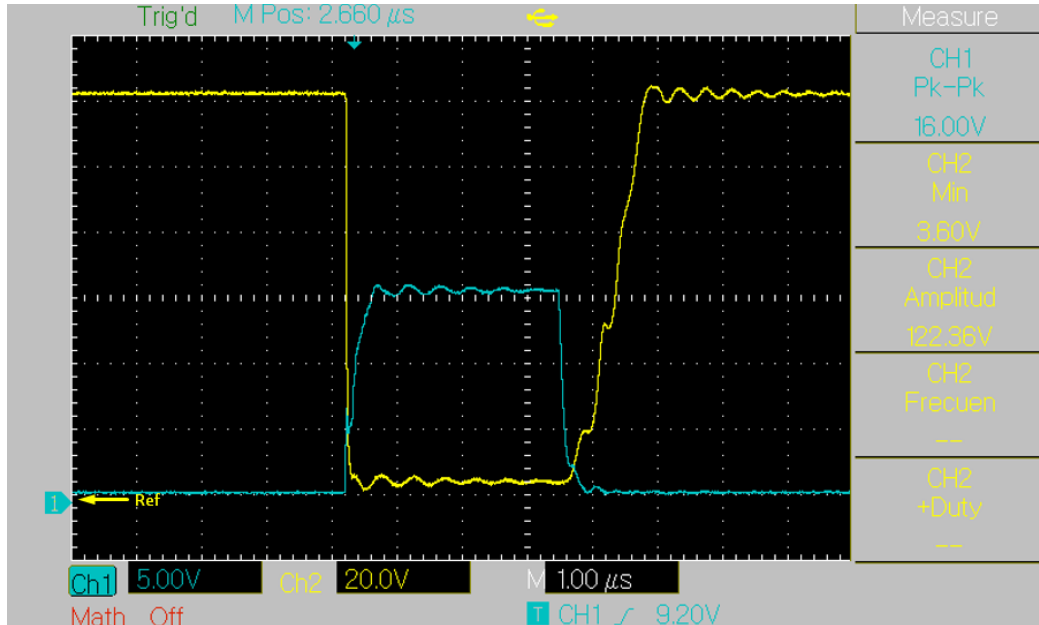
En la Figura 50 y Figura 51, se ve con más claridad el tipo de forma del transitorio.

Figura 50 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para Rmax de 200 [Ω] y D del 20% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

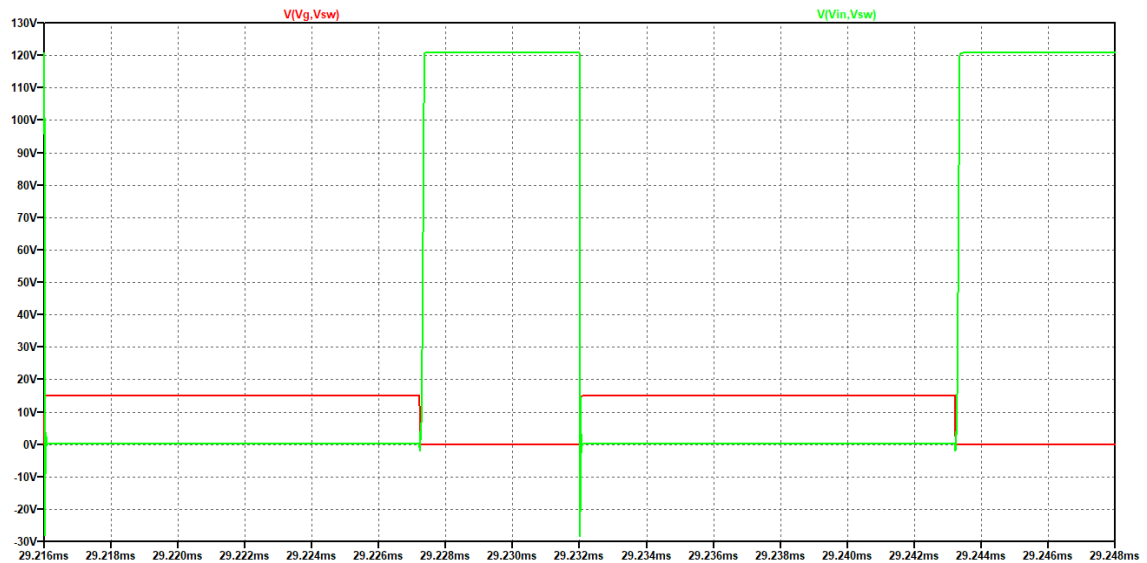
Figura 51 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor (azul) Tensión ampliada Drenador-Surtidor (amarilla) para una Rmax de 200 [Ω] y D del 20%.



Fuente. Autores

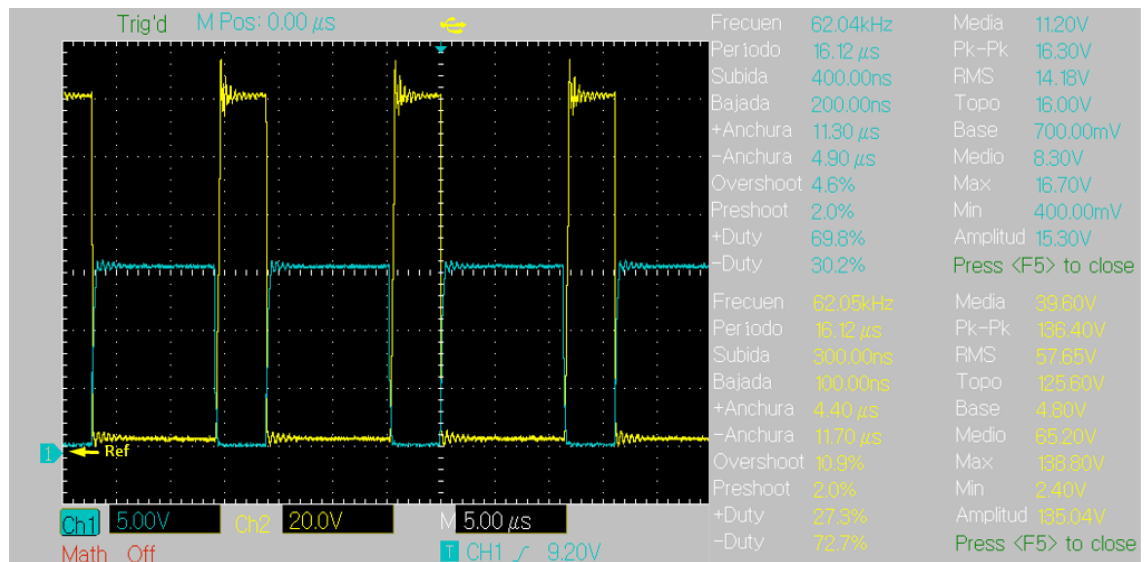
La Figura 52 se muestran las tensiones Vgs y Vds para una carga máxima de 200 [Ω] y D del 70%.

Figura 52 Tensión Puerta-Surtidor (roja) y Tensión Drenador-Surtidor (verde) para una R_{max} de 200 [Ω] y un D del 70% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

Figura 53 Resultados experimentales de la Tensión Puerta-Surtidor (azul) y Tensión Drenador-Surtidor (amarilla) para una R_{max} de 200 [Ω] y D del 70%.



Fuente. Autores

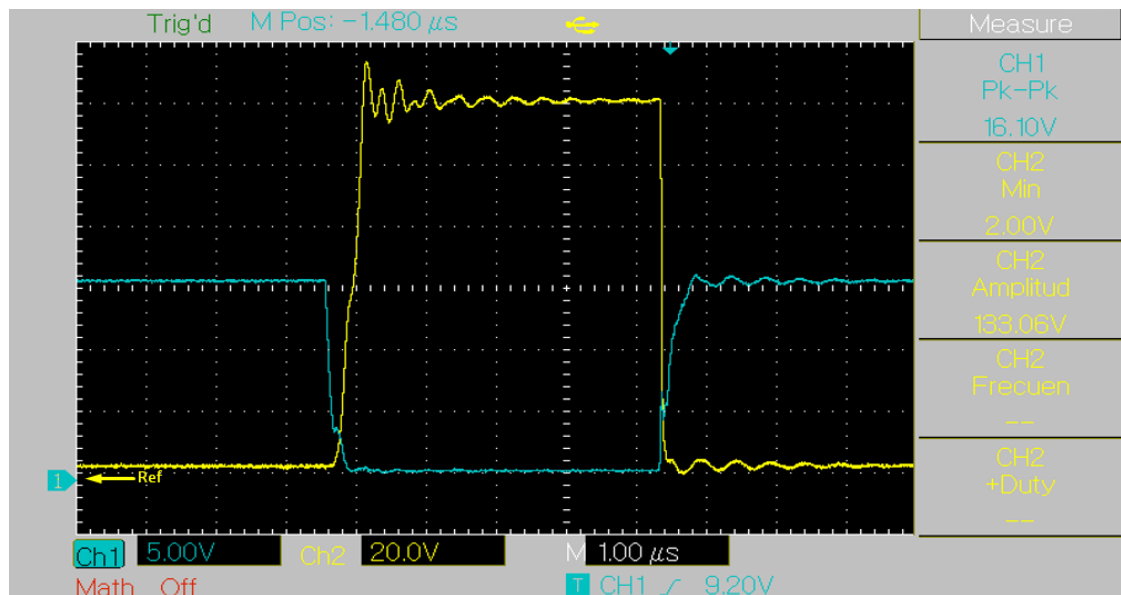
En la Figura 54 y Figura 55, se ve con más claridad el tipo de forma del transitorio.

Figura 54 Tensión ampliada Puerta-Surtidor (roja) y Tensión ampliada Drenador-Surtidor (verde) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

Figura 55 Resultados experimentales de la Tensión ampliada Puerta-Surtidor y Tensión ampliada Drenador-Surtidor para una R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70%.



Fuente. Autores

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la tensión de salida del convertidor de potencia. Se debe tener en cuenta que los datos de tensión de salida teóricos están basados en la ecuación (27).

$$V_o = DV_s \quad (27)$$

Se obtienen los siguientes resultados como se muestran en la Tabla 6.

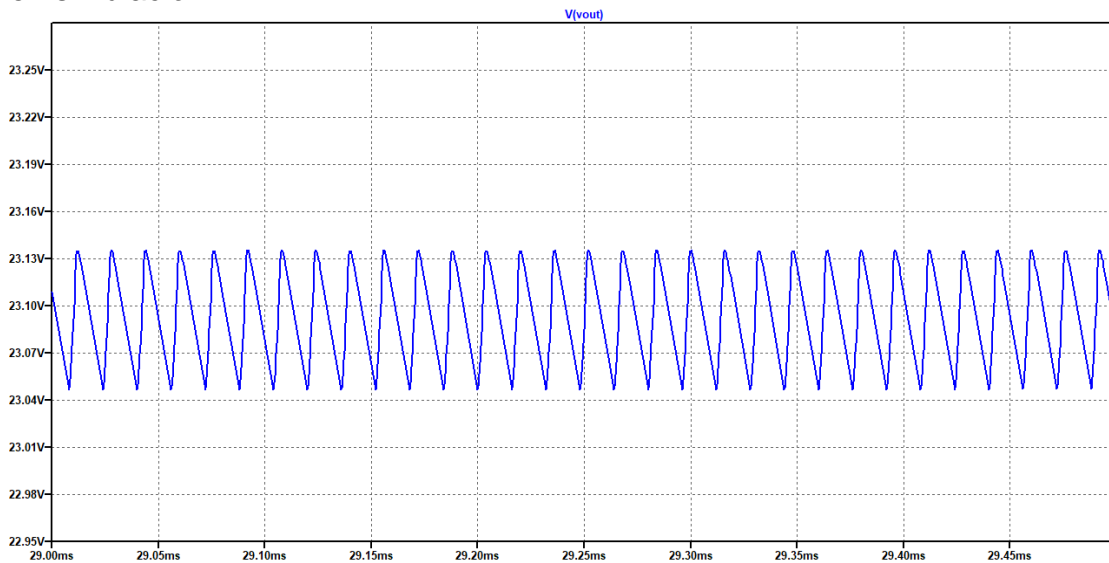
Tabla 6 Tensión de salida para ciclo de 20% y 70% para una tensión de entrada 120[V].

