

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FUENTE CONMUTADA DE
TENSIÓN Y CORRIENTE VARIABLE PARA ELECTRODEPOSICIÓN DE
METALES

ANGIE PÉREZ ROJAS

DIEGO ALBERTO RODRÍGUEZ MORA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

Bucaramanga

2017

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FUENTE CONMUTADA DE
TENSIÓN Y CORRIENTE VARIABLE PARA ELECTRODEPOSICIÓN DE
METALES

ANGIE PÉREZ ROJAS
DIEGO ALBERTO RODRÍGUEZ MORA

Trabajo de Grado en la Modalidad Investigación para optar al título de Ingeniero
Electrónico

DIRECTOR

Ingeniera electrónica, Doctora en Ingeniería electrónica.
María Alejandra Mantilla Villalobos

CODIRECTOR

Ingeniero electrónico, Magíster en ciencias de la Información y las comunicaciones
David Eugenio Forero Martínez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

Bucaramanga

2017

DEDICATORIAS

En primera instancia a Jehová Dios, por regalarme tantas bendiciones y permitirme cumplir este gran logro.

A mi madre Yaneth Rojas y a mi hermana Diana Pérez, por todo el amor que a diario me brindan, por sus esfuerzos y el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Las amo con el alma.

A mi sobrinito Samuel Andrés, por ser un motivo más para cumplir con mis metas y por alegrarme la vida con toda su ternura.

A mi Padre Víctor Pérez y a mi hermano Anderson Pérez por hacer parte de mi crianza y ayudarme a forjar la persona que soy hoy en día.

A Diego Rodríguez, por ser un excelente amigo y compañero de proyecto, lleno de talento y dedicación.

A mi amigo José Luis Garay por su colaboración y motivación durante la realización de este trabajo.

A Sonia Pérez y Luz Elena Cáceres por convertirse en mi segunda familia, brindándome experiencias enriquecedoras para mi ámbito personal y profesional.

A toda mi familia y amigos con quienes he compartido momentos muy gratos.

Y en especial, a mi tío Julio Guerra, quien en vida me amó como a una hija, me aconsejó, apoyó y motivó en todo momento. Tío, hoy cumplo nuestro sueño. Gracias por creer siempre en mí.

Angie Pérez Rojas

A Dios por permitirme el milagro de la vida, ya que sin eso no hubiese podido compartir con las personas que han dejado huella en mí.

A mi abuela, la cual desearía que en estos momentos estuviera compartiendo conmigo este logro y a la cual le agradezco su forma de ser conmigo, su sonrisa, sus regaños, sus halagos y en especial todo el tiempo que pasamos juntos sin importar si fuera bueno o malo. Le agradezco por todo y en especial por ser cariñosa conmigo.

A mi madre Luz Cenith y a mi papá Rafael Ruiz por todo su amor, sus esfuerzos y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis tíos Leidy, José Julián y Víctor los cuales merecen el título de padres, ya que en ellos encontré el apoyo, el ánimo, la confianza y siempre me han hecho sentir como un hijo más para ellos. Sin ellos no fuera posible este logro de mi vida.

A mi compañera Angie, la cual llego en el momento menos esperado pero en el más necesitado, y con la cual siento que es más que una amiga para mí, la veo como si fuera un ser espectacular, gracias a ella he aprendido a corregir fallas en mí. Es una de las mejores personas que he conocido en mi camino por la universidad. Gracias por ser como eres Angie.

A mis amigos Jorge Gómez y Galindo por ayudarme en los momentos cuando más lo necesitaba.

A Yennyfer Viviana por llegar a mi vida cuando más la necesitaba, por llenar ese espacio que nadie pudo llenar y por sacarme de la rutina con una sonrisa y un “te quiero”. Gracias Yennyfer, significas mucho para mí.

Diego Alberto Rodríguez Mora

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A Dios por permitirnos culminar con éxito este trabajo.

A nuestra directora de proyecto la Dra. María Alejandra Mantilla por su guía, paciencia y excelente acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

Al Magíster y docente Jaime Guillermo Barrero por sus valiosos aportes académicos en el transcurso de nuestra carrera y durante la realización del proyecto.

Al Ingeniero José Luis Garay por su tiempo, disposición y colaboración al momento de realizar este trabajo.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	20
1 ESTADO DEL ARTE	21
2 MARCO TEÓRICO	26
2.1 ELECTRODEPOSICIÓN	26
2.2 FUENTES CONMUTADAS	28
2.2.1 Funcionamiento	28
3 DISEÑO DEL PROTOTIPO	43
3.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y MÁRGENES DE OPERACIÓN DE LA FUENTE CONMUTADA.	43
3.1.1 Selección de componentes	44
3.2 RECTIFICADOR.....	44
3.3 CONVERTIDOR	46
3.3.1 Dispositivos de conmutación	47
3.3.2 Diseño del driver.....	47
3.3.3 Transformador utilizado	52
3.3.4 Rectificador de alta frecuencia	57
3.4 CONTROLADOR.....	58
3.4.1 Sistema de control de fase	58
3.4.2 Medición de variables	60
3.4.3 Controlador PID digital	61
3.4.4 Representación de datos e Interfaz gráfica	66

3.4.5 Comunicación serial	68
3.5 ALIMENTACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL, MEDICIÓN Y POTENCIA 69	
3.5.1 Alimentación de circuitos de control	69
3.5.2 Alimentación de circuitos de potencia	69
4 RESULTADOS	70
4.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN	70
4.2 APLICACIÓN EN PYTHON	76
4.2.1 Descripción de la interfaz gráfica.....	77
4.2.2 Presentación de los datos de voltaje y corriente	79
4.3 IMPLEMENTACIÓN	84
4.3.1 Circuito del convertidor, sensado y alimentación.....	84
4.3.2 Circuito para la conexión de la pantalla.....	88
4.3.3 Circuito encargado del controlador de los transistores.....	90
4.3.4 Prototipo construido.....	92
4.4 VERIFICACIÓN.....	93
5 CONCLUSIONES	96
6 RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXOS	102

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Comparativa de fuentes disponibles en el mercado y sus características principales.....	26
Tabla 2. Tecnologías disponibles para rectificadores.	31
Tabla 3. Rango de potencia de salida de convertidores DC-DC.....	36
Tabla 4. Tipos de núcleo y ventajas.....	40
Tabla 5. Características del prototipo.	43
Tabla 6. Dispositivos utilizados para la etapa de rectificación de baja frecuencia (50/60 Hz).	45
Tabla 7. Características del MOSFET utilizado.	47
Tabla 8. Características principales del Driver utilizado.....	48
Tabla 9. Tabla de componentes.....	48
Tabla 10. Características del diodo FR105.....	50
Tabla 11. Características del núcleo.....	53
Tabla 12. Comparativa para diversos materiales, tomado de la hoja de datos de TDK.....	54
Tabla 13. Características principales de los diodos utilizados.	57
Tabla 14. Especificaciones técnicas del Arduino DUE.....	59
Tabla 15. Características principales del amplificador utilizado.	60
Tabla 16. Características principales del sensor de corriente utilizado.....	61
Tabla 17. Valores utilizados en el modelo del convertidor.	62
Tabla 18. Parámetros del controlador utilizado.....	65

Tabla 19. Características principales del dispositivo XPT.....	68
Tabla 20. Características principales del driver ILI.	68
Tabla 21. Sumario de pruebas realizadas variando voltaje y carga.....	80
Tabla 22. Comportamiento del sensor de voltaje.....	85
Tabla 23. Parámetros para evaluar el desempeño de la etapa de sensado.	86
Tabla 24. Complementos de tkinter en Python.	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Máscara de cobre en miniatura proveniente de Loma Negra en la costa norte del Perú, data del año 200 D.C aproximadamente. Al eliminar los residuos de la corrosión del cobre, se encontró una superficie de oro brillante. Esta capa extremadamente delgada se aplicó mediante deposición química.	22
Figura 2. Diagrama de una celda electrolítica.....	27
Figura 3. Diagrama de bloques general de una fuente conmutada	29
Figura 4. Rectificador utilizado en fuentes conmutadas.....	30
Figura 5. Topología <i>flyback converter</i>	32
Figura 6. Topología <i>forward converter</i>	33
Figura 7. Topología <i>push-pull converter</i>	34
Figura 8. Topología <i>half-bridge converter</i>	34
Figura 9. Topología <i>full-bridge converter</i>	35
Figura 10. Aplicación de cada topología dependiendo de su tensión DC de entrada y la potencia de salida.	36
Figura 11. Control PID de una planta.....	38
Figura 12. Tipos de núcleos magnéticos.	39
Figura 13. Curvas B-H para diferentes tipos de transformador. A. <i>Pushpull</i> , <i>half</i> y <i>full bridge</i> . B. <i>Flyback</i> en discontinuo. C. <i>Flyback</i> en discontinuo y filtro <i>forward</i> . .	41
Figura 14. Símbolo de un MOSFET de potencia canal N	42
Figura 15. Diagrama general de la fuente conmutada.	44
Figura 16. Rectificador de onda completa utilizado.	45
Figura 17. Topología <i>full-bridge</i> utilizada.	46

Figura 18. Driver IR2110.....	49
Figura 19. Protección MOSFET	51
Figura 20. Diagrama interno TLP250.....	52
Figura 21. Dimensiones de núcleo de ferrita.	53
Figura 22. Bobinado de transformador.	56
Figura 23. Programación utilizada para la generación de señales de control por desplazamiento de fase.	60
Figura 24. Definición de bloques del sistema en lazo cerrado.	62
Figura 25. Diagrama de Bode del modelo en lazo abierto.	63
Figura 26. Respuesta al escalón del modelo más el controlador en lazo cerrado.	66
Figura 27. Pantalla LCD táctil utilizada para selección y muestra de datos.	67
Figura 28. Tensión puerta surtidor de los cuatro MOSFETS con una fase de 90°	71
Figura 29. Tensión drenador surtidor de los cuatro MOSFETS con una fase de 90°	72
Figura 30. Tensión en el primario del transformador producida por el puente completo conformado por cuatro MOSFETS.	72
Figura 31. Tensión en el secundario del transformador	73
Figura 32. Corriente del primario del transformador	74
Figura 33. Corriente en el secundario del transformador	74
Figura 34. Tensión a la salida del filtro de segundo orden conformado por un inductor de 25 uH y una capacitancia de 470 uF con una carga de 10 Ohms	75
Figura 35. Corriente a la salida del filtro de segundo orden conformado por un inductor de 25 uH y una capacitancia de 470 uF con una carga de 10 Ohms	75
Figura 36. Interfaz gráfica de aplicación en Python, ventana de valores	77

Figura 37. Menú "Guardar" de aplicación en Python.	77
Figura 38. Menú "Ver" de aplicación en Python.....	78
Figura 39. Menú "Opciones" de aplicación en Python.	78
Figura 40. Menú "Ayuda" de aplicación en Python.	79
Figura 41. Interfaz gráfica de aplicación en Python, ventana de gráficas	80
Figura 42. Prueba 1, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.	81
Figura 43. Prueba 1, datos de tensión y corriente en función del tiempo.	81
Figura 44. Prueba 2, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.	82
Figura 45. Prueba 2, datos de tensión y corriente en función del tiempo	82
Figura 46. Prueba 3, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.	83
Figura 47. Prueba 3, datos de tensión y corriente en función del tiempo	83
Figura 48. Gráfica de comportamiento del sensor de tensión.....	85
Figura 49. Diagrama del circuito utilizado para la etapa de sensado de tensión ...	86
Figura 50. Esquemático del circuito general diseñado.....	87
Figura 51. Implementación de la etapa del rectificador, convertidor, sensado y alimentación.....	88
Figura 52. Esquemático del circuito diseñado para realizar la conexión entre el Arduino, la pantalla y el controlador táctil.	89
Figura 53. Implementación de circuito de conexión de la pantalla.....	90
Figura 54. Circuito diseñado para el control de conmutación con su respectiva alimentación.....	91
Figura 55. Implementación de circuito de control de los transistores.....	92
Figura 56. Prototipo de fuente conmutada construido.	93
Figura 57. Prototipo de fuente conmutada construido, distinto ángulo.	93

Figura 58. Tensión puerta surtidor del MOSFET puente completo (azul), y tensión en el primario del transformador (rojo).....	94
Figura 59. Relación primario secundario del transformador	95
Figura 60. Funciones disponible en el módulo <i>math</i> de Python.....	103
Figura 61. Funciones principales del módulo <i>numpy</i> de Python.....	105
Figura 62. Programa de ejemplo del módulo <i>matplotlib</i>	106
Figura 63. Estilos de línea, marcador y leyenda de librería <i>matplotlib</i> en Python.	106
Figura 64. Gráfico ejemplo de la librería <i>matplotlib</i> en Python.....	107
Figura 65. Ejemplo de una interfaz de línea de comando.....	109
Figura 66. Ejemplo de cuadro de diálogo en interfaz gráfica.....	110
Figura 67. Programa HelloWorld utilizando <i>tkinter</i> en Python.....	112

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Python	102
Anexo B. Tabla de características de hilo de cobre	113
Anexo C. Manual de usuario módulo de comunicación, fuente conmutada 12 V y 4 A.	113
Anexo D. Código Arduino.	114
Anexo E. Código Python.....	114

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FUENTE CONMUTADA DE TENSIÓN Y CORRIENTE VARIABLE PARA LA ELECTRODEPOSICIÓN DE METALES¹

AUTORES: ANGIE PÉREZ ROJAS, DIEGO ALBERTO RODRÍGUEZ MORA ²

PALABRAS CLAVES: FUENTE CONMUTADA, ELECTRODEPOSICIÓN DE METALES, CONTROL PID DIGITAL, COMUNICACIÓN SERIAL, TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA.

DESCRIPCIÓN: El presente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un prototipo de fuente conmutada, el cual le permita al usuario realizar procesos de electrodeposición de metales. La función de este prototipo es seguir una tensión de referencia definida por el usuario; ante variaciones de carga, siempre y cuando no supere la capacidad máxima de corriente. Para el diseño y simulación del dispositivo se empleó el software LTSpice, de igual manera los valores máximos de salida establecidos son de 12 [V] para la tensión y 4 [A] para la corriente. Además el prototipo cuenta con un control PID digital el cual proporciona un valor de tensión estable a la salida, esto se realizó por medio de un microcontrolador empleando el software Arduino. También se usó el lenguaje de programación interpretado Python para el desarrollo de una interfaz gráfica que le permite al usuario visualizar las variables de tensión y corriente en un computador. Cabe resaltar que los programas anteriormente mencionados son de licencia libre “*freeware*”, por lo cual no requieren de un costo adicional para el desarrollo del prototipo. Logrando así competir con los demás dispositivos en el mercado, los cuales presentan un mayor costo debido a que ellos utilizan software con licencias pagas. Adicionalmente este prototipo cuenta con una pantalla táctil la cual permite seleccionar los valores de voltaje requeridos y a la vez visualizarlos, al igual que los valores de corriente.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de ingenierías Físicomecánicas. Escuela de ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Magíster y doctora en Ingeniería electrónica.

Codirector: David Eugenio Forero Martínez. Magíster en ingeniería electrónica

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A SWITCHED MODE POWER SUPPLY PROTOTYPE WITH VARIABLE VOLTAGE AND CURRENT FOR METAL ELECTRODEPOSITION³

AUTHORS: ANGIE PÉREZ ROJAS, DIEGO ALBERTO RODRÍGUEZ MORA⁴

KEYWORDS: SWITCHED MODE POWER SUPPLY, METAL ELECTRODEPOSITION, DIGITAL PID CONTROL, MICROCONTROLLER, SERIAL COMMUNICATION, HIGH FREQUENCY TRANSFORMER.

DESCRIPTION: The project aims to design and develop a prototype of a switch-mode power supply, which allows the user to perform metal electrodeposition processes. The main function of this prototype is to follow a reference voltage defined by the user, under load variations, as long as it does not exceed the maximum current capacity. For the design and simulation of the device, LTSpice software was used, the maximum output values set are 12 [V] for the voltage and 4 [A] for the current, in addition, the prototype has a digital PID control which provides a stable voltage value at the output, this was done through an Arduino-based microcontroller; Python programming language was also used for the development of the graphical interface in order to visualize the voltage and current variables in a computer. It should be noted that the aforementioned programs are freeware "freeware", so they do not require an additional cost for the development of the prototype. Thus, compete with the other devices in the market, which present a higher cost because they use software with paid licenses. Additionally this prototype has a touch screen which allows to select the required voltage values and at the same time visualize them, as well as the current values.

³ Bachelor Thesis

⁴ Faculty of Physical & Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering.

Director: PhD. María Alejandra Mantilla Villalobos

Co-director: MSc. David Eugenio Forero Martínez

INTRODUCCIÓN

Una fuente de alimentación es requerida por la mayoría de equipos electrónicos, los cuales trabajan con alimentación de la red eléctrica, y necesitan convertir la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC). Entre las aplicaciones de las fuentes de alimentación están los circuitos electrónicos que se encuentran en la radio, televisión, computadores, impresoras entre otros.

Además, las fuentes de alimentación tienen aplicaciones en la metalúrgica para realizar procesos galvanoplásticos como recubrir un metal con otro, de esta manera se mejoran las características físicas de la pieza a utilizar; en la minería se emplean en la producción de cobre como proceso final, esto es llamado electro refinación; y en la electroquímica se emplean en procesos de electrodeposición para separar metales con un alto grado de pureza⁵.

A pesar de que el proceso de electrodeposición se realiza a tensiones que no superan los 12 voltios; dependiendo de la aplicación, la corriente puede variar de 1 [A] hasta 10 [A], y en el caso de la minería cientos de amperes⁶.

En este proceso es importante mantener la tensión a un valor constante, independiente de la carga y de las variaciones de la red eléctrica, ya que, de no mantener la tensión en un rango definido, se depositarían otros metales que contaminarían o bajarán la pureza del metal a refinar.

Lograr mantener estable la tensión con dispositivos lineales presenta algunas desventajas, ya que por un lado se requiere de un transformador de baja frecuencia, los cuales son grandes y pesados, en comparación a los de alta

⁵ BROWN, Theodore, *et al.* Química de la ciencia central. 9 ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2004.1046 p. ISBN 970-26-0468-0.

⁶ MCCANN, Michael. Metalúrgica y metalistería. En: OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. España, Ministerio de trabajo y asuntos sociales, 1998. p. 82.1-82.66. ISBN 84-8417-047-0.

frecuencia; y por otro lado se utiliza un regulador de tensión, que es por lo general un transistor que opera en su región activa, lo que conlleva a tener pérdidas considerables de potencia⁷.

Por otra parte, están las fuentes conmutadas (SMPS), las cuales trabajan con transformadores de alta frecuencia, los cuales son de menor tamaño y menos pesados. Los elementos de conmutación operan como interruptores, por lo que las pérdidas son menores a la contraparte lineal, debido a que cuando la tensión es máxima la corriente es mínima y cuando la corriente es máxima la tensión es mínima. Además un transistor que opera en estado encendido/apagado presenta mayor capacidad de manejo de potencia en comparación a su región activa.

1 ESTADO DEL ARTE

La electrodeposición es un fenómeno fascinante, el hecho de que se pueda agregar una cubierta reluciente de metal a otro metal, simplemente a partir del intercambio de electrones e iones en una solución es algo que no pasa desapercibido, además, es excepcionalmente versátil y está presente en varias aplicaciones que serán mencionadas a continuación.

No se sabe a ciencia cierta cuándo y de dónde surgió la electrodeposición. Mientras que la deposición electro-química (El paso de la corriente de una fuente externa a través de una celda electroquímica) tuvo que esperar al invento de una fuente de ese tipo por Alessandro Volta en 1800, la deposición química sin presencia de corrientes eléctricas externas existe desde hace milenios (ver Figura 1). Los baños de oro se crearon a partir de una reacción de sustitución, que se da cuando una superficie de cobre se expone a iones de oro teniendo en cuenta que el primero es el metal más reactivo.

⁷ BILLINGS, Keith y MOREY Taylor. Switchmode Power Supply Handbook. 3 ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2011. 849 p. ISBN 978-0-07-163972-9.

Figura 1. Máscara de cobre en miniatura proveniente de Loma Negra en la costa norte del Perú, data del año 200 D.C aproximadamente. Al eliminar los residuos de la corrosión del cobre, se encontró una superficie de oro brillante. Esta capa extremadamente delgada se aplicó mediante deposición química.



Fuente: Electrodeposition, a technology for the future.

La deposición química evolucionó en la medida que se agregó un agente reductor químico en el año 1940 por obra de Grace Ridell y Abner Brenner y actualmente es un método muy importante para aplicar recubrimientos de protección a componentes metálicos utilizados en industrias que van desde la minera hasta la aeroespacial. La deposición química continúa siendo un área de investigación e innovación continua.

Volviendo a la electrodeposición, ésta surgió definitivamente con el desarrollo de electrolitos efectivos para la deposición de oro y plata, que se convirtieron en la base de la exitosa industria de los recubrimientos electrolíticos decorativos, gracias a la expansión de la tecnología desde Gran Bretaña y Rusia hacia el resto de Europa. Sin embargo, los electrolitos eran extremadamente tóxicos porque

incluían cianuro, y hoy en día continúa la búsqueda por sustitutos mejores y más seguros⁸.

Además del recubrimiento decorativo de metales, la electrodeposición ha encontrado aplicaciones desafiantes en la industria electrónica que incluyen desarrollos de cabezales de grabación hechos con películas delgadas magnéticas para discos duros, así como el reemplazo de aluminio y sus aleaciones por cobre electro-depositado en la interconexión de circuitos integrados.

La electrodeposición también encuentra un amplio espectro de aplicaciones en la nanotecnología debido a su robustez al usarse para ubicar materiales en geometrías tridimensionales arbitrarias comparada con otros métodos. Por lo tanto, puede utilizarse en la fabricación de nano-componentes usando electrolitos basados en agua y, por lo tanto, amigables con el medio ambiente.

Adicionalmente, la electrodeposición puede usarse con propósitos ambientales como lo es el tratamiento de residuos químicos producidos ya sea en laboratorios de electroquímica como en industrias entre las que se encuentran, la automotriz, electrodoméstica, aeronáutica, mobiliario metálico, decoración, arquitectura metálica, electricidad y electrónica. Con el objetivo de eliminar metales pesados (Cromo y Plata) y así reducir la contaminación de los ríos y quebradas que es a donde van a parar estos desechos⁹.

Finalmente, la electrodeposición tiene cabida en una de las etapas finales de la minería como lo es el refinamiento, en donde puede utilizarse para extraer oro y plata con una pureza superior al 99% lo que hace que la electrodeposición

⁸ SCHWARZACHER, Walther. Electrodeposition: a technology for the future. En: Electrochemical Society Interface. 2006. vol. 15 no. 1, p. 32-33.

⁹ GIL, Julio. Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca. Trabajo de Grado Magíster en Ingeniería Sanitaria. Cali: Universidad del Valle, Facultad de ingeniería, 2012. 127 p.

presente aplicaciones indirectas como la elaboración de nitrato de plata, fabricación de espejos, radiografías, así como la anteriormente mencionada joyería.

Para llevar a cabo las aplicaciones especificadas, se requiere la utilización de una fuente DC, que proporcione una diferencia de potencial fija y una corriente proporcional en área del metal, por ello se revisó de forma general, la situación actual referente a este apartado como se presenta a continuación.

La evolución de las fuentes DC a lo largo de los años, ha consistido en la transición desde las fuentes lineales hacia las fuentes conmutadas. Las fuentes lineales contienen un transformador principal y un regulador serie disipativo, lo que implica la presencia de un transformador de 50/60 [Hz] de gran tamaño y peso, además de eficiencias de conversión típicas del 30% al 65% mientras que las topologías correspondientes a fuentes conmutadas presentan eficiencias típicas que oscilan entre el 70 y 95%^{10 11}.

Además, al utilizar altas frecuencias de conmutación, el tamaño del transformador de potencia y componentes asociados de filtrado se reduce drásticamente en las fuentes conmutadas comparadas con las lineales, por ejemplo, en el caso de una frecuencia de operación de 20 [kHz] la reducción de tamaño es de 4 veces, para 100 [kHz] es de 8 veces. Actualmente es requisito para la mayoría de sistemas electrónicos que las fuentes de alimentación sean compactas y livianas.

¹⁰ PHILIPS SEMICONDUCTORS, Power Semiconductor Applications. [En línea]. [Hamburgo, Alemania]: Mr.D.F.Haslam, 1992. [Citado el 20 de Junio de 2017]. Disponible en: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA495/PHILIPS%20APPLICATIONS/PHILIPS%20SemiCond%20HB.pdfg2jes9GdpQ>.

¹¹ ON SEMICONDUCTOR. Switch-mode power supply reference manual [En línea]. Rev. 4. [Denver, EE.UU]: Literature distribution center for ON, 2014. [Citado el 12 de Junio de 2017]. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/SMPSRM-D.PDF>.