Parámetros	Valor
Tensión de entrada, V_s	120[V]
Tensión de salida, V_o para $D=20\%$	24[V]
Tensión de salida, V_o para $D=70\%$	84[V]

Fuente. Autores

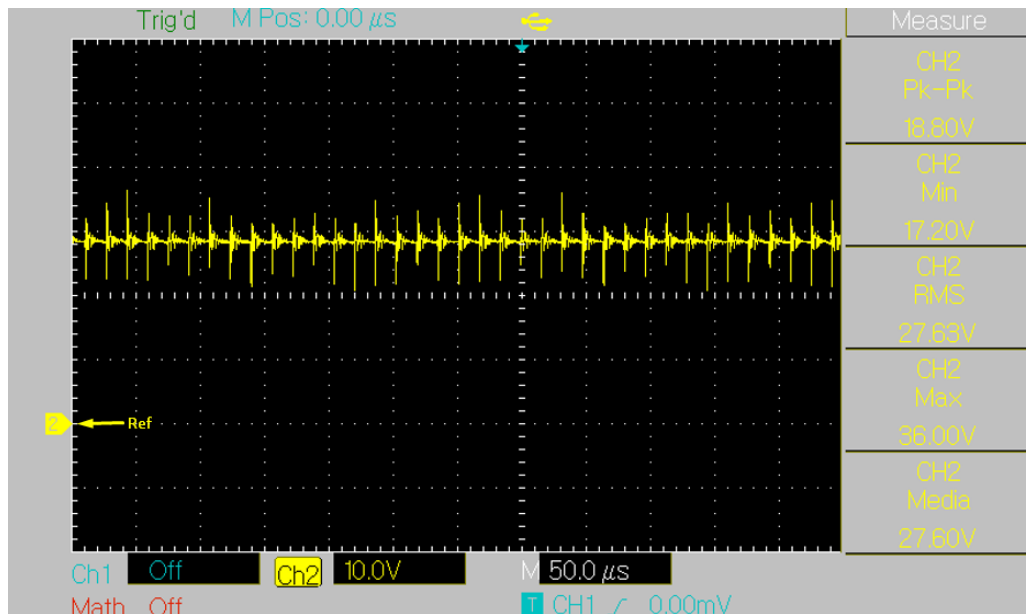
La tensión de salida para una carga mínima de 50 [Ω] y ciclo de trabajo de 20% se muestra en la Figura 56 y la Figura 57.

Figura 56 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{min} de 50 [Ω] y D del 20% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

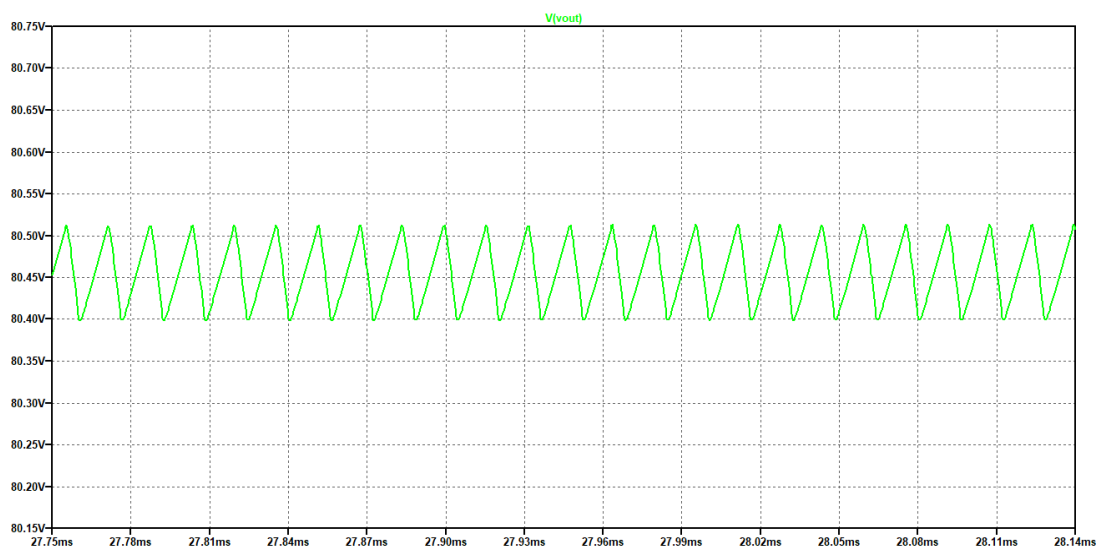
Figura 57 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 20%.



Fuente. Autores

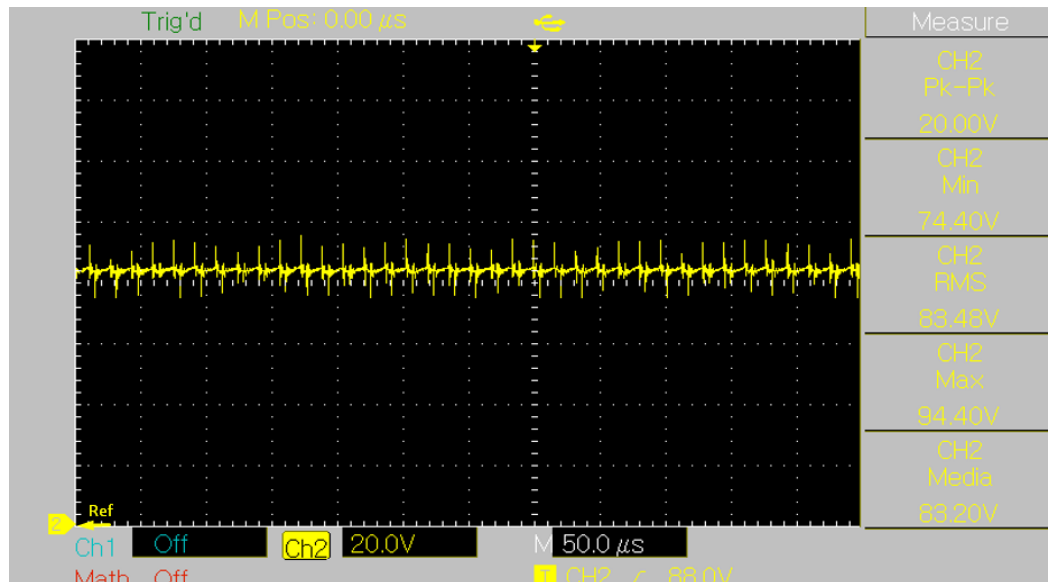
La tensión de salida para una carga R_{min} de 50 $[\Omega]$ y ciclo de trabajo de 70% se muestra en la Figura 58 y la Figura 59.

Figura 58 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70% obtenida en simulación



Fuente. Autores

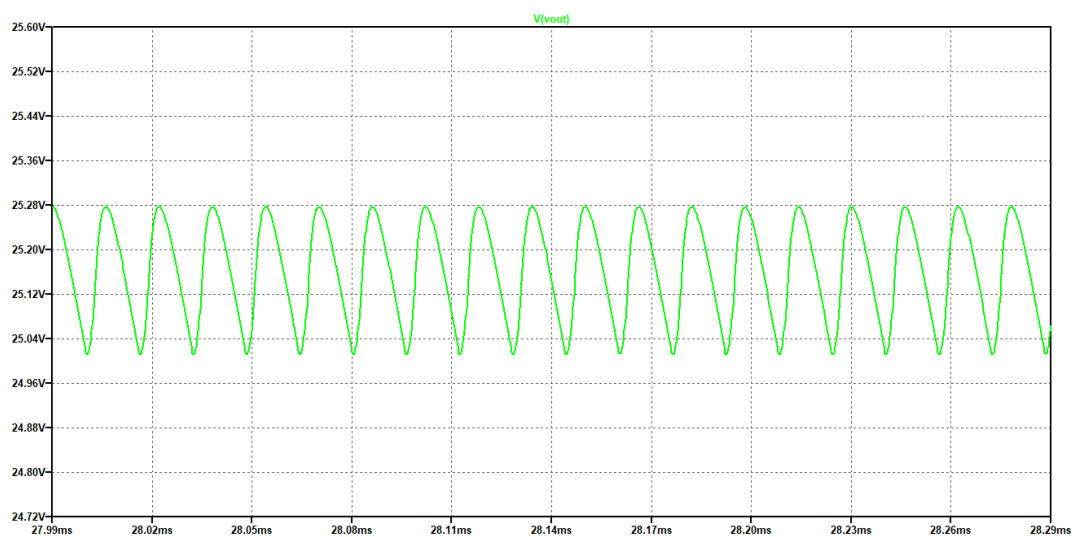
Figura 59 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{min} de 50 $[\Omega]$ y D del 70%.



Fuente. Autores

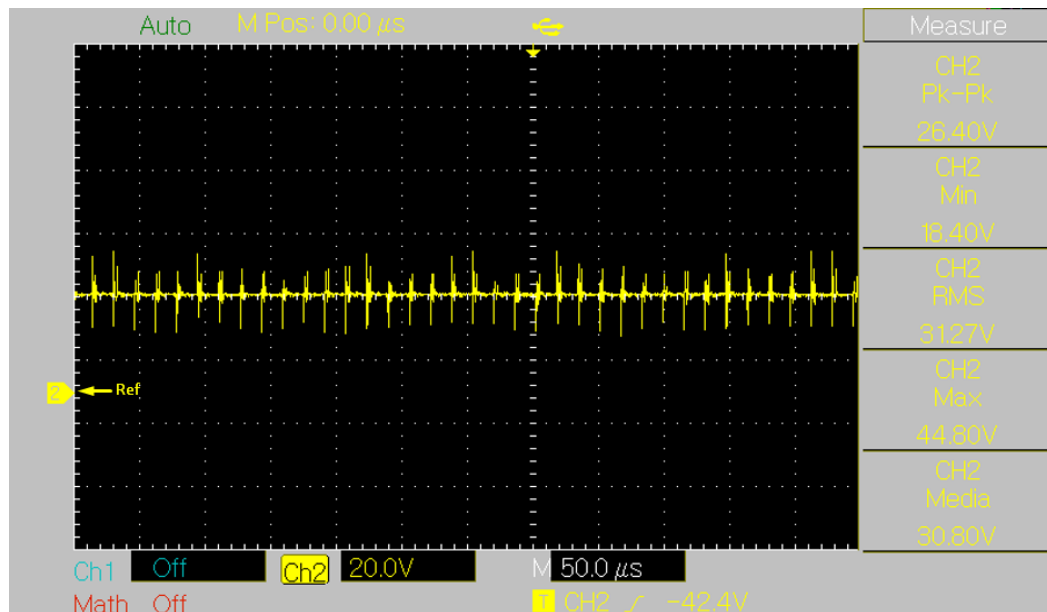
La tensión de salida para una carga R_{max} de 200 $[\Omega]$ y ciclo de trabajo de 20% se muestra en la Figura 60 y la Figura 61.