Existen diferentes topologías de convertidores DC-DC que se utilizan en las fuentes conmutadas, entre los proyectos realizados en la Universidad Industrial de Santander se encuentran los circuitos *Boost*¹² (con corrección del factor de potencia) *LLC Half-bridge*¹³ y *full-bridge*¹⁴ utilizados para elaborar fuentes conmutadas de 350, 300 y 500 [W] con eficiencias de 97%, 95% y 82% respectivamente.

Los proyectos anteriormente mencionados, se realizaron definiendo un valor fijo de carga y en algunos casos no presentaban resultados completos de simulación debido a que utilizaban componentes de alto rendimiento de marcas registradas cuyas librerías de simulación se encontraban encriptadas y solo eran accesibles mediante software de pago.

Por lo tanto, resulta interesante el desarrollo de una fuente conmutada variable, utilizando software libre y componentes disponibles tanto para su simulación como implementación.

En este proyecto se realizó el diseño e implementación de una fuente conmutada DC variable con valores máximos a la salida de 12 [V] y 4 [A] con miras a ser utilizada en la electrodeposición. Por lo tanto, se realizó una búsqueda en la que se consultaron las diferentes opciones que existen en el mercado con respecto a fuentes de poder DC enfocadas a la electrodeposición, tal como se muestra en la Tabla 1.

¹² BERNAL, Yeiler y NUÑEZ, José. Diseño e implementación de una fuente de tensión de corriente continua con factor de potencia corregido. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2013. 152 p.

¹³ HINE, Carlos y MARTINEZ, Sergio. Diseño y construcción de una fuente de tensión conmutada. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2011. 115 p.

¹⁴ GIORGI, Lisseth y URIBE, Karen. Implementación de una fuente DC empleando un convertidor Full-Bridge de frecuencia variable. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2014. 93 p.

Tabla 1. Comparativa de fuentes disponibles en el mercado y sus características principales.

Marca	Tensión [V]	Corriente [A]	Precio [USD]
Dynatronix DP20-50-100 Pulse	0 – 20 0 – 50 0 – 100	Media: 50 Pico: 100	6880
Regulated Adjustable Linear DC HY1803D	0 – 20	0 – 3	70
Plating Rectifier HY15X0EX	0 – 15	20 – 30 – 200	140 – 190 – 1000
Plating Rectifier HY30X0EX	0 – 30	30 – 80 – 100	270 – 550 – 670
Programmable DC HY30X0EP	0 – 30	20 – 30 – 50	270 – 330 – 480
Regulated Variable Switching DC HY1550EX	0 – 15	0 – 50	290

Fuente: Mastech power supplies.

De acuerdo a la búsqueda realizada, se encontró que existe disponibilidad de fuentes DC variables en EE.UU con tensiones de 0 a 30 V y corrientes de 0 a 200 A para entradas de 240 VAC; en el caso de 110 VAC disminuye la corriente dependiendo de cuales equipos soportan esta entrada.

2 MARCO TEÓRICO

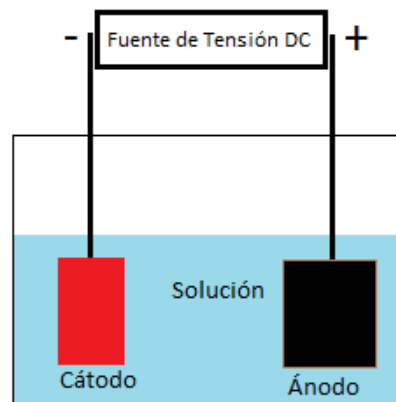
2.1 ELECTRODEPOSICIÓN

La electrodeposición, reducción electrolítica o electrolisis de metales es un tratamiento electroquímico, en el cual se sumergen electrodos, estos corresponden a cátodo y ánodo, en una celda electrolítica que contiene una

solución acuosa, tal como se muestra en la Figura 2. Dependiendo de la aplicación, es decir, de las características físicas, químicas o mecánicas que se desee mejorar en las piezas a utilizar “electrodos”; se determinan las concentraciones de los solventes requeridos y la diferencia de potencial eléctrico a la que estarán sometidas las piezas a procesar¹⁵.

Hay varios aspectos importantes de la electrodeposición, considerando que la solución es apropiada en agitación, temperatura y solventes; también se debe considerar el recipiente el cual no debe entrar en relación química con el proceso. Con las anteriores consideraciones se pueden emplear ánodos consumibles o no consumibles. Tomando ánodos consumibles, que es la mayoría de los casos, se permite el recubrimiento del cátodo por parte del ánodo debido a una diferencia de potencial eléctrico de una fuente de tensión DC; esta fuente de tensión permite el flujo forzado de electrones del cátodo hacia el ánodo logrando la reducción de él mismo¹⁶.

Figura 2. Diagrama de una celda electrolítica



La fuente de alimentación del circuito debe ser de tensión continua, a la cual se le permita controlar la máxima cantidad de corriente, asegurando además poder fijar

¹⁵ MCCANN. Op. Cit., p. 82.53.

¹⁶ BROWN, Op. Cit., p. 105.

un valor apropiado de tensión, el cual es ajustado por el operario por medio de una perilla o botón, es decir, es de fácil manipulación; al igual la corriente máxima entregada por la fuente debe ser de fácil manipulación por el operario del equipo “Fuente de electrodeposición”.

2.2 FUENTES CONMUTADAS

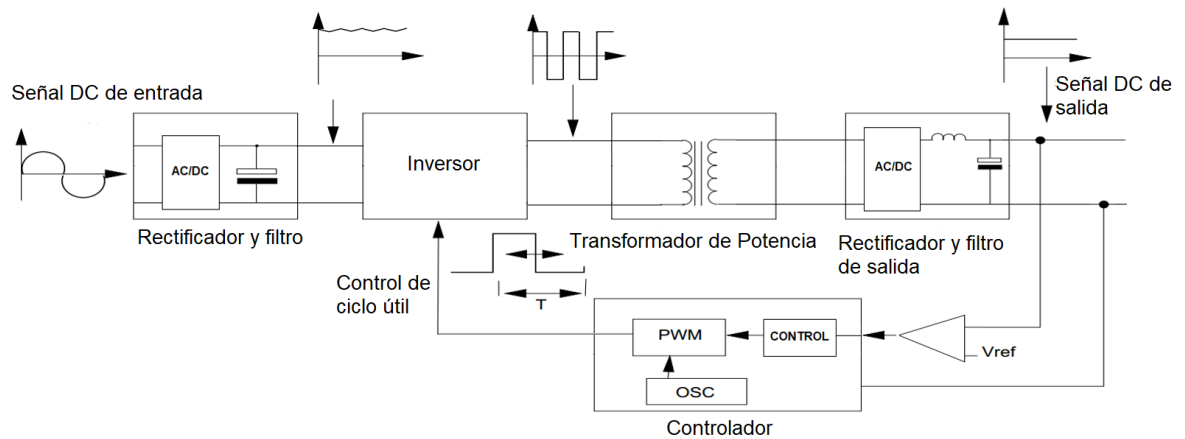
Las fuentes conmutadas son equipos que vienen del desarrollo de la electrónica de potencia, las cuales remplazan a las fuentes lineales. Las fuentes conmutadas o SMPS “*Switched-mode power supply*” se caracterizan por tener mejores características en tamaño, peso, eficiencia en comparación con las fuentes lineales; además presentan un mayor rango de operación para cambios de la red eléctrica¹⁷, por ejemplo: los cargadores de teléfonos celulares actuales utilizan fuentes conmutadas, y pueden trabajar en cualquier parte del mundo; caso contrario a las fuentes lineales anteriormente usadas, las cuales solo pueden trabajar para la región a la cual fueron diseñadas.

2.2.1 Funcionamiento

Para entender mejor el funcionamiento una fuente conmutada básica es preferible separarla en bloques, y analizarlos paso a paso, tal como se muestra en la Figura 3.

¹⁷ RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia. Traducido por Gabriel Sánchez García. 2 ed. Bogotá D.C : Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1995. 621 p. ISBN 968-880-586-6.

Figura 3. Diagrama de bloques general de una fuente conmutada



Fuente: Adaptada de Philips Semiconductors.

De acuerdo a la figura anterior, esta configuración asume una entrada de 50/60 [Hz], que es primero rectificada y luego filtrada por el condensador para producir una señal DC aproximada que puede variar debido a variaciones en la tensión de la red eléctrica. Esta señal DC alimentará el bloque central de la fuente, la sección de conmutación de potencia de alta frecuencia en donde dispositivos como transistores MOSFET son puestos a trabajar como interruptores y conmutan la tensión de entrada a través del primario del transformador de potencia. Los pulsos de control generalmente se encuentran a una frecuencia fija (20 a 200 [kHz]) y ciclo útil variable. Por lo tanto, aparece un tren de pulsos en el secundario del transformador, que es rectificado y suavizado por el filtro de salida, que puede ser un condensador o un arreglo de condensador/inductor dependiendo de la topología utilizada. La transferencia de potencia debe llevarse a cabo con las menores pérdidas posibles para mantener la eficiencia, por esto, el diseño óptimo de los componentes pasivos y magnéticos y la selección de los dispositivos semiconductores de potencia es muy importante. Finalmente, la regulación en la salida se lleva a cabo por el bloque de control/realimentación en el que la tensión de salida se compara con una tensión de referencia y el voltaje de error que arroja el comparador se utiliza para indicar al control de pulsos lo que debe hacer para

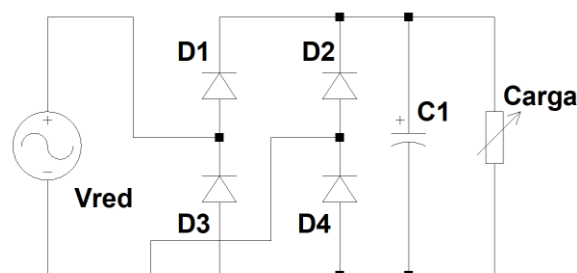
llevar a la salida la tensión correcta. Si se diseña correctamente se puede obtener una fuente DC muy estable.

Es de vital importancia que los retardos en el lazo de control sean mínimos, de lo contrario podrían ocurrir problemas de estabilidad, por lo tanto, deben utilizarse componentes de muy alta velocidad, además, en topologías con acople de transformador, debe mantenerse la barrera de aislamiento intacta, esto se logra utilizando un pequeño transformador de pulso o un optoacoplador.

2.2.1.1 Rectificador

Generalmente, en las fuentes conmutadas se utiliza un rectificador de onda completa (ver Figura 4) compuesto por un puente de diodos cuya disposición permite el flujo de corriente en la carga en los dos semi-ciclos de la señal de entrada AC con lo que se obtiene una senoidal rectificada. Finalmente, se utiliza un capacitor en paralelo a la carga para almacenar energía en el espacio entre semi-ciclos en el cual la tensión cae, lo que permite obtener una salida DC de valor aproximado al valor pico de la señal de entrada del convertidor.

Figura 4. Rectificador utilizado en fuentes conmutadas.



Los rectificadores representan cerca del 60% de las pérdidas en las fuentes conmutadas no-sincronizadas¹⁸, esto hace que la elección del diodo tenga un gran

¹⁸ ON SEMICONDUCTOR. Op. Cit., p. 19.

impacto en la eficiencia de la fuente. Los parámetros del rectificador que afectan la operación de la fuente conmutada son:

- Tensión en directa (V_f): Diferencia de potencial en el diodo cuando una corriente fluye desde el ánodo hacia el cátodo.
- Tiempo de recuperación inversa (t_{rr}): Es el tiempo que tarda un diodo en descargarse y alcanzar su valor máximo de corriente en inversa cuando se le aplica una tensión negativa.
- Tiempo de recuperación directa (t_{ON}): Es el tiempo que tarda el diodo en permitir el paso de corriente, luego de que se aplica una tensión en directa.

Existen cuatro tecnologías a elegir para rectificadores, estándar, rápida, ultra-rápida y de tipo *Schottky*, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tecnologías disponibles para rectificadores.

Tipo de rectificador	V_f Promedio	t_{rr}	Aplicaciones
Respuesta estándar	0.7 – 1.0 V	1000 ns	Rectificación 50 – 60 Hz
Respuesta rápida	1.0 – 1.2 V	150 – 200 ns	Rectificación de salida
Respuesta ultra rápida	0.9 – 1.4 V	25 – 75 ns	Rectificación de salida ($V_o > 12$ V)
<i>Schottky</i>	0.3 – 0.8 V	< 10 ns	Rectificación de salida ($V_o < 12$ V)

Fuente: On semiconductor Switch mode power supply

2.2.1.2 Convertidor

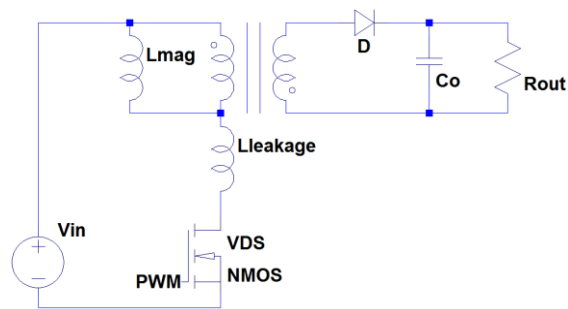
El circuito que determina cómo se transfiere la potencia, se puede implementar bajo diferentes topologías y es de vital importancia en el proceso de diseño. Cada topología consiste en un arreglo de inductores, condensadores, un transformador y dispositivos semiconductores de potencia (MOSFET, Bipolar o IGBT, así como rectificadores).

La parte central del convertidor de potencia es el inversor de alta frecuencia, en donde la entrada es troceada a alta frecuencia (20 a 200 [kHz])¹⁹, luego es filtrada y suavizada para producir una salida en DC.

Todas las topologías de fuentes conmutadas están basadas en tres topologías no-aisladas que son los circuitos *Buck*, *Boost* y *Buck-Boost*. Sin embargo, actualmente la mayoría de fuentes conmutadas se construyen utilizando topologías aisladas, que se muestran a continuación:

Flyback converter

Figura 5. Topología *flyback converter*



El convertidor aislado *fly-back*, tal como muestra en la Figura 5, es muy usado en aplicaciones que no superen los 150 [W] de potencia, esta topología solo usa un componente magnético principal, donde el inductor provee almacenamiento de energía como aislamiento eléctrico. La transferencia de energía de la carga ocurre cuando el dispositivo de conmutación está en el tiempo de apagado *off-time*.²⁰

Esta topología tiene la gran ventaja de presentar pocos componentes, esto hace que sea muy económica y empleada en conversiones de energía AC-DC.

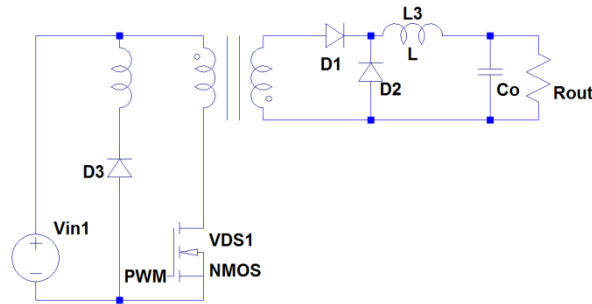
¹⁹ PHILIPS SEMICONDUCTORS. Op. Cit., p. 107.

²⁰ PHILIPS SEMICONDUCTORS. Op. Cit., p. 113.

Además, es muy usada en aplicaciones donde se requieran altos voltajes de salida.

Forward converter

Figura 6. Topología *forward converter*



El convertidor aislado *forward*, como se muestra en la Figura 6, es típicamente usado en potencias entre los 150 y 400 [W], además de ser muy empleado en aplicaciones de reducción de tensión, esta topología emplea dos grandes componentes magnéticos; un transformador y un inductor a la salida, la transferencia de energía del secundario del transformador a la carga ocurre cuando el dispositivo de conmutación está en el tiempo de encendido *on-time*²¹.

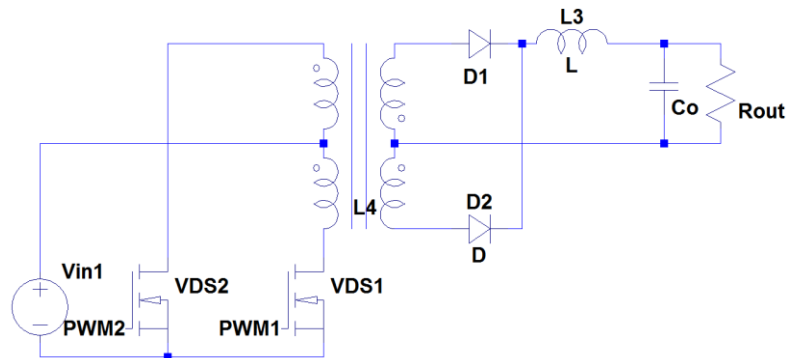
Push-pull converter

El convertidor *push-pull* es usado cuando hay una gran variación en la tensión de entrada y cuando el voltaje de salida es mucho menor al voltaje de entrada. Esta topología tiene la peculiaridad de dividir en dos el primario del transformador de aislamiento permitiendo disminuir a la mitad la corriente de conmutación primaria en cada dispositivo de conmutación. Esta topología puede ser usada en niveles de

²¹ ON SEMICONDUCTOR. Op. Cit., p. 42.

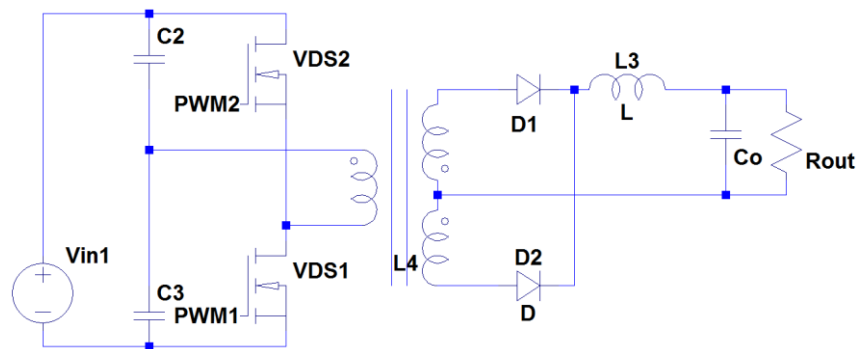
potencia en el rango de unos cuantos de cientos de watts hasta llegar a 1 kW.²² La topología se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Topología *push-pull converter*



Half-bridge converter

Figura 8. Topología *half-bridge converter*



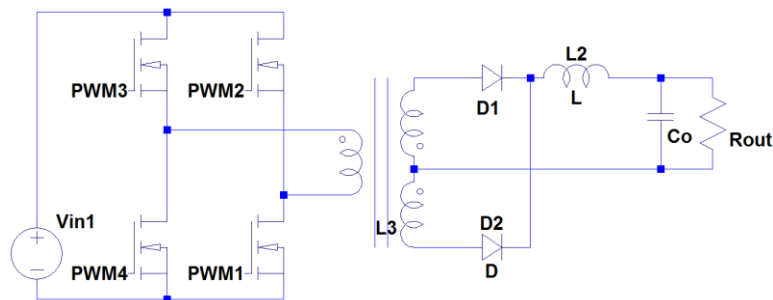
El convertidor *half-bridge* es utilizado en fuentes de alimentación en un rango de 150 a 1 kW. Esta topología además usa dos componentes magnéticos principales, un transformador y un inductor a la salida, pero en este caso se utiliza mejor el transformador que en un convertidor *forward*. Esta topología presenta la desventaja que los dispositivos de conmutación deben manejar el doble de

²² PHILIPS SEMICONDUCTORS. Op. Cit., p. 119.

corriente en comparación con el conversor *full-bridge*.²³ La topología se muestra en la Figura 8.

Full-bridge converter

Figura 9. Topología *full-bridge converter*



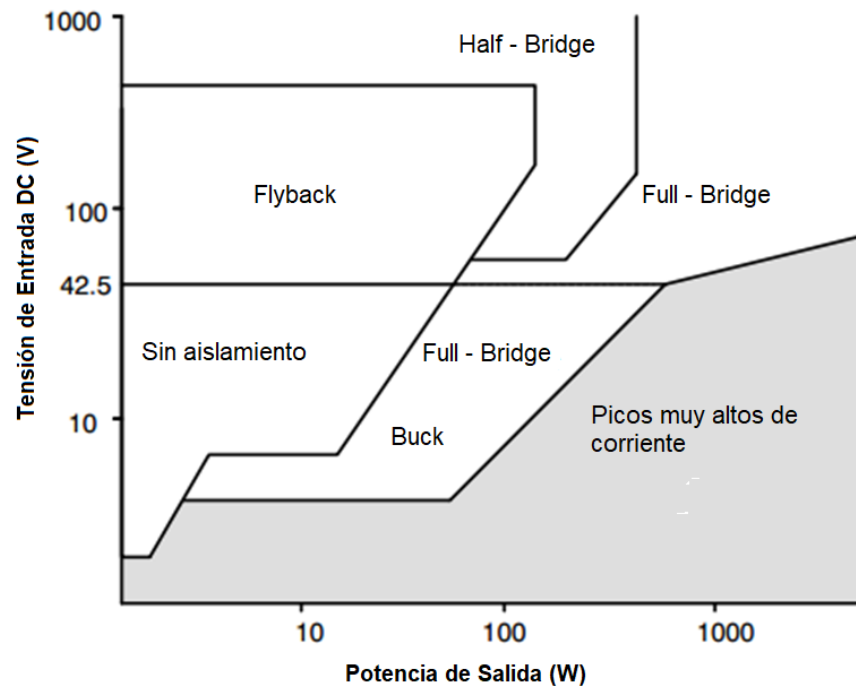
Esta topología permite obtener a la salida el doble de potencia para la misma corriente de conmutación primaria, pero aumenta la complejidad de los circuitos de accionamiento de los dispositivos de conmutación, en comparación con el conversor *half-bridge*. Existe la tendencia de utilizar esta topología en convertidores reductores de tensión y cuando se trabaja con potencias superiores a 1000 W.²⁴ La topología se muestra en la Figura 9.

A continuación se observa la aplicación de cada topología dependiendo de su tensión DC de entrada y la potencia de salida (ver Figura 10) y se registra en la Tabla 3 el rango de potencia de salida de convertidores DC-DC.

²³ BILLINGS. Op. Cit., p. 2.83.

²⁴ GIORGI. Op. Cit., p. 23.

Figura 10. Aplicación de cada topología dependiendo de su tensión DC de entrada y la potencia de salida.



Fuente: Switch-Mode Power Supply Reference Manual

Tabla 3. Rango de potencia de salida de convertidores DC-DC.

Topología	Potencia de salida máxima aproximada
Flyback	200 W
Forward	300 W
Forward/Flyback	400 W
Push-pull	500 W
Half-Bridge	1000 W
Full-Bridge	> 1000 W

Fuente: Philips Guide, Switched mode power supplies.

2.2.1.3 Controlador

Como se menciona anteriormente, este dispositivo se encarga de comparar la señal de salida con una tensión de referencia y a partir de esta diferencia modifica

la señal PWM del convertidor de potencia controlado de la fuente conmutada para seguir la tensión de referencia.

Tradicionalmente, los diseños de fuentes conmutadas utilizaban controladores PWM analógicos, contruidos a partir de amplificadores operacionales cuyos circuitos incluían todos los algoritmos de control necesarios, tanto para el modo de tensión o de corriente.

A continuación, se presentan algunos de los métodos de control que existen para fuentes conmutadas:

- Modo de control de voltaje y corriente
- Control PID
- Técnicas *feed – forward*
- Técnicas de control digital para fuentes conmutadas

En este proyecto, se implementó un lazo de control PID (ver Figura 11) para la fuente conmutada. Este método como su nombre lo indica, utiliza una acción proporcional, una integral y una derivativa del error entre la salida y la señal de referencia para controlar la señal PWM, ya sea en ciclo útil o fase y puede realizarse para la tensión o corriente de salida.

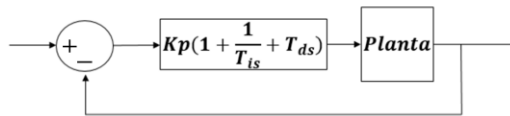
El algoritmo de control PID²⁵ fue desarrollado en 1942 por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols²⁶, y ha sido el método de control dominante para el control de motores, procesos industriales y centrales de trabajo.

²⁵ Proporcional, integral y derivativo.

²⁶ MICROCHIP, Introduction to SMPS control techniques. [En línea]. [Arizona, EE.UU]: WebSeminars, 2006. [Citado el 1 de Julio de 2017]. Disponible en: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en527885.pdf.

Se han implementado controladores PID en sistemas mecánicos, neumáticos, hidráulicos y electrónicos, y el algoritmo es sencillo e intuitivo de entender. En la Figura 11 se presenta un ejemplo de un control PID aplicado a una planta.

Figura 11. Control PID de una planta.



2.2.1.4 Transformador de potencia

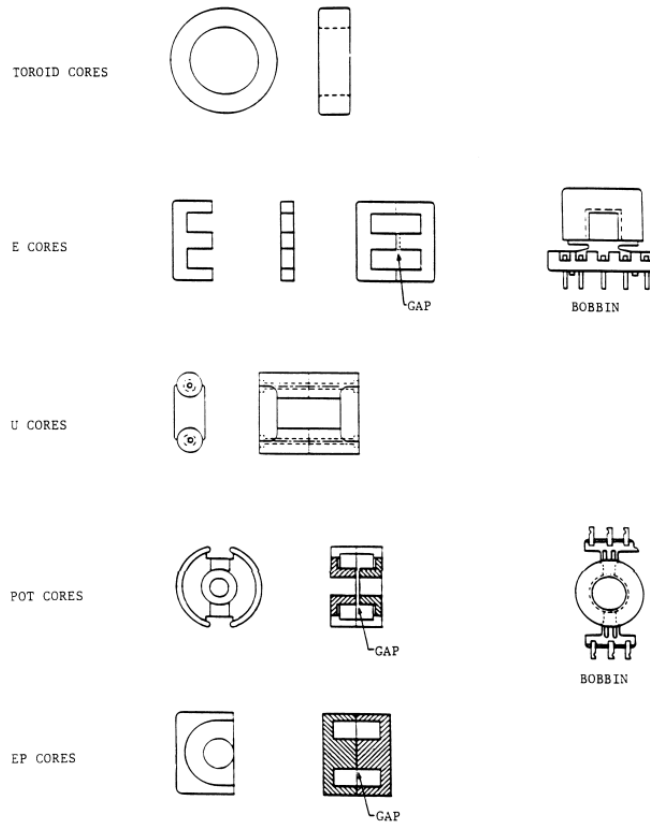
El éxito o fracaso del funcionamiento de una fuente conmutada depende enormemente del diseño e implementación apropiado de los componentes magnéticos. Esto se debe a que los elementos parásitos que aparecen en transformadores de alta frecuencia o inductores, provocan varios problemas en el circuito que incluyen: Altas pérdidas, picos de voltaje excesivos, regulación pobre para diferentes salidas, acoplamiento de ruido en la entrada o salida, rango restringido de ciclo útil, entre otros.

El propósito del transformador de potencia en las fuentes conmutadas es la transmisión de potencia de manera eficiente e instantánea desde una fuente eléctrica externa a una carga externa, con esto, el transformador proporciona otras posibilidades adicionales entre las que se encuentran:

- La relación entre el primario y el secundario puede establecerse para acomodar diversos niveles de voltaje de entrada y salida.
- Es posible utilizar múltiples secundarios con diferente número de vueltas para alcanzar diferentes salidas con diferentes niveles de voltaje.
- El bobinado separado del primario y secundario facilita el aislamiento de alto voltaje entre la entrada y salida, un aspecto importante en materia de seguridad.

Existen distintos tipos de núcleos a considerar en el diseño del transformador, como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Tipos de núcleos magnéticos.



Fuente: Power Supply Cookbook

A su vez, algunas características de cada núcleo son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Tipos de núcleo y ventajas.

Tipo núcleo	Material				
	Permalloy ²⁷	Ferrita	Gap	Bobinado blindado	Coste
Toroide	X	X	Si/No	No	Bajo
E		X	Si	No	Bajo
U		X	Si	No	Bajo
Pot		X	Si	Sí	Alto
EP		X	Si	No	Bajo

Fuente: Power Supply Cookbook

Electromagnetismo aplicado a las fuentes conmutadas

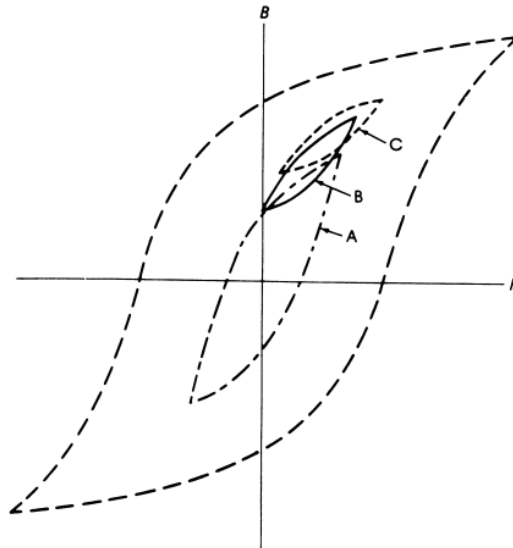
Cuando se enrolla un cable alrededor de un anillo de material magnético como un toroide de ferrita, el campo magnético viaja casi exclusivamente a través del núcleo de ferrita debido a la que la resistencia magnética en él (reluctancia) es mucho menor que en el aire, por lo que se forma un lazo magnético completo. Si se agrega un segundo bobinado idéntico al toroide, y se realiza una pequeña prueba, se obtiene la curva B-H, que es única para cada uno de los materiales magnéticos y sus aleaciones. Cuando la fuente AC de excitación de la prueba se eleva lo suficiente, la curva se nivela en la parte superior e inferior, éste fenómeno se denomina saturación.

En las fuentes conmutadas, el núcleo nunca trabaja en el punto de saturación, sino en un lazo menor, en el caso de fuentes PWM conmutadas de 20 a 50 [kHz], el rango de excursión del flujo magnético (B_{max}) por lo general es la mitad del flujo de saturación (B_{sat}). Con esto se tienen pérdidas de eficiencia del 2%

²⁷ Marca comercial que designa a una aleación magnética compuesta por hierro y níquel.

aproximadamente en los convertidores²⁸. Para frecuencias más altas de operación B_{max} debe reducirse para mantener este porcentaje de pérdidas. Las curvas B-H de lazo menor pueden observarse en la Figura 13.

Figura 13. Curvas B-H para diferentes tipos de transformador. A. *Pushpull, half y full bridge*. B. *Flyback en discontinuo*. C. *Flyback en discontinuo y filtro forward*.



Fuente: Power supply cookbook.

2.2.1.5 Conmutador

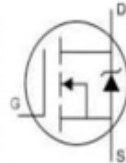
Transistor de efecto campo (MOSFET) de conmutación

Un MOSFET de potencia es un transistor controlado por tensión que presenta una gran velocidad de conmutación en el orden de los nanosegundos [ns] y requiere una corriente pequeña de entrada para su activación, lo que se traduce en poco consumo de compuerta. Estos dispositivos no tienen problemas de fenómenos de

²⁸ BROWN, Marty. Power supply cookbook. [En línea]. 2ed. [Massachusetts, EE.UU]: Butterworth-Heinemann, 2001. [Citado el 1 de Mayo de 2017]. Disponible en: <https://pwrelectronic.files.wordpress.com/2010/06/power-supply-cookbook.pdf>. ISBN 0-7506-7329-X.

segunda avalancha como los BJT²⁹, sin embargo, tienen los problemas de descarga electrostática y necesitan de cuidados especiales en su manejo; En la Figura 14 se observa el símbolo de un MOSFET de canal N.

Figura 14. Símbolo de un MOSFET de potencia canal N



Fuente: Circuitos Microelectrónicos.

El circuito de excitación para activar o desactivar un MOSFET es normalmente más sencillo que el utilizado para un BJT. En estado de conducción, las variaciones de V_{DS} son linealmente proporcionales a las variaciones de I_D . Por lo tanto, el MOSFET en estado de conducción puede modelarse como una resistencia de conducción, denominada R_{DSon} . La construcción de un MOSFET produce un diodo parasito como se muestra en la Figura 14, lo que se puede utilizar a veces de forma ventajosa en circuitos electrónicos de potencia. Las velocidades de conmutación del MOSFET son mayores que las de BJT y se utilizan en convertidores que operan por encima de los 100,000 [Hz]³⁰.

Las velocidades de conmutación y las pérdidas de potencia asociadas son dos factores muy importantes en los circuitos electrónicos de potencia. Los tiempos de conmutación del BJT son mayores que los del MOSFET. Por tanto, generalmente el MOSFET tiene mayores pérdidas de conmutación, las cuales están asociadas al momento en que es encendido y apagado el transistor. Esto se debe a que

²⁹ SEDRA, Adel, et al. Circuitos Microelectrónicos, 5 ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006, p.1277. ISBN-10: 9701054725.

³⁰ HART. Daniel. Electrónica de potencia, 1 ed. Madrid: Prentice Hall, 2001, p.472.

soportan grandes tensiones y corrientes, que provocan una alta disipación de potencia durante la conmutación. Estas pérdidas a baja frecuencia se consideran despreciables, sin embargo a altas frecuencias se deben tener en cuenta al momento del diseño, con el fin de atenuar el consumo asociado a la conmutación.

3 DISEÑO DEL PROTOTIPO

3.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y MÁRGENES DE OPERACIÓN DE LA FUENTE CONMUTADA.

A continuación, se definieron los márgenes de operación del prototipo, entre los que se encuentran el intervalo de alimentación de tensión, la corriente máxima a la que se asegura el funcionamiento óptimo de la fuente conmutada, además de la frecuencia de conmutación a la que trabajarán los dispositivos activos.

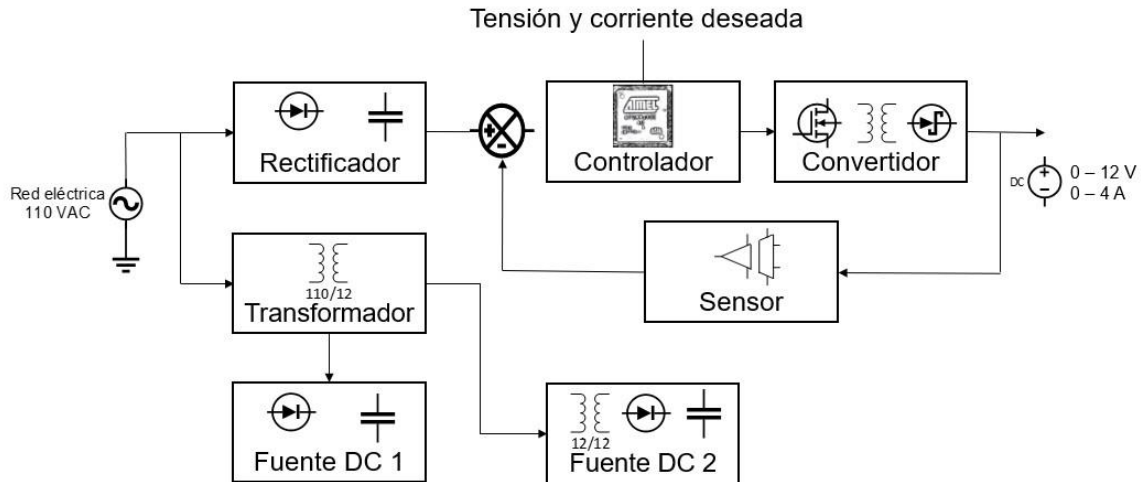
Adicionalmente se determinó la potencia nominal a la que trabajará el prototipo, la máxima y mínima tensión y corriente de salida a la que la fuente conmutada se le podrá variar dependiendo de las necesidades del usuario. En la siguiente tabla se registró la información referente a los parámetros de entrada del prototipo a diseñar e implementar:

Tabla 5. Características del prototipo.

Dispositivo	Fuente Conmutada DC
Aplicación	Electrodeposición
Voltaje de entrada	110– 120 VAC
Topología	<i>Full - Bridge</i>
Frecuencia	50/60 Hz
Potencia de salida	48 W
Tensión máxima de Salida	12 V
Corriente máxima de Salida	4 A
Aislamiento entrada/salida	Sí
Temperatura de operación	0 a 70°C

El diagrama en bloques de la fuente a implementar se presenta a continuación:

Figura 15. Diagrama general de la fuente conmutada.



3.1.1 Selección de componentes

La selección de los componentes a utilizar en el prototipo, está ligada a sus características y requerimientos del funcionamiento óptimo del prototipo. En la selección de componentes están presentes parámetros como tensión de polarización inversa, máxima y mínima corriente de polarización, tensión de ruptura, frecuencia máxima de conmutación, máxima tensión de operación, potencia de disipación, además de otras características importantes como el precio, y la disponibilidad de librerías de simulación.

3.2 RECTIFICADOR

En este proyecto se utilizó el rectificador de onda completa que se muestra en la Figura 16 conformado por cuatro diodos (D1, D2, D3 y D4), una bobina de choke (L1 y L2), un termistor (U1), un varistor (U2), unos capacitores de poliéster (C1 y C2) y un condensador electrolítico (C3). La función de la bobina de choke es la de filtrar el ruido en modo común que genera la fuente conmutada y así evitar

interferencia con otros equipos electrónicos. El puente rectificador y el capacitor electrolítico se emplean para convertir de tensión alterna a tensión continua. El varistor se emplea para suprimir los picos de tensión que se producen por la conmutación de los transistores de la siguiente etapa (convertidor DC-DC) y evita que pueda dañar los dispositivos que conforman el prototipo, donde la carga es el puente completo conformado por los cuatro MOSFET y la carga inductiva del primario del transformador. Teniendo en cuenta que el valor del capacitor debe ser lo más grande posible para que la señal de salida se asemeje a una señal DC, se eligió un capacitor de 1mF. De acuerdo a la Tabla 2 se escogieron diodos de propósito general, cuya tensión de trabajo típica es de 0.7 V y su *slew rate* es apropiado para realizar la rectificación. En la Tabla 6 se observan los diferentes dispositivos utilizados para esta etapa, con sus respectivas referencias y la cantidad usada para la implementación.

Figura 16. Rectificador de onda completa utilizado.

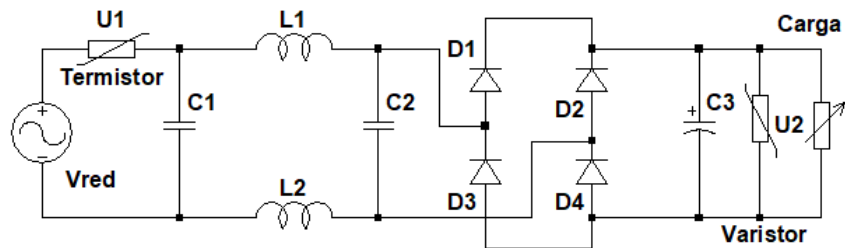


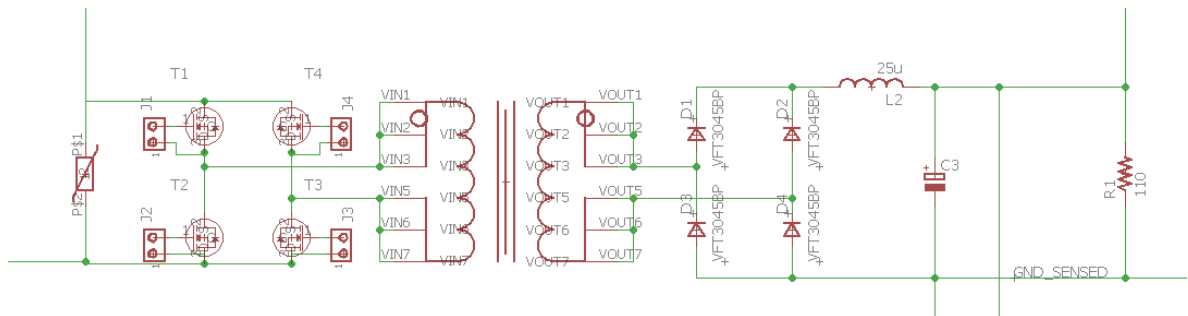
Tabla 6. Dispositivos utilizados para la etapa de rectificación de baja frecuencia (50/60 Hz).

Nombre del dispositivo	Referencia	Cantidad
Termistor (U1)	NTC5D20	1
Capacitores (C1 y C2)	PHE840M	2
Bobina de choke (L1 y L2)	CMT3-2.5-15L	1
Puente rectificador (D1,D2,D3 y D4)	GBJ25005	1
Capacitor electrolítico (C3)	53W23L	1
Varistor (U2)	MOV-07D241K	1

3.3 CONVERTIDOR

En esta etapa se especificaron las magnitudes de los componentes electrónicos a utilizar. Se empleó la topología *full-bridge* (ver Figura 17) teniendo presente que no se requieren tensiones de salida superiores de los 12 [V] para procesos galvanoplásticos, esto fue de importancia al momento de proteger la salida contra cortocircuitos. Además, se debe tener en cuenta la etapa de filtrado, aislamiento electromagnético y la potencia nominal que entrega el prototipo, lo que asegura el correcto funcionamiento de la fuente conmutada.

Figura 17. Topología *full-bridge* utilizada.



El control de los pulsos se lleva a cabo a partir de un desplazamiento de fase dejando el ciclo de trabajo constante en 50%, asimismo se utilizó un transformador de núcleo de ferrita que permite trabajar con altas frecuencias de conmutación.

Entre las principales ventajas que otorga la topología *full-bridge* se encuentra que, al utilizar cuatro transistores, el inductor siempre tiene un camino definido para la corriente, lo que evita picos de tensión en el primario que afectan también al secundario y pueden ocasionar daños en los dispositivos conmutadores. Adicionalmente, el utilizar control de fase permite incrementar la eficiencia debido a que la señal de salida presenta una componente DC igual a 0 lo que evita un desgaste adicional del transformador.

3.3.1 Dispositivos de conmutación

Para los dispositivos semiconductores controlados de la topología *full-bridge* se eligieron transistores MOSFET, por sus capacidades de respuesta, disponibilidad de librerías de simulación y bajo precio. Las principales características de los dispositivos se presentan a continuación.

Tabla 7. Características del MOSFET utilizado.

Referencia	IPA65R190
Tipo MOSFET	Canal n
Vds, máximo	650 V
RDS (on), máxima	0.19 Ω
Vgs, máximo	± 20 V
Disipación de potencia, máxima	34 W
Temperatura de operación	-55°C ~ 150°C (TJ)
Id @ 25°C	17.5 A
Voltaje de acción	12 V

Fuente: Infineon Technologies.

3.3.2 Diseño del driver

El control de los transistores, se realizó a partir del driver IR2110 que recibe las señales PWM del controlador y adecua sus niveles de tensión y potencia para encender o apagar los MOSFET. Las características del dispositivo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Características principales del Driver utilizado.

Referencia	IR2110
Tipo de Compuerta	IGBT, MOSFET - N
Corriente de salida pico +/-	2 A
Rango de tensión a la salida	10 – 20 V
T _{on/off}	120 ns
Retardo de acoplamiento	10 ns
VDD _{máx}	500 V
V _{in} _{máx}	VDD + 0.3 V
V _{in} _{mín}	VSS - 0.3 V
Aislamiento galvánico	NO
Protección contra corrientes inversas	SÍ

Fuente: Infineon Technologies.

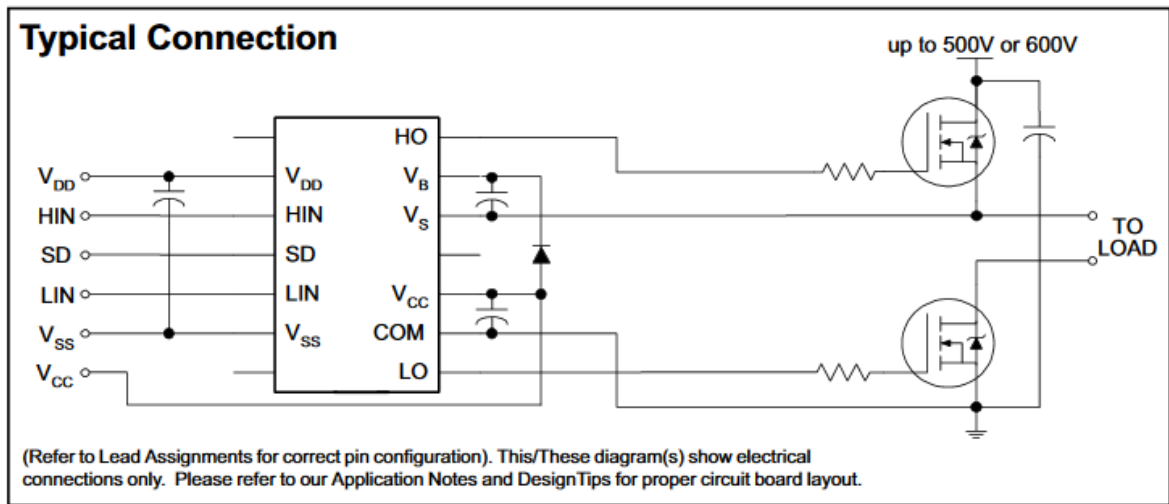
Para el diseño del circuito de conmutación de los MOSFETS de potencia se escogieron los siguientes componentes, (ver Tabla 9):

Tabla 9. Tabla de componentes

Dispositivo	Cantidad
IR2110	2
1N4148	4
FR105	2
Resistor 22 Ohms	4
Capacitor 1uF	2
TLP250	5

El circuito integrado IR2110 (ver Figura 18) es un driver para la conmutación de MOSFETS e IGBTs, el cual permite la conmutación de transistores flotantes y no flotantes, por lo cual es adecuado para las topologías puss-pull, medio puente y puente completo.

Figura 18. Driver IR2110



Fuente: Hoja de datos del dispositivo

Para el correcto funcionamiento de conmutación se deben escoger apropiadamente algunos componentes externos, como un diodo y un capacitor para el transistor flotante.

Para el diodo se debe considerar la tensión del transistor flotante, se recomienda que la tensión del diodo sea por mínimo el doble, para este diseño es $170 \text{ V} * 2 = 340 \text{ V}$, además se recomienda que sea de ultra rápida respuesta, no se recomienda *Schottky* por ser unión metal-metal, la cual presenta una capacitancia superior a los de ultra rápida respuesta y produce oscilaciones en la conmutación del MOSFET superior, por todo lo anterior se recomienda usar el diodo FR105. En la Tabla 10 se pueden ver sus características principales. (Ver Anexo D).

Tabla 10. Características del diodo FR105

Valores máximos	Símbolo	Cantidad	Unidades
Máximo pico de voltaje repetitivo	VRRM	600	V
Máximo valor de voltaje RMS	VRMS	420	V
Máxima corriente promedio de conducción	IF(AV)	1	A
Máximo pico de corriente	IFSM	35	A
Máxima pico de voltaje de conducción a un amperio	VF	1.3	uV
Capacitancia de unión típica	CJ	50	pF

Fuente: Hoja de datos del dispositivo

Para la elección del capacitor se utilizan las notas de diseño del fabricante³¹, donde se recomienda utilizar capacitores cerámicos de por lo menos dos veces la tensión de alimentación del driver y que sea superior de 470nF, esto es debido a que presenta un mayor ancho de banda, son más rápidos y no presentan corriente de fuga.

Para el resistor que va en serie con la tensión puerta-surtidor, se debe conocer la resistencia dinámica de puerta del MOSFET (IPA65R190CFD) que es de 1 Ohm, por lo que se escoge de 22 Ohms para completar 23 Ohms, la cual da una respuesta apropiada. La resistencia de puerta no debe ser menor a 7.5 Ohms (ver Ecuación (1)), ya que puede destruir al driver (IR2110), debido a que la corriente máxima del MOSFET es de 2 [A].

³¹ INTERNATIONAL IOR RECTIFIER. Application note AN-978 [En línea]. [California, EE.UU]: Data and specifications subject to change without notice, 2007. [Citado el 12 de Julio de 2017]. Disponible en: <https://www.infineon.com/dgdl/an-978.pdf?fileId=5546d462533600a40153559f7cf21200>

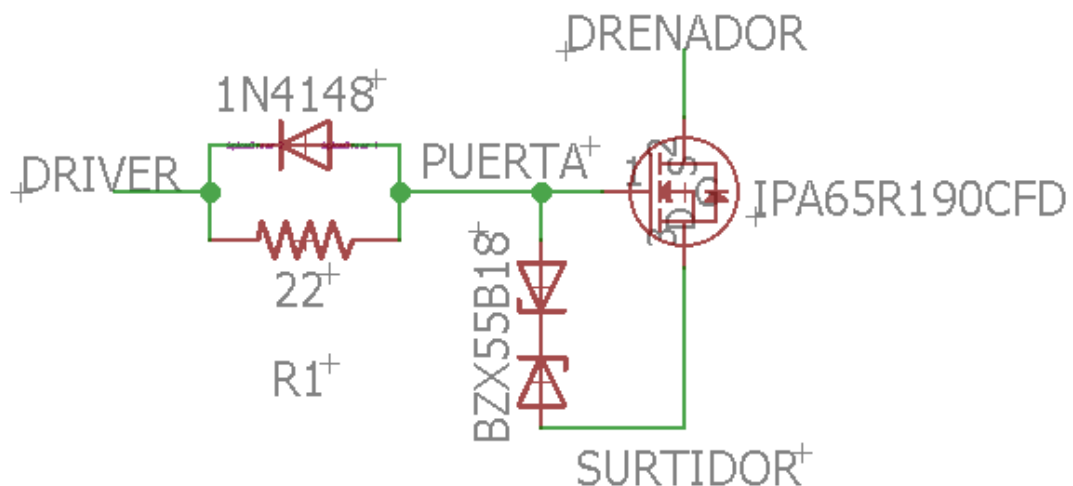
$$I_{puerta\ máxima} = \frac{V_{driver}}{R_{puerta\ minima}} = \frac{15V}{R_{puerta\ minima}} = 2 \quad (1)$$

$$R_{puerta\ minima} = 7.5\ Ohms$$

El fabricante recomienda agregar un diodo paralelo a la resistencia de puerta de rápida respuesta, por lo que se utiliza el 1N4148, el cual agrega un pequeño retardo al momento de conmutar, esto adiciona tiempo muerto en la conmutación, y la hace más eficiente.