Figura 60 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 20% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

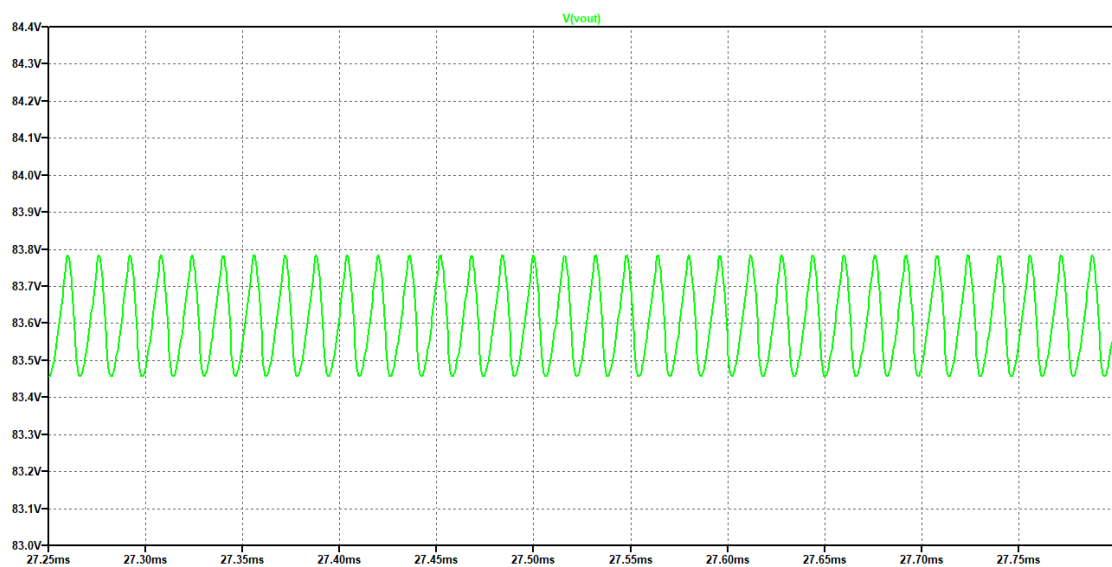
Figura 61 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{max} de 200 [Ω] y D del 20%.



Fuente. Autores

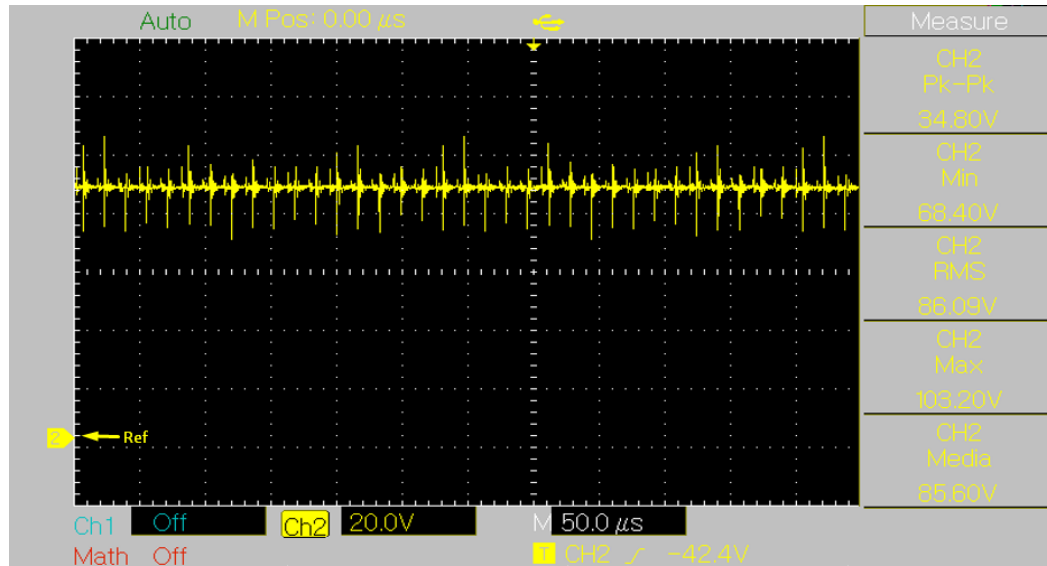
La tensión de salida para una carga máxima de 200 [Ω] y ciclo de trabajo de 70% se muestra en la Figura 62 y la Figura 63.

Figura 62 Tensión de salida ampliada (V_o) para R_{max} de 200 [Ω] y D del 70% obtenida en simulación.



Fuente. Autores

Figura 63 Resultados experimentales de la Tensión de salida (V_o) para R_{max} de 200 $[\Omega]$ y D del 70%.



Fuente. Autores

A continuación, se muestra en la Tabla 7 los valores de tensión de salida obtenidos en la prueba.

Tabla 7 Tensión de salida con ciclo variable para carga R_{min} y R_{max} .

Tensión de salida del prototipo										
Ciclo de trabajo (D)	Tensión de salida para carga de 50 $[\Omega]$					Tensión de salida para carga de 200 $[\Omega]$				
	Teórica	Simulada	Experimental	% Error _s	% Error _E	Teórica	Simulada	Experimental	% Error _s	% Error _E
20%	V_{oT} [V]	V_{oS} [V]	V_{oE} [V]	9.2	2.1	V_{oT} [V]	V_{oS} [V]	V_{oE} [V]	3.5	24.6
	24	21.792	24.5			24	24.838	29.9		
70%	V_{oT} [V]	V_{oS} [V]	V_{oE} [V]	10.0	4.3	V_{oT} [V]	V_{oS} [V]	V_{oE} [V]	2.0	0.60
	84	75.5888	80.4			84	82.3239	84.5		

Fuente. Autores

5.3 POTENCIA Y EFICIENCIA DEL PROTOTIPO FINAL

En este caso se consideró una entrada de 340 [V] en DC, obtenida del rectificador implementado. A continuación, en la Tabla 8 se muestran los valores de potencia y

eficiencia obtenidos para una carga mínima y máxima de 50[Ω] y 200[Ω], respectivamente, con un ciclo de trabajo variable en simulación y en implementación.

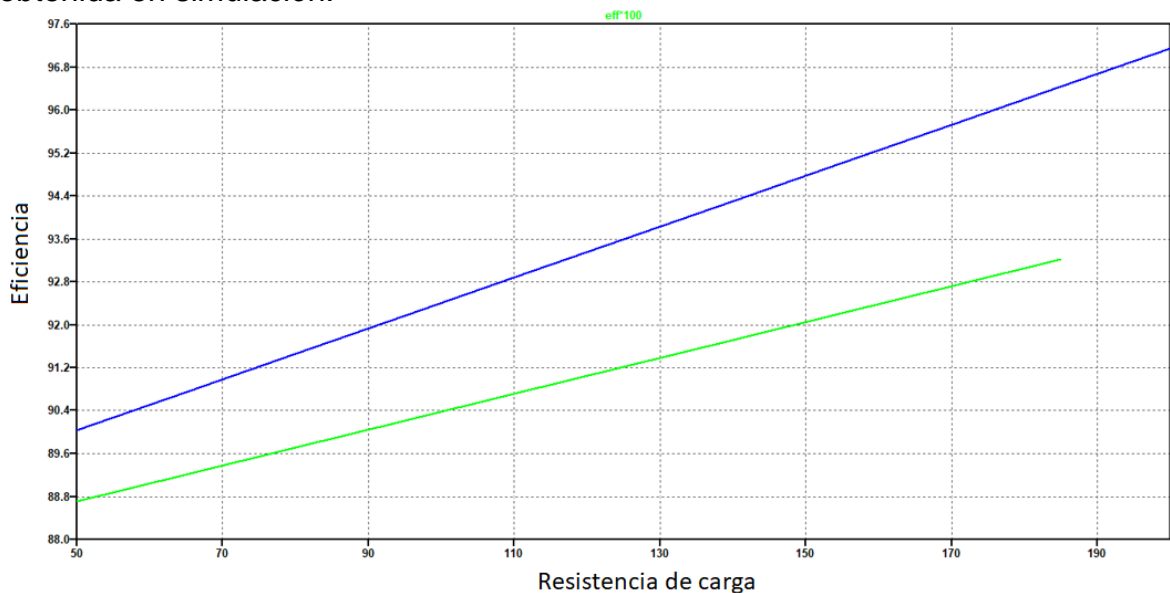
Tabla 8 Eficiencia y potencia del prototipo de convertidor de potencia para el anodizado de aluminio.

Eficiencia y potencia del prototipo													
Ciclo de trabajo (D)	Eficiencia y potencia para carga de 50 [Ω]						Eficiencia y potencia para carga de 200 [Ω]						
	Simulado			Experimental			% n Error	Simulado			Experimental		
	Pin [W]	Pout [W]	%n	Pin [W]	Pout [W]	%n		Pin [W]	Pout [W]	%n	Pin [W]	Pout [W]	%n
20%							1.25						3.30
	83.7694	74.3167	88.7	104.928	94.254	89.8		25.4717	23.8725	93.7	23.52	22.77	
70%							10.10						2.53
	981.204	883.38	90.0	845.495	838.09	99.1		277.024	269.129	97.2	238.464	237.54	

Fuente. Autores

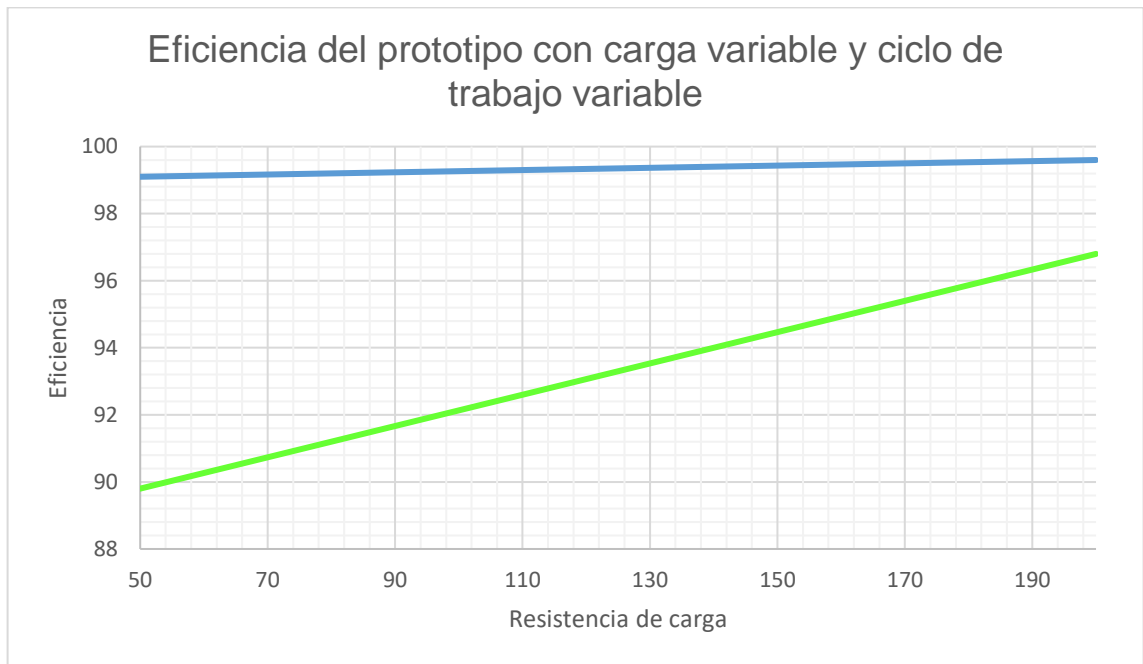
En la Figura 64 y la Figura 65 se observa la eficiencia con más detalle a variaciones de ciclo de trabajo y carga mínima y máxima.

Figura 64 Eficiencia del prototipo con ciclo de trabajo variable y carga variable obtenida en simulación.



Fuente. Autores

Figura 65 Resultados experimentales de la eficiencia del prototipo con ciclo de trabajo variable y carga variable.



Fuente. Autores

La eficiencia obtenida fue mayor a la simulada según el porcentaje error obtenido en la Tabla 8. La eficiencia máxima del prototipo se obtiene cuando el ciclo de trabajo es mayor y la carga es máxima.

5.4 PRUEBA FINAL CON CONTROL EN EL PROCESO DE ANODIZADO.

La prueba final de anodizado se realizó en una sola placa de aluminio de 1x4[mm]. Está sola placa no cumple con el rango de resistencia válido para el buen funcionamiento del convertidor, como solución se pone en paralelo una resistencia de 200[Ω], obteniendo una resistencia final de carga de 170[Ω]. El montaje realizado se muestra en la Figura 66.

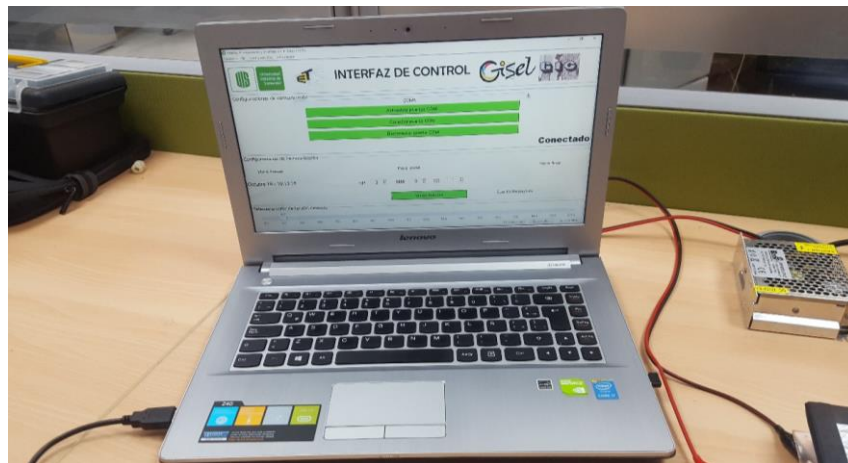
Figura 66 Montaje en solución química para la realización del anodizado.



Fuente. Autores

Se procede a incluir en la interfaz el tiempo y la tensión deseada para el proceso, en este caso se optó por una tensión de 40[V] y un tiempo de 30 minutos como lo muestra la Figura 67.

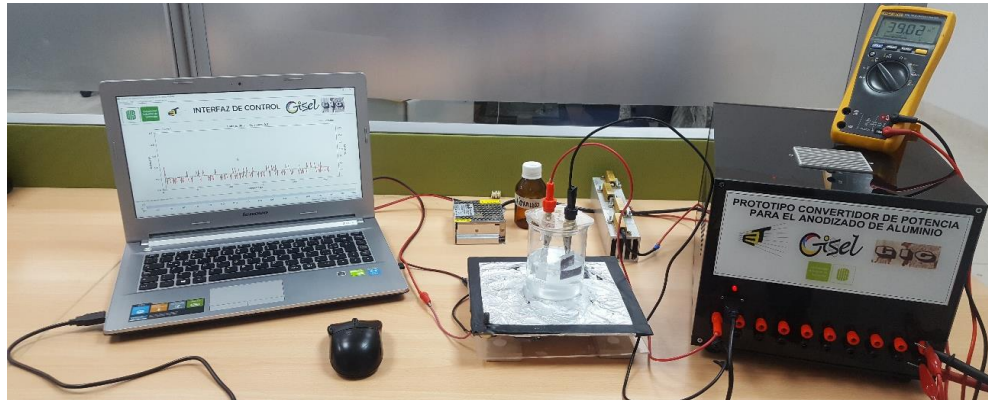
Figura 67 Modificación de tensión y tiempo en la interfaz para el proceso de anodizado.



Fuente. Autores

Ya modificadas las variables del proceso se procede a dar click en iniciar proceso. Automáticamente el prototipo de convertidor de potencia comienza el anodizado suave y de igual forma la interfaz gráfica en tiempo real muestra los valores de tensión y corriente proporcionado por los sensores incorporados. En la Figura 68 se muestra el proceso completo de anodizado de aluminio.

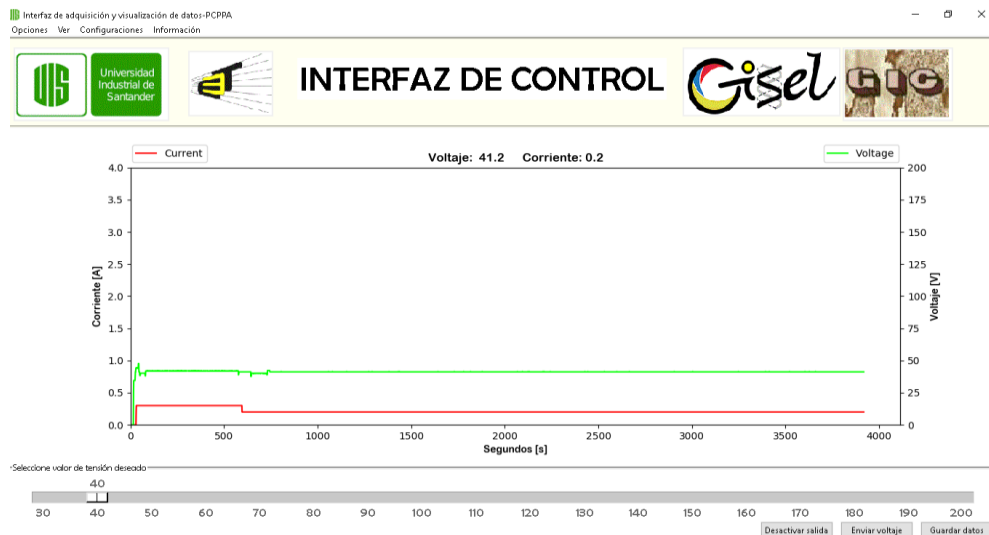
Figura 68 Proceso final de anodizado de aluminio.



Fuente. Autores

Se obtienen los datos de tiempo, tensión y corriente como lo muestra la Figura 69, adicionalmente se guardan en un archivo .txt en la carpeta llamada “Datos” respectivamente.

Figura 69 Gráfica de tiempo, tensión y corriente proporcionada por la interfaz en tiempo real.



Fuente. Autores

Para que el usuario del prototipo lleve a cabo su correcto funcionamiento, se llevó a cabo un manual (ver ANEXO R) en donde se especifica paso a paso su instalación y manipulación para procesos de anodizado.

6. OBSERVACIONES Y MEJORAS FUTURAS

- Con la consulta bibliográfica realizada no se ha encontrado un procedimiento unificado para la elaboración de prototipos de convertidores DC-DC para anodizado de aluminio debido a la gran variedad de topologías existentes, de ahí la importancia de reunir los aspectos más importantes y crear un manual que sirva como guía para éste y futuros diseños de prueba de convertidores DC-DC en procesos de anodizado.
- Para posteriores modelos implementados se debería tener en cuenta una fuente conmutada como alimentación del prototipo. De esta forma se reduce el tamaño y brinda la potencia necesaria para el proceso de anodizado. Cabe aclarar que el blindaje de los elementos electrónicos debe llevarse a cabo, ya que las perturbaciones a frecuencias parásitas afectan el funcionamiento del sensado y del troceador.
- Se propone optimizar la creación de películas anódicas de alúmina, por medio del mejoramiento del anodizado de aluminio controlando diferentes condiciones de operación, que son importantes para aumentar la eficiencia del proceso como es la temperatura, que es directamente proporcional con la densidad de corriente y el espesor de la capa anódica, que al aumento de la carga eléctrica (densidad de corriente por tiempo de anodizado) mayor será la temperatura. Los autores recomiendan diseñar un control de temperatura sensando y actuando con un sistema de enfriamiento controlado, según las características del usuario. Otra condición es la agitación mecánica que contribuye a la uniformidad de la temperatura del baño térmico, lo que repercute en un mayor ordenamiento de los poros, por ello controlando las variables de velocidad y duración de agitación con la creación de un dispositivo que modifique las revoluciones por minuto (rpm) y la programación de un motor de paso. El control de dichos parámetros genera cambios en las características físicas y morfológicas de las capas de óxido de aluminio.

7. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de grado se evidencia el diseño e implementación de un convertidor DC/DC reductor controlado mediante un algoritmo que varía su ciclo de trabajo. El sistema es capaz de mantener un conjunto de valores de tensión de salida en un valor cercano a la tensión de referencia proporcionada por el usuario, y una corriente suministrada para poder desarrollar 10 procesos de anodizado de aluminio en paralelo.
- El diseño y la simulación del circuito del convertidor reductor basado en los modelos obtenidos de las empresas fabricantes de los diferentes dispositivos que componen el prototipo, proporcionan un acercamiento del funcionamiento real con el desempeño esperado por el análisis en estado estable del convertidor. De igual forma proporciona seguridad en el momento de implementar el prototipo ya que la simulación respalda valores como son el voltaje de entrada y salida, el ciclo de trabajo y la eficiencia del circuito.
- El prototipo maneja rangos de tensión de 30[V] a 200 [V] con una variación de tensión de salida $\Delta V=2$ [V].
- En el prototipo implementado se tiene una frecuencia de trabajo de 62.5 [kHz] y para esta frecuencia, la máxima resolución que puede entregar el microcontrolador ATmega328p es de 8 bits. Por esta razón en el control de voltaje se tienen variaciones de ± 1.32 [V] y el seguimiento de la referencia se hace correcto cuando el valor de tensión de salida cae dentro de un rango de aceptación $V_{\text{sensor}} \pm 1.5$ [V].
- Para adquirir datos de mayor precisión de los sensores, se realizó una etapa de suavizado la cual consiste en tomar una serie de muestras, obtener el promedio y emplearlo para realizar el control pertinente. Se deben tener en cuenta los tiempos que tarda el microcontrolador en ejecutar las sentencias, para

seleccionar correctamente la cantidad de muestras y no visualizar datos erróneos.

- Se implementó una interfaz gráfica en Python la cual permite al usuario visualizar el comportamiento del proceso por medio de la adquisición de datos del sensor y permite enviar la tensión de referencia y la duración del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

BAJALES, Noelia, et al. Low-Dimensional Magnetic Systems in Nanopore Arrays, En: IEEE Transactions on Magnetics, Argentina, 2013. vol. 49.

CASTAÑO, Juan y ECHEVERRÍA, Félix. Estudio de la degradación de la capa de sellado en perfiles de aluminio anodizado. En: Revista Ingeniería y Desarrollo. Octubre, 2010, vol.28.

DUNSTAN BENGOUGH, Guy y MCARTHUR STUART, John. Improved process of protecting surfaces of aluminium of aluminium alloys. U.K. Patent 223, August 2, 1923. p.994.

HART, Daniel. Electronica de potencia. Madrid. Segunda Edición. Editorial Prentice Hall, 2001.

HERNÁNDEZ, Jeanette y LEAL, Carlos. Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones de aluminio AA 6063 y AA 8011, utilizando diferentes métodos de sellado. Venezuela. 2011.: Vol. 2 No.5., En: REPID: UNEXPO. VRB.

HERRERO HERNANDEZ, Hector. Protección a la corrosión de materiales compuestos de aluminio (Al/SiC- MMCs). Mexico D.F, 2007. Instituto Politecnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.

RAMIREZ RODRIGUEZ, Jose Miguel y RAMIREZ YANES, Lindon Wilson. Efecto del anodizado sobre la razon de desgaste de una aleacion de aluminio 6061. San Salvador. Septiembre, 2009. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica.

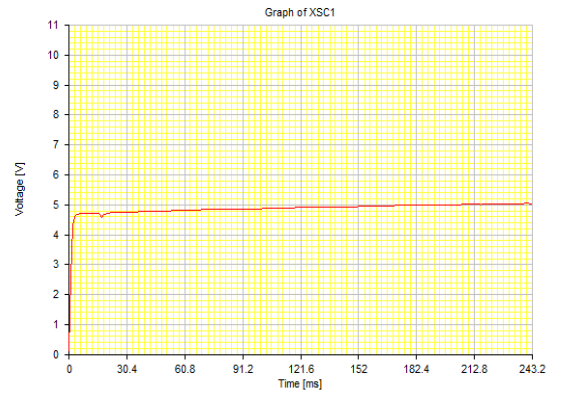
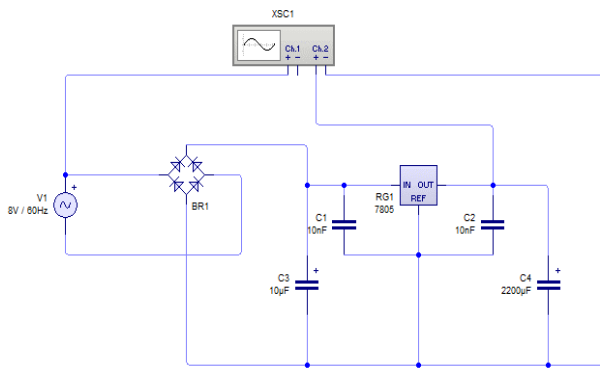
SULKA, Grzegorz; ZARASKA, Leszek y STĘPNIOWSKI, Wojciech. Anodic Porous Alumina as a Template for Nanofabrication. En: Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Junio, 2011. no.2. American Scientific editorial, p.261-349.