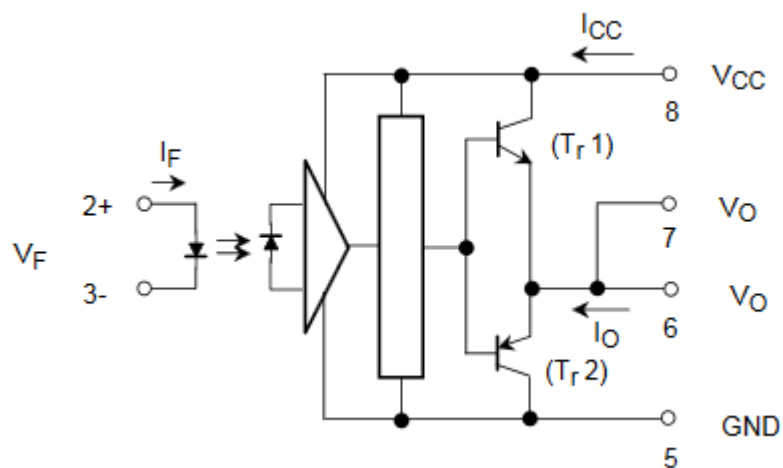
Un buen método para proteger a los MOSFETS de las corrientes inversas y de las tensiones pico, es agregar dos diodos Zener en contra cátodo en paralelo con la tensión puerta surtidor. Los Zener deben ser de rápida respuesta y estar lo más cerca posible del transistor. Para los MOSFETS (IPA65R190CFD) se escogió el BZX55B18, el cual es un Zener de 18 V de pequeña señal apropiado para la protección del transistor como se puede apreciar en la Figura 19.

Figura 19. Protección MOSFET



Como el Driver (IR2110) no presenta aislamiento eléctrico, se debe agregar una etapa de aislamiento, la cual separe la etapa de control generadora de pulsos de la etapa de conmutación debido a los picos de tensión y corriente que afecta fácilmente a los depósitos de control que son sensibles y se pueden dañar. Por lo que se escoge al opto driver TLP250, del cual se presenta su diagrama interno en la Figura 20.

Figura 20. Diagrama interno TLP250



Fuente: Hoja de datos del dispositivo

3.3.3 Transformador utilizado

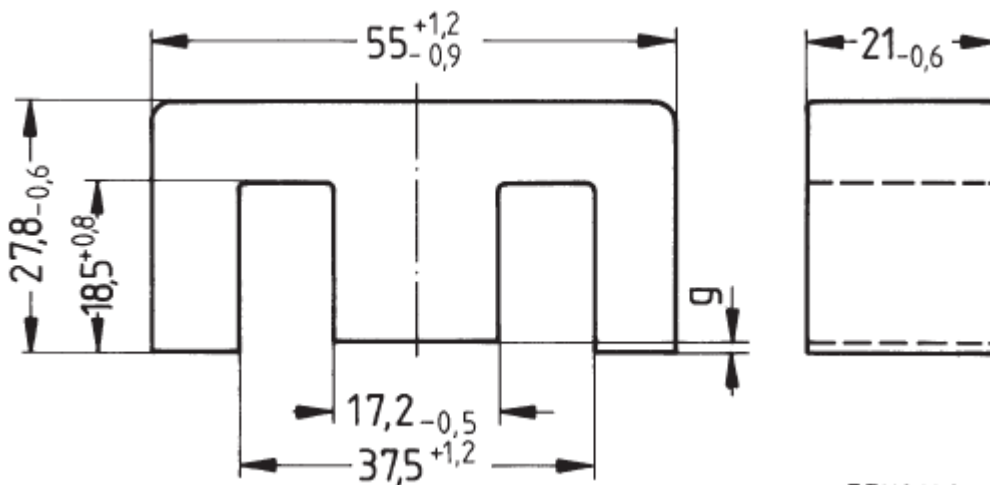
El transformador elegido para el proyecto está compuesto por un núcleo de ferrita y una estructura en forma de E. A continuación, se presenta el cálculo de los parámetros principales del dispositivo.

Para el diseño del transformador se escogió el transformador E 55/28/21 con material N27 de la marca TDK (ver Figura 21), el cual presenta las siguientes características:

Tabla 11. Características del núcleo.

Factor de forma magnética	0.35 mm^{-1}
Longitud efectiva del camino magnético	124 mm
Efectiva sección transversal magnética	354 mm^2
Sección transversal mínima del núcleo	351 mm^2
Volumen magnético efectivo	43900 mm^3

Figura 21. Dimensiones de núcleo de ferrita.



Fuente: Hoja de datos de TDK.

Al ser un puente completo con desplazamiento de fase se garantiza que la tensión pico a pico del primario del transformador será el doble del valor de voltaje de entrada, y mantendrá un valor promedio de tensión cercano a cero. Esto permite que el transformador no se sature cuando se le pide mayor cantidad de flujo magnético.

En la Tabla 12, se puede observar la capacidad de flujo a una frecuencia de 25 KHz para el material N27. Con los datos anteriores se procede a calcular la cantidad de vueltas en el primario y secundario del transformador, tal como se presenta en la Ecuación (2).

Tabla 12. Comparativa para diversos materiales, tomado de la hoja de datos de TDK.

Material	A_L nH	μ_e	B_s *mT	P_V W/set
N27	5800 +30/-20%	1610	320	<8.00 (200 mT, 25 kHz, 100 °C)
N87	6400 +30/-20%	1780	320	<3.80 (100 mT, 100 kHz, 100 °C)
N97	6700 +30/-20%	1868	320	<3.34 (100 mT, 100 kHz, 100 °C)

$$N_{primario} = \frac{V_{cc} * 10^8}{4 * f * B_{max} * A_c} \quad (2)$$

Dónde:

- V_{CC} : Es la máxima tensión a la que estará expuesto el transformador, al ser 120 V_{rms} se multiplica por $\sqrt{2}$ para tener su valor pico el cual corresponde a 170 V_{pico} , teniendo en cuenta las variaciones de la red, se toma el valor superior del 5% y un factor de 2 porque al ser puente completo la tensión pico a pico de salida es el doble de la tensión de entrada, tal como se muestra en la Ecuación (3).

$$V_{CC} = V_{rms} * \sqrt{2} * \text{porcentaje superior} * \text{factor puente} \quad (3)$$

- B_{max} : Es el máximo valor de densidad de campo magnético a la que trabajara el núcleo. Si se observa la Tabla 12, la máxima densidad de campo magnético es de 200 mT (mili Teslas) o 2000 Gauss.

A_c : Es el área seccional del núcleo dada en cm^2 . Para el caso del núcleo E 55/28/21 se puede calcular de la

- Figura 21 multiplicando $17.2 * 21 \text{ cm}^2$, o de la Tabla 11 como sección transversal magnética efectiva.

- f: Es la frecuencia de conmutación, para el prototipo es de 33 kHz.
- 10^8 es el factor de conversión de unidades inglesas a MKS, y por último el factor de 4 en el denominador de la ecuación (2) corresponde al factor de forma que tendrá la señal que entrará en el primario del transformador, para el caso de una señal cuadrada es de 4, para una señal sinusoidal es de 4.4. Cabe recordar que señal cuadrada hace referencia a una señal sin componente media o casi nula, lo cual evita la saturación del núcleo permitiendo este ser de menor tamaño. El cálculo del número de vueltas del primario se aprecia en la ecuación (4).

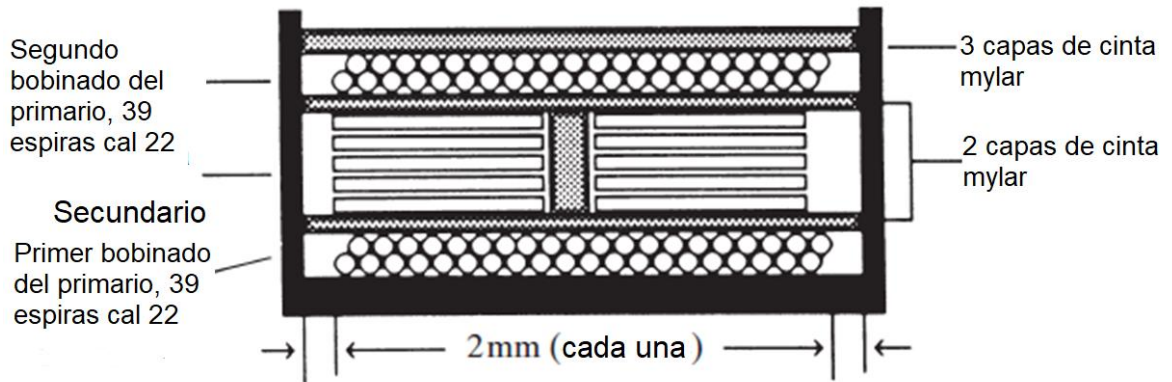
$$N_{\text{primario}} = \frac{(120 * \sqrt{2} * 2 * 1.05)(10^8)}{4(33\text{kHz})(2000\text{Gaus}) * (3.54\text{cm}^2)} = 38.13 \text{ Espiras} \quad (4)$$

En este caso N_{primario} se aproxima a 39 espiras. Para el cálculo del número de vueltas del secundario se considera la siguiente ecuación:

$$N_{\text{secundario}} = \frac{1.1(13 + 0.3)(39)}{(170 - 1) * 0.95} = 3.55 \text{ Espiras} \quad (5)$$

En la ecuación (5), 13V corresponde a la tensión de salida del secundario del transformador, 39 es la cantidad de espiras del primario, 170 es el valor obtenido de $120 * \sqrt{2}$ y 0.95 es la constante de acoplamiento magnético esperada. Por lo anterior, el número de vueltas del secundario se aproxima a 4 espiras, por lo que la relación del transformador es de $39/4 = 9.75$.

Figura 22. Bobinado de transformador.



Fuente: Adaptada de "Power Supply Cookbook" Pag. 125.

En la Figura 22 se especifica la manera con la que se embobina el transformador, para el calibre del embobinado se debe tener en cuenta el efecto piel, el área de la ventana de cobre y el área de la ventana donde se puede embobinar, teniendo en cuenta la ecuación (6) el núcleo E 55/28/21 tiene una ventana de:

$$\text{Área Ventana} = \frac{(37.5 - 17.2)}{2} * 18,5 = 375\text{mm}^2 \quad (6)$$

Para el calibre máximo, que permita el uso de todo el diámetro del hilo de cobre se puede observar el Anexo B, tomado de "American Wire gauge conductor size".

En la Anexo B se puede observar que a partir del calibre 21 se va a usar toda el área del cable de cobre por lo que las pérdidas por corriente de Foucault serán despreciables, por lo que se escoge el calibre 22 el cual soporta una frecuencia máxima de hasta 42 kHz y un diámetro de 0,7239 mm.

Teniendo el diámetro del hilo de cobre y la cantidad de espiras, se puede calcular el área de ventana de cobre, por lo que se obtiene la ecuación (7):

$$\text{Área ventana cobre} \quad (7)$$

$$= \pi * \left(\frac{\text{diametro hilo cobre}}{2} \right) * 2 * \text{Numero espiras.}$$

$$\text{Área ventana cobre} = 3.1415 * \left(\frac{0.7239}{2} \right) * 39 * 2 = 88.69 \text{ mm}^2 \quad (8)$$

El factor de dos en las ecuaciones (7) y (8) se origina en función de bobinar el transformador en forma de emparedado.

Comparando la ecuación (8) con la ecuación (6) se concluye que el núcleo está sobre-dimensionado y los tres bobinados (Dos primarios y uno secundario) entrarán sin ningún problema.

3.3.4 Rectificador de alta frecuencia

Para la obtención de la señal DC de salida a partir de la tensión AC que aparece en el secundario del transformador, se utilizó un rectificador constituido por diodos *Schottky* que poseen una respuesta muy rápida y una tensión de trabajo que oscila entre 0.2 y 0.4 [V] (ver Tabla 2). Las principales características de los dispositivos utilizados se presentan a continuación

Tabla 13. Características principales de los diodos utilizados.

Referencia	VFT3045BP
Tipo de Diodo	<i>Schottky</i>
Tensión máxima de reversa	45 V
Máximo valor DC de corriente de salida	30 A
Tiempo de respuesta	$t_r < 500 \text{ ns}$ para $I_o > 200 \text{ mA}$
Máxima temperatura de operación	200 °C
Tensión DC del diodo	0.3 V a 5 A – 0.51 V a 30 A – Máx 0.7 V

Fuente: Vishay.

3.4 CONTROLADOR

3.4.1 Sistema de control de fase

En la topología de puente completo, se tiene un convertidor DC-AC compuesto por cuatro transistores que a su vez requieren señales de control para su funcionamiento. En total son 4 señales de onda cuadrada, A , \bar{A} y B , \bar{B} , en donde las dos primeras varían en fase, mientras que en las últimas la fase se mantiene constante.

Este control de fase fue implementado en el Arduino DUE, el cual es una placa microcontroladora basada en la CPU ARM Cortex-M3 Atmel SAM3X8E. Es la primera placa Arduino basada en un microcontrolador de núcleo ARM de 32 bits. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 12 se pueden utilizar como salidas PWM), 12 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un reloj de 84 MHz, una conexión USB OTG, 2 DAC (digital a analógico), 2 TWI, una toma de alimentación, una cabecera SPI, una cabecera JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado. A diferencia de la mayoría de las placas Arduino, la placa Arduino Due funciona a 3.3V. El voltaje máximo que los pines I / O pueden tolerar es 3.3V. Aplicar tensiones superiores a 3,3 V a cualquier pin de E / S podría dañar la placa.³² A continuación en la Tabla 14 se pueden observar las especificaciones técnicas del mismo.

³² ARDUINO. Arduino DUE. [En línea]. 4 ed. [Ivrea, Italia]: Arduino, 2017. [Citado el 14 de Agosto de 2017]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.

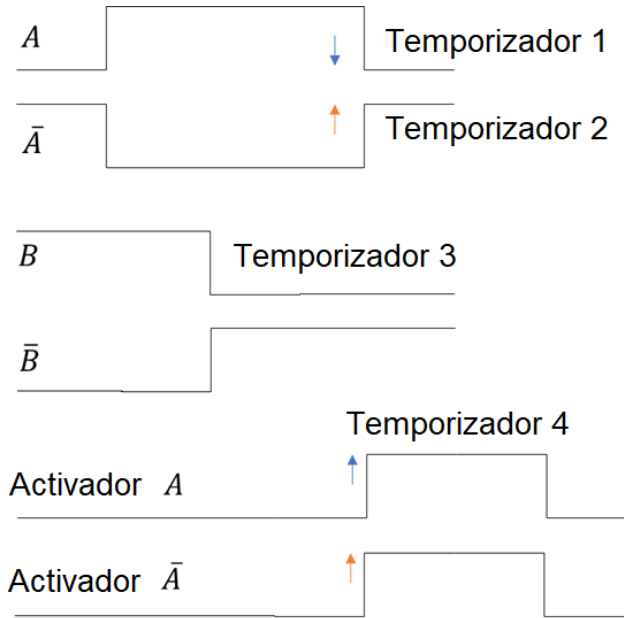
Tabla 14. Especificaciones técnicas del Arduino DUE.

Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Voltaje de operación	3.3 V
Entrada de voltaje (recomendada)	7-12 V
Entrada de voltaje (limites)	6-16 V
Pines digitales de entrada y salida	54 (de los cuales 12 proporcionan salidas PWM)
Pines de entrada analógicos	12
Pines de salida analógicos	2 (DAC)
Corriente total DC de todas las líneas de entrada y salida	130mA
Corriente DC para el terminal de 3.3V	800mA
Corriente DC para el terminal de 5V	800mA
Memoria flash	512 KB disponible en su totalidad
SRAM	96 KB (dos bloques: 64 KB y 32 KB)
Velocidad de reloj	84 MHz

El Arduino DUE posee diversas funciones como UART, ADC, PWM, temporizadores, reloj en tiempo real, calendario, contador en tiempo real, entre otras. Para acceder a todas ellas, el dispositivo incorpora multiplexores con los cuales es posible elegir la que se desea utilizar. En este proyecto, la programación realizada utiliza 4 temporizadores (ver Figura 23).

Dos temporizadores se encargan de las señales A, \bar{A} , otro se encarga de las señales B, \bar{B} que como se mencionó, mantienen su fase constante. Finalmente un último temporizador funciona como disparador de las señales A, \bar{A} y depende directamente de una variable de entrada que indica el desplazamiento de fase y es proporcionada por el usuario al elegir un valor de tensión.

Figura 23. Programación utilizada para la generación de señales de control por desplazamiento de fase.



3.4.2 Medición de variables

Para llevar a cabo el lazo de control es necesario medir la salida del sistema, tanto en tensión como en corriente. Para la medición de tensión se utiliza el amplificador de precisión con aislamiento entrada-salida AMC1301, que tiene un rango de entrada de ± 250 [mV] y presenta un elevado rechazo al ruido de modo común.

Tabla 15. Características principales del amplificador utilizado.

Referencia	AMC1301
Dispositivo	Amplificador de aislamiento
Rango de tensión de entrada	± 250 mV
Ganancia	8.2
Offset	± 200 mV a 25°C
Error de ganancia	$\pm 0.3\%$ a 25°C
No linealidad	0.03 %
Tensión DC de aislamiento	7000 V _{PK}
Aislamiento de acuerdo a UL1577	5000 V _{RMS} por 1 minuto

Fuente: Texas Instruments.

La medición de corriente se realizó mediante el dispositivo transductor de efecto Hall HLSR 50-P/SP33 que permite medir hasta 50 [A], incluye aislamiento galvánico, y proporciona un valor de tensión de salida dependiendo de la corriente de entrada, con una sensibilidad de 16mV/A y un error de precisión de $\pm 1\%$.

Tabla 16. Características principales del sensor de corriente utilizado.

Referencia	HLSR 50-P/SP33
Dispositivo	Transductor de corriente
Tipo de sensor	Efecto Hall, lazo abierto
Corriente máxima	50 A
Sensibilidad	16 mV/A
No linealidad	$\pm 0.5\%$
Precisión	$\pm 1\%$
Tiempo de respuesta	2.5 μ s
Corriente de alimentación	25 mA
Tensión de alimentación	3.3 V
Temperatura de operación	-40°C ~ 105°C

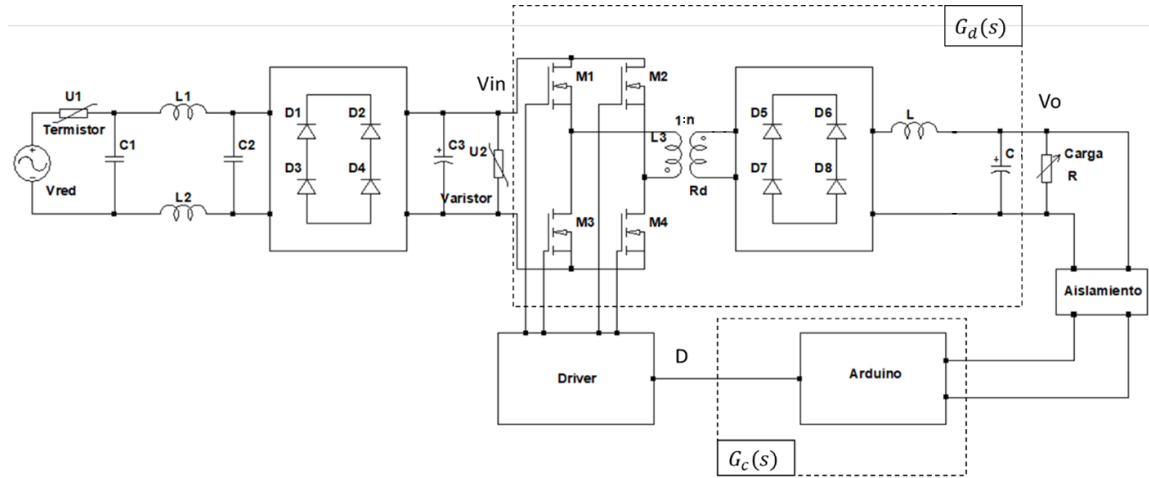
Fuente: LEM USA Inc.

3.4.3 Controlador PID digital

Los controladores en las fuentes conmutadas suelen denominarse “reguladores” y se utilizan para satisfacer algunos requisitos como rechazo de perturbaciones, respuesta transitoria y estabilidad.

Se realizó un modelo en pequeña señal del convertidor (ver Ecuación (9)) que indica el cambio en la tensión de salida que produce un cambio en la señal d , que es el ciclo útil que proporciona la etapa de conmutación y depende del desplazamiento de fase. A continuación se presenta en la Figura 24 el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

Figura 24. Definición de bloques del sistema en lazo cerrado.



Fuente: KAIST – Department of electrical engineering.

$$\frac{\widehat{v}_o}{\widehat{d}_{eff}} = G_d(s) = \frac{nV_{in}}{LC} * \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{1}{RC} + \frac{R_d}{L} \right) + \frac{1}{LC} \left(\frac{R_d}{R} + 1 \right)} \quad (9)$$

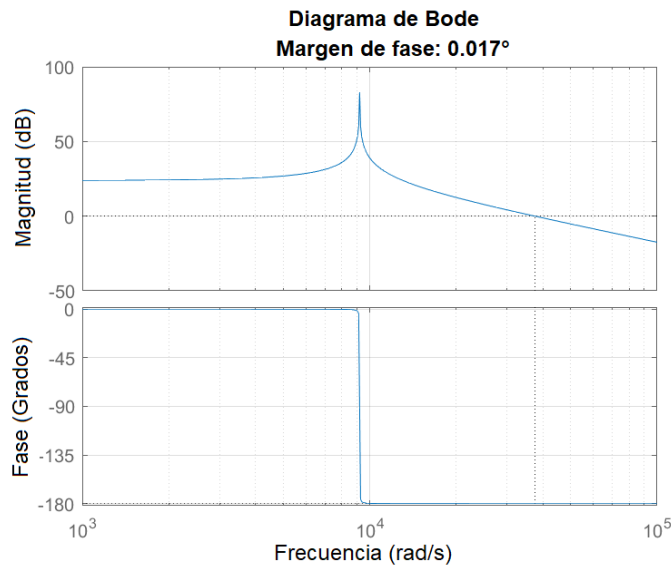
Donde $R_d = 4n^2 L_{lkg} f_s$

La siguiente tabla, presenta los valores utilizados en el modelo.

Tabla 17. Valores utilizados en el modelo del convertidor.

Función de transferencia	Tensión de salida vs Ciclo útil
n: Relación del transformador	0.1025
Vin: Tensión DC de entrada en los MOSFET	170 V
R: Resistencia de salida	200 Ω
L: Inductancia del Filtro de Salida	25 μH
C: Capacitancia del filtro de salida	470 μF
fs: Frecuencia de conmutación	33 kHz
Llkg: Inductancia de fuga del transformador	≈ 0

Figura 25. Diagrama de Bode del modelo en lazo abierto.



En la Figura 25 se puede observar el diagrama de bode de la ganancia de lazo del modelo en lazo abierto, debido a que el margen de fase es casi cero, el modelo se encuentra al borde de la inestabilidad, por lo tanto se requiere compensación.

Se diseñó e implementó un controlador de tensión de tipo PID de la forma.

$$G_c(s) = \frac{\hat{K}(s + a)(s + b)}{s} \quad (10)$$

Para diseñar el controlador es necesario especificar el desempeño que se quiere alcanzar, en este caso se definieron características de respuesta en el tiempo como el máximo sobre-impulso deseado, el tiempo de establecimiento entre otros.

Estos parámetros definen un comportamiento deseado que se traduce en los polos deseados (complejos conjugados), que son las raíces del controlador que satisfacen las condiciones y están determinadas por la siguiente expresión.

$$s_{1,2}^* = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}j \quad (11)$$

Cuando ya se conocen los polos deseados, se determina el ángulo de aporte requerido del controlador para llevar a la planta a ese comportamiento, esto se hace evaluando los polos deseados en el modelo de la planta y calculando la diferencia entre el ángulo de fase encontrado y 180° .

El ángulo de aporte requerido se define por:

$$\varphi = 180^\circ - \angle[G_d(s)]_{s=s_1^*} \quad (12)$$

El paso siguiente es aplicar trigonometría para determinar el aporte del término $(s + a)$ en donde 'a' se define como:

$$a = \operatorname{Re}(s_1^*) + \frac{\operatorname{Imag}(s_1^*)}{|\tan(\varphi)|} \quad (13)$$

Posteriormente, se determina el valor de \hat{K} , es decir la ganancia requerida para que el sistema con el compensador diseñado tenga un valor absoluto de 1 en el polo deseado.

$$\hat{K} = \frac{1}{\|G_d(s)(s + a)\|_{s=s_1^*}} \quad (14)$$

Con esto finaliza la etapa de diseño de la red de adelanto, y se procede con la red de atraso $\frac{s+b}{s}$ en donde se busca mejorar la respuesta en estado estable sin modificar la respuesta transitoria. Para ello se suele ubicar el polo y el cero muy cerca del origen, en este caso se eligió $b=0.1$ y se comprobó que no afectara con el comportamiento del sistema mediante el siguiente cálculo.

$$\angle \left[\frac{s+b}{s} \right]_{s=s_1^*} \approx 0 \quad (15)$$

Entre más cercano a cero sea el aporte de fase, mejor para el comportamiento del sistema.