WOO, Lee, et al. Fast Fabrication of Long-Range Ordered Porous Alumina Membranes by Hard Anodization. En: Nature Materials, Alemania, agosto, 2006. vol. V, p. 741-747.

ANEXOS

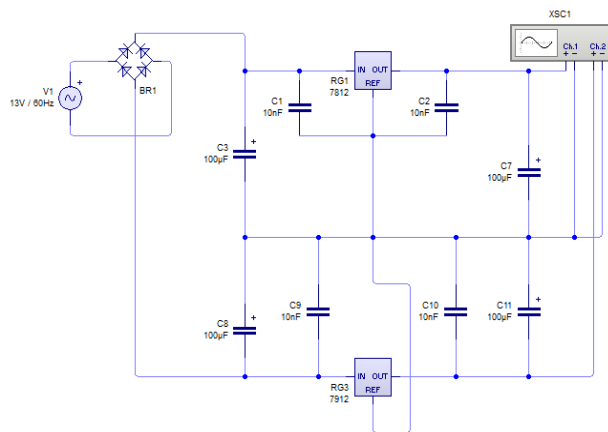
ANEXO A Fuente de alimentación

Figura 70 Fuente regulada de 5 [V].



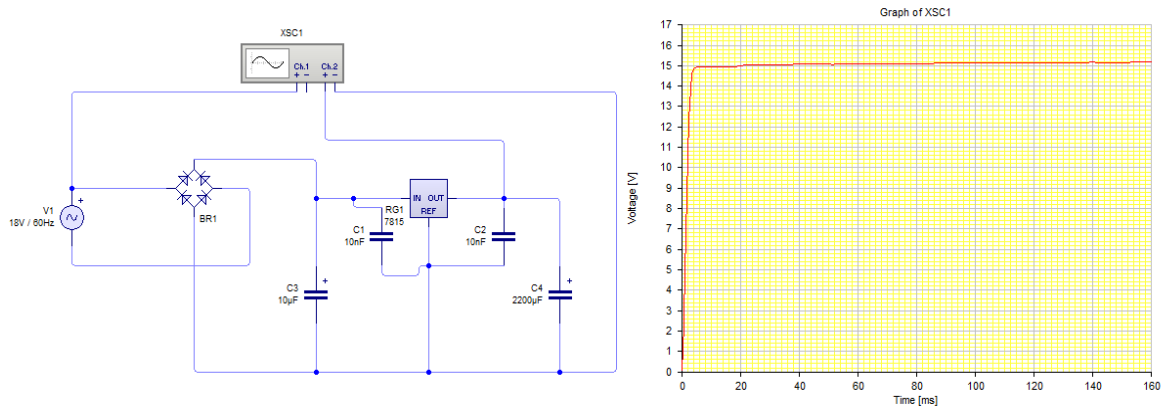
Fuente. Autores

Figura 71 Fuente regulada de 12 [V].



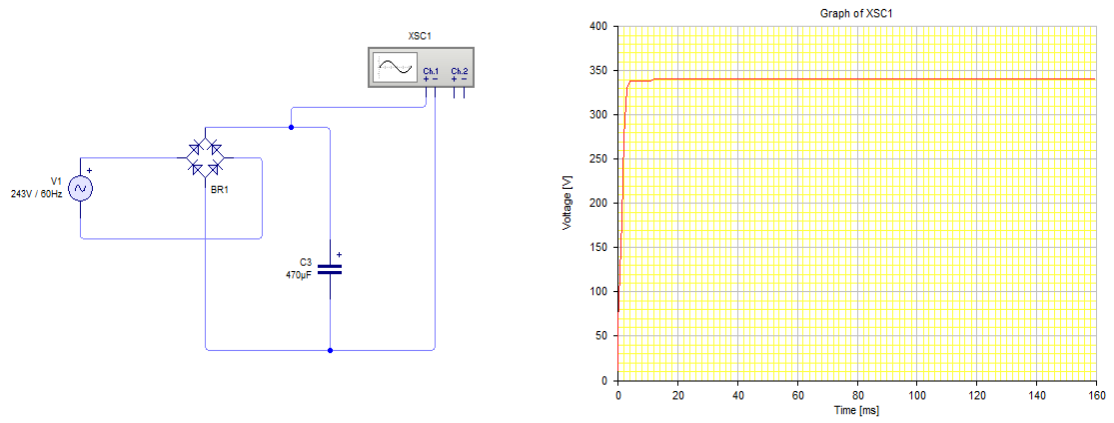
Fuente. Autores

Figura 72 Fuente regulada de 15 [V].



Fuente. Autores

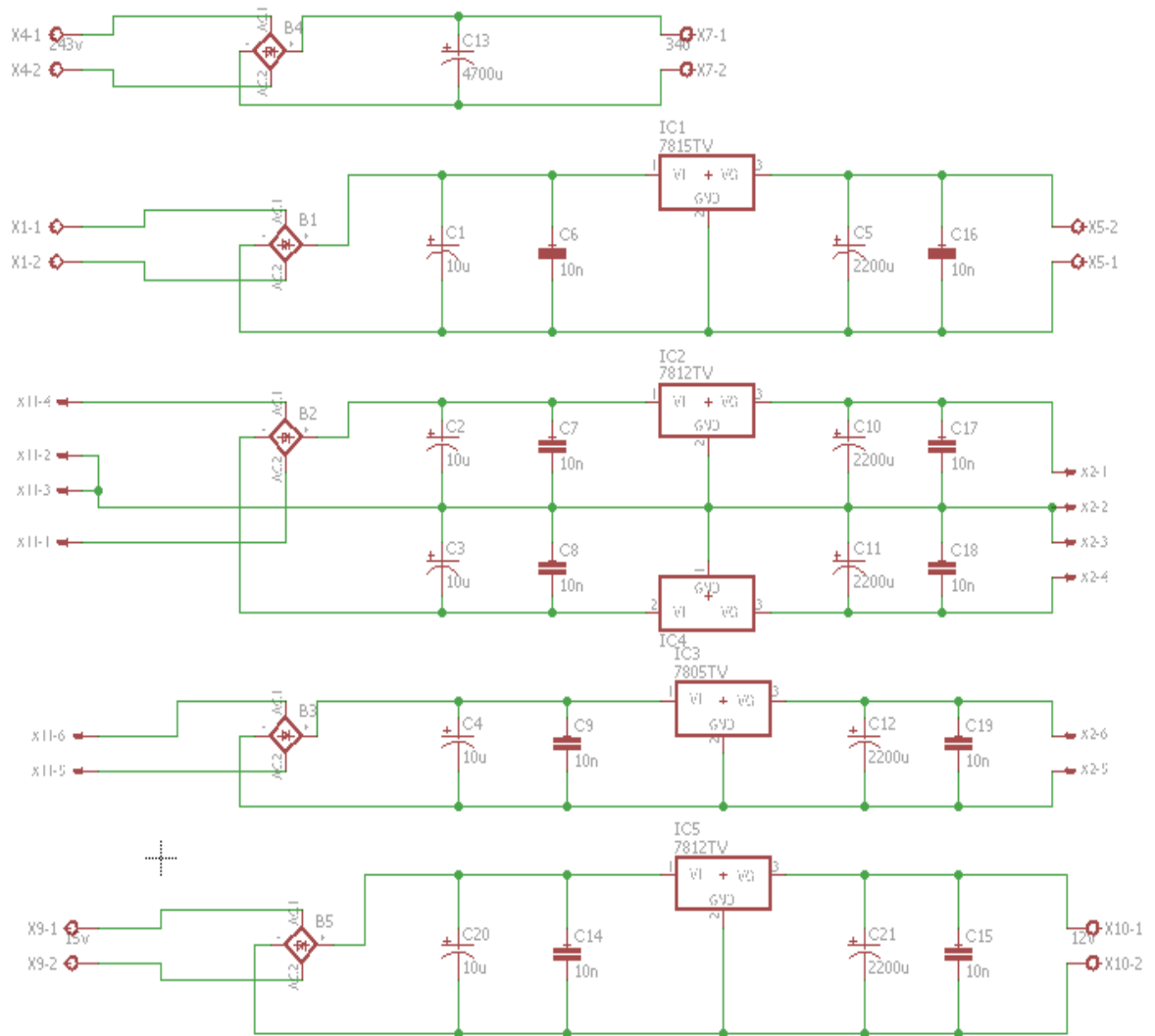
Figura 73 Fuente regulada de 340 [V].



Fuente. Autores

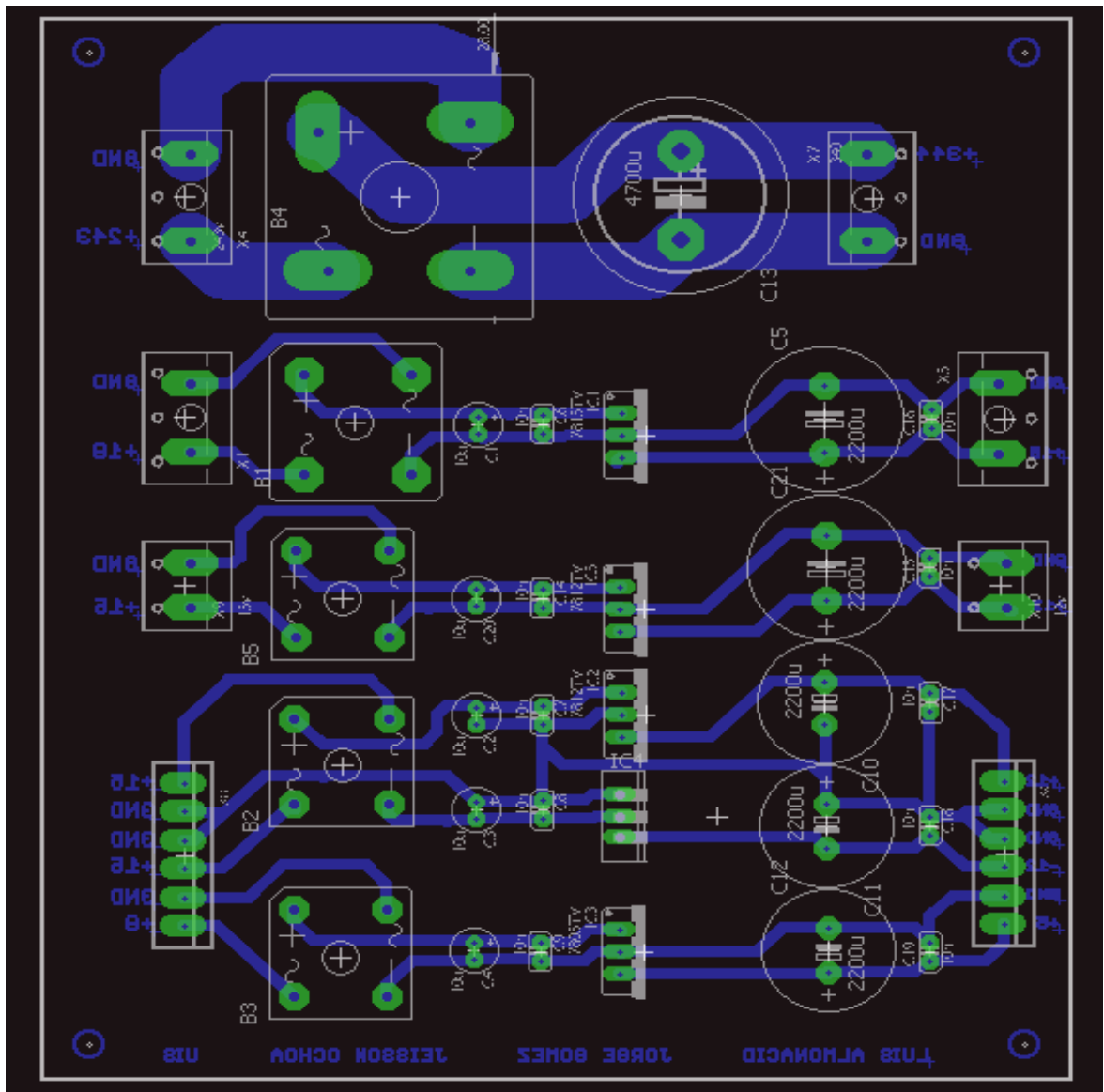
ANEXO B Diagrama fuente de alimentación

Figura 74 Esquemático fuentes de alimentación.



Fuente. Autores

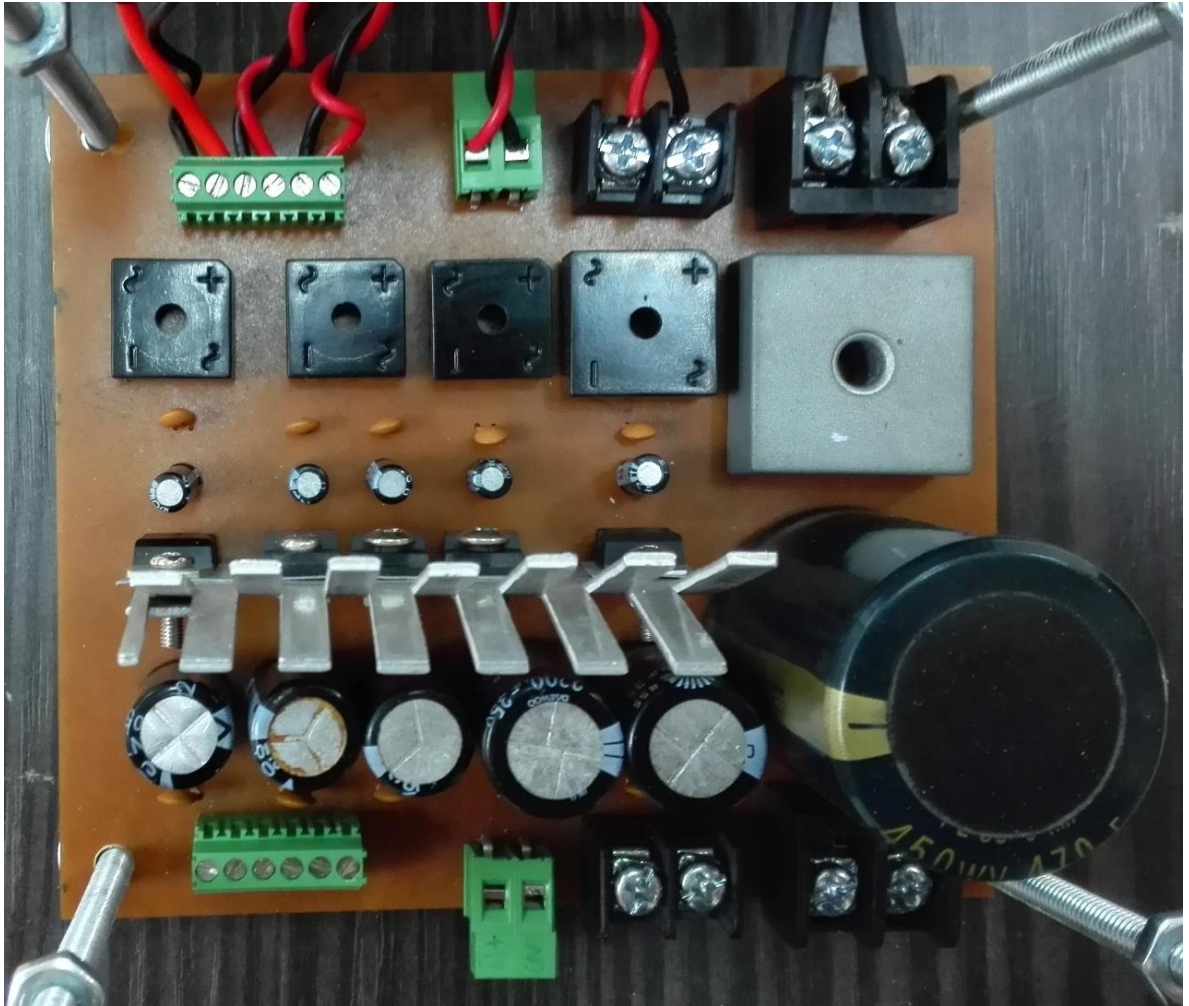
Figura 75 PCB fuentes de alimentación.



Fuente. Autores

ANEXO C Tarjeta de la fuente de alimentación

Figura 76 Implementación fuente regulada de alimentación.



Fuente. Autores

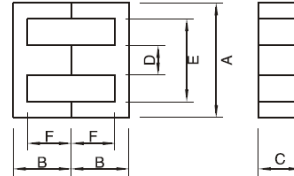
ANEXO D Hoja de datos núcleo EE-80

Figura 77 Hoja de datos permeabilidad de la ferrita.

EE & EF CORES

Meisongbei

Material: M3K, M2, M3



Type	Dimension(mm)						Effective Parameter				AL(nH/N ²)			Weight (g)
	A	B	C	D	E min	F	CI (mm ⁻¹)	Le (mm)	Ae (mm ²)	Ve (mm ³)	M3K (±25%)	M2 (±25%)	M3 (±25%)	
EE25A	25.4±0.5	10.0±0.3	6.4±0.3	6.0±0.3	18.5	7.0±0.3	1.16	50	43	2193	2300	2100	1900	10.7
EE25B	25.4±0.5	10.0±0.3	6.8±0.2	6.0±0.3	18.5	7.0±0.3	1.117	50.7	42.4	2149	2300	2100	1900	14
EF25	25.0±0.6	12.5±0.4	7.0±0.4	6.8±0.3	18.6	9.1±.3	1.22	57.8	47.2	2700	2300	2100	1900	13
EEI25	25.4±0.5	16.3±0.4	6.3±0.3	6.3±0.3	18.6	13.3±0.4	1.9	76.7	40.4	3097	1600	1400	1300	15.5
EE26.5	26.5±0.7	10.8±0.3	11.0±0.3	7.2±0.3	19	6.8±0.3	1.36	77.6	57.1	4430	4000	3900	3600	22
EE28	28.5±0.6	10.0±0.3	10.4±0.3	7.2±0.3	19	6.8±0.3	0.57	48.1	99.8	4801	4200	4000	4000	23.5
EEI28	28.0±0.7	17.1±0.3	10.4±0.3	7.1±0.3	18.9	12.8±0.4	0.9	74.4	87.5	6508.4	3100	2600	2400	35
EE30/7	30.1±0.7	15.0±0.4	7.3±0.5	7.2±0.5	19.5	9.9±0.25	1.12	66.9	59.7	4000			2100	21
EE30/11	30.0±0.5	15.0±0.4	10.7±0.3	7.2±0.5	19.5	9.9±0.25	0.86	57.8	110	6358			2800	32
EE40	40.0±0.7	17.3±0.3	11.6±0.3	11.6±0.3	26.8	10.3±0.3	0.53	77.28	145.74	11262.77			4000	56
EE42	42.0±0.7	21.2±0.4	15.0±0.4	12.3±0.4	29.5	9.9±0.25	0.6	97.8	180	17600	5300	4800	4200	88
EE55A	55.0±0.8	27.5±0.3	17.0±0.7	17.0±0.6	38	18.8±0.3	0.428	80	186	14880	4300	4000	3700	178
EE65A	65.2±1.3	32.5±.3	19.6±0.3	19.6±0.3	44.2	22.5±0.3	0.373	146.8	393.1	57728.4			5800	280
EE65B	65.2±1.3	32.5±0.3	19.6±0.3	27.0±0.3	44.2	22.5±0.3	0.274	147	535	78700			7800	380
EE70	70.5±1.0	35.5±0.5	24.5±0.6	16.7±0.5	48	24.6±0.6	0.344	159	461	73200			6500	370
EE70B	70.7±1.5	32.0±0.4	30.5±0.6	21.5±0.5	48	22.0±0.6	0.226	150	665	99800			9000	500
EE80	80.0±0.8	37.95±0.4	20.4±0.4	20.0±0.4	60	28.0±0.3	0.446	183.5	399	73150			6100	368
EE85	85.0±1.2	43.5±0.5	26.0±0.6	26.4±0.6	56	30.5±0.5	0.49	196.3	433	79150			7500	700
EE100	100.0±2.0	60.0±0.6	28.0±1.0	28.0±1.0	71.5	46.5±1.2	0.349	271	775	209768			7800	1028
EE110	110±2.0	55.0±0.6	36.0±1.0	36.0±1.0	75	37.0±1.2	0.212	274.5	1296	355750			13300	1796.5
EE130	130.0±3.0	63.0±1.0	20.0±1.0	40.0±2.0	89	43.0±0.8	0.352	284	1600	454000			12000	2190
EE140	140.0±3.0	53.0±1.0	35.0±1.0	35.0±1.0	100	35.0±0.6	0.216	259.3	1200.2	311212			7000	1550
EE160	160.0±3.0	83.0±1.0	20.0±1.5	40.0±2.0	120	64.0±1.0	0.498	398	1600	637000			9000	2500
EE185	185.0±3.0	77.0±1.5	27.5±1.0	53.0±1.0	128	50.0±1.5	0.24	370	1488	551000			12000	5700
EE240	240.0±3.0	117.0±1.0	40.0±1.5	56.0±3.0	176	86.5±1.0	0.235	556.4	2359	1312421			12500	5900

Fuente. Tomada de EE&EF CORES

ANEXO E Hoja de datos driver 1EDI20N12AF

Figura 78 Hoja de datos driver de potencia.



**1EDI EiceDRIVER™ Compact
1EDI20N12AF**

Electrical Parameters

5 Electrical Parameters

5.1 Absolute Maximum Ratings

Note: Absolute maximum ratings are defined as absolute limits, i.e. exceeding them may lead to destruction of the integrated circuit.

Table 2 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values		Unit	Note / Test Condition
		Min.	Max.		
Power supply output side	V_{VCC2}	-0.3	40	V	1)
Gate driver output	V_{OUT}	$V_{GND2}-0.3$	$V_{VCC2}+0.3$	V	–
Positive power supply input side	V_{VCC1}	-0.3	18.0	V	–
Logic input voltages (IN+,IN-)	$V_{LogicIN}$	-0.3	18.0	V	–
Input to output isolation voltage	V_{ISO}	-1200	1200	V	
Junction temperature	T_J	-40	150	°C	–
Storage temperature	T_S	-55	150	°C	–
Power dissipation (Input side)	$P_{D,IN}$	–	25	mW	2) @ $T_A = 25^\circ\text{C}$
Power dissipation (Output side)	$P_{D,OUT}$	–	400	mW	2) @ $T_A = 25^\circ\text{C}$
Thermal resistance (Input side)	$R_{THJA,IN}$	–	145	K/W	2) @ $T_A = 85^\circ\text{C}$
Thermal resistance (Output side)	$R_{THJA,OUT}$	–	165	K/W	2) @ $T_A = 85^\circ\text{C}$
ESD capability	$V_{ESD,HBM}$	–	2	kV	Human Body Model ³⁾

1) With respect to GND2.

2) See [Figure 10](#) for reference layouts for these thermal data. Thermal performance may change significantly with layout and heat dissipation of components in close proximity.

3) According to EIA/JESD22-A114-C (discharging a 100 pF capacitor through a 1.5 kΩ series resistor).

Fuente. Tomada de INFINEON

ANEXO F Hoja de datos MOSFET SPB12N50C3

Figura 79 Hoja de datos del MOSFET implementado.