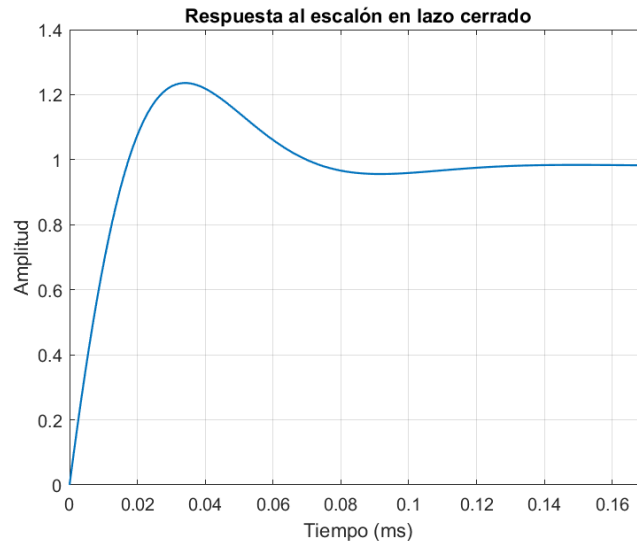
A continuación, se encuentra la tabla de parámetros que definen el controlador elegido para este proyecto:

Tabla 18. Parámetros del controlador utilizado.

Tipo de controlador/regulador	PID – Implementado en Arduino DUE
Máximo sobre-impulso elegido	20%
Tiempo de establecimiento	0.1 ms
Kp	3.39
Ki	0.339
Kd	$6.04 \cdot 10^{-5}$
Margen de fase	59.16°

En la Figura 26, se observa la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado utilizando el controlador PID previamente diseñado. El tiempo de establecimiento es de 0.12 ms y el sobre-impulso es del 23%.

Figura 26. Respuesta al escalón del modelo más el controlador en lazo cerrado.



3.4.4 Representación de datos e Interfaz gráfica

Esta parte del trabajo se dedica a la programación del *software* encargado de realizar la comunicación en tiempo real de la fuente conmutada con un equipo de cómputo, esto se elaboró con el lenguaje de programación interpretado Python 3.4, teniendo en cuenta que este es de licencia libre “*freeware*” de esta manera se asegura que el usuario tenga un fácil acceso a los datos de tensión y corriente del prototipo.

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que permite la integración de módulos o librerías, el cual al ser “*open source*” tiene disponibles varios paquetes para hacer representaciones de datos, diseñar la interfaz gráfica, y llevar a cabo la comunicación serial (UART TTL) (ver Anexo A).

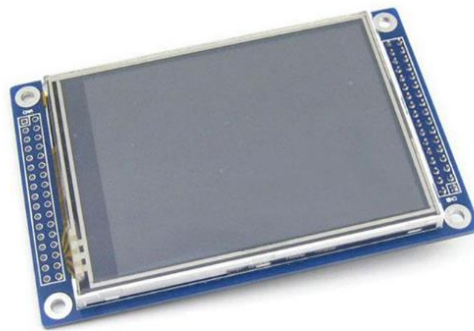
Para que el usuario pueda leer la salida de voltaje y corriente de la fuente conmutada en tiempo real de una manera sencilla y entendible, se utilizó Matplotlib, la cual es una biblioteca para la generación de gráficos a partir de datos contenidos en listas o *arrays* en el lenguaje de programación Python y su

extensión matemática NumPy.³³ De esta manera no solo el usuario podrá leer las variables, sino que a la vez le permite hacer análisis de datos.

Para la interfaz gráfica, se decidió utilizar la librería de *tkinter*, la cual se considera un estándar para la interfaz gráfica de usuario (GUI) para Python y es el que viene por defecto con la instalación para Microsoft Windows.³⁴

Las pestañas que se pusieron dan la facilidad al usuario para seleccionar el puerto de entrada al ordenador, seleccionar el valor de salida de voltaje el cual se mantendrá fijo (desde 2.0 V hasta 12 V), mostrar y borrar la gráfica de voltaje versus tiempo y/o corriente versus tiempo, escoger el tiempo de muestreo, obtener información y ayuda sobre el módulo de comunicación.

Figura 27. Pantalla LCD táctil utilizada para selección y muestra de datos.



Fuente: Aliexpress

Adicionalmente se utilizó una pantalla táctil LCD de 320x240 que indica los valores de tensión y corriente y permite modificarlos directamente desde su interfaz, sin necesidad de conexión al computador. Entre los controladores de la pantalla se utilizan el dispositivo XPT 2046 encargado de la parte táctil y el driver ILI9341 que

³³ LANGTANGEN. Op. Cit., p. 7.

³⁴ SHIPMAN, Jhon. Tnter 8.5 reference: a GUI for Python. Nuevo México: New Mexico Tech, 2014. 168 p.

controla la parte gráfica la pantalla puede apreciarse en la Figura 27. A continuación se presentan las características principales del dispositivo XPT en la Tabla 19, y del driver ILI en la Tabla 20 .

Tabla 19. Características principales del dispositivo XPT.

Referencia	XPT2046
Tensión de alimentación VCC/VDD	- 0.3 a 6 V
Entradas analógicas	- 0.3 V a VCC + 0.3 V
Entradas digitales	- 0.3 V a VDD + 0.3 V
Máximo consumo de potencia	250 μ W
Temperatura de unión	150 °C
Temperatura de almacenamiento	- 65 a 150 °C
Temperatura de operación	- 40 a 85 °C

Fuente: XPT.

Tabla 20. Características principales del driver ILI.

Referencia	ILI9341
Resolución de pantalla	240xRGB x 320
Memoria RAM del driver TFT-LCD	172.800 bytes
Tensión de alimentación	3.3 V
Modos de color	262K ó 8 colores
Modos de ahorro de energía	Modo <i>Deep</i> y <i>Deep Standby</i>
Temperatura de operación	- 40 a 85 °C

Fuente: ILITEK.

3.4.5 Comunicación serial

Esta parte del trabajo se dedica a la programación del software encargado de realizar la comunicación en tiempo real de la fuente conmutada con un equipo de cómputo, esto se elaboró con el lenguaje de programación interpretado Python 3.4 (ver Anexo A y Anexo E).

Para mostrar en tiempo real la comunicación serial entre un ordenador y la tarjeta de desarrollo Arduino DUE, se utilizó la librería de *pyserial*. Esta comunicación se puede realizar por cable o por Bluetooth 2.0, en este proyecto se realizó por cable.

3.5 ALIMENTACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL, MEDICIÓN Y POTENCIA

La presencia de microcontroladores, drivers, transistores y otros circuitos integrados, requiere la presencia de fuentes DC de alimentación, que para este proyecto deben ser de 12 y 5 [V], principalmente con un suministro de corriente del orden de los miliamperios.

Las fuentes DC utilizadas para alimentación son de tipo lineales. Para su implementación se utiliza un transformador de relación 120/13 para obtener 12 V en alterna (considerando la caída de tensión en los diodos), que posteriormente serán filtrados y rectificadas de manera que se tenga una señal de salida continua.

Adicionalmente, la presencia de dos fuentes de tensión permite el uso del amplificador de aislamiento en el proceso de medición de la señal de salida.

3.5.1 Alimentación de circuitos de control

La fuente DC 1 presentada en la Figura 15, toma la tensión de salida del transformador de 120/13 V y se encarga de realizar el proceso de rectificación y filtrado con el propósito de alimentar algunos componentes de control de la fuente conmutada entre los que se encuentran:

- El microcontrolador ATMEGA, incorporado en un Arduino DUE.
- El sensor de corriente.
- Amplificador de aislamiento 1.

3.5.2 Alimentación de circuitos de potencia

La fuente DC 2 presentada en la Figura 15, contiene un transformador 1:1 que le permite estar aislada de la fuente DC 1, y de manera similar a esta, realiza rectificación y filtrado para obtener una señal DC, y poder alimentar algunos componentes, mayormente asociados a la parte de potencia de la fuente conmutada, como sigue:

- El *driver* de los transistores MOSFET.
- Amplificador de aislamiento 2.
- Optoacoplador utilizado para enviar las señales PWM al *driver*.

4 RESULTADOS

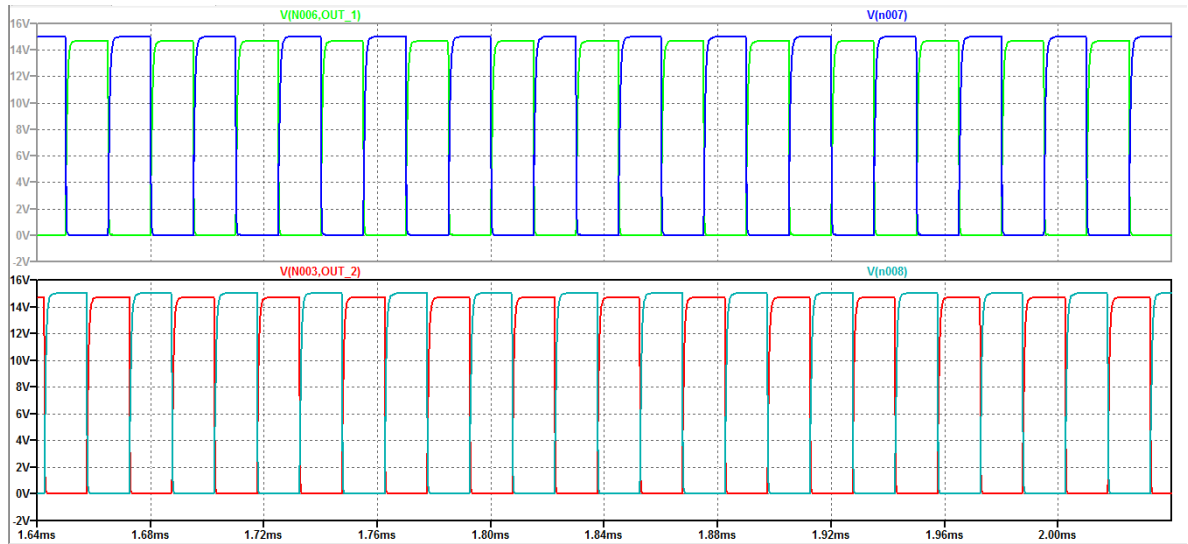
4.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Por medio de la simulación se corrobora la adecuada conmutación de los transistores, en este caso cuatro MOSFETS por ser puente completo, además se corrobora la relación de transformación del transformador, el cual se calculó analíticamente pero su valor de inductancia y resistencia se obtienen experimentalmente.

Teniendo en cuenta que en este proyecto se implementan dos señales PWM de 33 kHz con un ciclo útil de 50% con su respectiva señal invertida, el corrimiento de fase es de 180° cuando las dos señales están totalmente desfasadas, y en caso contrario se encuentran en fase.

A continuación se muestran las cuatro señales PWM con tensiones de referencia puerta surtidor de cada transistor.

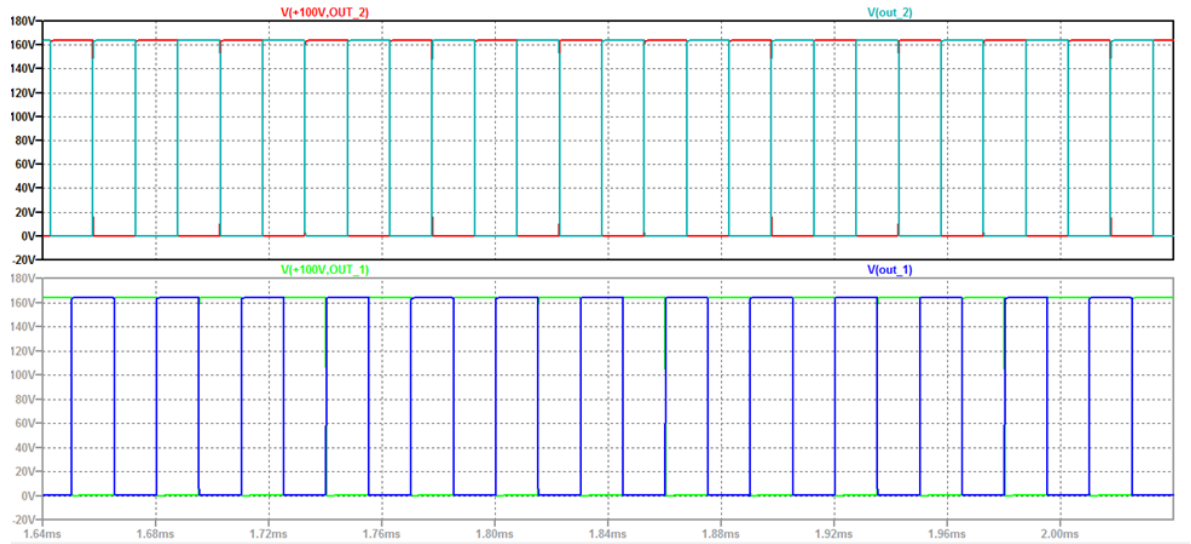
Figura 28. Tensión puerta surtidor de los cuatro MOSFETS con una fase de 90°



Analizando detalladamente la Figura 28, se logra observar que el tiempo de carga y descarga del capacitor interno entre puerta surtidor del MOSFET es apropiada, es decir, el funcionamiento del driver es el esperado, ya que no se presentan corrientes en reversa que superen la tensión máxima de ± 30 V y que puedan destruir el MOSFET por tensiones superiores en puerta surtidor, aunque en la práctica se aconseja agregar una protección, en este caso dos diodos Zener de pequeña señal en contra cátodo, los cuales suprimen tensiones superiores a los ± 30 V.

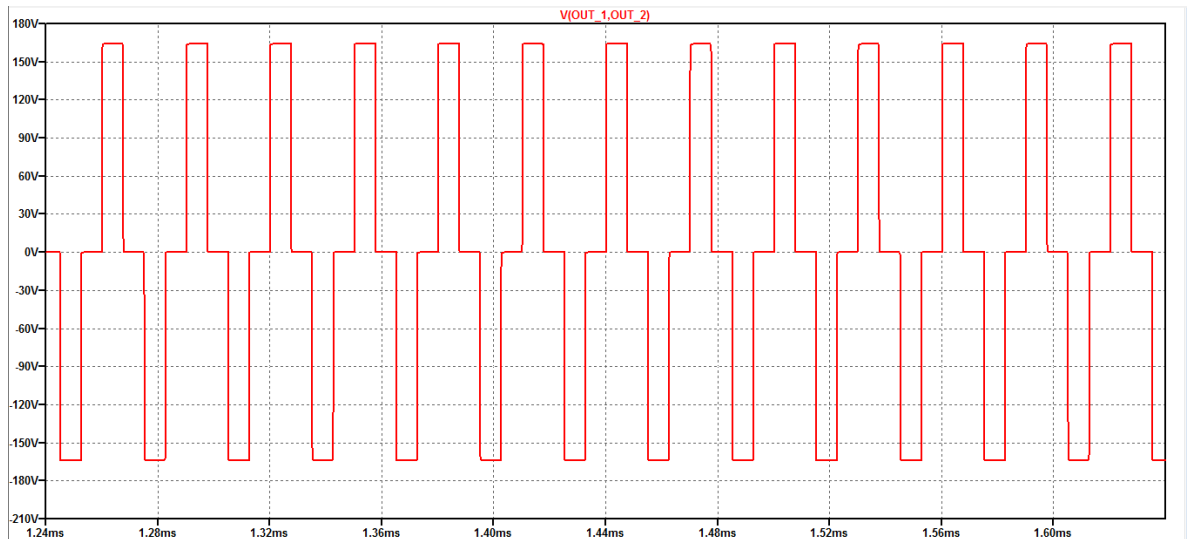
En la Figura 29 se puede observar que no se presentan tensiones picos durante el transitorio, los cuales podrían destruir el MOSFET por tensiones superiores a 700 V, aunque en la práctica se recomienda agregar un varistor o un recortador de picos, pero debido a que se escogió un valor de tensión drenador surtidor para los MOSFETS de 700 V no es necesario porque el máximo valor al que podría llegar es a tres veces su valor máximo, es decir $120\sqrt{2} * 3 = 509$ V .

Figura 29. Tensión drenador surtidor de los cuatro MOSFETS con una fase de 90°



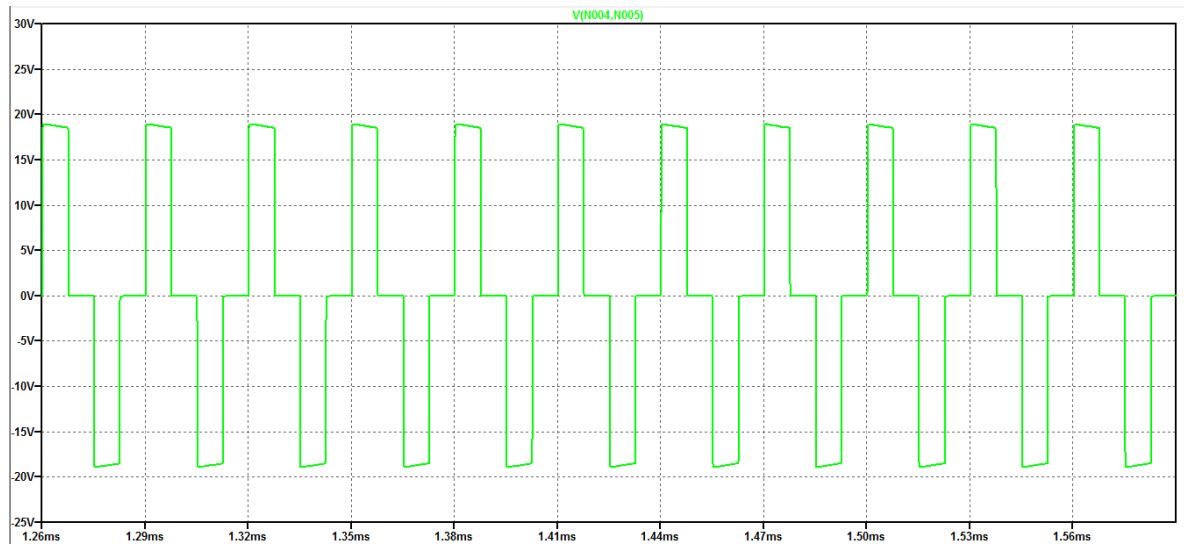
Para verificar que la conmutación es correcta y que no se producen picos de tensión en el primario del transformador se puede observar, en la Figura 30 su respectiva simulación. Además se aprecia que la componente de tensión media en el primario tiende a cero, debido a que el área superior y el área inferior son iguales, por ende el núcleo no se va a saturar.

Figura 30. Tensión en el primario del transformador producida por el puente completo conformado por cuatro MOSFETS.



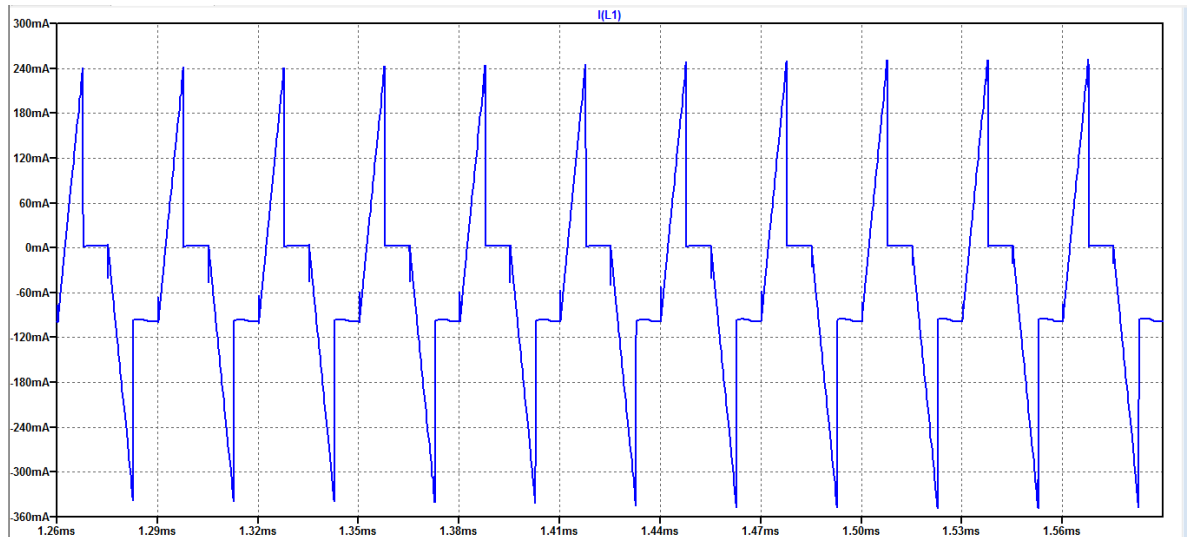
En la Figura 31, se puede observar la tensión del secundario del transformador, al igual que en la figura anterior, no se aprecian picos de tensión que puedan destruir a los diodos *Schottky* que conforman el puente rectificador completo de alta frecuencia.

Figura 31. Tensión en el secundario del transformador



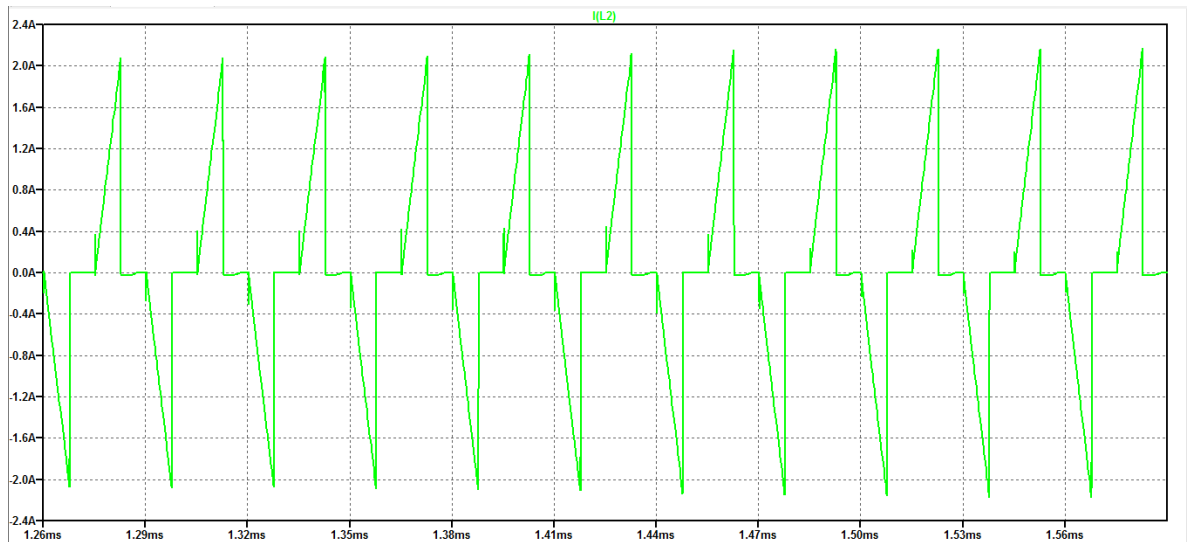
En la Figura 32, se puede observar la corriente por el primario del transformador. Esta corriente es proporcional a la fase entre las dos señales PWM, además se corrobora que la componente media de corriente es igual a cero, ya que el área superior es igual al área inferior.

Figura 32. Corriente del primario del transformador



En la Figura 33 se puede observar la corriente en el secundario del transformador.

Figura 33. Corriente en el secundario del transformador



A continuación se pueden apreciar las respuestas transitorias de tensión (ver Figura 34) y corriente (ver Figura 35) en la carga en donde la tensión de referencia considerada es de 10.5 V. Estas respuestas presentan un tiempo de

establecimiento de aproximadamente de 1.2 ms, con un pequeño sobre impulso aproximadamente del 10%.

Figura 34. Tensión a la salida del filtro de segundo orden conformado por un inductor de 25 μH y una capacitancia de 470 μF con una carga de 10 Ohms

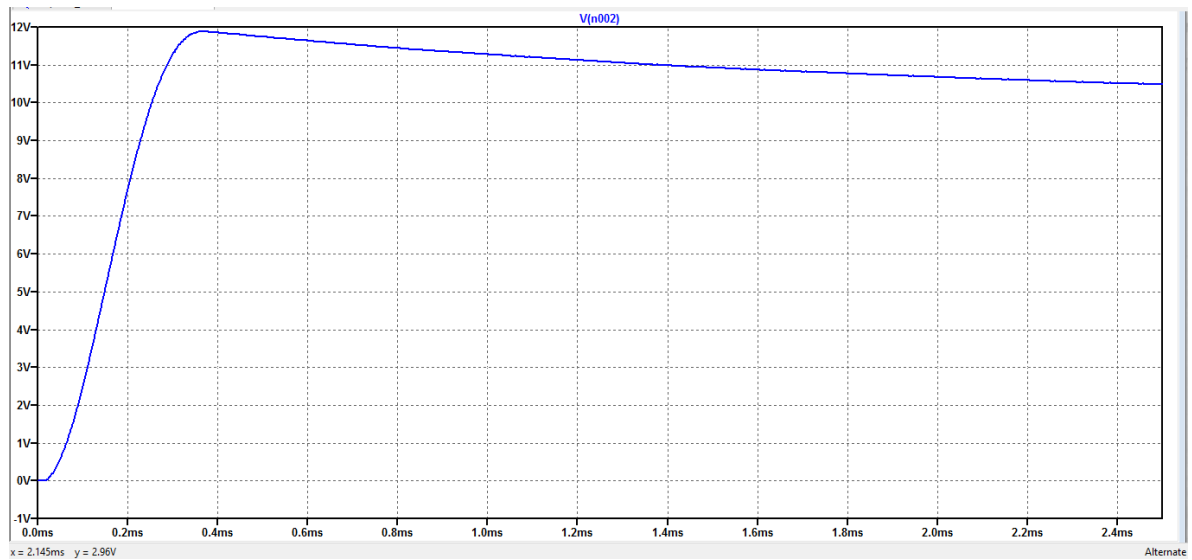
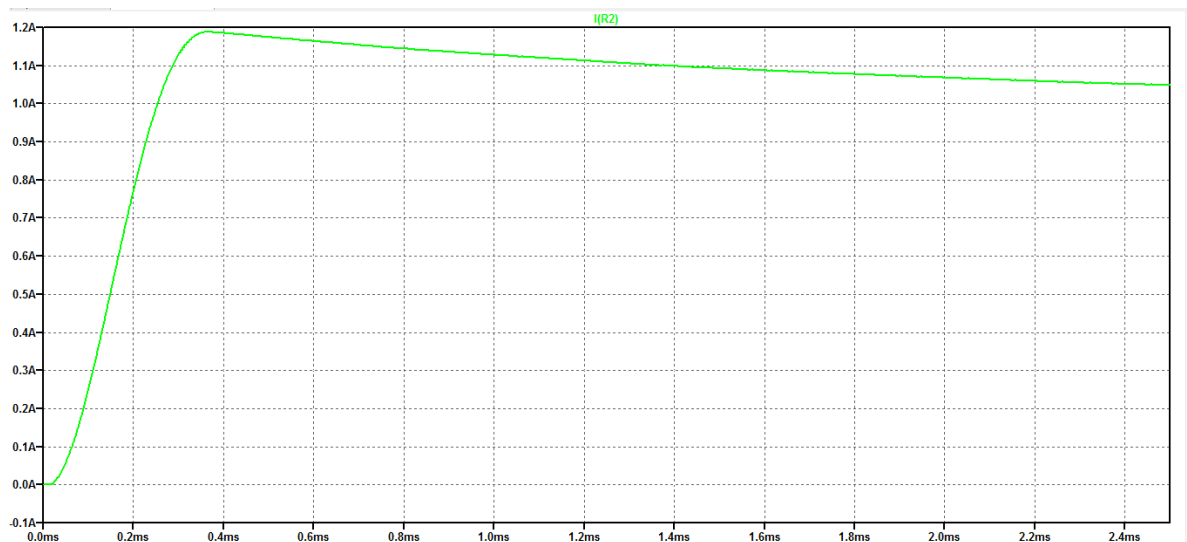


Figura 35. Corriente a la salida del filtro de segundo orden conformado por un inductor de 25 μH y una capacitancia de 470 μF con una carga de 10 Ohms



4.2 APLICACIÓN EN PYTHON

La aplicación diseñada, tiene el nombre de “*Communication module*” y fue programada en Python 3.4 (ver Anexo A) instalado en el sistema operativo Microsoft Windows 10. A continuación se listan sus principales características:

- Trabaja en sistemas operativos de 32/64 bits, se recomienda Windows 7 o superior.
- Permite seleccionar el valor de voltaje de la fuente conmutada mediante una barra deslizante que oscila entre 2 y 12 [V].
- Muestra los valores de tensión y corriente de la fuente conmutada en tiempo real, además, permite seleccionar el tiempo de muestreo de los datos.
- Acumula y grafica los datos de tensión y corriente de la fuente conmutada para ver su comportamiento en función del tiempo.
- Incluye un menú de ayuda, que permite al usuario comprender fácilmente como utilizar el programa. (Ver Anexo C).

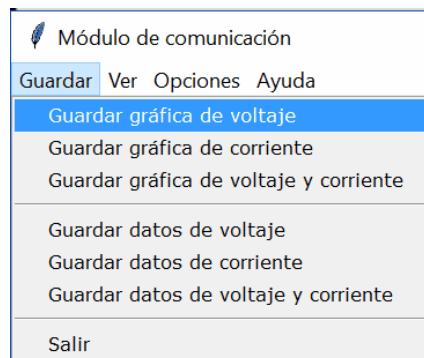
4.2.1 Descripción de la interfaz gráfica

Figura 36. Interfaz gráfica de aplicación en Python, ventana de valores



El programa cuenta con una barra de menús, dividida en cuatro opciones "Guardar", "Ver", "Opciones" y "Ayuda" como se muestra en la Figura 36, y son descritos a continuación:

Figura 37. Menú "Guardar" de aplicación en Python.

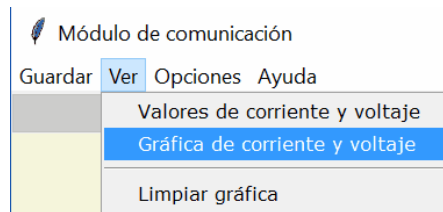


En la Figura 37 se observa el menú "Guardar", y es ahí donde se encuentra:

La opción "Guardar gráfica", la cual permite almacenar una figura en formato .png de las gráficas de tensión y corriente.

- La opción "Guardar datos", esta genera un archivo de texto que contiene los datos tomados hasta el momento.
- La opción "Salir", que permite salir del programa.

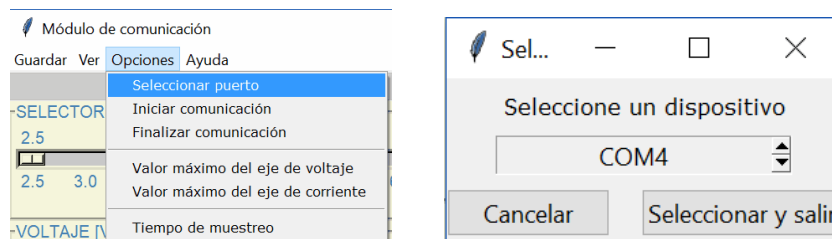
Figura 38. Menú "Ver" de aplicación en Python.



En el menú "Ver" que se presenta en la Figura 38, el usuario puede:

- Seleccionar "Valores de corriente and voltaje", y es allí donde se muestra la pestaña para modificar valores de tensión y corriente.
- Seleccionar "Gráfica de corriente y voltaje" para ver los datos de tensión y corriente gráficamente.
- Seleccionar la opción "Limpiar gráfica".

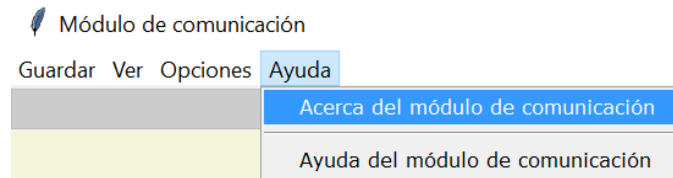
Figura 39. Menú "Opciones" de aplicación en Python.



A continuación se explican las opciones que se muestran en la Figura 39:

- “*Seleccionar puerto*” despliega una ventana en donde se elige el puerto serial que va a comunicarse con el controlador de la fuente conmutada (ver Figura 39) Derecha.
- “*Iniciar comunicación*” Inicia la comunicación.
- “*Finalizar comunicación*” Cierra la comunicación.
- “*Valor máximo del eje de voltaje/corriente*” Permite definir el rango de valores que se van a mostrar.

Figura 40. Menú "Ayuda" de aplicación en Python.



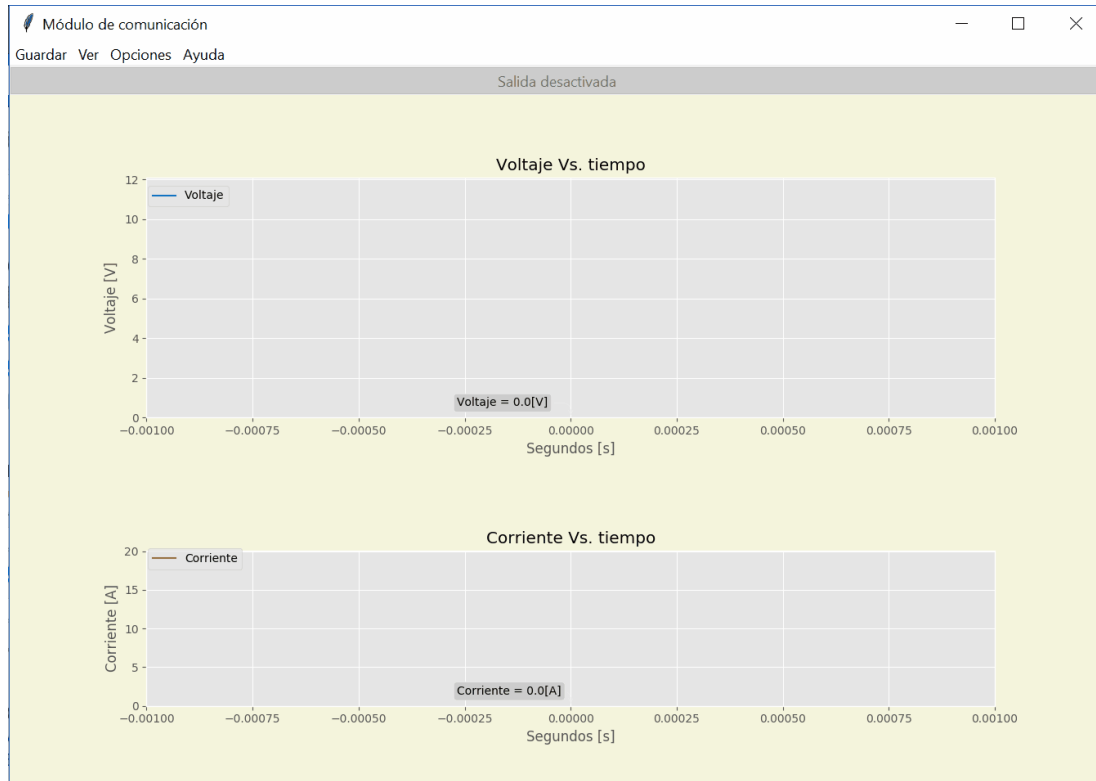
Por último esta la pestaña de "Ayuda" como se observa en la Figura 40, la cual contiene las siguientes opciones:

- “*Acerca de*” despliega información acerca de la aplicación, como la versión y el tipo de licencia.
- “*Ayuda*” proporciona al usuario una plataforma de consulta para mejorar su experiencia con el software.

4.2.2 Presentación de los datos de voltaje y corriente

Al seleccionar la opción “*Gráfica de corriente y voltaje*” en la pestaña “Ver”, se cambia de ventana y se procede a visualizar los datos de corriente o de voltaje en función del tiempo (ver Figura 41).

Figura 41. Interfaz gráfica de aplicación en Python, ventana de gráficas



Se realizaron varias pruebas, algunas de ellas expuestas en la Tabla 21, en las cuales se realizó la conexión de la fuente conmutada a diferentes valores de carga resistiva, variando también el valor de voltaje. En todas las pruebas se pudo visualizar correctamente la información, tal como se presenta en las Figura 42 a la Figura 47.

Tabla 21. Sumario de pruebas realizadas variando voltaje y carga.

Tensión de salida	Carga utilizada	Corriente de carga	Gráfica
12 V	50 Ω	0.2 A	Figura 42 y Figura 43
6 V	25 Ω	0.2 A	Figura 44 y Figura 45
2.5 V	25 Ω	0.1 A	Figura 46 y Figura 47

Figura 42. Prueba 1, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.

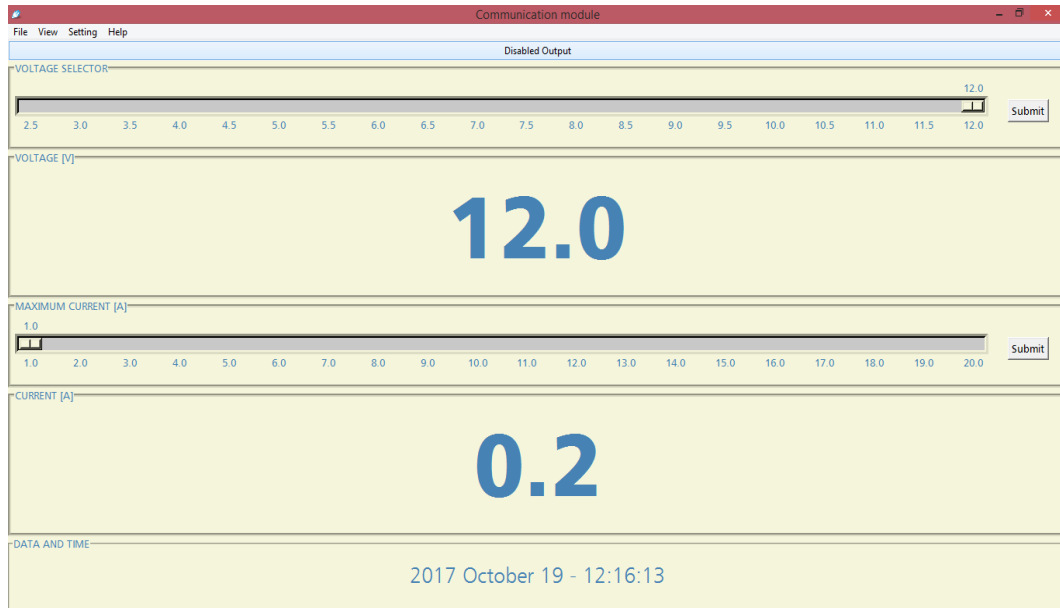
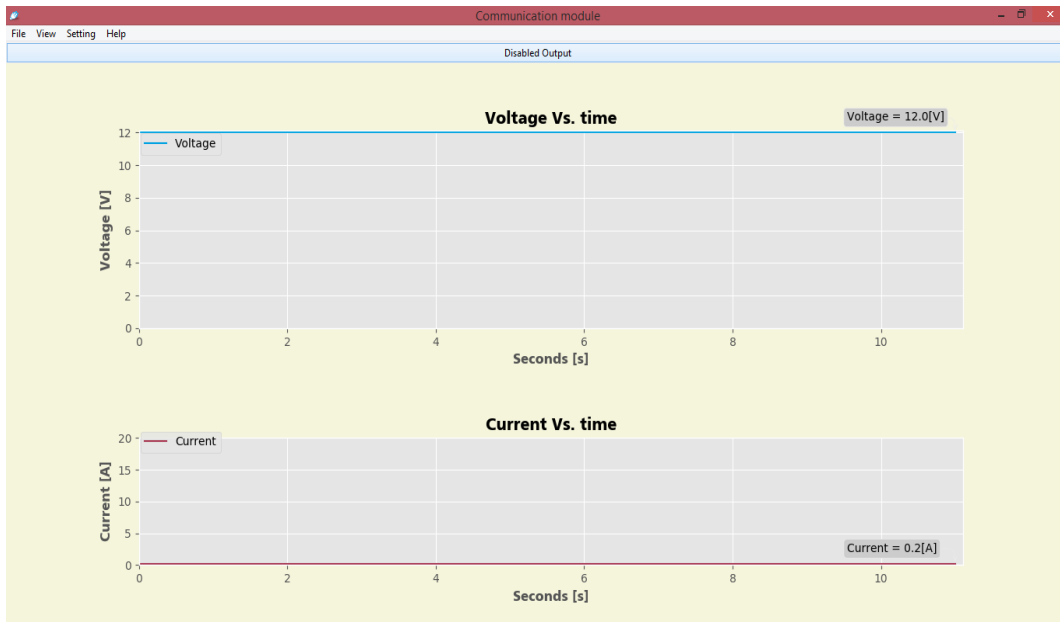


Figura 43. Prueba 1, datos de tensión y corriente en función del tiempo.



Al observar las gráficas anteriores de la prueba 1, se puede concluir que se sigue la tensión de referencia esperada de 12 V.

Figura 44. Prueba 2, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.

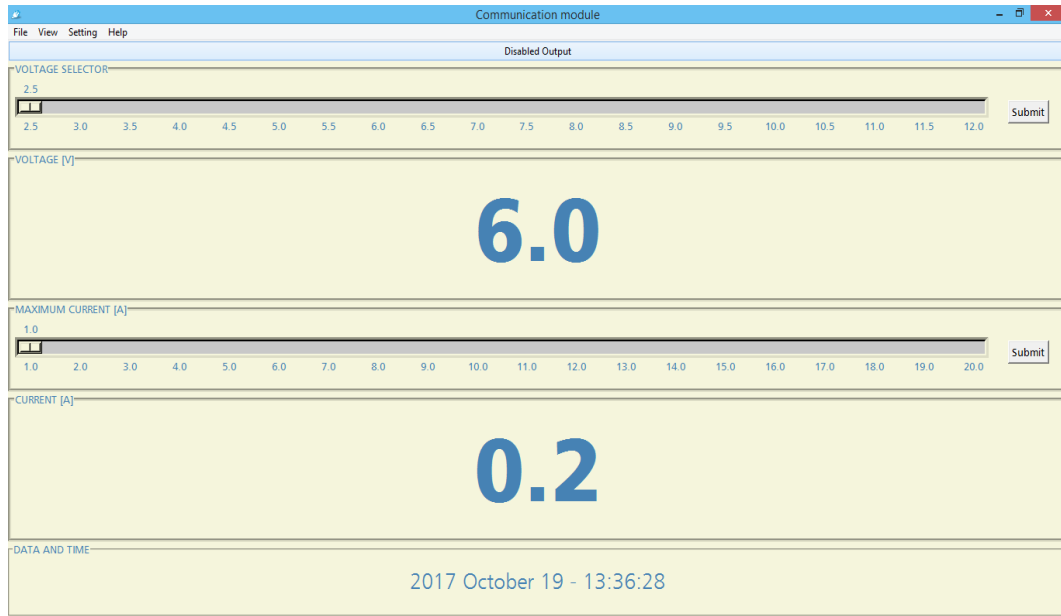


Figura 45. Prueba 2, datos de tensión y corriente en función del tiempo



Al observar las gráficas anteriores de la prueba 2, se puede concluir que se sigue la tensión de referencia esperada de 6 V.

Figura 46. Prueba 3, valores instantáneos de tensión y corriente de salida.

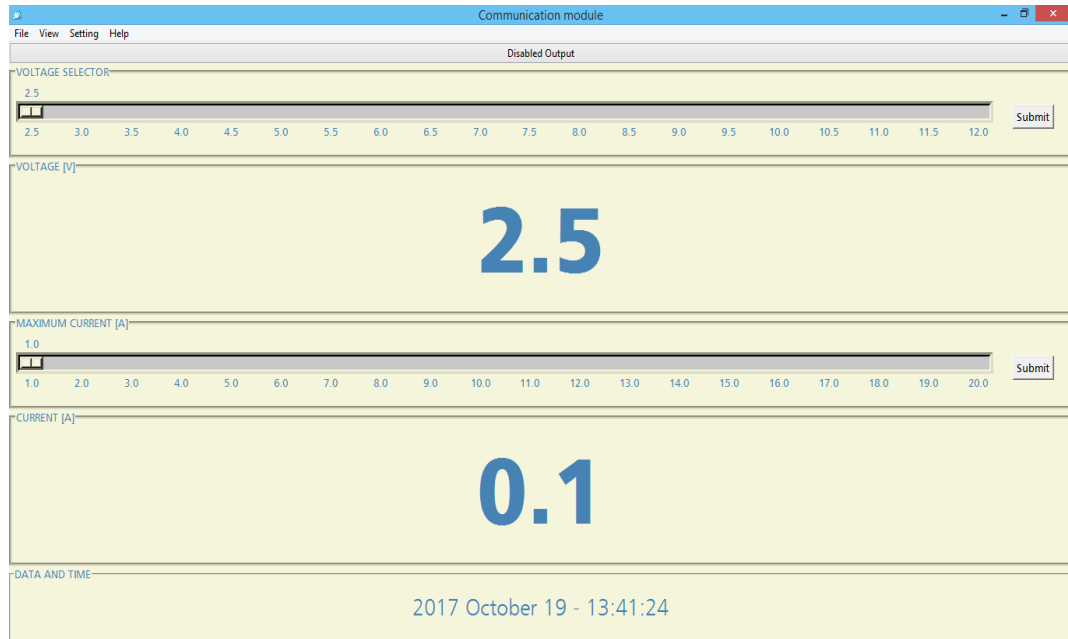
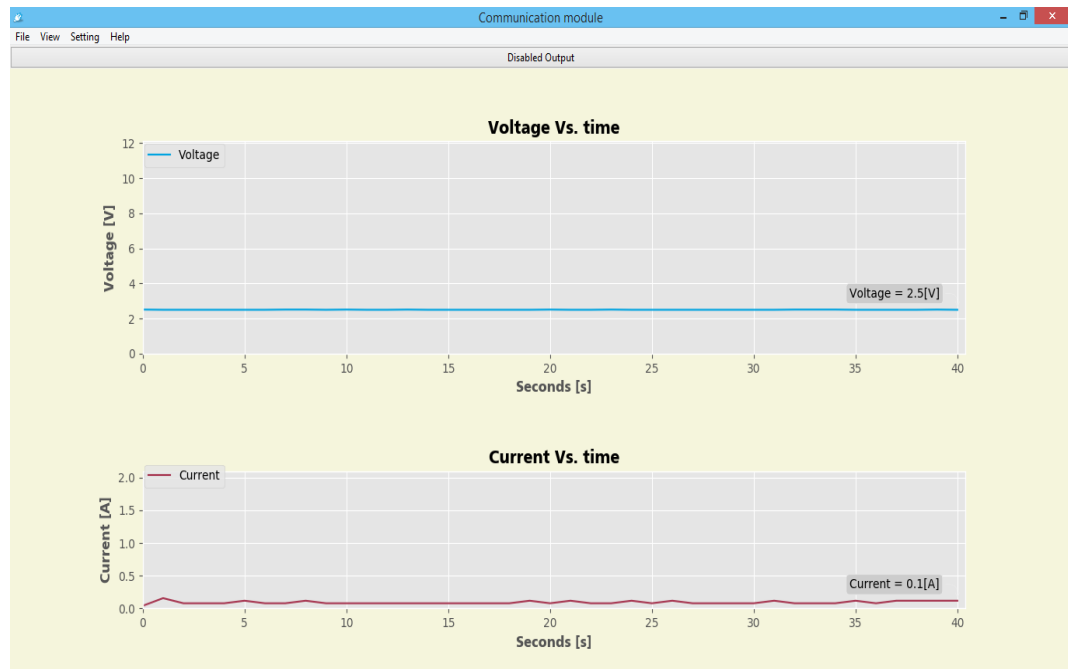


Figura 47. Prueba 3, datos de tensión y corriente en función del tiempo



Al observar las gráficas anteriores de la prueba 3, se puede concluir que se sigue la tensión de referencia esperada de 2.5 V.

4.3 IMPLEMENTACIÓN

En esta parte se realizó el diseño y fabricación de los circuitos impresos (PCB, *Printed Circuit Board*), donde se encontrarán las etapas de filtrado, potencia, comunicación del prototipo de la fuente conmutada anteriormente simuladas. Esto se realizó mediante el software EAGLE³⁵.

4.3.1 Circuito del convertidor, sensado y alimentación

- *Sensado de tensión*

El diagrama del circuito utilizado para la medición del voltaje puede visualizarse en la

Figura 49. En esta etapa se tiene como entrada al sensor, la tensión DC en la salida de la fuente conmutada la cual no supera los 12 [V]. La señal de salida de tensión del sensor no supera los 3.3 [V], de modo que puede ser leída en el microcontrolador. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 22 y en la

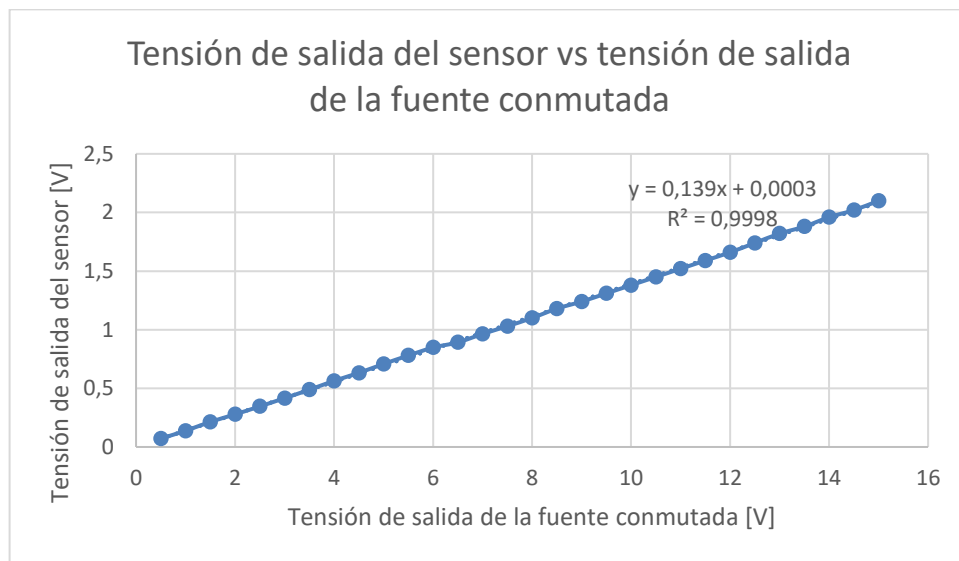
Figura 48.