SPB12N50C3

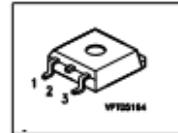
Cool MOS™ Power Transistor

Feature

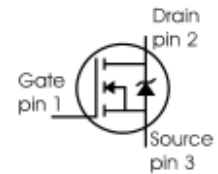
- New revolutionary high voltage technology
- Ultra low gate charge
- Periodic avalanche rated
- Extreme dv/dt rated
- Ultra low effective capacitances
- Improved transconductance
- Qualified according to JEDEC[®] for target applications

$V_{DS} @ T_{jmax}$	560	V
$R_{DS(on)}$	0.38	Ω
I_D	11.6	A

PG-TO263



Type	Package	Ordering Code	Marking
SPB12N50C3	PG-TO263	Q67040-S4641	12N50C3



Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value		Unit
		SPB		
Continuous drain current $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_D	11.6 7		A
Pulsed drain current, t_p limited by T_{jmax}	$I_{D\text{ puls}}$	34.8		A
Avalanche energy, single pulse $I_D=5.5\text{A}, V_{DD}=50\text{V}$	E_{AS}	340		mJ
Avalanche energy, repetitive t_{AR} limited by $T_{jmax}^{2)}$ $I_D=11.6\text{A}, V_{DD}=50\text{V}$	E_{AR}	0.6		
Avalanche current, repetitive t_{AR} limited by T_{jmax}	I_{AR}	11.6		A
Gate source voltage	V_{GS}	± 20		V
Gate source voltage AC ($f > 1\text{Hz}$)	V_{GS}	± 30		
Power dissipation, $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	125		W

Fuente. Tomada de INFINEON

ANEXO G Hoja de datos diodo schottky SCS212AG

Figura 80 Hoja de datos del diodo Schottky.



SCS212AG
SiC Schottky Barrier Diode

Datasheet

V_R	650V
I_F	12A
Q_C	18nC

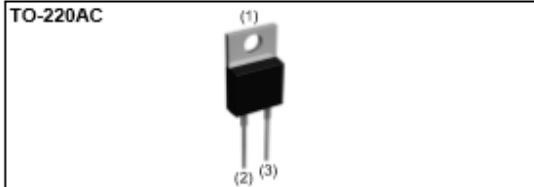
●Features

- 1) Shorter recovery time
- 2) Reduced temperature dependence
- 3) High-speed switching possible

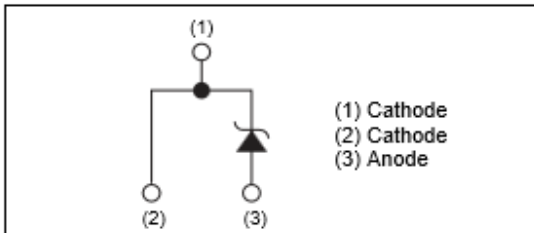
●Construction

Silicon carbide epitaxial planer type

●Outline



●Inner circuit



●Packaging specifications

Type	Packaging	Tube
	Reel size (mm)	-
	Tape width (mm)	-
	Basic ordering unit (pcs)	50
	Packing code	C
	Marking	SCS212AG

●Absolute maximum ratings (Tj = 25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage (repetitive peak)	V_{RM}	650	V
Reverse voltage (DC)	V_R	650	V
Continuous forward current	I_F	12* ¹	A
Surge no repetitive forward current	I_{FSM}	45* ²	A
		170* ³	A
		36* ⁴	A
Repetitive peak forward current	I_{FRM}	49* ⁵	A

Fuente. Tomada de ROHM

ANEXO H Hoja de datos sensor de tensión LV-25

Figura 81 Hoja de datos sensor tensión LV-25.



Voltage Transducer LV 25-P

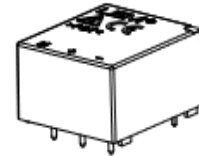
For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.

$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



RoHS



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal rms current	10	mA		
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA		
R_M	Measuring resistance	$R_{M, min}$	$R_{M, max}$		
		with ± 12 V	@ ± 10 mA _{max}	30	190
		@ ± 14 mA _{max}	30	100	Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA _{max}	100	350	Ω
	@ ± 14 mA _{max}	100	190	Ω	
I_{SN}	Secondary nominal rms current	25	mA		
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000			
U_c	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V		
I_c	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_s	mA		

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25 \text{ °C}$	@ ± 12 .. 15 V	± 0.9	%	
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8	%	
ϵ_L	Linearity error		< 0.2	%	
I_{D^*}	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25 \text{ °C}$		Typ	Max	
		Temperature variation of I_{D^*}	0 °C .. + 25 °C	± 0.06 ± 0.25	mA
		+ 25 °C .. + 70 °C	± 0.10 ± 0.35	mA	
t_r	Step response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN}	40		μs	

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_p	Resistance of primary winding @ $T_A = 70 \text{ °C}$	250	Ω
R_s	Resistance of secondary winding @ $T_A = 70 \text{ °C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997 UL 508: 2010	

Note: ¹⁾ $R_i = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_i , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

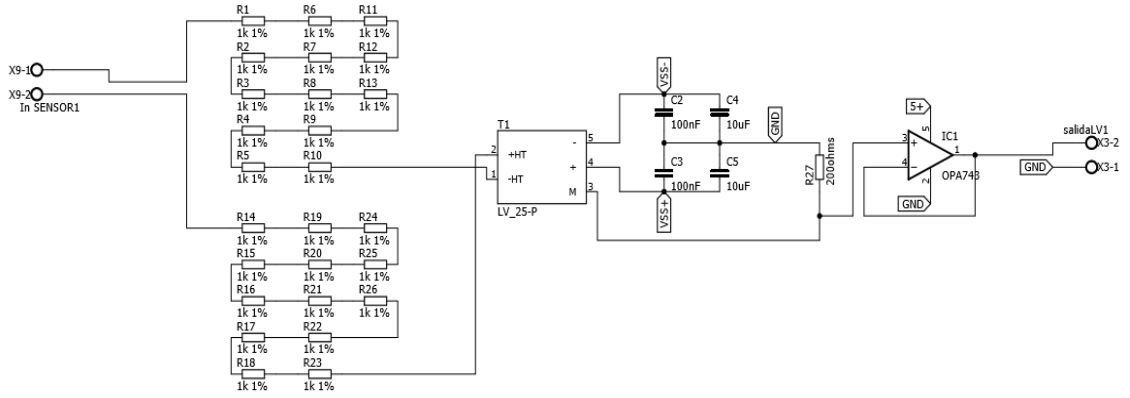
Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding

Fuente. Tomada de LEM

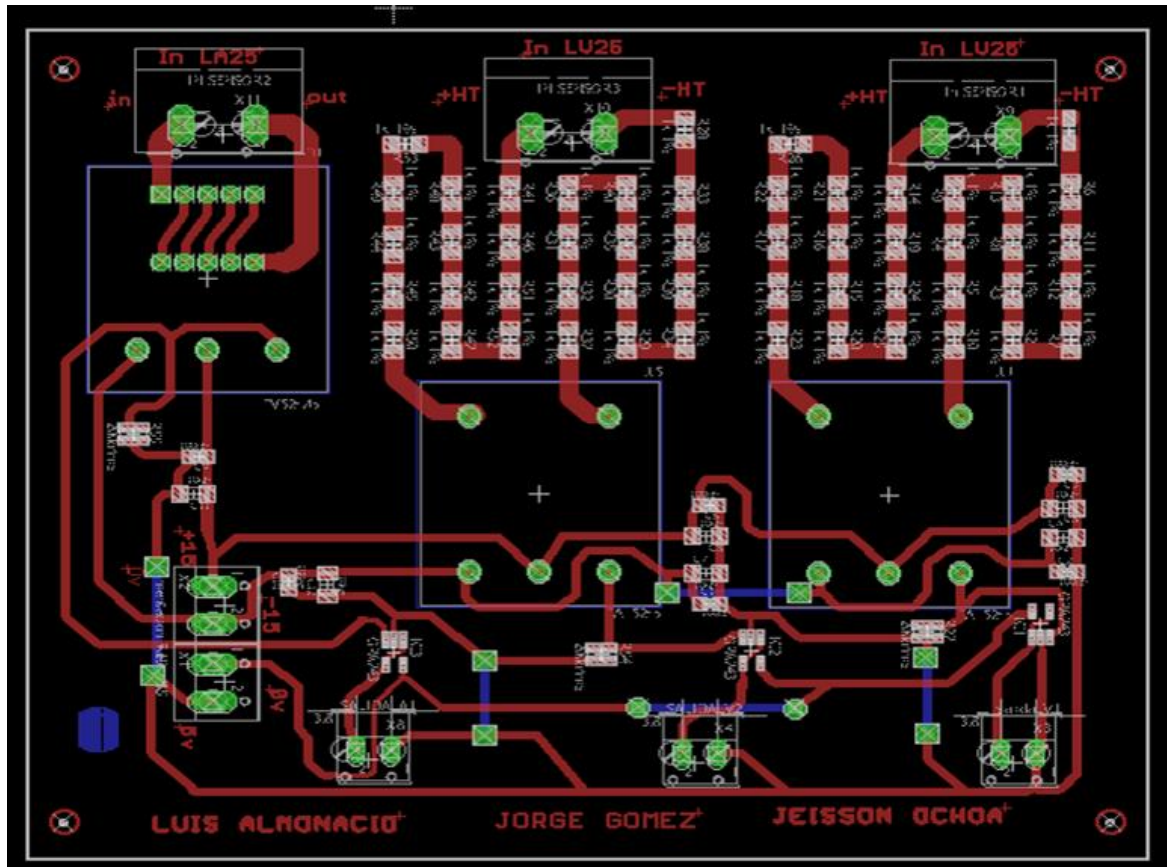
ANEXO I Diagrama y PCB del sensor de tensión

Figura 82 Circuito de acondicionamiento del transductor de tensión LV25-NP.



Fuente. Autores

Figura 83 PCB circuito acondicionamiento del Transductor de tensión LV25-NP.



Fuente. Autores

ANEXO J Hoja de datos sensor de corriente LA-25

Figura 84 Hoja de datos sensor de corriente LA-25.



Current Transducer LA 25-NP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit and the secondary circuit.

$I_{PN} = 5-6-8-12-25 \text{ At}$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	25	At
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 36	At
R_M	Measuring resistance @ with $\pm 15 \text{ V}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$	
		$R_{M\min}$	$R_{M\max}$
		$R_{M\min}$	$R_{M\max}$
	@ $\pm 25 \text{ At}_{\max}$	100	320
	@ $\pm 36 \text{ At}_{\max}$	100	190
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	
		$R_{M\min}$	$R_{M\max}$
		100	185
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA
K_N	Conversion ratio	1-2-3-4-5	: 1000
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	Current consumption	$10 + I_S$	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.5	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.2	%
I_0	Offset current ¹⁾ @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max
		± 0.05	± 0.15
I_{DM}	Magnetic offset current ²⁾ @ $I_p = 0$ and specified R_M after an overload of $3 \times I_{PN}$	± 0.05	± 0.15
		± 0.08	± 0.25
I_{DT}	Temperature variation of I_0	$0^\circ\text{C} \dots +25^\circ\text{C}$	± 0.10
		$+25^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$	± 0.35
		$-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	± 0.5
		$-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	± 1.2
t_r	Response time ³⁾ to 90 % of I_{PN} step	< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed	> 50	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 150	kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 .. +85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-45 .. +90	$^\circ\text{C}$
R_p	Primary coil resistance per turn @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	< 1.25	m Ω
R_s	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
		115	Ω
		115	Ω
R_{is}	Isolation resistance @ 500 V, $T_A = 25^\circ\text{C}$	> 1500	M Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

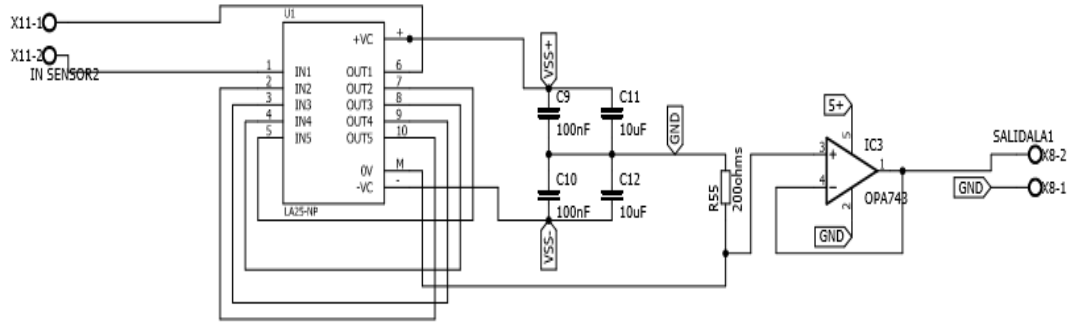
Application domain

- Industrial.