³⁵ EAGLE, (siglas de Easily Applicable Graphical Layout Editor) es un programa de diseño de diagramas y PCBs.

Tabla 22. Comportamiento del sensor de voltaje.

Vin [V]	Vout [mv]
12	1.66
11	1.52
10	1.38
9	1.24
8	1.1
7	0.964
6	0.848
5	0.708
4	0.564
3	0.416
2	0.278
1	0.138

Figura 48. Gráfica de comportamiento del sensor de tensión

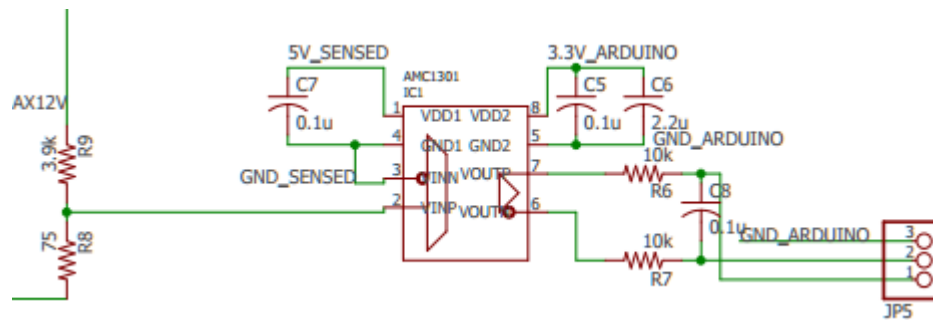


Para evaluar el desempeño de la etapa de sensado, se determinaron los siguientes parámetros (ver Tabla 23).

Tabla 23. Parámetros para evaluar el desempeño de la etapa de sensado.

Rango de tensión a la entrada	0 – 15 [V]
Rango de tensión a la salida	0 – 2 [V]
Correlación (r)	0.999
Sensibilidad	0.139
Offset	0.0003 [V]

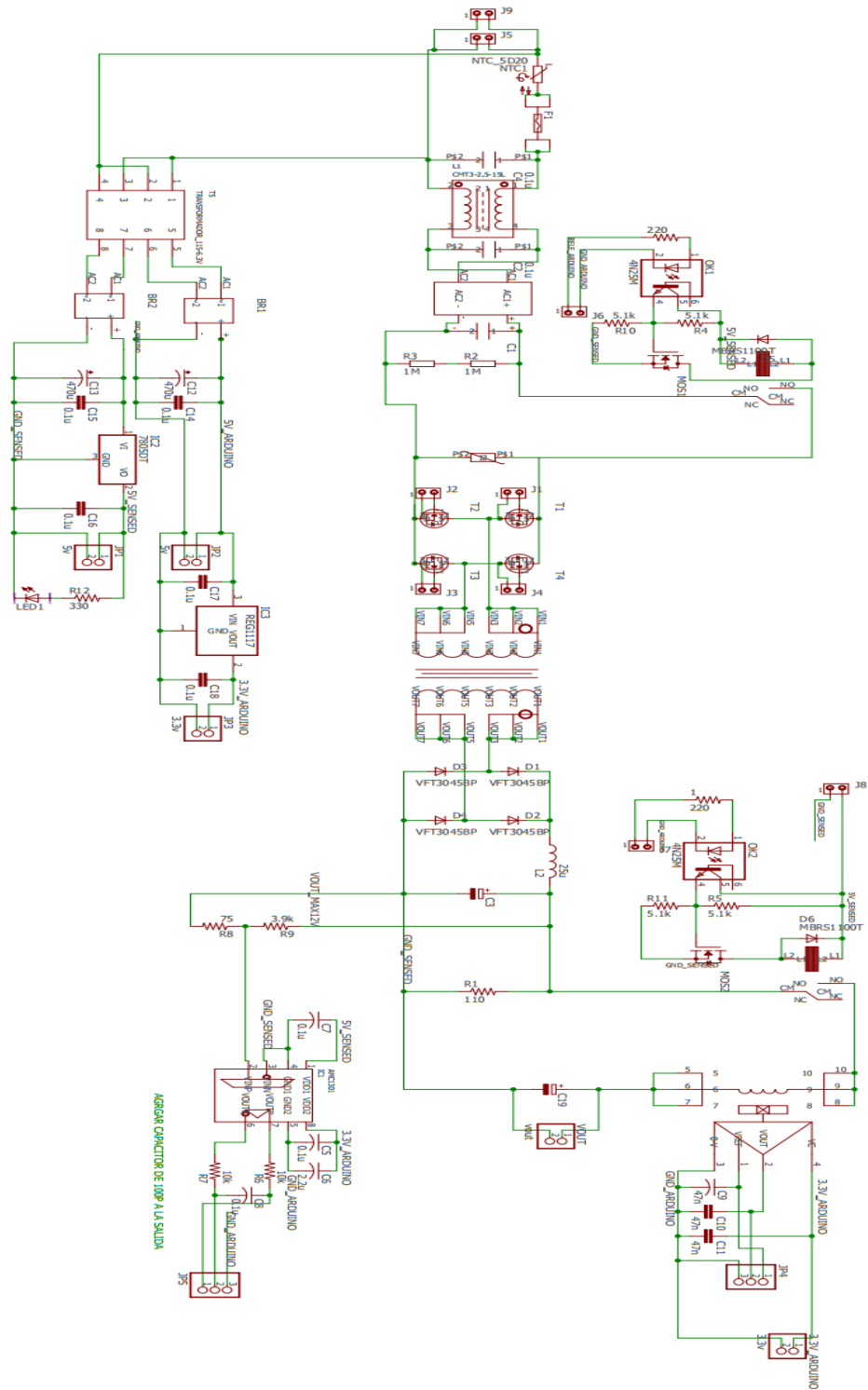
Figura 49. Diagrama del circuito utilizado para la etapa de sensado de tensión



- *Circuito general de la fuente conmutada*

A continuación en la Figura 50 se puede observar el esquemático que conforma la etapa de sensado, la etapa de conmutación, la etapa de filtro EMI, el puente rectificador de alta frecuencia y los relés para la etapa de salida y la alimentación de los MOSFETS.

Figura 50. Esquemático del circuito general diseñado



En la Figura 51 se observa la etapa central de la fuente conmutada, en ella se encuentran elementos como el filtro EMI de entrada del rectificador, el transformador de alta frecuencia del convertidor y otros transformadores auxiliares utilizados para alimentación DC de los equipos electrónicos utilizados.

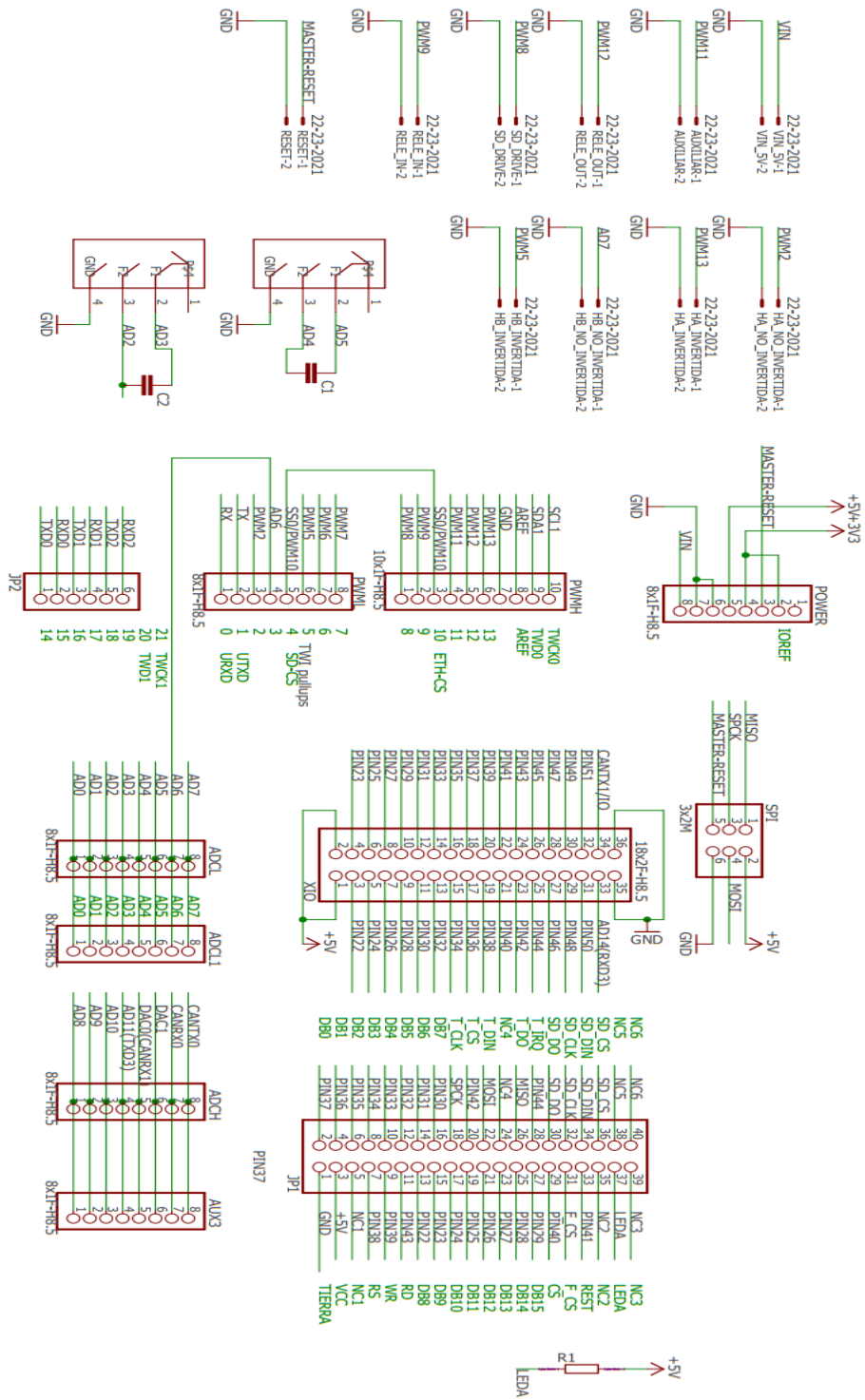
Figura 51. Implementación de la etapa del rectificador, convertidor, sensado y alimentación.



4.3.2 Circuito para la conexión de la pantalla

Tal como se muestra en la Figura 52, se diseñó una placa encargada de conectar el Arduino con la pantalla, esta placa es similar a los módulos *shield* que existen en el mercado para acoplarse al Arduino y aumentar sus capacidades y aplicaciones. En este caso se incorpora una interfaz visual a partir de una pantalla táctil en donde se visualizan y seleccionan los datos en tiempo real de voltaje y corriente.

Figura 52. Esquemático del circuito diseñado para realizar la conexión entre el Arduino, la pantalla y el controlador táctil.



El circuito implementado y conectado se puede apreciar en la Figura 53.

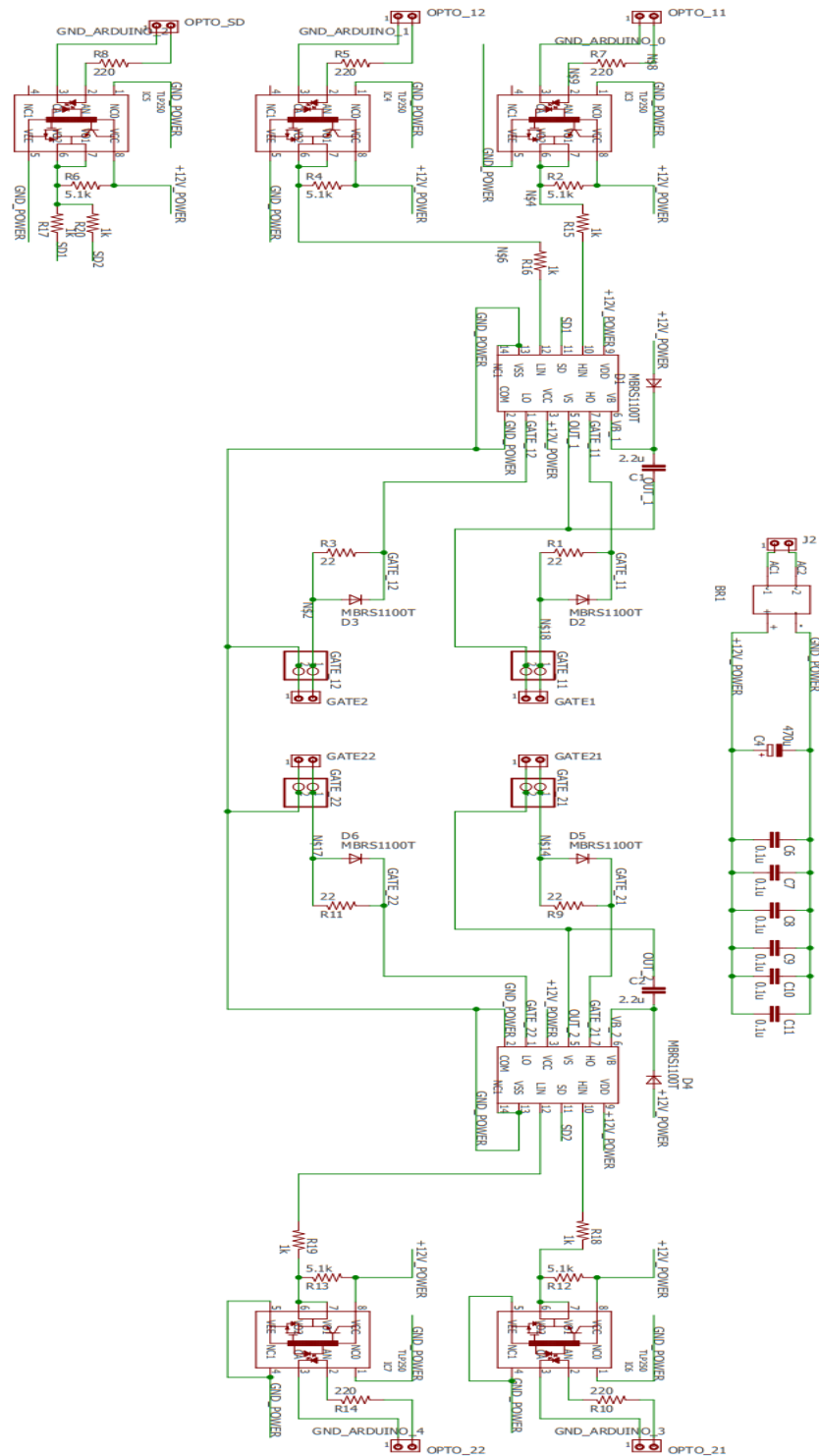
Figura 53. Implementación de circuito de conexión de la pantalla.



4.3.3 Circuito encargado del controlador de los transistores

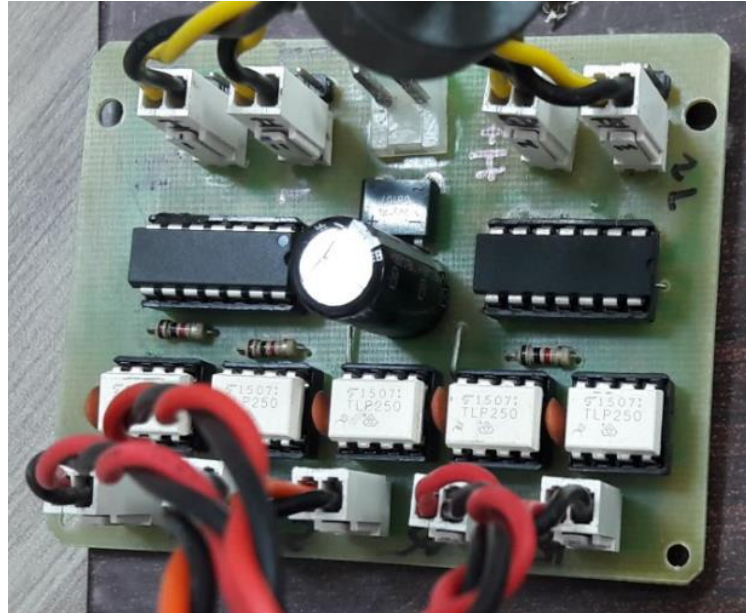
Teniendo en cuenta que el control de los transistores es una parte crítica del proyecto, debido a que de ella depende que el nivel de la tensión de salida sea correcto, se decidió realizar una placa exclusiva para esta etapa en el que se incluye el Driver IR2110 con su respectiva alimentación y circuitos de adecuación de señal, como se observa en la Figura 54.

Figura 54. Circuito diseñado para el control de conmutación con su respectiva alimentación.



La implementación se puede observar en la Figura 55.

Figura 55. Implementación de circuito de control de los transistores.



4.3.4 Prototipo construido

El prototipo de fuente conmutada realizado en este proyecto consiste en la unión de los tres circuitos anteriormente mencionados, como se puede observar en la Figura 56 y Figura 57. Las imágenes incluyen cargas de prueba, ubicadas entre disipadores de calor.

Figura 56. Prototipo de fuente conmutada construido.

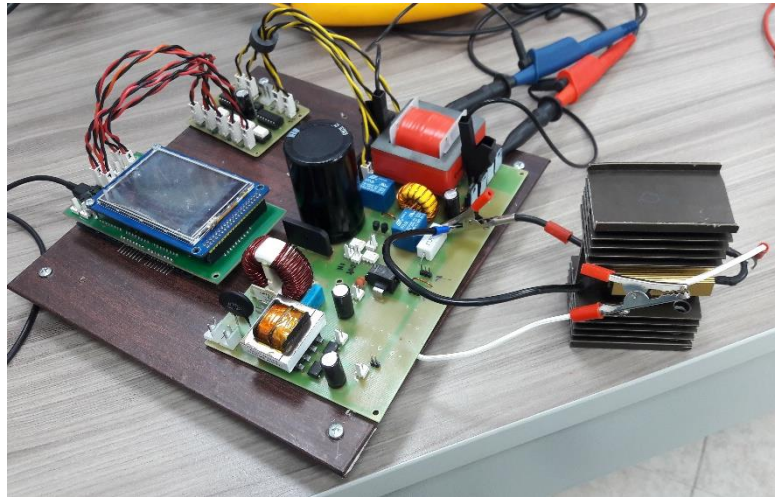


Figura 57. Prototipo de fuente conmutada construido, distinto ángulo.

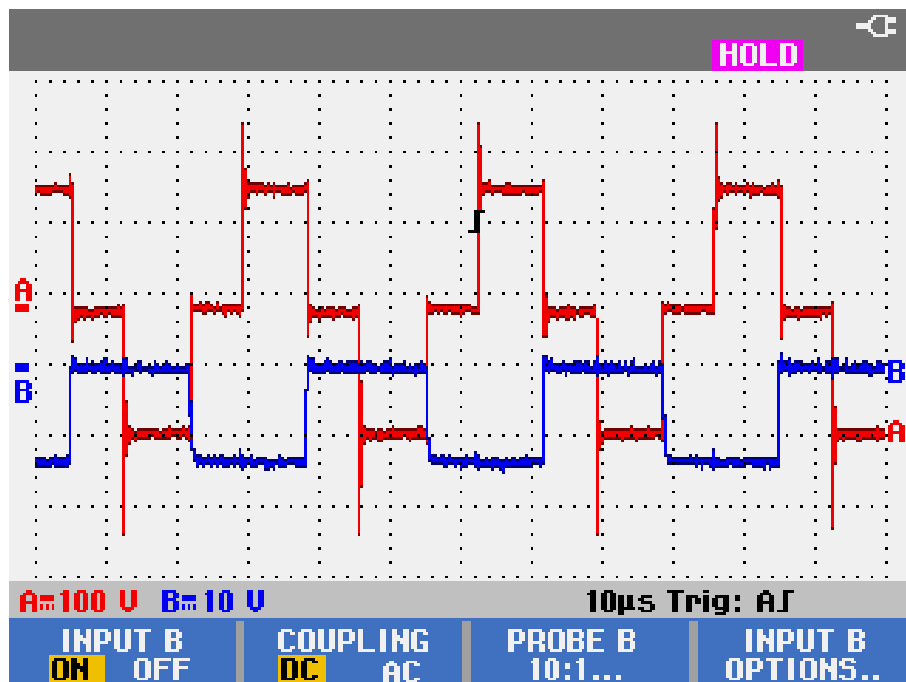


4.4 VERIFICACIÓN

Se realizaron pruebas de funcionamiento con un corrimiento de fase de 90° , en las cuales se verificó que se cumpliera con los parámetros especificados en la primera etapa, en los cuales se revisó el funcionamiento con cargas resistivas de 25 y 50 Ohms.

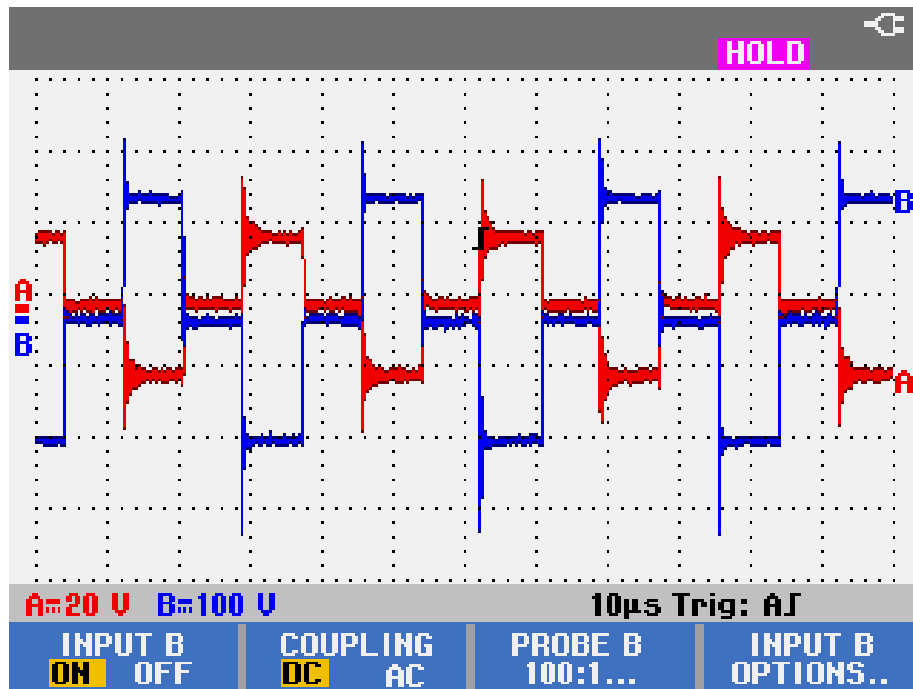
En la Figura 58, la gráfica de color azul muestra el comportamiento de la tensión puerta surtidor de un transistor en el cual se aprecia que no hay picos de tensión que puedan llegar a destruir el MOSFET. Y la gráfica de color rojo representa la tensión en el primario del transformador con una carga en el secundario de 25 Ohms, en ella también se observa un pequeño transitorio producido por las capacitancias e inductancias parásitas del circuito.

Figura 58. Tensión puerta surtidor del MOSFET puente completo (azul), y tensión en el primario del transformador (rojo)



En la Figura 59 se puede observar la relación primario secundario del transformador. La gráfica azul representa la tensión del primario del transformador y en ella no se aprecian picos de tensión superiores a 700 V que puedan destruir a los MOSFETS que conforman el puente completo de alta frecuencia, y la gráfica roja representa la tensión en el secundario del transformador y en ella no se aprecian picos de tensión superiores a 40 V que puedan destruir el puente rectificador de diodos *Schottky*.

Figura 59. Relación primario secundario del transformador



Con la gráfica anterior se puede concluir que la etapa de conmutación, el diseño del transformador y el puente rectificador de alta frecuencia están trabajando correctamente, porque no se superan las tensiones y corrientes que pueden destruir a los dispositivos.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se diseñó e implementó un prototipo de fuente conmutada que permite seguir una tensión de referencia determinada. El elemento principal de la fuente conmutada es un convertidor DC-DC en la topología puente completo, la cual presenta un tamaño menor a comparación de las fuentes lineales tradicionales debido principalmente al transformador de potencia de alta frecuencia usado en la topología de puente completo.

El prototipo implementado cuenta con un módulo de comunicación que permite adquirir, visualizar y exportar gráficas al computador, lo que facilita el análisis del proceso que se desea realizar por parte del usuario. Además, cuenta con una pantalla táctil que permite al usuario la selección de las variables de tensión y corriente sin la necesidad del uso de un computador.

Por medio del uso de software de código abierto y de licencia libre, se economiza en gran parte los costos del prototipo, además, se encuentra gran cantidad de información en la red, debido a que las personas lo pueden usar y no tiene ningún costo.

Se logró implementar la técnica de corrimiento de fase para la conmutación de transistores en la tarjeta de desarrollo Arduino Due, a la cual se le puede especificar la frecuencia de conmutación y la fase de corrimiento, por lo que la tarjeta Arduino Due se puede usar en inversores, calentadores por inducción, elevadores de tensión y todas las aplicaciones donde se requiera implementar medio y puente completo.

Por medio de Python se puede implementar de manera económica y rápida módulos de comunicación que permitan visualizar graficas en función del tiempo, independiente de la tarjeta de desarrollo y/o microcontrolador.

6 RECOMENDACIONES

Arduino

La programación orientada a objetos ayuda a condensar muchas líneas de códigos en bloques funcionales, las cuales pueden ser más entendibles entre programadores, y esto es algo que el software IDLE de Arduino permite, por lo que se recomienda el uso de esta programación orientada a objetos, punteros y referencias.

Es preferible en lo posible controlar el hardware interno del microcontrolador por medio de los registros del módulo correspondiente. El mapeo adecuado de los registros se encuentra en el sistema de ficheros del software Arduino siempre y cuando la tarjeta esté instalada en el ordenador, para el caso del Arduino Due se debió instalar y su microcontrolador es el SAM3X8E ARM Cortex-M3.

Python

Python es un excelente intérprete de código, ya que trabaja tanto para Windows como para Linux, por lo que se logra encontrar mucha documentación en la red, pero a pesar de eso también puede llevar a la confusión de no saber cuál versión es apropiada para comenzar a programar, por lo que es necesario conocer la compatibilidad de los módulos que se van agregar, así se asegura que la versión de Python instalada en el ordenador es la apropiada.

Selección de dispositivos

Antes de seleccionar cualquier dispositivo, se debe tener en cuenta su hoja de datos, sus archivos de simulación y componentes externos para un adecuado funcionamiento, por ejemplo: si se va a adquirir transistores MOSFETS, debe también considerarse el uso de supresores de tensión, debido a que en la

simulación hay muchos fenómenos que no se aprecian, como las corrientes en reversa que producen picos de tensión que destruyen el dispositivo. Lo anterior es debido al nivel del modelo de simulación que no es de alto nivel.

MOSFETS

Para la selección de un MOSFET, se deben de conocer la corriente entre drenador-surtidor y la tensión drenador-surtidor máximas, por lo que se recomienda que la corriente drenador-surtidor sea por lo menos 2.5 veces la corriente máxima, y la tensión sea 3 veces la tensión máxima drenador surtidor. Si la tensión drenador-surtidor es mucho mayor de 3 veces trae el inconveniente que agranda la resistencia de encendido, esto aumenta las pérdidas de conmutación. Si la corriente es mucho mayor de 2.5 aumentan las capacitancias parásitas que a la vez hace más difícil la conmutación y aumenta las pérdidas proporcionales a la frecuencia de conmutación.

Es bueno proteger los transistores con diodos Zener de rápida respuesta en puerta-surtidor, esto evita que corrientes inversas lo destruyan.

Agregar un tiempo muerto entre conmutación, disminuye la temperatura de los MOSFETS y se disminuyen las pérdidas por conmutación.

Diodos

Los diodos *Schottky* a pesar de tener una caída de tensión de encendido presentan una capacitancia un poco mayor que los diodos ultra rápidos debido a ser una unión metal-metal, por lo que no es apropiado usarlos para cargar el capacitor *Bootstrap* como en el driver IR2110, debido a que genera oscilaciones no deseadas en el transistor flotante, por lo que se recomienda emplear los diodos *Schottky* en la etapa de rectificación de alta frecuencia, donde su baja caída de

tensión produce bajas pérdidas por calentamiento. Los diodos ultra rápidos son ideales para cargar los capacitores de *Bootstrap*.

Transformador

Para el diseño de un transformador de alta frecuencia se debe conocer la topología en la que se va a desenvolver, ya que no es lo mismo un puente completo que presenta un valor de tensión media cercano a cero, que un convertidor *flyback* que presenta una componente media bastante elevada. El material, la frecuencia de conmutación, al área de ventana, la inductancia del primario y secundario, y la cantidad de espiras son valores que se deben considerar antes de comprar el núcleo, así se podrá dar un correcto embobinado y se disminuirán las pérdidas en el mismo.

PCB

Para los circuitos de sensado de tensión y corriente se recomienda que estén lo más cerca posible de los ADC que se encargan de codificar de analógico a digital, en el caso que no sea posible, se debe usar cable con apantallamiento. Esto evita que se agregue ruido externo e interno (producido por la conmutación de los diodos).

Las pistas por donde circula una gran cantidad de corriente, deben ser lo más corto y ancho posible, preferiblemente con vías metalizadas que compartan la cara superior e inferior del circuito impreso, esto disminuye la resistencia de la pista y así la caída de tensión también disminuirá.

BIBLIOGRAFÍA

ARDUINO. Arduino DUE. [En línea]. 4 ed. [Ivrea, Italia]: Arduino, 2017. [Citado el 14 de Agosto de 2017]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.

BERNAL, Yeiler y NUÑEZ, José. Diseño e implementación de una fuente de tensión de corriente continua con factor de potencia corregido. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2013. 152 p.

BILLINGS, Keith y MOREY Taylor. Switchmode Power Supply Handbook. 3 ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2011. 849 p. ISBN 978-0-07-163972-9.

BROWN, Marty. Power supply cookbook. [En línea]. 2ed. [Massachusetts, EE.UU]: Butterworth-Heinemann, 2001. [Citado el 1 de Mayo de 2017]. Disponible en: <https://pwrelectronic.files.wordpress.com/2010/06/power-supply-cookbook.pdf>. ISBN 0-7506-7329-X.

BROWN, Theodore, et al. Química de la ciencia central. 9 ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2004. 1046 p. ISBN 970-26-0468-0.

GADDIS, Tony. Starting out with Python. 2 ed. Boston: Pearson Education, 2012. 632 p. ISBN-10: 0-13-257637-6.

GIL, Julio. Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca. Trabajo de Grado Magíster en Ingeniería Sanitaria. Cali: Universidad del Valle, Facultad de ingeniería, 2012. 127 p.

GIORGI, Lisseth y URIBE, Karen. Implementación de una fuente DC empleando un convertidor Full-Bridge de frecuencia variable. Trabajo de grado Ingeniero

Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2014. 93 p.

HART, Daniel. Electrónica de potencia, 1 ed. Madrid: Prentice Hall, 2001, p.472.

HINE, Carlos y MARTINEZ, Sergio. Diseño y construcción de una fuente de tensión conmutada. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela E3T, 2011. 115 p.

LANGTANGEN, Hans. A primer on scientific programming with Python. [En línea]. 2ed. [Oslo, Norway]: Springer, 2011. [Citado el 2 de Junio de 2017]. Disponible en: <http://www.dsf.unica.it/~fiore/psc.pdf>. ISBN 978-3-642-18365-2.

LIECHTI, Chris. pySerial Documentation. 3.3 ed. Missouri, EE.UU: Cliechti, 2017. 61 p.

MCCANN, Michael. Metalúrgica y metalistería. En: OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. España, Ministerio de trabajo y asuntos sociales, 1998. p. 82.1-82.66. ISBN 84-8417-047-0.

MICROCHIP, Introduction to SMPS control techniques. [En línea]. [Arizona, EE.UU]: WebSeminars, 2006. [Citado el 1 de Julio de 2017]. Disponible en: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en527885.pdf.

NATIONAL INSTRUMENTS. Comunicación Serial: Conceptos Generales [En línea]. [Texas, EE.UU]: NI Soporte, 2006. [Citado el 14 de Agosto de 2017]. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>.

OLIPHANT, Travis. Guide to NumPy. [En línea]. EE.UU: Complexity Sciences Center, 2006. [Citado el 14 de Junio de 2017]. Disponible en: <http://csc.ucdavis.edu/~chaos/courses/nlp/Software/NumPyBook.pdf>.

ON SEMICONDUCTOR. Switch-mode power supply reference manual. [En línea]. Rev. 4. [Denver, EE.UU]: Literature distribution center for ON, 2014. [Citado el 12 de Junio de 2017]. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/SMPSRM-D.PDF>.

PHILIPS SEMICONDUCTORS, Power Semiconductor Applications. [En línea]. [Hamburgo, Alemania]: Mr.D.F.Haslam, 1992. [Citado el 20 de Junio de 2017]. Disponible en: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA495/PHILIPS%20APPLICATIONS/PHILIPS%20SemiCond%20HB.pdfg2jes9GdpQ>.

RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia. Traducido por Gabriel Sánchez García. 2 ed. Bogotá D.C : Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1995. 621 p. ISBN 968-880-586-6.

SCHWARZACHER, Walther. Electrodeposition: a technology for the future. En: Electrochemical Society Interface. 2006. vol. 15 no. 1, p. 32-33.

SEDRA, Adel, et al. Circuitos Microelectrónicos, 5 ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006, p.1277. ISBN-10: 9701054725.

SHIPMAN, Jhon. Tkinter 8.5 reference: a GUI for Python. Nuevo México: New Mexico Tech, 2014. 168 p.

ANEXOS

Anexo A. Python

Python es un lenguaje de programación de código abierto que permite la integración de módulos o librerías y al ser de código abierto, tiene disponibles varios paquetes para hacer representaciones de datos, diseñar la interfaz gráfica, y llevar a cabo la comunicación serial (UART TTL).

Este lenguaje combina un gran poder de desarrollo con una sintaxis clara, simple y compacta. Es similar a MATLAB y es apropiado para realizar cálculos matemáticos. Python permite la integración con otros lenguajes compilados como Fortran, C y C++ que son ampliamente utilizados en cálculos científicos complejos.³⁶

Módulos matemáticos en Python

La mayoría de funciones matemáticas no se encuentran disponibles directamente en el núcleo de Python, sin embargo, pueden cargarse a partir del módulo *math* y *cmath*, este último incluye algunas de las funciones de *math* pero además permite trabajar con números complejos.

Figura 60. Funciones disponible en el módulo *math* de Python.

```
>>> import math
>>> dir(math)
['_doc_', '__name__', 'acos', 'asin', 'atan',
 'atan2', 'ceil', 'cos', 'cosh', 'e', 'exp', 'fabs',
 'floor', 'fmod', 'frexp', 'hypot', 'ldexp', 'log',
 'log10', 'modf', 'pi', 'pow', 'sign', 'sin', 'sinh',
 'sqrt', 'tan', 'tanh']
```

³⁶ LANGTANGEN, Hans. A primer on scientific programming with Python. [En línea]. 2ed. [Oslo, Norway]: Springer, 2011. [Citado el 2 de Junio de 2017]. Disponible en: <http://www.dsf.unica.it/~fiore/psc.pdf>. ISBN 978-3-642-18365-2.

Fuente: Numerical Methods in Engineering with Python 3.

Módulo numpy

Este módulo es de los más importantes de Python, su origen se remonta al año 1995 cuando Jim Hugunin desarrolló el módulo *Numeric* con el objetivo de dotar a Python de la capacidad que tenían otros programas como MATLAB. Posteriormente el módulo fue mejorado por Travis E. Oliphant y Eric Jones quienes unieron fuerzas y crearon SciPy en 2001. NumPy salió a la luz en 2006 luego de que Travis terminase de construir un objeto array híbrido capaz de trabajar con una serie universal de funciones como se describe en el *NumPy Book*³⁷.

El módulo *numpy* se encarga de añadir la capacidad matemática y vectorial a Python permitiéndole operar con cualquier dato numérico o *array*. Este módulo abarca desde operaciones como la suma o multiplicación hasta otras más complejas como la transformada de Fourier o el álgebra lineal.

Los objetos *array* son similares a las listas, pero pueden manipularse por varias funciones que contiene el módulo. Entre las principales características del *array* se encuentran las siguientes:

Todos los elementos deben ser del mismo tipo, preferiblemente real, entero o complejo, para tener un coste computacional reducido.

El número de elementos debe ser conocido al crear el objeto.

³⁷ OLIPHANT, Travis. Guide to NumPy. [En línea]. EE.UU: Complexity Sciences Center, 2006. [Citado el 14 de Junio de 2017]. Disponible en: <http://csc.ucdavis.edu/~chaos/courses/nlp/Software/NumPyBook.pdf>.

Permite realizar un amplio rango de operaciones matemáticas y no requiere el uso de ciclos mediante la aplicación de la vectorización.³⁸

El tamaño de un objeto *array* no se puede modificar y no puede tener elementos vacíos.

A continuación, se presentan las funciones más utilizadas del módulo.

Figura 61. Funciones principales del módulo numpy de Python.

```
>>> import math
>>> dir(math)
['__doc__', '__name__', 'acos', 'asin', 'atan',
 'atan2', 'ceil', 'cos', 'cosh', 'e', 'exp', 'fabs',
 'floor', 'fmod', 'frexp', 'hypot', 'ldexp', 'log',
 'log10', 'modf', 'pi', 'pow', 'sign', 'sin', 'sinh',
 'sqrt', 'tan', 'tanh']
```

Fuente: Numerical Methods in Engineering with Python 3.

En este Proyecto se utilizó el módulo Numpy para el manejo de los datos de voltaje y corriente proporcionados por el prototipo de fuente conmutada.

Módulo Matplotlib

Matplotlib es una librería para realizar gráficas en 2D que le otorga a Python una funcionalidad al estilo de MATLAB. Puede utilizarse de una forma orientada a objetos y utiliza la función *Numpy* y otras extensiones para proveer un rendimiento excelente incluso para objetos *array* de gran tamaño. No forma parte del núcleo de Python pero se encuentra disponible para su descarga e instalación.

³⁸ LANGTANGEN. Op. Cit. p. 184.

El siguiente programa muestra el funcionamiento del módulo para gráficas en dos dimensiones.

Figura 62. Programa de ejemplo del módulo matplotlib.

```
plt.plot(x, sin(x), 'o-', x, cos(x), '^-') # Plot with specified
                                           # line and marker style
plt.xlabel('x')                          # Add label to x-axis
plt.legend(('sine', 'cosine'), loc = 0)   # Add legend in loc. 3
plt.grid(True)                            # Add coordinate grid
plt.savefig('testplot.png', format='png') # Save plot in png
                                           # format for future use
plt.show()                                 # Show plot on screen
input("\nPress return to exit")
```

Fuente: Numerical Methods in Engineering with Python 3.

El estilo de línea y marcador se especifica a partir de los caracteres mostrados en la parte izquierda de la siguiente figura, los códigos de localización para la leyenda se muestran en la parte derecha.

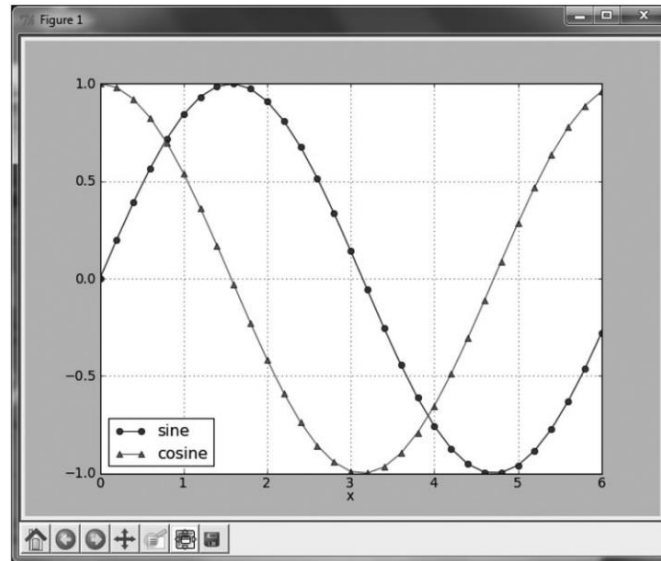
Figura 63. Estilos de línea, marcador y leyenda de librería matplotlib en Python.

' - '	Solid line	0	"Best" location
' -- '	Dashed line	1	Upper right
' - . '	Dash-dot line	2	Upper left
' : '	Dotted line	3	Lower left
' o '	Circle marker	4	Lower right
' ^ '	Triangle marker		
' s '	Square marker		
' h '	Hexagon marker		
' x '	x marker		

Fuente: Numerical Methods in Engineering with Python 3.

Al ejecutar el programa se obtiene la siguiente pantalla:

Figura 64. Gráfico ejemplo de la librería matplotlib en Python.



Fuente: Numerical Methods in Engineering with Python 3.

Este módulo es utilizado por gran cantidad de personas en diferentes contextos, en este proyecto se empleó Matplotlib interactivamente con la consola de Python en Tkinter para mostrar los datos de voltaje y corriente de la fuente conmutada en un computador con sistema operativo Windows.

Comunicación serial

La comunicación serial es un protocolo de comunicación entre dispositivos que viene incluida de manera estándar en prácticamente cualquier computador. Es bastante común en varios dispositivos utilizados para instrumentación y también permite la adquisición de datos en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo.

El concepto de comunicación serial, indica que un puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez, para realizar esta comunicación se utilizan 3

líneas de transmisión (1) Tierra, (2) Transmitir (3) Recibir³⁹. A continuación, se describen brevemente las características más importantes de la comunicación serial:

Velocidad de transmisión (*baud rate*): Indica el número de bits por segundo que se transfieren y se mide en baudios. A mayor velocidad, menor distancia máxima posible entre los dispositivos.

Bits de datos: Hace referencia a la cantidad de bits en la transmisión, que puede ser 5, 7 u 8 bits.

Bits de parada: Se utilizan para indicar que la comunicación de un paquete ha terminado. Los valores típicos son 1, 1.5 o 2 bits.

Paridad: Permite verificar si hay errores en la transmisión serial. Puede ser par, impar, marcada, espaciada o directamente no utilizarse en la comunicación.

Acceso a puerto serial en Python

El módulo *Pyserial* contiene el acceso al puerto serial, proporciona *backends* en *Python* para distintos sistemas operativos como Windows, OSX, Linux y tiene una licencia completamente gratis⁴⁰.

A continuación, se listan algunas de sus características:

Misma interfaz basada en clases para todas las plataformas soportadas.

Acceso a las opciones del puerto a través de Python

³⁹ NATIONAL INSTRUMENTS. Comunicación Serial: Conceptos Generales [En línea]. [Texas, EE.UU]: NI Soporte, 2006. [Citado el 14 de Agosto de 2017]. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>.

⁴⁰ LIECHTI, Chris. pySerial Documentation. 3.3 ed. Missouri, EE.UU: Cliechti, 2017. 61 p.

Soporta diferentes paquetes de bits, bits de parada, paridad y control de flujo.

Puede trabajar con o sin recibir límite de tiempo (*timeout*).

100% programado en *Python*.

En este proyecto se utilizó el módulo Pyserial con el objetivo de enviar los datos de tensión deseada desde el computador hacia el controlador de la fuente conmutada y posteriormente enviar los datos de corriente y tensión en el tiempo de la fuente conmutada hacia el computador para su almacenamiento y visualización.

Interfaz gráfica de usuario

Una interfaz de usuario de un sistema es la parte del sistema con la que el usuario interactúa. Por muchos años, la única forma de que el usuario pudiese interactuar con un sistema operativo fue a partir de una interfaz de línea de comando que típicamente mostraba una entrada en donde el usuario escribía un comando y luego éste se ejecutaba.

Los usuarios principiantes encontraban esta interfaz difícil de utilizar debido a la necesidad de aprender gran cantidad de comandos y su sintaxis como si se tratara de programación, además, si el comando no se ingresaba correctamente, no funcionaba el sistema.

Figura 65. Ejemplo de una interfaz de línea de comando.

```
C:\MyPrograms>dir
Volume in drive C has no label.
Volume Serial Number is 2414-0000

Directory of C:\MyPrograms

01/18/2008  08:10 AM    <DIR>          .
01/18/2008  08:10 AM    <DIR>          ..
04/17/2007  03:23 PM                250 payroll.py
               1 File(s)                250 bytes
               2 Dir(s)    21,691,060,224 bytes free

C:\MyPrograms>
```

Fuente: Starting out with Python.

En los años 80, un nuevo tipo de interfaz conocida como interfaz gráfica de usuario comenzó a utilizarse en sistemas operativos comerciales. Una interfaz gráfica de usuario *GUI* por sus siglas en inglés, permite al usuario interactuar con el sistema operativo y otros programas a través de elementos gráficos en una pantalla.

Las *GUIs* popularizaron el uso del ratón como dispositivo de entrada. Y permitían que el usuario apuntara elementos como cuadros de diálogo en una pantalla e hiciera *click* para activarlos en lugar de ingresar comandos.

En un entorno gráfico el usuario determina el orden en el que suceden las cosas, y el programa debe responder a las acciones del usuario, por ello, se puede afirmar que la GUI está en función de los eventos que provoca el usuario.⁴¹

Figura 66. Ejemplo de cuadro de diálogo en interfaz gráfica.

⁴¹ GADDIS, Tony. Starting out with Python. 2 ed. Boston: Pearson Education, 2012. 632 p. ISBN-10: 0-13-257637-6.



Fuente: Starting out with Python.

Módulo Tkinter

En Python, es posible utilizar el módulo *tkinter* para crear programas con interfaz gráfica de manera simple. El nombre “*tkinter*” es la abreviatura para “*Tk interface*”, y es una herramienta para programadores en Python que permite usar una librería GUI llamada Tk, utilizada en muchos otros lenguajes de programación.

El módulo Tkinter proporciona 15 complementos que pueden incorporarse a una ventana y son descritos en la siguiente tabla.

Tabla 24. Complementos de tkinter en Python.

Widget	Descripción
Button	Un botón que puede provocar una acción cuando es presionado.
Canvas	Un área rectangular que puede ser usada para mostrar gráficos.
Checkbutton	Un botón que puede ponerse en “encendido” o “apagado”.
Entry	Un área en dónde el usuario puede teclear una línea de entrada.
Frame	Un contenedor que puede albergar otros complementos.
Label	Un área que muestra una línea de texto o una imagen.
Listbox	Una lista de la cual el usuario puede seleccionar un elemento.

Menu	Una lista de opciones que se despliega al presionar Menubutton.
Menubutton	Un menú que puede ser presionado por el usuario.
Message	Muestra varias líneas de texto.
Radiobutton	Un complemento que puede ser seleccionado o deseleccionado.
Scale	Permite al usuario seleccionar un valor mediante una barra móvil.
Scrollbar	Habilita la barra de navegación en diferentes complementos.
Text	Permite al usuario ingresar múltiples líneas de texto.
Toplevel	Un contenedor, similar al frame, pero en su propia ventana.

Fuente: Starting Out with Python.

Como ejemplo, se presenta a continuación el código necesario para realizar una interfaz que muestre la oración “Hello World!” con tkinter en Python.

Figura 67. Programa HelloWorld utilizando tkinter en Python.

```

1 # This program displays a label with text.
2
3 import tkinter
4
5 class MyGUI:
6     def __init__(self):
7         # Create the main window widget.
8         self.main_window = tkinter.Tk()
9
10        # Create a Label widget containing the
11        # text 'Hello World!'
12        self.label = tkinter.Label(self.main_window, \
13                                  text='Hello World!')
14
15        # Call the Label widget's pack method.
16        self.label.pack()
17
18        # Enter the tkinter main loop.
19        tkinter.mainloop()
20
21 # Create an instance of the MyGUI class.
22 my_gui = MyGUI()

```



Fuente: Starting out with Python

En este proyecto, se realizó una interfaz gráfica que permite al usuario elegir distintos parámetros de entrada para la fuente como el voltaje, el tiempo de conmutación y visualizar los datos de tensión y corriente en tiempo real.

Anexo B. Tabla de características de hilo de cobre

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

Anexo C. Manual de usuario módulo de comunicación, fuente conmutada 12 V y 4 A.

El manual de usuario está orientado a ser práctico, preciso y conciso, todas y cada una de las funciones son explicadas paso por paso y con ayuda de imágenes. Este manual se encuentra en el CD anexo en la carpeta llamada “Anexo C. Manual de Usuario módulo”.

Anexo D. Código Arduino.

El código Arduino fue implementado para generar las señales que controlan la fuente conmutada y la pantalla táctil que se encarga de la visualización y selección de los datos. Este código se encuentra en el CD anexo en la carpeta llamada “Anexo E. Código Arduino”.

Anexo F. Código Python.

El código Python se implementó para hacer el módulo de comunicación entre la fuente de conmutación y el computador, para de esta manera exportar y graficar los datos de tensión y corriente. Este código se encuentra en el CD anexo en la carpeta llamada “Anexo G. Código Python”.