Fuente. Tomado de LEM

ANEXO K Diagrama y PCB del sensor de corriente

Figura 85 Circuito de acondicionamiento del Transductor de Corriente LA25-NP.



Fuente. Autores

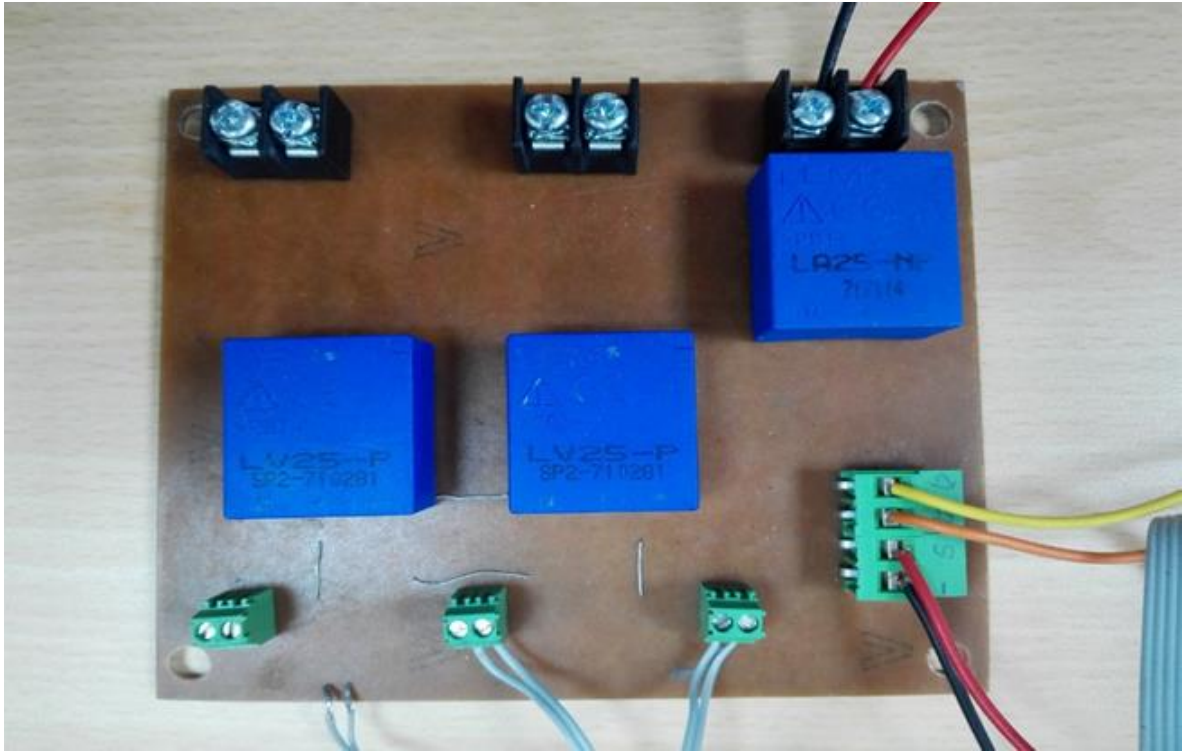
Figura 86 Configuraciones de corriente para LA-25.

Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_P [m Ω]	Primary insertion inductance L_P [μ H]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_P [A]					
1	25	36	25	1 / 1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2 / 1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3 / 1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4 / 1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	

Fuente. Tomado de LEM

ANEXO L Tarjeta de sensores LV-25 y LA-25

Figura 87 Implementación de los sensores de corriente y tensión.

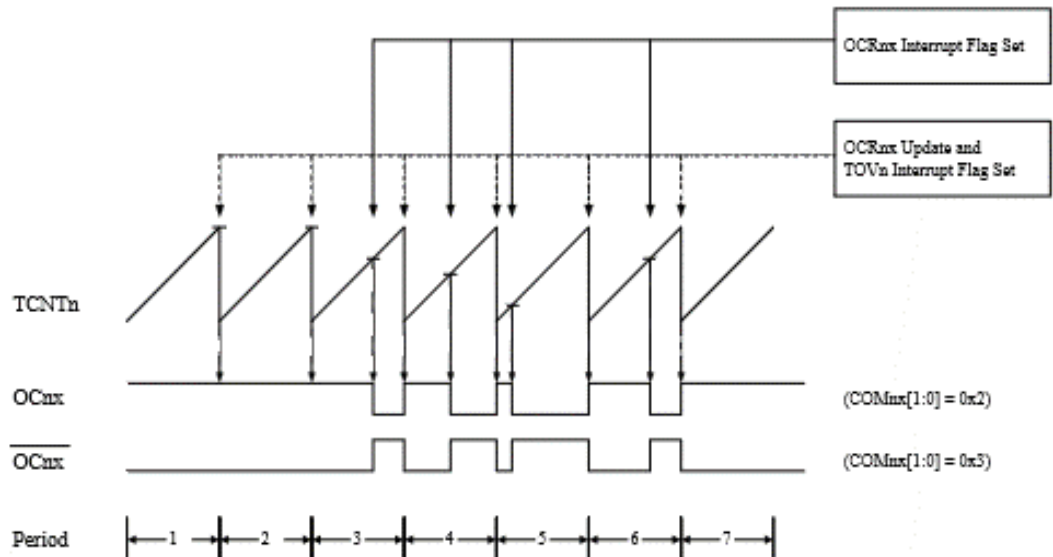


Fuente. Autores

ANEXO M Modo de trabajo Fast PWM

Figura 88 Hoja de datos Microcontrolador ATmega328P modo Fast PWM.

Figure 22-6. Fast PWM Mode, Timing Diagram



The Timer/Counter Overflow Flag (TOV2) is set each time the counter reaches TOP. If the interrupt is enabled, the interrupt handler routine can be used for updating the compare value.

In fast PWM mode, the compare unit allows generation of PWM waveforms on the OC2x pin. Setting the COM2x1:0 bits to two will produce a non-inverted PWM and an inverted PWM output can be generated by setting the COM2x[1:0] to three. TOP is defined as 0xFF when WGM2[2:0] = 0x3, and OCR2A when MGM2[2:0] = 0x7. The actual OC2x value will only be visible on the port pin if the data direction for the port pin is set as output. The PWM waveform is generated by setting (or clearing) the OC2x Register at the compare match between OCR2x and TCNT2, and clearing (or setting) the OC2x Register at the timer clock cycle the counter is cleared (changes from TOP to BOTTOM).

The PWM frequency for the output can be calculated by the following equation:

$$f_{OCnxPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{N \cdot 256}$$

The N variable represents the prescale factor (1, 8, 32, 64, 128, 256, or 1024).

The extreme values for the OCR2A Register represent special cases when generating a PWM waveform output in the fast PWM mode. If the OCR2A is set equal to BOTTOM, the output will be a narrow spike for each MAX+1 timer clock cycle. Setting the OCR2A equal to MAX will result in a constantly high or low output (depending on the polarity of the output set by the COM2A[1:0] bits.)

A frequency (with 50% duty cycle) waveform output in fast PWM mode can be achieved by setting OC2x to toggle its logical level on each compare match (COM2x[1:0] = 1). The waveform generated will have a maximum frequency of $f_{OC2} = f_{clk_I/O}/2$ when OCR2A is set to zero. This feature is similar to the OC2A toggle in CTC mode, except the double buffer feature of the Output Compare unit is enabled in the fast PWM mode.

Fuente. Tomada de ATMEL

ANEXO N Algoritmo de comunicación implementado

El código final implementado en la plataforma de Python para la realización de la interfaz y su comunicación se encuentra en la carpeta “ANEXOS” en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS.”.

ANEXO O Algoritmo de control implementado

El código final implementado en la plataforma de Arduino para la realización del control y su comunicación se encuentra en la carpeta “ANEXOS” en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS.”. Está programado en Object-oriented programming (OOP) es una manera de organizar los diferentes scripts por medio de clases en la plataforma de Arduino.

ANEXO P Interfaz del usuario

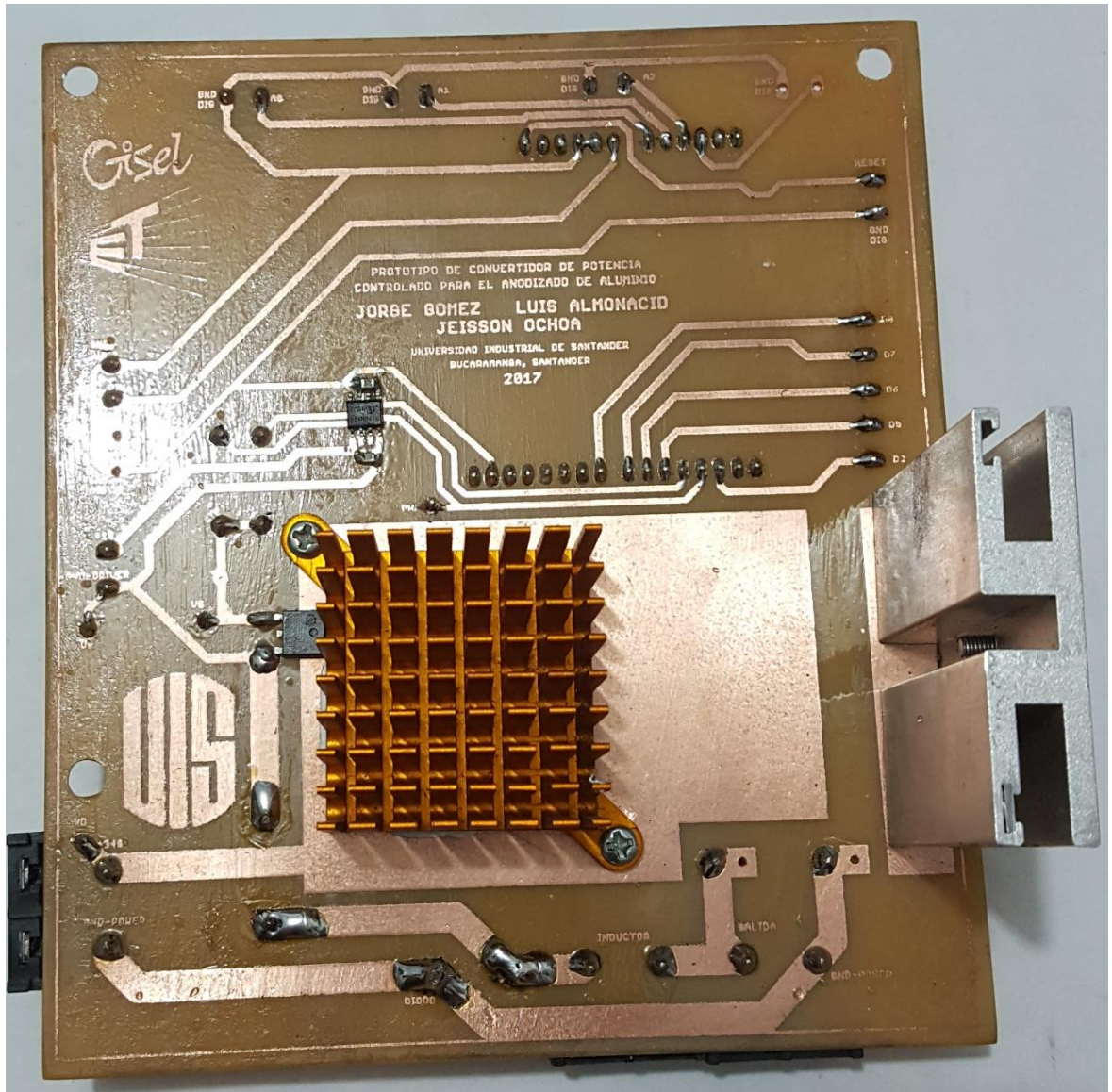
Figura 89 Interfaz en Python 3.4 para el control del prototipo.



Fuente. Autores

ANEXO Q Tarjeta del convertidor DC-DC reductor

Figura 90 Tarjeta implementada del troceador reductor.



Fuente. Autores

ANEXO R Manual del prototipo

El manual del prototipo implementado para que el usuario ejecute un buen funcionamiento en el proceso de anodizado de aluminio se encuentra en la capeta "ANEXOS" en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS.