

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DC PARA EL LABORATORIO
DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**ANUAR ALFREDO AMAYA ALSINA
LORENA ANDREA GÓMEZ SÁNCHEZ
FABIAN LEONARDO RAMÍREZ BECERRA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DC PARA EL LABORATORIO
DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**ANUAR ALFREDO AMAYA ALSINA
LORENA ANDREA GÓMEZ SÁNCHEZ
FABIAN LEONARDO RAMÍREZ BECERRA**

Trabajo de grado para optar al titulo de Ingeniero Electricista

**Director:
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Dr. en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A Dios por permitirme estar de pie durante todo mi proceso universitario.

A mi madre Olga Alsina y a mi padre Luis Amaya que fueron mi mayor apoyo y mi más grande motivación.

A mis hermanas Diana y Andrea que me apoyaron constantemente.

A mis familiares que se hicieron presente con voces de aliento, en especial a mi tía María Dolores Amaya y a mi tía Alcira Alsina Angarita por su cariño y su constante ánimo.

A todos mis amigos que hicieron parte de mi vida durante este proceso, en especial a Alberto De La Rosa, Felipe Noguera, Álvaro José Molina, La sra Isabel Castillo, los hermanos Antonio y Pedro Monsalve y su padre Antonio Monsalve (Q.E.P.D).

A Tania Paola Pérez por su apoyo incondicional.

Por último, a la música que ha dejado grandes personas y enseñanzas en mi vida.

Anuar

Principalmente a Dios por permitirme culminar con éxito esta etapa.

A mis padres: Alba Luz Sanchez y Luis Helver Gómez por su apoyo ,paciencia y confianza durante todo mi proceso universitario.

A mi hermana Estefania Gómez por haber estado en los momentos difíciles y apoyarme cuando mas lo necesitaba al darme palabras de aliento.

A mi abuela Araminta Angel por acompañarme en este proceso.

A Jaime Halarcon y Milena López por ser el primer eslabón para comenzar mi carrera.

A mis amigos: Paola Melo, Sara Díaz, Jenny Lara, Néstor Díaz, Duber Corzo y Diego Villareal por estar siempre presentes en los altos y bajos de mi carrera.

A todos mis familiares y amigos

Lorena

A Dios por permitirme culminar de manera satisfactoria esta etapa de mi vida.

A mis padres, María Becerra y Arsenio Ramírez por brindarme su amor y sabias enseñanzas para hacer de mí una mejor persona cada día.

A mis hermanos, Yadira, Paola, Juan David y Nicolás por ser un apoyo moral en todo momento.

A mis tíos y demás familiares que siempre fueron un apoyo incondicional para llegar a esta meta.

A mi novia, Mónica por acompañarme en todos los momentos de este arduo trabajo que finalmente se culmina con éxito

Fabián R.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto ofrecen su agradecimiento a:

Al director del proyecto el profesor Hermann Vargas por su apoyo y orientación en cada una de las etapas de desarrollo de este proyecto.

Al profesor Jaime Barrero por su asesoría y disposición para este trabajo.

A Rodman Calderón, Leonardo Bonilla, Fredy Rojas, Juan Cruz y Guillermo Galindez por sus aportes.

A los compañeros y demás personas que intervinieron durante este proceso de trabajo de grado

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO	21
1.2 PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO	24
1.3 TIRISTOR O SCR	26
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DC (RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO)	28
2.1 ETAPA DE MANDO O CONTROL	29
2.1.1 Detector de cruce por cero	29
2.1.2 Controlador	32
2.1.3 Circuito de sensado de tensión	35
2.2 ETAPA DE AISLAMIENTO	38
2.3 ETAPA DE POTENCIA	41
2.3.1 Características principales de los SCR's	43
2.3.2 Características principales de los diodos	44
2.4 FUENTES DE ALIMENTACIÓN	44
2.5 PROTECCIONES	47
2.5.1 Protección SCR's:	47
2.5.2 Protección contra sobrecorriente	48

2.5.3 Fusibles	49
3. DISEÑO Y ELABORACIÓN ALGORITMO DE CONTROL	51
3.1 DETECCIÓN DE SECUENCIA	51
3.2 GENERACIÓN DE PULSOS	53
3.3 CONTROL TENSIÓN	55
4. PRUEBAS	59
4.1 CRUCE POR CERO Y DETECCIÓN DE SECUENCIA	59
4.2 GENERACIÓN DE PULSOS	60
4.3 SENSADO Y CONTROL DE TENSIÓN	61
4.4 SIMULACIÓN FILTRO LC	64
5. CONCLUSIONES	66
6. RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rectificador Trifásico Semicontrolado	22
Figura 2. Tensiones de línea	22
Figura 3. Tensión de salida para $\alpha = 45^\circ$	23
Figura 4. Tensión de salida para $\alpha = 60^\circ$	23
Figura 5. Símbolo del tiristor y estructura	26
Figura 6. Curva característica V-I del tiristor	27
Figura 7. Etapas del rectificador trifásico semicontrolado	28
Figura 8. Diagrama bloques etapa de mando	29
Figura 9. Circuito detector de cruce por cero para la fase A.	30
Figura 10. Pines y características del 4n25.	30
Figura 11. Señal detector de cruce por cero.	31
Figura 12. Microcontrolador Arduino Micro	32
Figura 13. Pines de la tarjeta Arduino Micro	33
Figura 14. Características del ISO 124	36
Figura 15. Circuito de sensado de tensión	36
Figura 16. Características del amplificador TL082	37
Figura 17. Diagrama de bloques etapa de aislamiento	38
Figura 18. Pines y características del TLP250:	39
Figura 19. Circuito etapa de aislamiento	41
Figura 20. Diagrama de bloques etapa de potencia:	42
Figura 21. Circuito de Potencia	42
Figura 22. Pines y características del SCR:	43
Figura 23. Pines y características del Diodo de potencia:	44
Figura 24. Transformador de alimentación de fuentes	45
Figura 25. Fuente de alimentación para TLP 250	45

Figura 26. Fuente de alimentación ISO 124 (+VS1,-VS1)	46
Figura 27. Fuente de alimentación ISO 124 (+VS2,-VS2) y Arduino Micro	46
Figura 28. Esquemático Red Snubber	47
Figura 29. Interruptor automático	49
Figura 30. Esquema general de protecciones	50
Figura 31. Diagrama de flujo detección de secuencia	52
Figura 32. Tiempos de conducción de los SCR´s	53
Figura 33. Diagrama de flujo generación de pulsos	54
Figura 34. Selector de señal de referencia	55
Figura 35. Diagrama de flujo control de tensión	57
Figura 36. Señal de detector de cruce por cero de la fase A	59
Figura 37. Medición y simulación de señal de cruce por cero de la fase A y fase B	60
Figura 38. Medición y simulación de pulsos generados con secuencia positiva.	61
Figura 39. Señal de tensión antes del filtro pasabajos	62
Figura 40. Señal de tensión después del filtro pasabajos	62
Figura 41. Medición y simulación de señal de salida en carga resistiva a 200 V	63
Figura 42. Medición y simulación de señal de salida en carga resistiva a 220 V	63
Figura 43. Señal de tensión de salida en el motor a 200 V	64
Figura 44. Filtro LC	65
Figura 45. Señal de tensión para carga resistiva con filtro y sin filtro	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del controlador	34
Tabla 2. Asignación de pines en el microcontrolador	34

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. HOJAS DE DATOS	72
ANEXO B. TARJETA DISEÑADA	77
ANEXO C. ETAPA DE POTENCIA	80

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DC PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS*

AUTORES: Anuar Alfredo Amaya Alsina.
Lorena Andrea Gómez Sánchez.
Fabián Leonardo Ramírez Becerra**.

PALABRAS CLAVES: Microcontrolador, SCR, rectificador

Descripción:

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir una fuente de corriente continua semicontrolada para el uso en el laboratorio de máquinas eléctricas; esta cuenta con las siguientes especificaciones: al conectar una carga debe entregar una tensión en terminales de 200 V o 220 V y trabaje en un rango de corriente de 0 A a 20 A.

El ámbito de aplicación del proyecto se centrará en la parte de control y potencia de la fuente; pero se debe tener en cuenta las limitaciones de la fuente; es decir que no se conecte una carga que demande una corriente superior al rango establecido para esto se contara con las respectivas protecciones.

El proyecto comprende las siguientes fases: la primera de ellas es la etapa de control formada por el microcontrolador, un circuito detector de cruce por cero y un circuito de disparo; la segunda es la etapa de potencia conformada por los SCR's y diodos. Y por último la etapa de aislamiento para separar eléctricamente la etapa de control y la de potencia.

Las etapas de diseño y construcción de la fuente se realizaron concentrándose en el rectificador trifásico semicontrolado. Este hardware servirá de apoyo para los estudiantes que requieran utilizar una fuente de corriente continua en las asignaturas: electrónica de potencia, sistemas de control y maquinas eléctricas.

En el proyecto se presentan los cálculos correspondientes a cada etapa, y los parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección de los dispositivos utilizados en el diseño.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

SUMMARY

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DC SOURCE FOR THE ELECTRIC MACHINES LABORATORY*

AUTHORS: Anuar Alfredo Amaya Alsina.
Lorena Andrea Gómez Sánchez.
Fabián Leonardo Ramírez Becerra**.

KEY WORDS: Microcontroller , SCR, Rectifiers

Description

This project aims to design and build a semicontrolled continues current source for the electric machines laboratory, it counts with the next features: when connected it has to provide a load of 200 V or 220 V, working with a current range of 0 A to 20A.

The Project scope is the control and power's source; it is mandatory do not connect electrical loads which demand a higher current than the established range in this case electrical protection must be used.

The Project phases are : first a control stage is integrated by the microcontroller , a zero crossing detection circuit and a trigger circuit , the second one is power stage is integrated by the SCR's and diodes. And finally the isolation step for electrically separating the stage of control and power.

The stages of design and construction of the source is made focusing on the semi-controlled three-phase rectifier. This hardware will support students requiring use a DC source in the subjects: power electronics , control systems and electric machines .

The project presents the calculations for each stage , and the parameters taken into account for the selection of the devices used in the design are presented ..

* Degree Work

** Faculty of Mechanical Physical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications, Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo en la implementación de nuevas tecnologías para la generación, transporte, distribución y consumo de la energía eléctrica ha llevado a importantes desarrollos en todas las áreas mencionadas. El estudio de la conversión de energía eléctrica para la adaptación en procesos específicos a todos los niveles, (industriales, residenciales, comerciales, etc.).

La rectificación controlada es un método para realizar dicha conversión en los diferentes formatos de corriente continua y corriente alterna, con el máximo rendimiento posible. Las fuentes de rectificación son un ejemplo de esto y se utilizan para transformar la corriente alterna a corriente continua para suplir necesidades particulares en las que se requiera una tensión constante a partir de una fuente de tensión alterna.

La evolución de la electrónica de potencia, que es la disciplina encargada de abordar este tipo de desarrollos con dispositivos usados para la rectificación controlada como: SCRs, GTOs, BJTs, IGBTs o MOSFETs, ofrecen la oportunidad de múltiples configuraciones, unas más eficientes que otras dependiendo del tipo de aplicación en donde se requiera el rectificador.

El diseño de la fuente se concentró en el rectificador trifásico semicontrolado, este texto presenta cada una de las etapas de diseño y construcción. El capítulo 1 aborda la parte teórica del funcionamiento del rectificador. El capítulo 2 presenta el diseño de cada una de las etapas de la fuente: la etapa de control, la etapa de aislamiento y la etapa de potencia, todas estas con sus respectivos cálculos y parámetros de diseño. El capítulo 3 muestra el desarrollo del algoritmo

implementado para la integración de las etapas presentadas en el capítulo 2 ejecutadas con un Arduino Micro.

Finalmente el capítulo 4 expone las pruebas hechas a la fuente para verificar su funcionamiento de acuerdo a las especificaciones requeridas por el proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se mencionan los aspectos más relevantes de los rectificadores trifásicos semicontrolados de onda completa y sus parámetros de rendimiento.

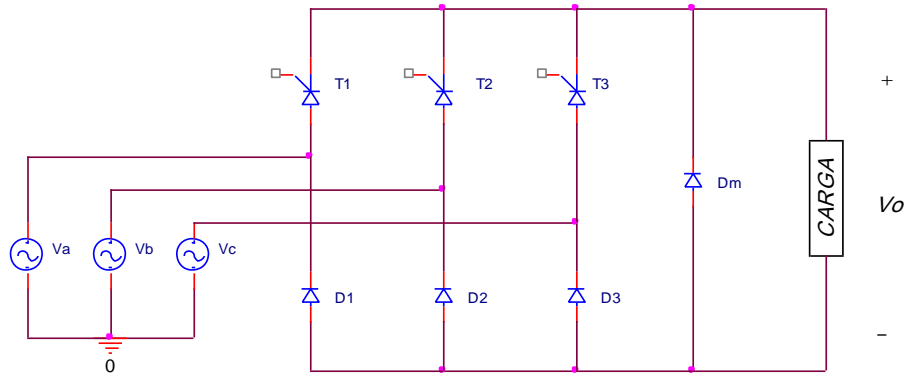
1.1 RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO

La función de un rectificador es convertir la corriente alterna de entrada en corriente continua a la salida; mediante dispositivos semiconductores que manejan grandes potencias. Las distintas opciones que ofrecen los rectificadores van desde el número de fases con las que se alimenta, la conexión de los elementos (media onda, onda completa) y la capacidad de controlar la tensión de salida (controlado, semicontrolado) [3].

Se denomina rectificador semicontrolado porque utiliza tres diodos y tres elementos semiconductores de control que para este caso corresponden a SCR's (Silicon Controlled Rectifier). Estos rectificadores son de gran aplicación en la industria para producir tensiones y corrientes continuas que generalmente impulsan cargas de gran potencia, como motores DC; cuando se requieren potencias de hasta 120 kW [1].

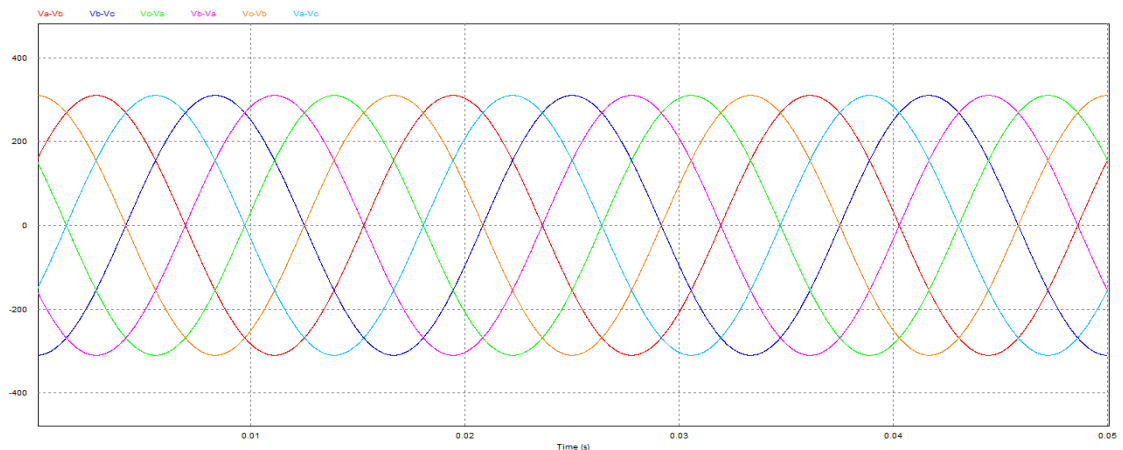
En la figura 1 se puede observar el esquemático de un rectificador trifásico semicontrolado.

Figura 1. Rectificador Trifásico Semicontrolado



Su funcionamiento consiste en disparar los tiristores con un determinado ángulo α respecto de un punto de conmutación natural o desde el cruce por cero de la señal de entrada. Con esto es posible obtener una tensión de salida variable con respecto al ángulo de retardo o disparo α . Los tiristores son disparados con un tren pulsos que están desfasados $2\pi/3$. Cuando el ángulo de disparo coincide con el punto de conmutación natural $\pi/6$ el rectificador semicontrolado operara exactamente igual que un rectificador no controlado [2]. En la figura 2 se muestran las tensiones de línea correspondientes a V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} , V_{ba} , V_{cb} y V_{ac} .

Figura 2. Tensiones de línea



En las figuras 3 y 4 se puede ver la tensión de salida para dos ángulos diferentes.

Figura 3. Tensión de salida para $\alpha = 45^\circ$

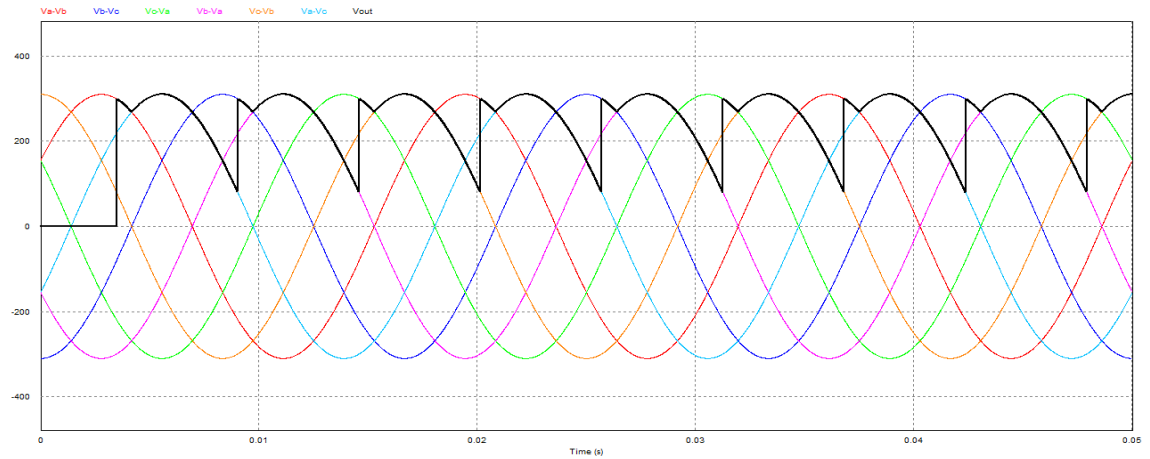
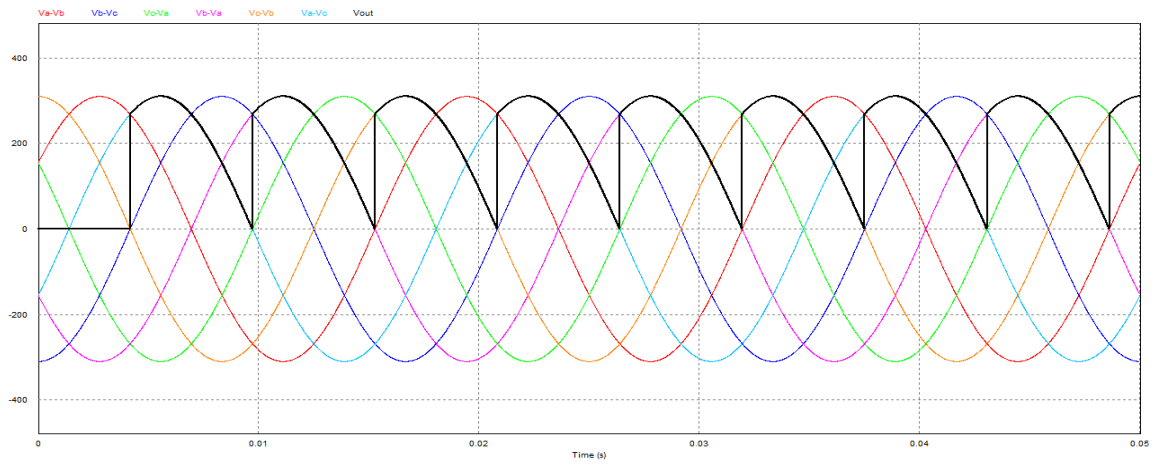


Figura 4. Tensión de salida para $\alpha = 60^\circ$



1.2 PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO¹

Las tensiones de fase con las que se alimenta el rectificador son:

$$V_{an} = V_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$V_{bn} = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$V_{cn} = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (3)$$

De esta manera las tensiones de línea:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \pi/6), V_{ba} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t - 5\pi/6) \quad (4)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t - \pi/2), V_{cb} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \pi/2) \quad (5)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \pi/6), V_{ac} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t - \pi/6) \quad (6)$$

Siendo: V_m : Tensión pico, para este caso corresponde a 179 V

Tensión promedio de salida:

$$V_{o_{dc}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt \quad (7)$$

➤ Para $\alpha \geq \pi/3$:

$$V_{o_{dc}} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad V \quad (8)$$

➤ Para $\alpha \leq \pi/3$:

$$V_{o_{dc}} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad V \quad (9)$$

¹ Ecuaciones tomadas de [1]

Tensión rms de salida

$$V_{O_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_o(t))^2 dt} \quad (10)$$

➤ Para $\alpha \geq \pi/3$:

$$V_{O_{rms}} = \sqrt{3} V_m \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)} \quad V \quad (11)$$

➤ Para $\alpha \leq \pi/3$:

$$V_{O_{rms}} = \sqrt{3} V_m \sqrt{\frac{3}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} (\cos \alpha)^2 \right)} \quad V \quad (12)$$

Potencia

$$P_{dc} = V_{O_{dc}} * I_{O_{dc}} \quad W \quad (13)$$

$$P_{ac} = V_{rms} * I_{rms} \quad W \quad (14)$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} * 100 \quad \% \quad (15)$$

Factor de forma: V_{RMS} y V_{DC} son medidos a la salida del rectificador

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{DC}} \quad (16)$$

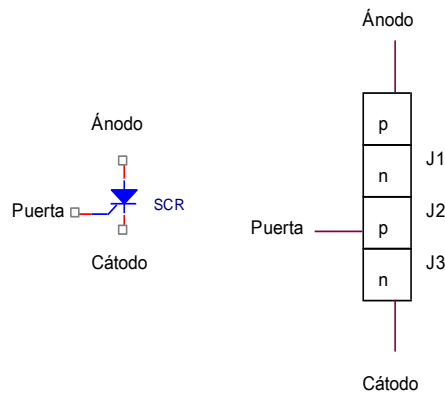
Factor de rizado

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (17)$$

1.3 TIRISTOR O SCR

Un SCR o tiristor es un dispositivo semiconductor de cuatro capas de estructura *pnpn* con tres uniones *pn* (Figura 5). Operan como conmutadores biestables, es decir pasan de estar en conducción a no conducción. Cuenta con tres terminales: ánodo, cátodo y puerta [1].

Figura 5. Símbolo del tiristor y estructura



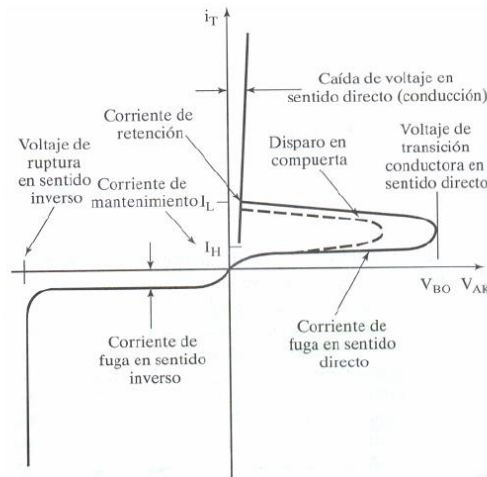
Cuando la tensión del ánodo es más positiva respecto al cátodo las junturas J1 y J3 tiene polarización directa. La unión J2 tiene polarización inversa y solo fluirá una corriente de fuga pequeña del ánodo al cátodo. Así el tiristor está en condición de bloqueo o en estado desactivado. Cuando el voltaje ánodo-cátodo V_{AK} se hace muy grande la unión J2 polarizada inversamente entrará en ruptura. Ya que las uniones J1 y J3 ya están polarizadas directamente se provocará una corriente directa del ánodo, se dice que el tiristor está en estado de conducción o activado [1].

La corriente del ánodo debe ser mayor que la corriente de enganche I_L , (corriente mínima necesaria para mantener al SCR en estado de conducción después de que se ha activado y se ha retirado la señal de la puerta) de lo contrario cuando se reduzca la tensión ánodo-cátodo el dispositivo regresará a la condición de

bloqueo. Cuando el tiristor es activado se comporta como un diodo en conducción, pero si se reduce la corriente directa del ánodo por debajo de un nivel conocido como corriente de mantenimiento I_H ($I_H < I_L$) el tiristor entrará en estado de bloqueo [1].

En la figura 6 se puede observar el comportamiento de un tiristor teniendo en cuenta sus características de tensión y corriente.

Figura 6. Curva característica V-I del tiristor



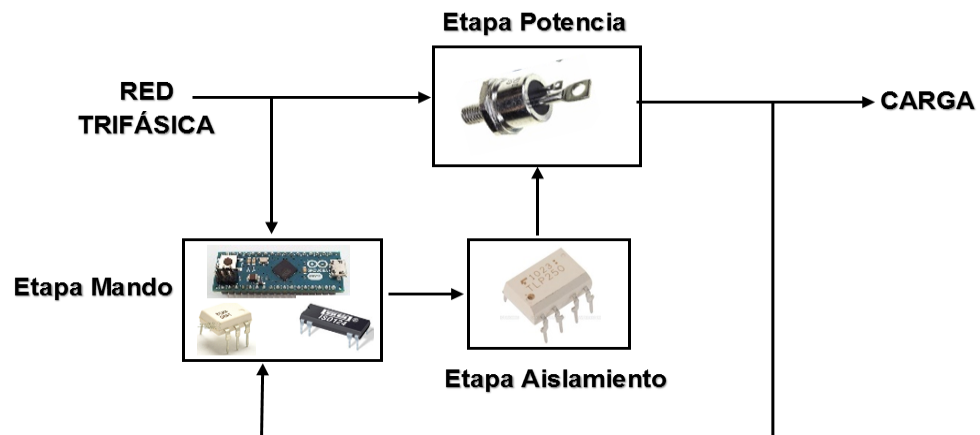
Fuente: RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DC (RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO)

Este capítulo presenta cada una de las etapas que conforman la fuente DC que será utilizada en el laboratorio de Máquinas Eléctricas y su funcionamiento. Se describe el hardware y el control en cada una de sus etapas. También se muestra bajo qué características se seleccionaron los diferentes componentes de la fuente incluyendo cálculos.

El sistema comprende tres grandes etapas: la etapa de control o mando en la que se encuentran el detector de cruce por cero, el sistema de desarrollo encargado de generar los pulsos para la activación de los SCR's llevada a cabo con una placa Arduino Micro, el circuito de sensado de tensión; la etapa de aislamiento y la etapa de potencia conformada por los SCR's y los diodos. En la figura 7 se representa el diagrama de bloques de las etapas del rectificador.

Figura 7. Etapas del rectificador trifásico semicontrolado

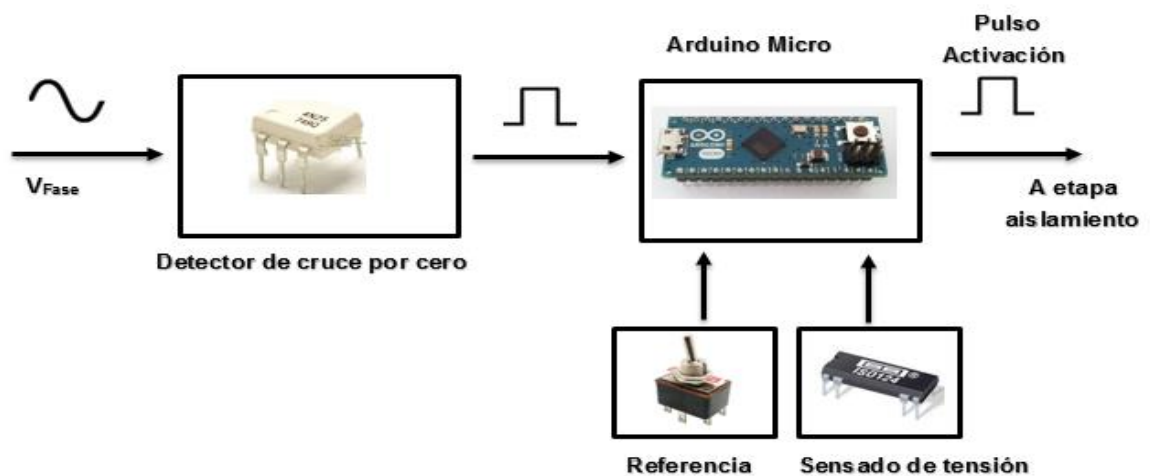


2.1 ETAPA DE MANDO O CONTROL

Esta etapa comprende el control de la fuente DC, el detector de cruce por cero y el sensado de tensión a la salida. Todo manejado con la placa Arduino Micro que es el encargado de ejecutar el algoritmo de control para el correcto funcionamiento del sistema.

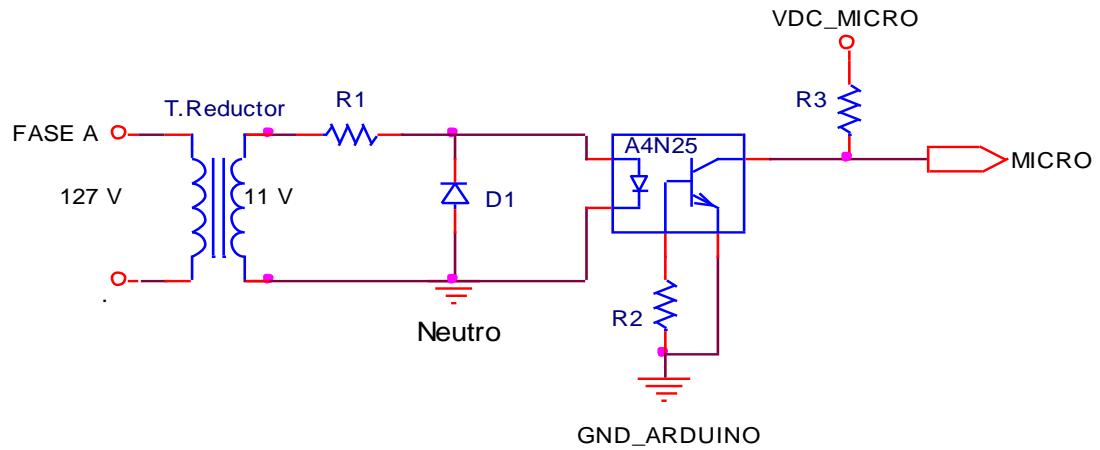
La placa Arduino Micro recibe las señales correspondientes a los cruces por cero de las tensiones de fase a la entrada del rectificador, la señal de la tensión en la salida (sensado), la señal de referencia de tensión y entrega tres señales cuadradas que son acondicionadas para la activación de los SCR's. En la figura 8 se representa el diagrama de bloques de la etapa de mando.

Figura 8. Diagrama bloques etapa de mando



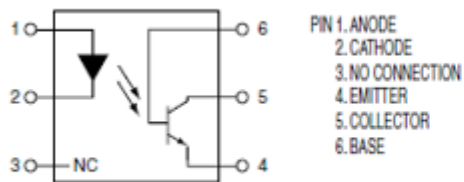
2.1.1 Detector de cruce por cero: La función principal de este circuito es generar una señal para sincronizar los pulsos de disparo de los SCR's con las tensiones de la red. También tiene como objetivo garantizar el aislamiento necesario entre la señal de la red y el microcontrolador. En la figura 9 se observa el diseño del circuito detector de cruce por cero.

Figura 9. Circuito detector de cruce por cero para la fase A.



Las características más importantes del dispositivo utilizadas en este circuito se mencionan en la figura 10.

Figura 10. Pines y características del 4n25.



Características	
Corriente de Entrada I_f	10 – 60 mA
Corriente de Colector I_c	2 mA
Tiempo de Encendido T_{on}	2 μ s
Tiempo de Apagado T_{off}	2 μ s

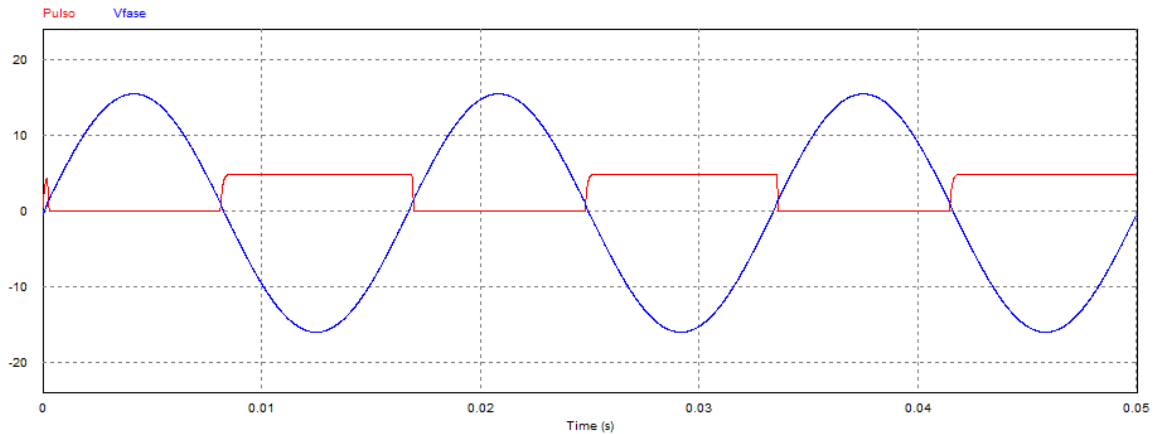
Fuente: Hoja de datos 4N25

Este circuito integrado está compuesto por un led y un fototransistor, cuando circula una señal eléctrica a través del led este se enciende y emite una luz que es percibida por el fototransistor para activar su funcionamiento [10].

Cuando la señal de entrada (tensión de fase) circula por el led el fototransistor es activado solo durante el ciclo positivo, allí $V_{CE} = 0 V$ y la señal de salida es 0 V;

durante el ciclo negativo la señal de salida es $V_C = 5\text{ V}$ formando así una señal cuadrada de 60 Hz (Figura 11).

Figura 11. Señal detector de cruce por cero.



De manera directa también se establece una protección contra el ruido y de aislamiento dentro de las etapas para un caso de falla eléctrica o de mala manipulación de la fuente.

El punto de referencia tomado por el Arduino Micro a partir del cruce por cero se está implementando con la tensión de fase y no con la tensión de línea, para esto se hace un desfase de 30° en la programación porque la salida del rectificador toma la envolvente de la tensión de línea.

Se utilizaron transformadores de 127/11 V para disminuir la tensión en cada una de las fases de los tres circuitos, con el fin de no tener una tensión de fase en la tarjeta.

Para la selección de los parámetros del circuito se realizaron los siguientes cálculos:

$$R1 = \frac{V_{fase(pico)}}{I_f} \quad (18)$$

$$R1 = \frac{11 \sqrt{2}}{15,6 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = \frac{+5V_{ARDUINO}}{I_c}$$

$$R2 = \frac{5}{0,33 \text{ mA}} = 15 \text{ k}\Omega \quad (19)$$

$$R3 = 100 \text{ k}\Omega$$

La R3 del circuito detector de cruce por cero se determinó por medio de simulación, otorgando un mejor comportamiento en la misma.

2.1.2 Controlador: Este es el responsable de controlar y gestionar las acciones para que el rectificador opere de manera que cumpla con las especificaciones establecidas. La variable que se controla es la tensión de salida que puede ser 200 V o 220 V.

Para tal propósito se define un control proporcional, utilizando el método de disparo por pulsos porque este brinda una velocidad de conmutación alta y baja disipación de potencia en la unión puerta-cátodo. Este método se empleó para disparar el SCR y conjunto con este se diseñó una etapa de acoplamiento para la señal de mando [4].

Figura 12. Microcontrolador Arduino Micro

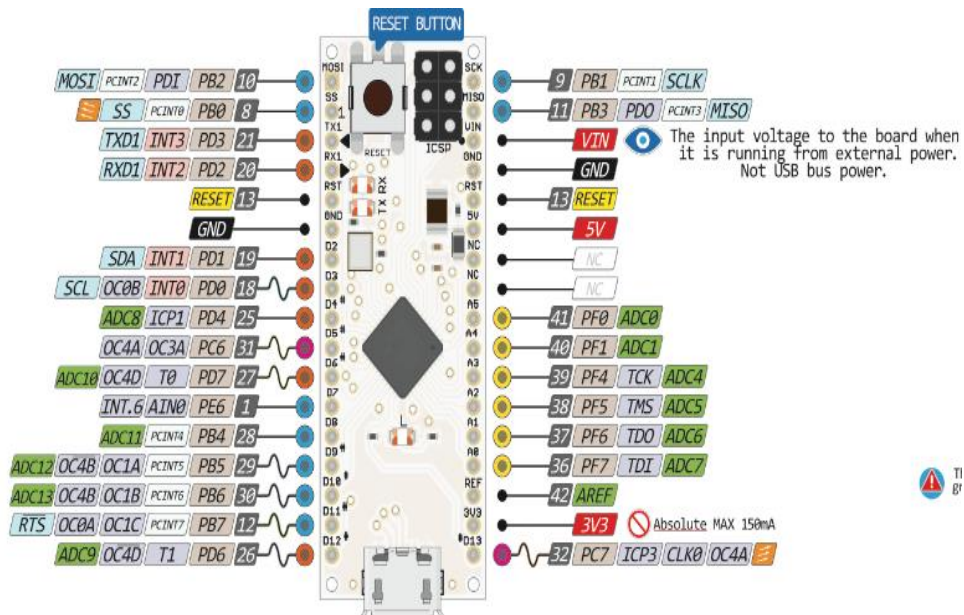


Fuente. Hoja de datos Arduino Micro [5].

El Arduino Micro es una tarjeta con un microcontrolador ATmega32u4. Cuenta con 20 pines digitales que se pueden configurar como entrada/salida de los cuales 7 se pueden usar como salidas PWM y 12 como entradas analógicas, un cristal oscilador de 16 MHz, conexión micro USB, un ICSP (In Circuit Serial Programming) que permite programar el BootLoader del microcontrolador para cargar los programas que se creen en la IDE sin tener que usar programadores externos y un botón de reset [5].

La descripción de los pines en la tarjeta Arduino Micro se pueden observar en la Figura 13.

Figura 13. Pines de la tarjeta Arduino Micro



Fuente: Hoja de datos Arduino Micro [5].

En la tabla 1 se muestran las especificaciones técnicas del microcontrolador

Tabla 1. Especificaciones técnicas del controlador

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	VALOR
Tensión de operación	5 V
Tensión de entrada (recomendado)	7-12 V
Tensión de entrada (límites)	6-10 V
Pines digitales I/O	20
Canales PWM	7
Canales de entrada analógica	12
Corriente DC para pines I/O	40 mA
Corriente DC para pin de 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 kB y 4 kB
SRAM	2.5 kB
EEPROM	1 kB
Velocidad de reloj	16 MHz

Los pines utilizados para el control de la fuente y su propósito se pueden detallar en la tabla 2.

Tabla 2. Asignación de pines en el microcontrolador

PINES ARDUINO- LCD				
Pin físico	Clasificación	Pin puerto	Designación	Función
8	PCINT0	SS	Salida	D4 LCD
9	PCINT1	SCK	Salida	D5 LCD
10	PCINT2	MOSI	Salida	D6 LCD
11	PCINT3	MISO	Salida	D7 LCD
40	Pin análogo	A4	Salida	ENABLE LCD
41	Pin análogo	A5	Salida	RS LCD
PINES ARDUINO-ETAPA CRUCE POR CERO Y ETAPA DE MANDO				
Pin físico	Clasificación	Pin puerto	Designación	Función

PINES ARDUINO-ETAPA CRUCE POR CERO Y ETAPA DE MANDO				
Pin físico	Clasificación	Pin puerto	Designación	Función
18	Pin de interrupción	D3	Salida	PULSO 1
19	Pin de interrupción	D2	Entrada	FASE C
20	Pin de interrupción	RX1	Entrada	FASE B
21	Pin de interrupción	TX1	Entrada	FASE A
30	Pin análogo	D10	Salida	PULSO 3
31	Pin análogo-digital	D5	Salida	PULSO 2
PINES ARDUINO -ETAPA DE SENSADO				
Pin físico	Clasificación	Pin puerto	Designación	Función
37	Pin análogo	A1	Entrada	SENSADO DE VOLTAJE
39	Pin análogo	A3	Entrada	SET DE VOLTAJE

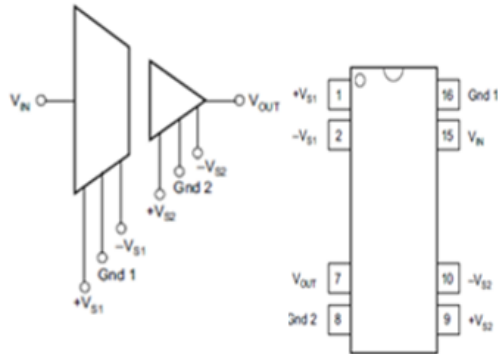
Para la alimentación requerida para el Arduino se construyó una fuente de alimentación de 9 V, que está dentro del rango que recomienda el fabricante para alimentación externa.

2.1.3 Circuito de sensado de tensión: Es necesario medir la tensión a la salida del rectificador para establecer si está cumpliendo con los parámetros requeridos. Para este fin se implementó un circuito de sensado conformado por un divisor de tensión resistivo en la salida, para reducir el nivel de tensión a un valor permisible para el Arduino Micro.

La señal de tensión tomada del divisor no se puede llevar de manera directa al Arduino por lo que se utiliza un amplificador de aislamiento ISO 124 que mantiene un aislamiento galvánico entre el circuito de potencia con el de control.

El ISO 124 es un amplificador de aislamiento que opera como un circuito abierto. Para su funcionamiento requiere de dos fuentes duales de $\pm 15\text{ V}$ con tierras independientes. En la Figura 14 se presentan algunas características del ISO124.

Figura 14. Características del ISO 124

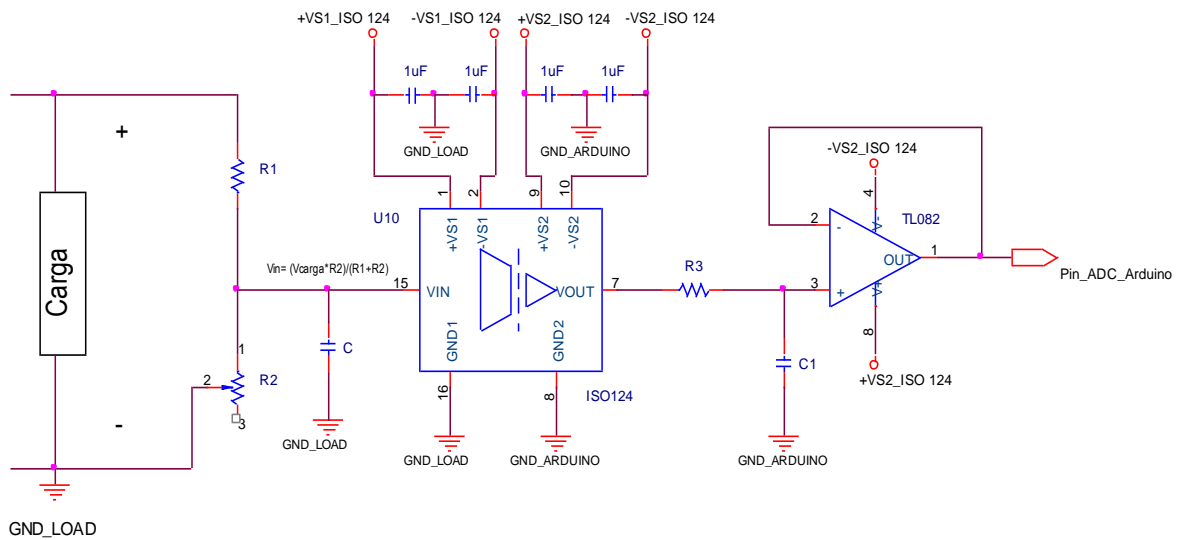


CARACTERÍSTICAS	
Aislamiento (60 Hz)	1500 V _{rms}
Tensión alimentación V _{S1} , V _{S2}	$\pm 15\text{ V}$
Tensión de entrada/salida	$\pm 12,5\text{ V}$
Ganancia	1

Fuente: Hoja de datos ISO 124

El circuito implementado para el sensado de la tensión en la carga se muestra en la figura 15, por recomendación del fabricante del ISO 124 de cada pin de la fuente de alimentación a tierra debe llevar un condensador de tantalio de 1 μF ubicado lo más cerca posible del dispositivo [6].

Figura 15. Circuito de sensado de tensión

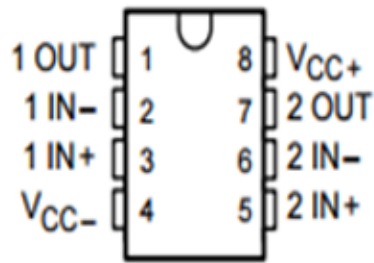


La tensión en la salida del rectificador se reduce 100 veces para la lectura de su valor promedio en Arduino:

$$V_{IN} = \frac{V_{CARGA} * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_{CARGA}}{100} \quad (20)$$

En esta etapa se implementó un filtro pasabajas para reducir la componente ondulatoria de la señal de salida con el propósito de mejorar la lectura y el procesamiento de datos de dicha señal. Para este circuito se utilizó un amplificador operacional TL082 , un capacitor de 10 μF y una resistencia de 10 $k\Omega$, en la figura 16 se muestran algunas características del amplificador TL082 .

Figura 16. Características del amplificador TL082



CARACTERÍSTICAS	
Velocidad de respuesta	13 V/ us
Rango de Tensión de entrada	± 15 V
Corriente de suministro	5,6 mA

Fuente: Hoja de datos TL082

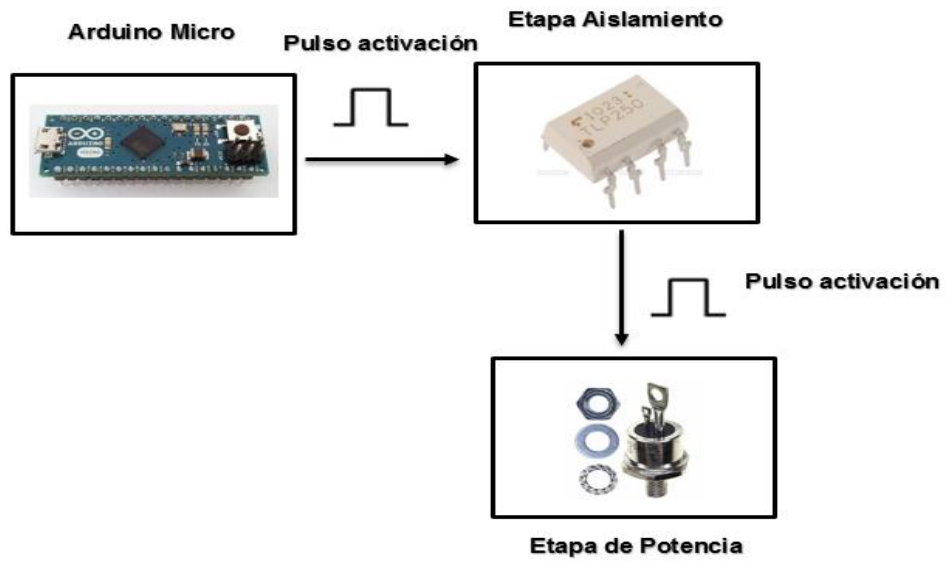
2.2 ETAPA DE AISLAMIENTO

Teniendo en cuenta condiciones de seguridad eléctrica, debido al manejo de altas corrientes y tensiones, se implementa una etapa de aislamiento para la protección del sistema de control utilizando un opto driver (TLP250) que permite aislar eléctricamente la etapa de potencia y control por medio de un acoplamiento óptico, en caso de una falla eléctrica en el circuito de potencia. Se utilizan 3 opto driver TLP250 uno para cada SCR.

El fabricante recomienda que para no perder la propiedad de conmutación se utilice un capacitor de $0.1 \mu F$ que se coloca entre los pines 5 y 8 [7].

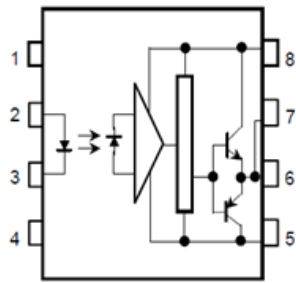
Para permitir la activación del TLP250 se utilizan resistencias en la entrada (resistencia entre el Arduino y el TLP250) para limitar la corriente de acuerdo a los valores establecidos por el fabricante. De igual forma en la salida (entre el TLP250 y la puerta del SCR) del opto para limitar la corriente (I_{GT}) de activación del SCR.

Figura 17. Diagrama de bloques etapa de aislamiento



Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 17 el Arduino Micro genera un pulso para activar la puerta del SCR. Las consideraciones a tener en cuenta son: la corriente de activación del SCR, la tensión de alimentación del TLP250 y no definir la misma tierra para la etapa de control y potencia porque se perdería la función de aislamiento realizada por el opto. En la figura 18 se mencionan algunas características del opto acoplador.

Figura 18. Pines y características del TLP250:



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

CARACTERISTICAS		
Corriente de entrada	I_f	7 – 10 mA
Tensión de alimentación	V_{CC}	10 – 35 V
Corriente de salida	I_o	± 1.5 A (max)
Tiempo de conmutación	$\frac{t_{pLH}}{t_{pHL}}$	1.5 us (max)

Fuente: Hoja de datos TLP250

El valor de las resistencias utilizadas se calculó de la siguiente forma:

$$R_{entrada} = \frac{V_{arduino}}{I_f} \quad (21)$$

$$R_{entrada} = \frac{5 V}{8,93 mA} = 560 \Omega$$

$$R_g = \frac{V_{salida TLP} - V_{GT}}{I_{GT}} \quad (22)$$

$$R_g = \frac{25 - 2,5}{250 mA} = 90 \Omega$$

Donde:

$V_{arduino}$: Tensión del Arduino

I_f : Corriente de entrada TLP250

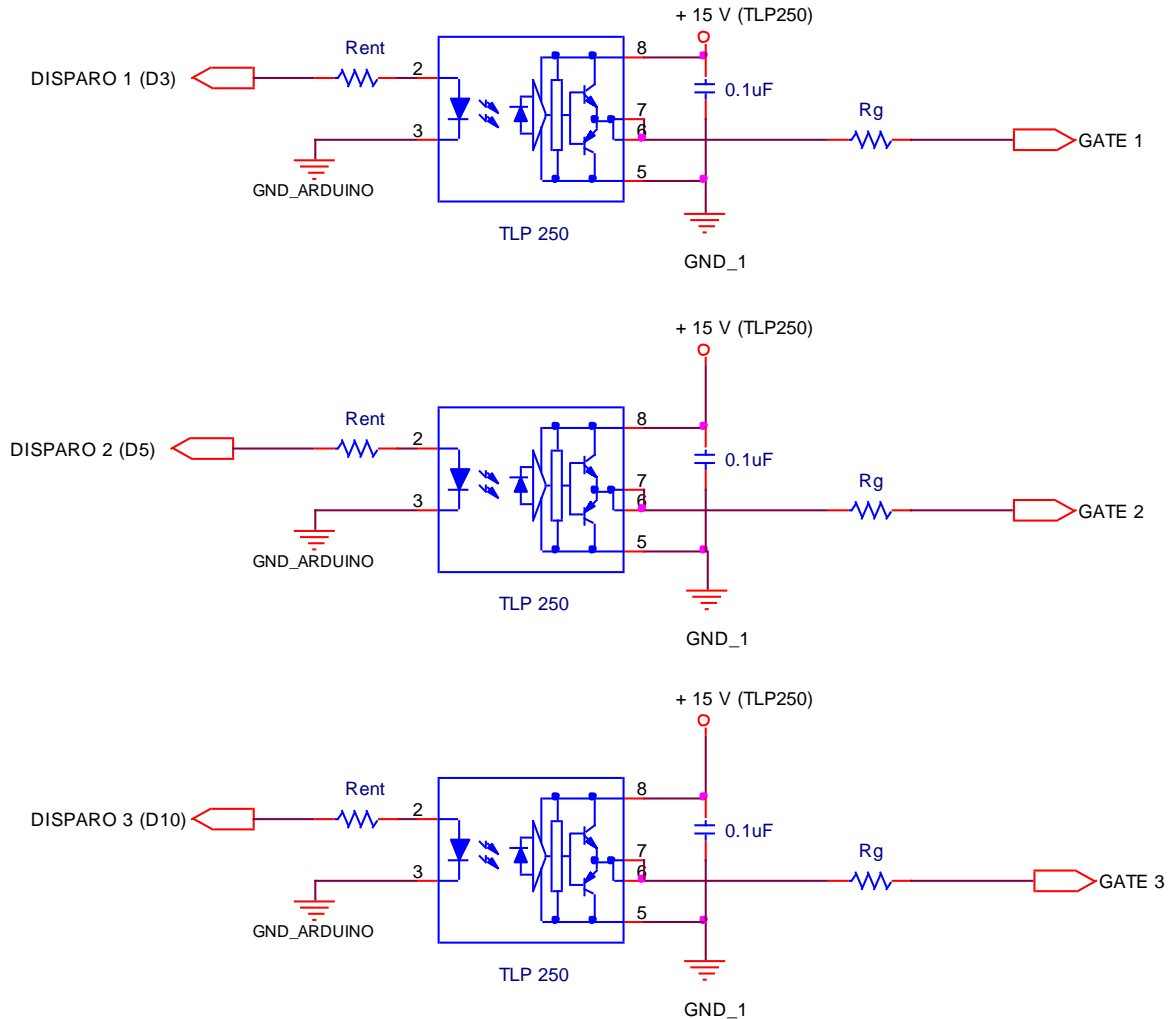
$V_{salida TLP}$: Tensión de salida del TLP250

V_{GT} = Tensión de la puerta de CC necesaria para disparar el SCR

I_{GT} = Corriente de la puerta de CC necesaria para disparar el SCR

Para la alimentación de los opto driver se diseñó una fuente de continua de 15 V. En la figura 19 se puede observar el circuito implementado para esta etapa.

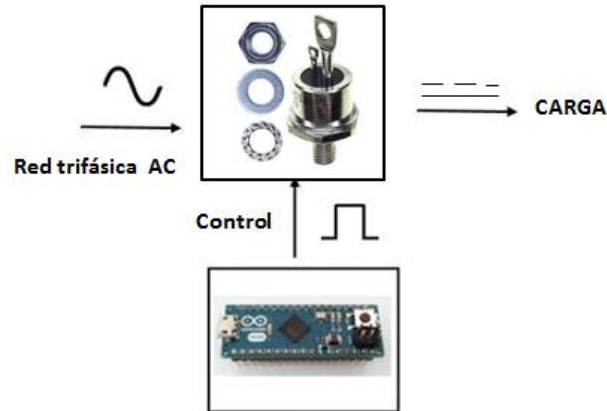
Figura 19. Circuito etapa de aislamiento



2.3 ETAPA DE POTENCIA

Esta etapa comprende los semiconductores utilizados para el rectificador semicontrolado, SCR's y diodos. En la figura 20 se presenta el diagrama de bloques de la etapa de potencia.

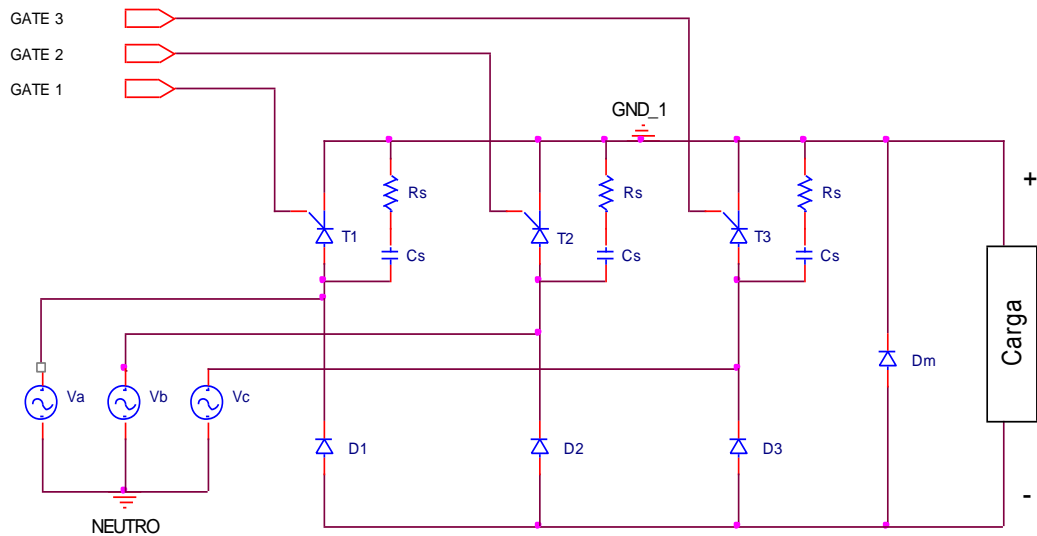
Figura 20. Diagrama de bloques etapa de potencia:



El circuito de la figura 21 describe la topología del rectificador implementado. Cuenta con tres SCR's y tres diodos. Los SCR's son activados con un pulso generado por el Arduino Micro permitiendo su conducción y rectificando las señales de la red trifásica de la entrada para alimentar una carga DC en la salida.

El ángulo de disparo de los SCR's cambia para variar la tensión que es entregada a la carga de acuerdo a la referencia establecida por el selector, debido a que el valor medio de la tensión de salida depende de este ángulo.

Figura 21. Circuito de Potencia




2.3.1 Características principales de los SCR's: Teniendo en cuenta el análisis que se ha realizado de los semiconductores de potencia utilizados para rectificación, se seleccionaron los SCR's por las características que manejan de tensión, corriente y frecuencia de trabajo [8].

Las principales características tenidas en cuenta para su selección son las siguientes:

- Son los semiconductores más adecuados cuando se requiere manejar altas tensiones y corrientes muy grandes [8].
- La potencia de control es baja y tienen pocas pérdidas [8].
- La frecuencia de funcionamiento es baja (para el proyecto este factor no influye debido a que se trabaja a una frecuencia de 60 Hz) [8].

En la figura 22 se mencionan algunas características del SCR seleccionado.

Figura 22. Pines y características del SCR:



CARACTERISTICAS		
Máxima corriente de trabajo	I_T	50 A
Corriente directa de pico no repetitivo	I_{TSM}	80 A
Máximo pico repetitivo y tensión de bloqueo	$\frac{V_{DRM}}{V_{RRM}}$	1200 V
Corriente DC de disparo de puerta	I_{GT}	50 – 250 mA
Tensión DC de disparo de puerta	V_{GT}	2.5 – 3.5 V
Máxima tasa crítica de ascenso	$\frac{dV}{dt}$	200 $\frac{V}{\mu s}$
Máxima velocidad de aumento de la corriente convertida	$\frac{dI}{dt}$	200 $\frac{A}{\mu s}$

Fuente. Hoja de datos SCR 50RIA 120

La selección de los SCR's se realizó teniendo en cuenta el valor de corriente especificado en el alcance del proyecto. La corriente máxima de salida es de 20 A

y comercialmente en este rango se encuentran SCR's de 25 A y 50 A. Se selecciona el limite superior por razones de protección y utilidad.

2.3.2 Características principales de los diodos: Los diodos de potencia se caracterizan por:

- En estado de conducción, son capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión [9].
- En sentido inverso, son capaces de soportar una fuerte tensión negativa de ánodo con una pequeña intensidad de fugas [9].

En la figura 23 se mencionan algunas características de los diodos de potencia seleccionados.

Figura 23. Pines y características del Diodo de potencia:



CARACTERISTICAS		
Maxima corriente de trabajo	I_f	50 A
Máxima tensión de trabajo	V_{RRM}	1200 V

Para la selección de los diodos de potencia se tuvieron en cuenta las mismas consideraciones de los SCR's y por tal razón cuentan con las mismas características.

2.4 FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Se construyeron tres fuentes de alimentación para la tarjeta, una fuente regulada de $15V_{DC}$ para alimentar los TLP250, una fuente regulada dual de $\pm 15V_{DC}$ para alimentar el ISO124 (+VS1,-VS1), y por último una fuente dual regulada con

salidas de $\pm 15V_{DC}$ y $9V_{DC}$ para la alimentación del ISO124 (+VS2,-VS2) y el microcontrolador respectivamente. A diferencia de las dos primeras fuentes cabe resaltar que esta última comparte la tierra.

Para la alimentación de estas fuentes se utilizó un transformador con tres devanados aislados, con entrada de 127 V y las tres salidas necesarias de alimentación. El esquema del transformador se muestra en la figura 24.

Figura 24. Transformador de alimentación de fuentes

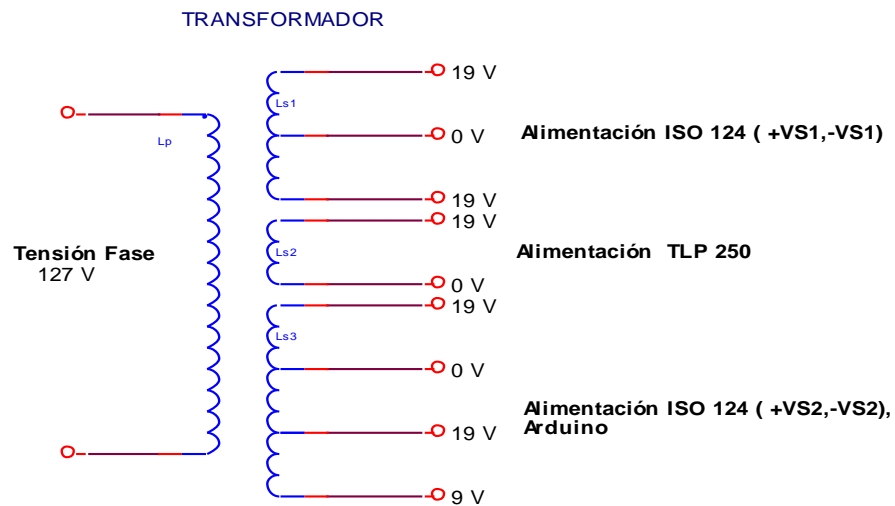


Figura 25. Fuente de alimentación para TLP 250

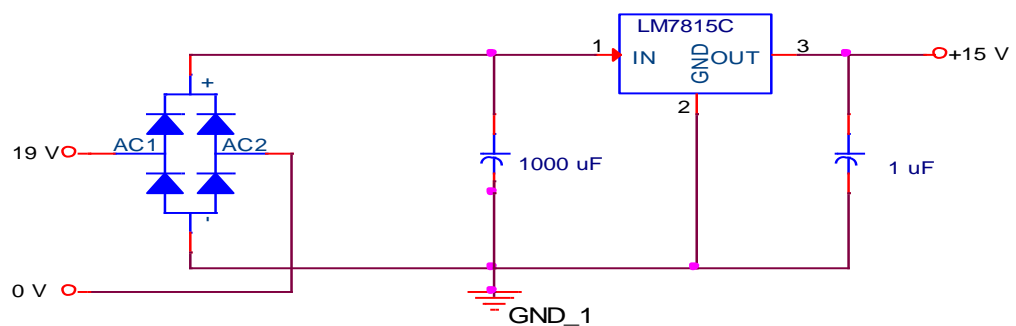


Figura 26. Fuente de alimentación ISO 124 (+VS1,-VS1)

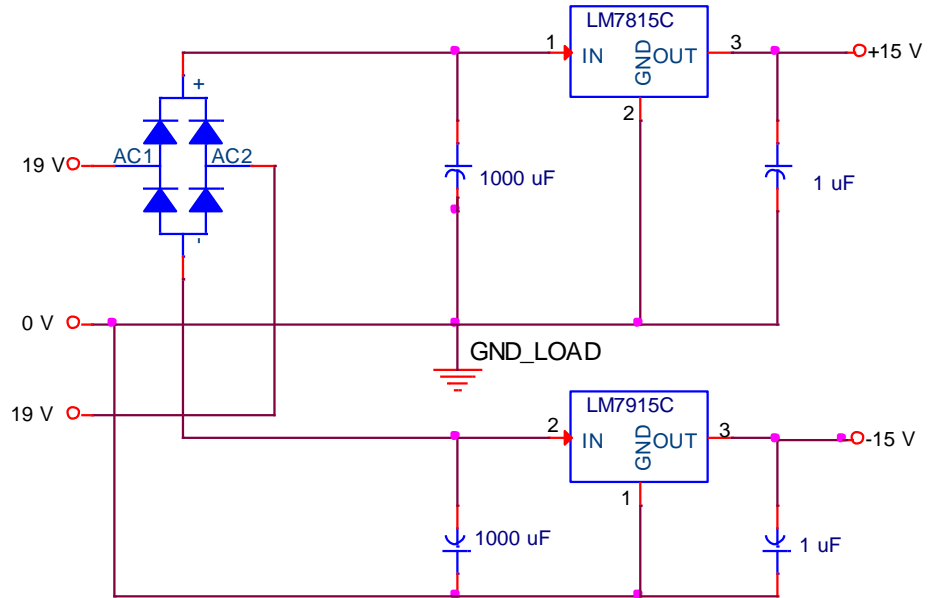
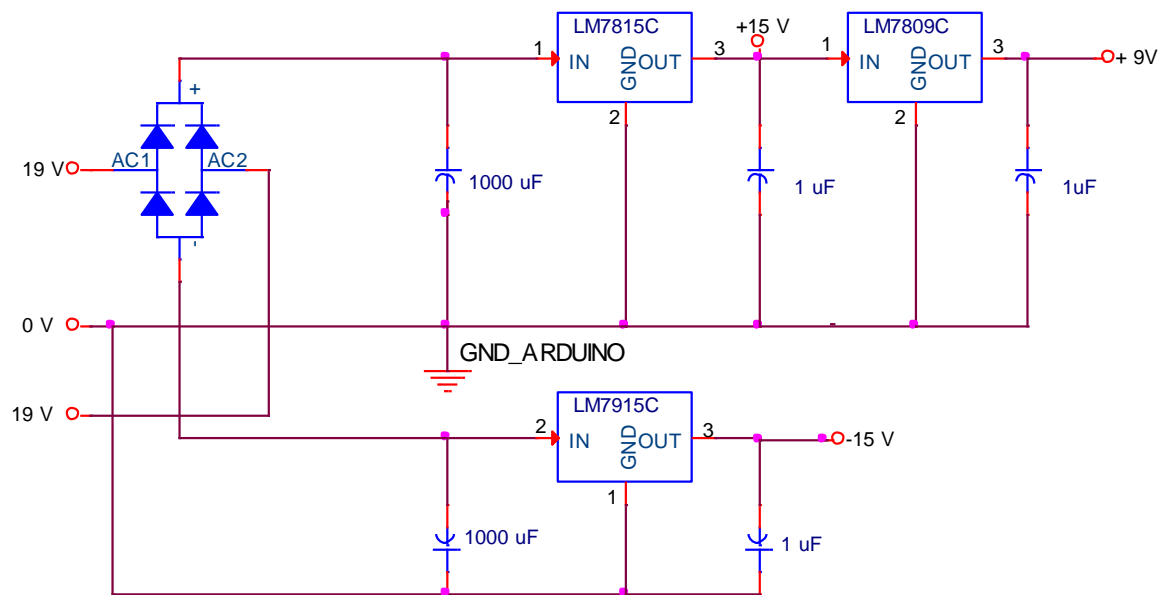


Figura 27. Fuente de alimentación ISO 124 (+VS2,-VS2) y Arduino Micro



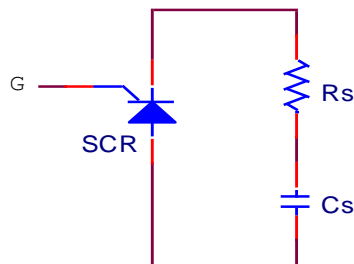
2.5 PROTECCIONES

Los dispositivos semiconductores requieren protección al igual que los circuitos dedicados al control, para ello se adoptaron una serie de protecciones que buscan salvaguardar el funcionamiento, la vida útil del conjunto de dispositivos usados en el proyecto y la seguridad de la persona que opere la fuente.

2.5.1 Protección SCR's: Se deben acatar las condiciones de operación que establece el fabricante, esto es primordial para garantizar un correcto funcionamiento. Durante el funcionamiento de los SCR's se pueden presentar sobretensiones producto de fenómenos transitorios en su proceso de encendido y apagado que pueden generar daños a los semiconductores o una operación incorrecta.

Para proteger a los SCR's se utilizó una red Snubber (Figura 28), que consiste en un circuito RC conectado en paralelo entre el ánodo y el cátodo del tiristor cuya función principal es controlar su tensión durante el proceso de encendido y apagado, además ayuda a mantener a la derivada de tensión por debajo de un determinado valor límite. [12]

Figura 28. Esquemático Red Snubber



Para la selección de los parámetros de la red Snubber se deben tener en cuenta múltiples factores como la derivada de tensión propia del SCR, la tensión entre ánodo-cátodo y el tipo de carga que alimenta el tiristor.

Los valores seleccionados para R_S y C_S fueron tomados de redes Snubber estándares que han sido desarrolladas y probadas con resultados favorables.

$$R_S = 100 \Omega$$

$$C_S = 0.47 \mu\text{F}$$

2.5.2 Protección contra sobrecorriente: Para proteger la integridad de la persona que opere la fuente DC y los dispositivos que la componen se dispuso de un Breaker o interruptor automático. Este dispositivo de protección interrumpe el suministro de energía cuando circula una corriente por encima del valor seleccionado para este o cuando se presente un cortocircuito.

En la selección del interruptor automático se tuvo en cuenta la corriente que puede suministrar la fuente de DC (20 A). Cada banco de trabajo del laboratorio dispone de una protección de 32 A en el tablero general del laboratorio por lo que la protección que debe llevar la fuente debe ser de un valor inferior a los 32 A.

Con este valor de corriente y la curva de tiempo inverso que brinda el fabricante (Anexo A, Figura A6) la protección seleccionada es de 25 A, esta selección asegura que en caso de falla actué primero la protección de la fuente y luego la del banco de trabajo. Tanto la protección del banco como la de la fuente son de la misma marca y tipo. En la figura 29 se mencionan las características más relevantes del interruptor automático seleccionado.

Figura 29. Interruptor automático

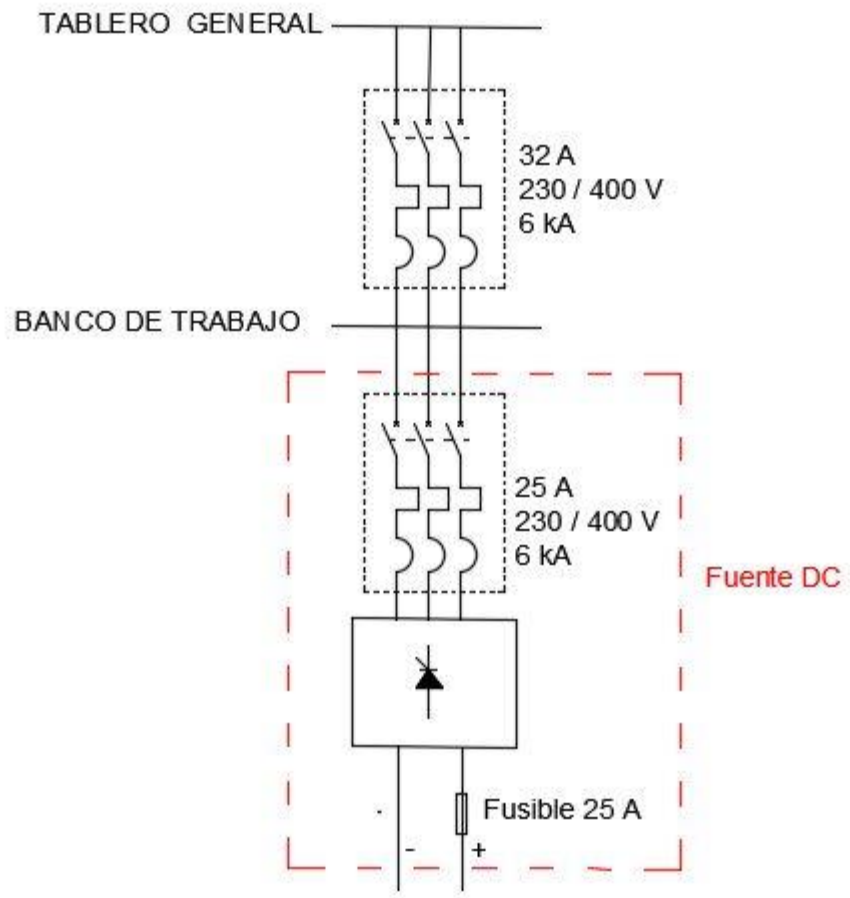


CARACTERÍSTICAS	
Referencia	BKN C25
Polos	3
Tipo de curva	C
Corriente Nominal	25 A
Capacidad interruptiva	6 kA a 230/ 400 V _{AC}
Tipo de disparo	Termo magnético
Endurancia eléctrica	6000 operaciones

Fuente. Catálogo de productos LS IS

2.5.3 Fusibles: Para asegurar el cumplimiento de los parámetros del proyecto en cuanto a la especificación de corriente y brindar una protección en el lado de continua, la fuente cuenta con un fusible de 25 A. La corriente que debe entregar la fuente es 20 A pero previendo picos de corriente la selección del fusible es de 25 A. El esquema general de protecciones se muestra en la figura 30.

Figura 30. Esquema general de protecciones



3. DISEÑO Y ELABORACIÓN ALGORITMO DE CONTROL

Este capítulo presenta las etapas definidas para la elaboración del algoritmo que permitirá cumplir con las especificaciones establecidas que debe tener la fuente; en este caso se realizará un control para la variable de la tensión de salida en la carga.

El algoritmo de control de la fuente DC se comporta de la siguiente manera: una vez se enciende la fuente con el interruptor el circuito detector de cruce por cero envía una señal de pulso al Arduino Micro cada vez que la onda de tensión se hace cero; el Arduino compara estos pulsos para determinar la secuencia de la red y realiza los disparos para la activación de los SCR's dependiendo del valor de tensión que se ingrese con el selector. Simultáneamente en la carga se toma la señal de tensión y se ingresa a un puerto ADC² del Arduino para que realice las operaciones correspondientes y ajuste el valor medido con el set de entrada que establezca el usuario.

La fuente cuenta con una pantalla LCD de 4 bits donde se visualiza el valor de tensión en la carga y el set de voltaje ingresado.

3.1 DETECCIÓN DE SECUENCIA

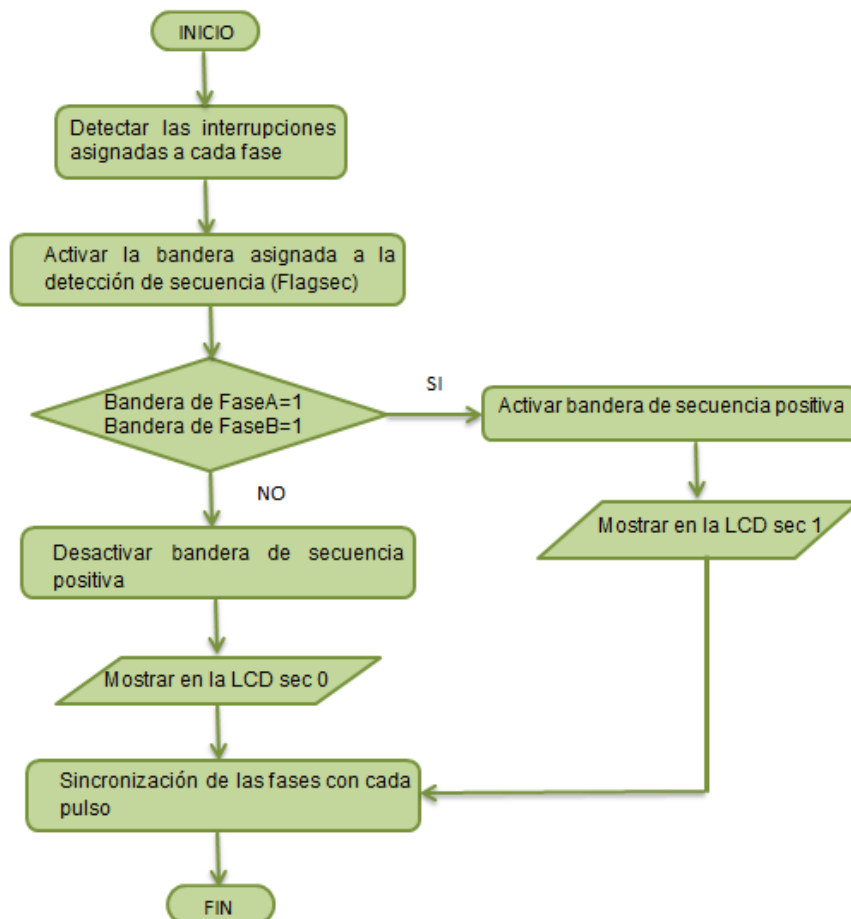
Cada circuito de detección de cruce por cero de las fases activa una interrupción del Arduino, la señal de la fase A es tomada como referencia para hacer la detección de secuencia; cuando se activa la interrupción de la fase A esta se compara con el estado de la fase B, si A y B están en alto entonces la bandera de

² Analog Digital Converter

secuencia se pone en alto y la secuencia es positiva, si A está en alto y B en bajo la bandera de secuencia se pone en bajo y la secuencia es negativa.

Si alguna de las fases no está conectada no se puede iniciar la detección de secuencia ni los pulsos de disparo y la LCD arroja el mensaje "BUSCA SECUENCIA". La figura 31 describe el diagrama de flujo correspondiente a la detección de secuencia.

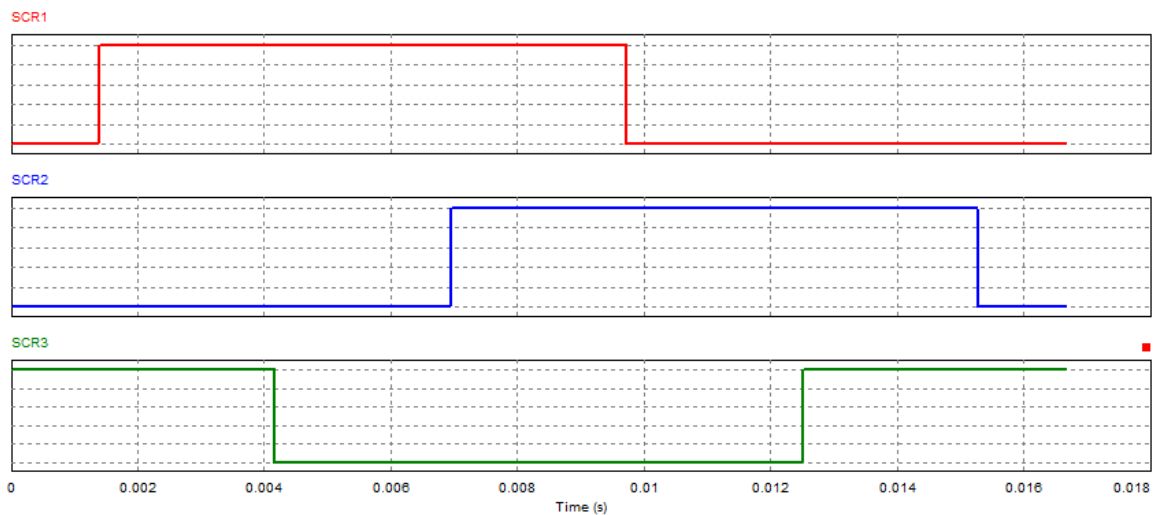
Figura 31. Diagrama de flujo detección de secuencia



3.2 GENERACIÓN DE PULSOS

Una vez determinada la secuencia de la red se generan los pulsos para la activación de los SCR's. Cada SCR's puede ser disparado dentro determinado periodo de tiempo como lo muestra la figura 32.

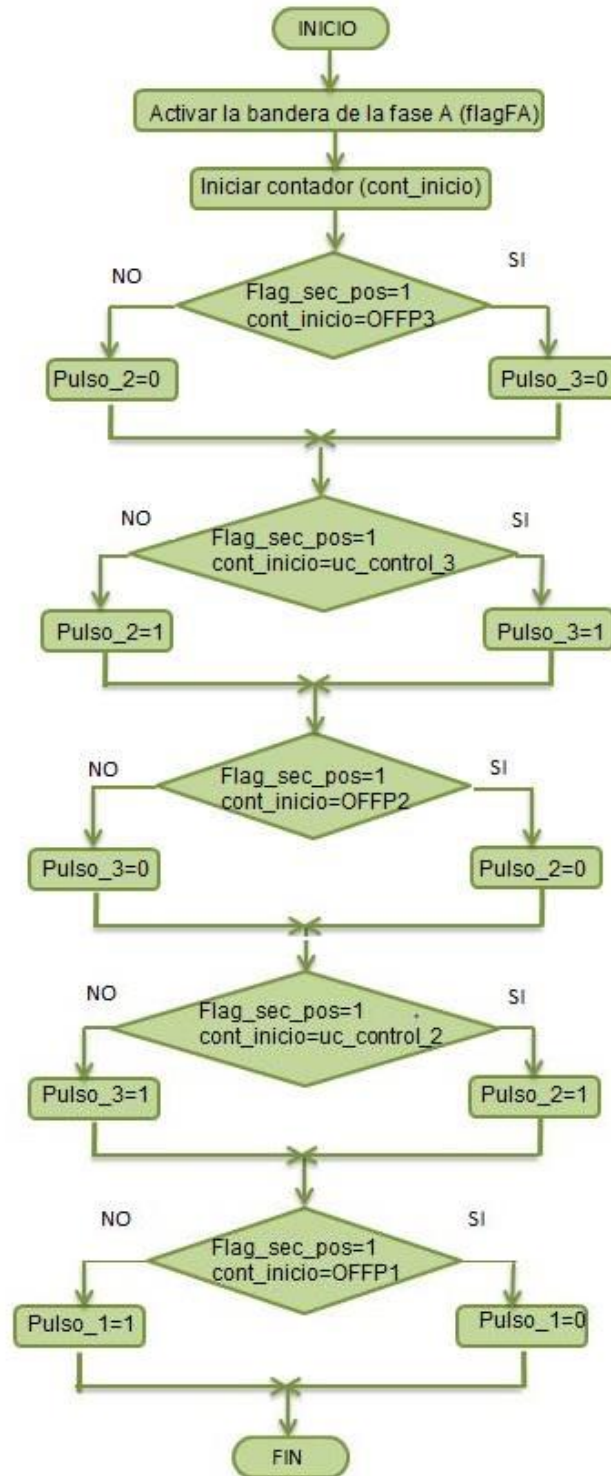
Figura 32. Tiempos de conducción de los SCR's



Se desactivan las interrupciones de la fase B y C mientras la interrupción de la fase A sigue activa para lanzar un contador que permite llevar la referencia para el inicio y fin de los pulsos.

Se creó una base de tiempo para un periodo de 60 Hz o 16.666 ms a partir de esto se sincronizan los inicios y finales de cada pulso de activación. La figura 33 describe el diagrama de flujo correspondiente a la generación de pulsos.

Figura 33. Diagrama de flujo generación de pulsos

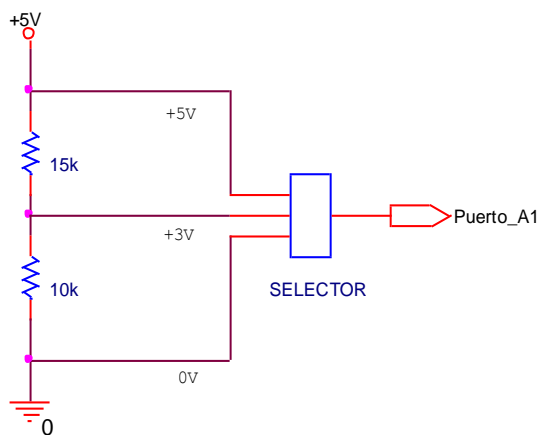


3.3 CONTROL TENSIÓN

El metodo de control usado es un control proporcional con una ganancia que se ajustó de manera práctica hasta encontrar el valor con el que mejor se comportó el sistema.

Con el selector se introduce la señal de referencia para la tensión de salida, cuando la señal es 5 V el set programado es 220 V, 3 V el set es 0 V y 0 V el set es de 200 V (Ver figura 34).

Figura 34. Selector de señal de referencia



La variable a controlar es la tensión la cual se ajusta variando el angulo de disparo ,este proceso se realiza de la siguiente manera:

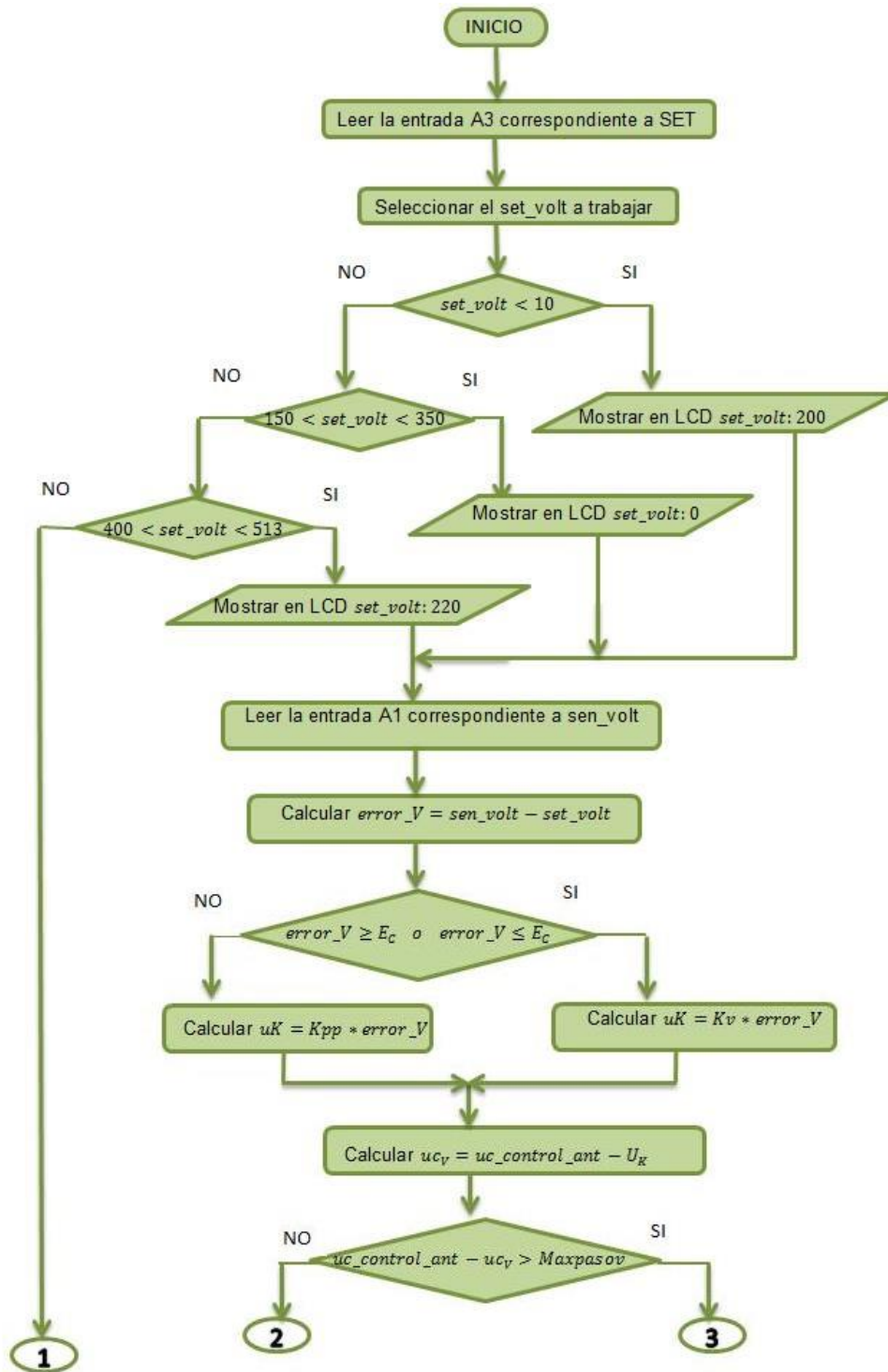
Se detecta la secuencia, luego como se menciona en la sección 3.2 se generan los pulsos con una base de tiempo para sincronizar los inicios y finales de cada pulso para activar los SCR's.

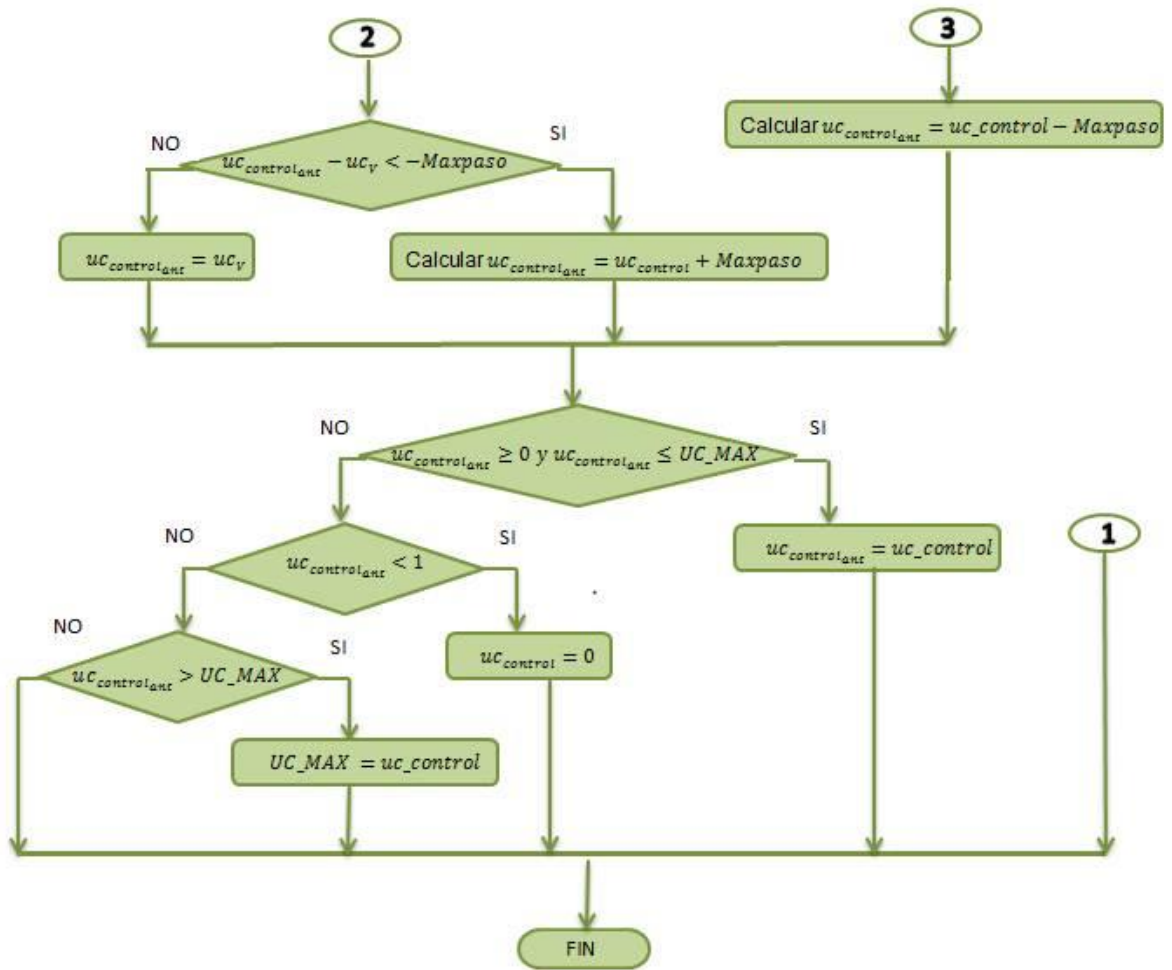
La señal de tensión de la carga pasa por el filtro pasabajas para ingresar al puerto A1 correspondiente al ADC6 del Arduino, se hace un promedio de la lectura y de

acuerdo al set de tensión establecido se genera un error entre el valor de referencia y el valor tomado por la lectura que se multiplica por una ganancia para ajustar el valor del ángulo que permita obtener a la salida la tensión deseada y llegar a la referencia programada lo más rápido posible.

La figura 35 describe el diagrama de flujo correspondiente al control de tensión. Los pines mencionados que utiliza el Arduino en el diagrama de flujo se encuentran definidos en la página 26.

Figura 35. Diagrama de flujo control de tensión





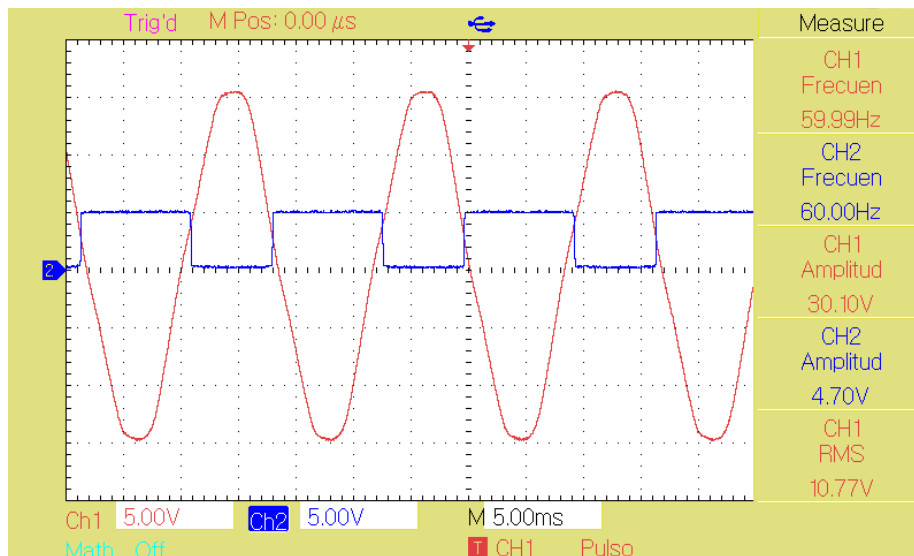
4. PRUEBAS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al realizar pruebas experimentales en el laboratorio de máquinas eléctricas. La fuente trabajó con dos tipos de carga: resistiva y un motor DC. Se abordaron pruebas para determinar el correcto funcionamiento de la fuente.

4.1 CRUCE POR CERO Y DETECCIÓN DE SECUENCIA

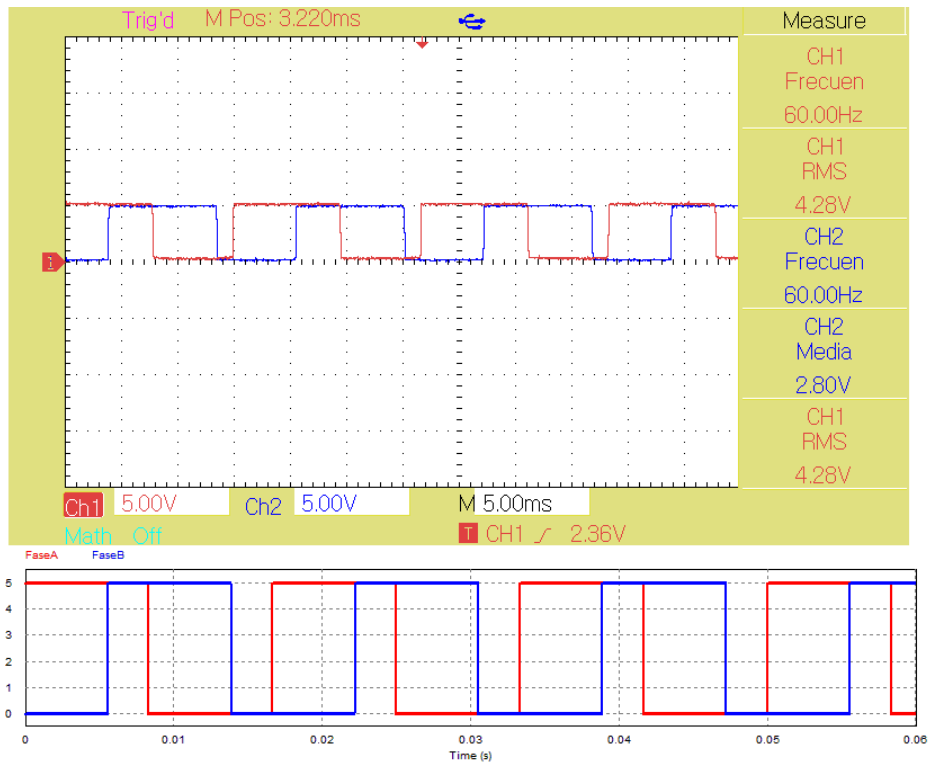
La señal del cruce por cero medida en la fase A se observa en la figura 36 y coincide con la señal mostrada en la sección 2.1.1 (Figura 11).

Figura 36. Señal de detector de cruce por cero de la fase A



En la figura 37 se observan las señales tomadas de los cruces por cero de dos fases que indican la selección de secuencia. Cuando la fase A (CH1) cambia de bajo-alto la fase B (CH2) está en bajo entonces la secuencia es positiva.

Figura 37. Medición y simulación de señal de cruce por cero de la fase A y fase B

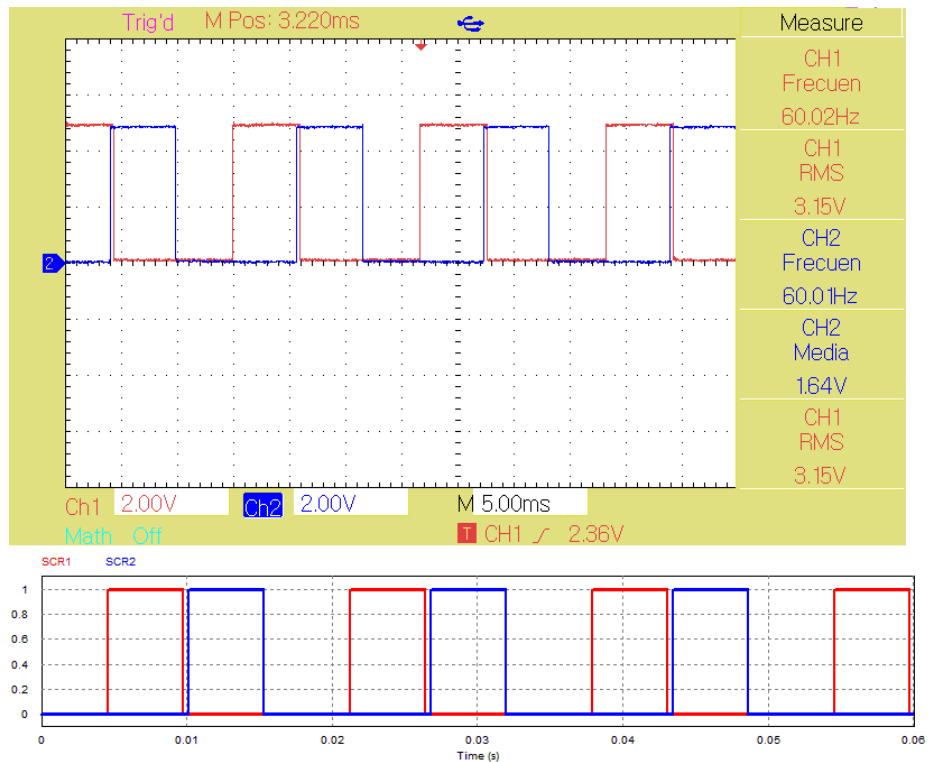


4.2 GENERACIÓN DE PULSOS

Como ya se ha explicado anteriormente los pulsos generados para la activación de los SCR's trabajan de forma programada dependiendo la secuencia detectada en la red. Estos deben estar desfasados 120° , el ángulo de disparo está directamente relacionado con la tensión seleccionada para la salida.

En la figura 38 se muestran los pulsos T1 y T2 generados para una tensión seleccionada de 200 V correspondiente a un ángulo de disparo $\alpha = 69.5^\circ$.

Figura 38. Medición y simulación de pulsos generados con secuencia positiva.



4.3 SENSADO Y CONTROL DE TENSIÓN

Con la implementación del filtro pasabajos en el sensado se logró eliminar gran parte de la componente ondulatoria de la señal rectificada para mejorar su procesamiento. En la figura 39 y 40 se observa la señal antes del filtro y después del filtro respectivamente. La señal es medida en el divisor de tensión con carga resistiva.

Figura 39. Señal de tensión antes del filtro pasabajos

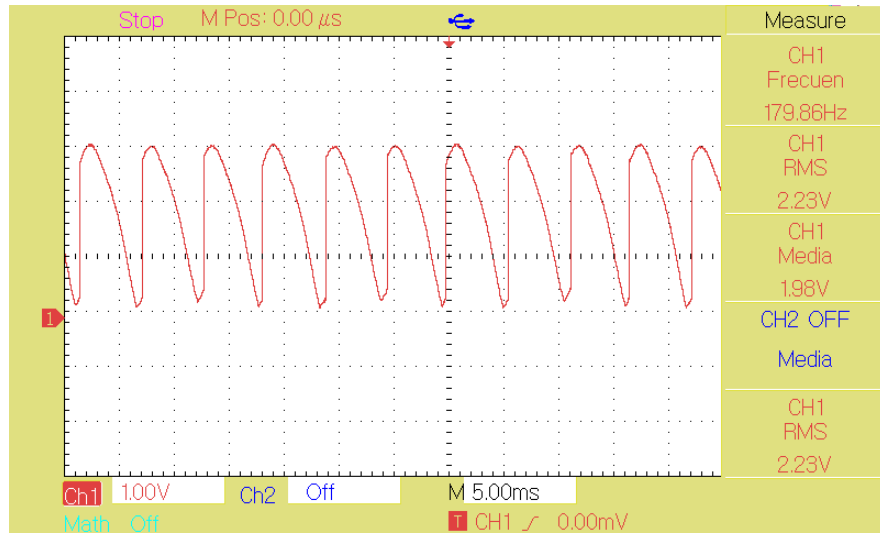
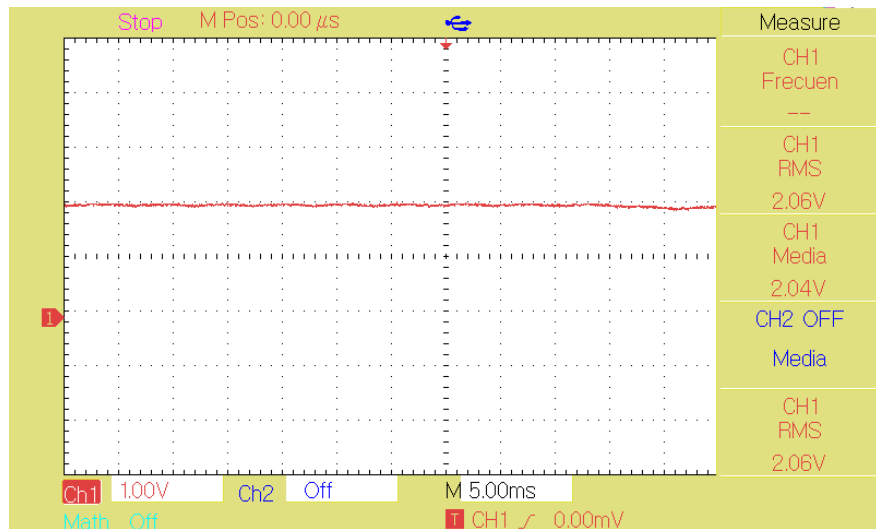


Figura 40. Señal de tensión después del filtro pasabajos



Se realizó la prueba correspondiente con carga resistiva (bombillos), obteniendo los resultados esperados con referencia a la simulación. A tensión constante de 200 V (Figura 41) y 220 V (Figura 42), haciendo efectivo el control en las mismas.

Figura 41. Medición y simulación de señal de salida en carga resistiva a 200 V

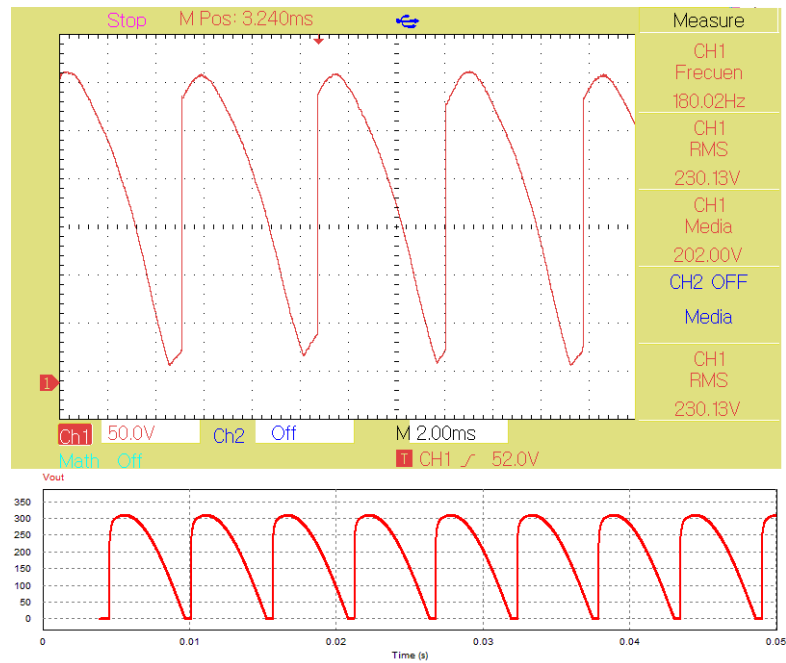
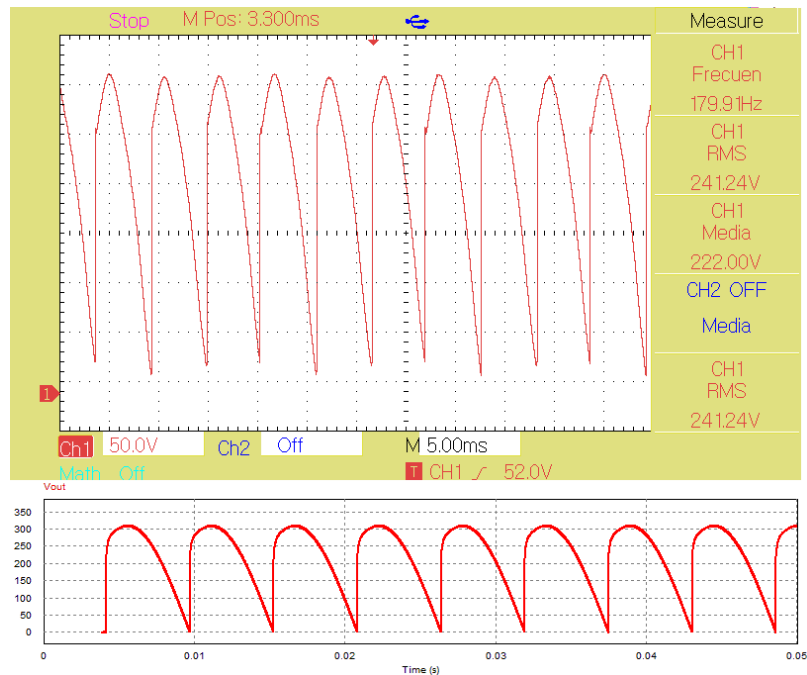
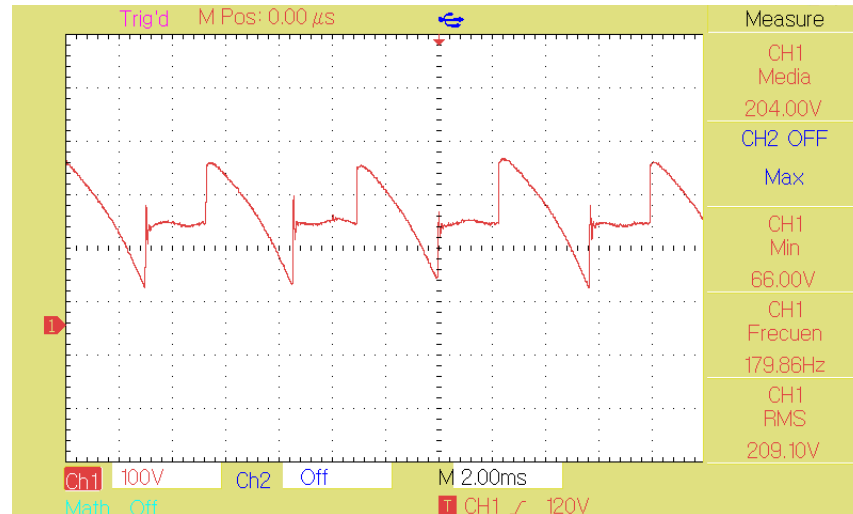


Figura 42. Medición y simulación de señal de salida en carga resistiva a 220 V



Se alimentó un motor de corriente continua con datos de placa: 220 V, 11 A, 60 Hz, utilizado en el laboratorio de máquinas eléctricas para las prácticas usuales de algunas materias ya mencionadas. Se hizo efectivo el control de tensión estando el motor sin carga (Ver figura 43).

Figura 43. Señal de tensión de salida en el motor a 200 V

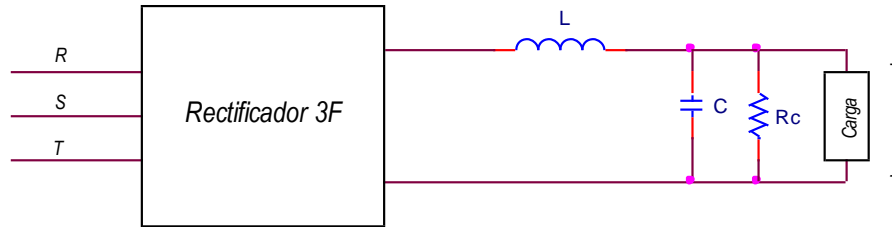


Se realizó una segunda prueba para determinar si la fuente cumple con la especificación de corriente establecida, se alimentó una carga resistiva (bombillos) y el motor, teniendo un consumo de 13,74 A.

4.4 SIMULACIÓN FILTRO LC

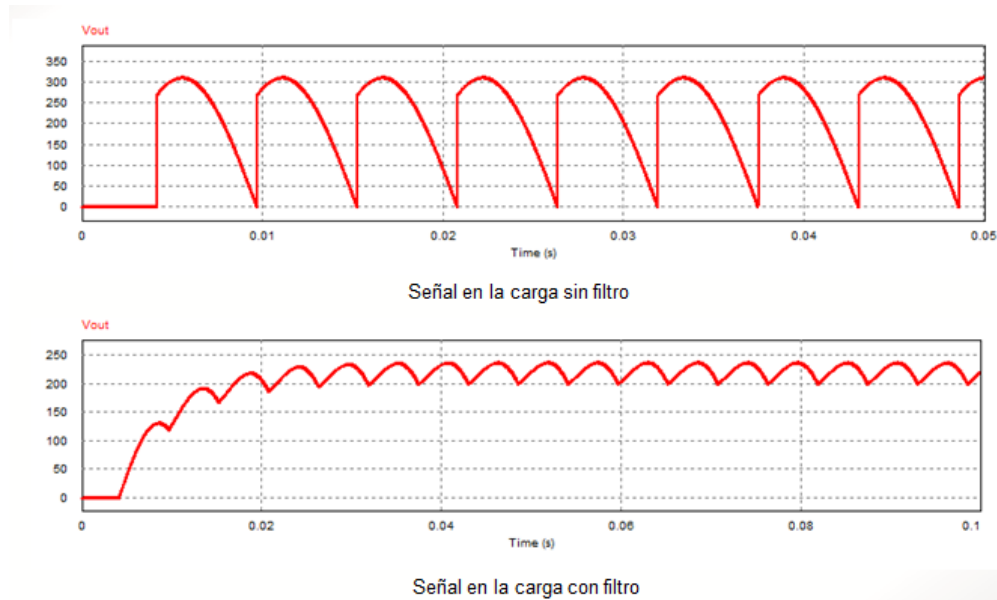
Con el propósito de mejorar el factor de rizado en las señales de tensión y corriente en la carga se recomienda implementar un filtro LC (Figura 44). De acuerdo a las pruebas realizadas el factor de rizado para las señales de tensión para carga resistiva es del 50 %, con la implementación del filtro LC este factor se reduciría a un 5.1 %.

Figura 44. Filtro LC



En la figura 45 se muestran las señales de tensión obtenidas por simulación cuando se alimenta una carga resistiva con la implementación del filtro y sin la implementación de este. Los valores de la inductancia y capacitancia del filtro corresponden a pruebas hechas en simulación para obtener los mejores resultados.

Figura 45. Señal de tensión para carga resistiva con filtro y sin filtro



5. CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo de diseñar y construir una fuente DC para el laboratorio de máquinas eléctricas que puede entregar $200 V_{dc}$ y $220 V_{dc}$ con una corriente de hasta 20 A.

Se implementó dentro de la programación una rutina encargada de realizar la detección de secuencia de la red, lo que permite el correcto funcionamiento de la fuente sin importar el orden de conexión de las fases.

La tarjeta de Arduino Micro utilizada tiene la posibilidad de ser reprogramada para implementar otro tipo de aplicaciones de la fuente, como por ejemplo obtener distintos valores de tensión diferentes a los que están programados. En tal caso que se requiera hacer una reprogramación es necesario desconectar el Arduino Micro de la tarjeta para su conexión al puerto USB del computador.

Se utilizó un transformador con devanados aislados para alimentar los dispositivos electrónicos que requieren alimentación externa, porque tienen referencias diferentes.

Se realizaron simulaciones para verificar el funcionamiento de los circuitos diseñados y prever posibles problemas que se puedan presentar, analizando variables como corriente, tensión y potencia.

Al seleccionar los optoacopladores que aíslan los circuitos para cada diseño en caso de fallas de cortocircuito, es necesario hacer una cuidadosa selección de estos, ya que algunos dispositivos comúnmente encontrados en el mercado son

sensibles al ruido y pueden activarse fácilmente generando respuestas no esperadas en el sistema.

6. RECOMENDACIONES

Al realizar las prácticas definidas en el laboratorio con los motores de DC se debe conectar la resistencia de arranque para evitar que el pico de corriente dispare las protecciones de la fuente y deteriore la vida útil de los dispositivos de la misma.

Para el diseño e implementación de futuras fuentes se recomienda utilizar otro microcontrolador, por uno de mayor velocidad en el procesamiento de datos, con el fin de obtener mejores resultados.

Implementar un filtro LC para mejorar el rizado de la señal de tensión y de corriente en la carga.

Para eliminar fuentes de ruido se recomienda colocar una resistencia entre puerta y cátodo de los SCR's.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Tercera Edición. ED Prentice Hall, 2004.

[2] MASET, Enrique. Introducción a la electrónica de potencia. Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Universidad De Valencia. España 2006. Tema 6: Rectificadores Controlados.

[3] ACEVEDO CASTRO JAVIER Y RAMOS ROJAS RODRIGO, “Obtención y visualización en tiempo real de los parámetros de rendimiento de un rectificador trifásico basado en tecnología CMOS usando un DSP” .Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-2009.

[4] CARRETO, Alfonso; FERRERO, Javier y SANCHEZ, Pilar. Electricidad y electrónica. Segunda Edición.Ed. Editex, 2009.

[5] Arduino Micro. [Online]. Disponible en internet: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMicro>>

[6] Toshiba. TLP250 Datasheet. [Online]. Disponible en internet: <<http://web.itu.edu.tr/yildir1/mylibrary/data/tlp250.pdf>>

[7] Texas Instruments. ISO124 Datasheet. [Online]. Disponible en internet: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso124.pdf>>

[8] Dispositivos de electronica de potencia. [Online]. Disponible en internet: <http://www.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FIN>

ALIZADOS/2013/REF%2040_2013%20%20%20T%C3%89CNICO%20AYUDANT
E%20MANTENIMIENTO%20E%20INGENIER%C3%8DA%20(ELECTROELECTR
%C3%93NICO)/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/CONOCIMIENTOS%20ESPEC
%C3%8DFICOS/DISPOSITIVOS%20DE%20ELECTRONICA%20DE%20POTENC
IA.PDF >

[9] Características diodos de potencia. [Online]. Disponible en internet :
<<http://www.uv.es/~marinjl/electro/diodo.html>>

[10] Funcionamiento optoacoplador 4N25. [Online]. Disponible en internet :
<<http://www.educachip.com/optoacoplador-que-es-y-como-utilizarlo/>>

[11] FAIRCHILD. 4N25 Datasheet.

[12] COMPEAN Victor, LARA Claudio, MOCTEZUMA Gregorio, LUNA Gabriel y
CAMPOS Daniel. “Diseño didáctico de un rectificador controlado trifásico”.
Facultad de Ciencias (UASLP), San Luis de Potosi, México.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO CASTRO JAVIER Y RAMOS ROJAS RODRIGO, “Obtención y visualización en tiempo real de los parámetros de rendimiento de un rectificador trifásico basado en tecnología CMOS usando un DSP” .Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-2009.

MASET, Enrique. Introducción a la electrónica de potencia. Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Universidad De Valencia. España 2006. Tema 6: Rectificadores Controlados.

QUINTERO MURCIA CARLOS ANDRES, CALDERON NIÑO RODMAN RAUL Y CRUZ BUITRAGO JHON FREDY, “Diseño y construcción de un rectificador trifásico controlado de onda completa para aplicaciones en protección catódica”. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-2012.

RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Tercera Edición. ED Prentice Hall, 2004.

ROJAS ESPINOZA FREDY ALBERTO Y NIETO CARLOS ALBERTO “Diseño e implementación de un Rectificador Totalmente Controlado Con Factor de Potencia Mejorado Basado en tecnología CMOS Y DSP”. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-2007.

ANEXOS

ANEXO A. HOJAS DE DATOS

Figura A.1. Hoja de datos 4N25

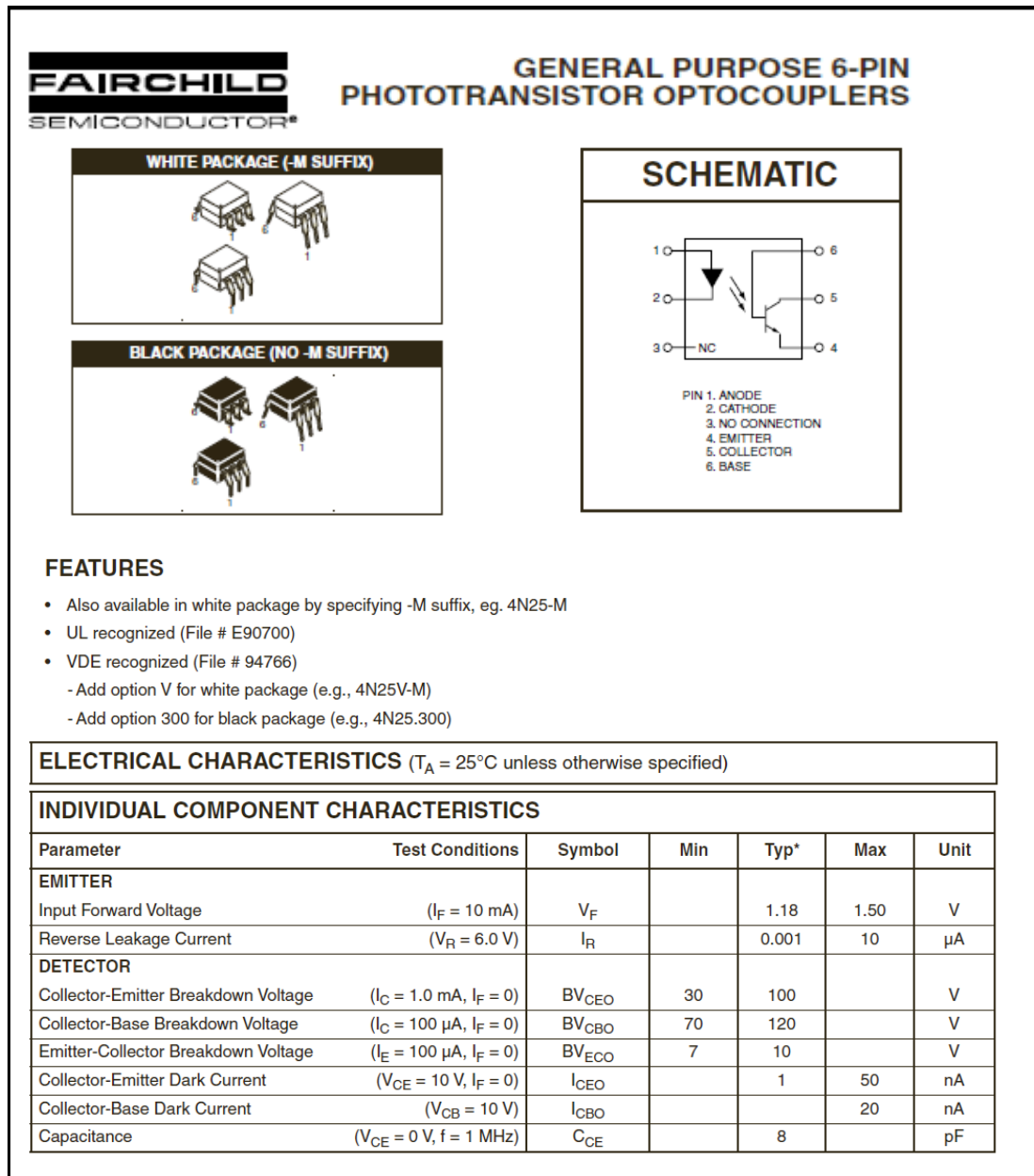


Figura A.3. Hoja de datos ISO124

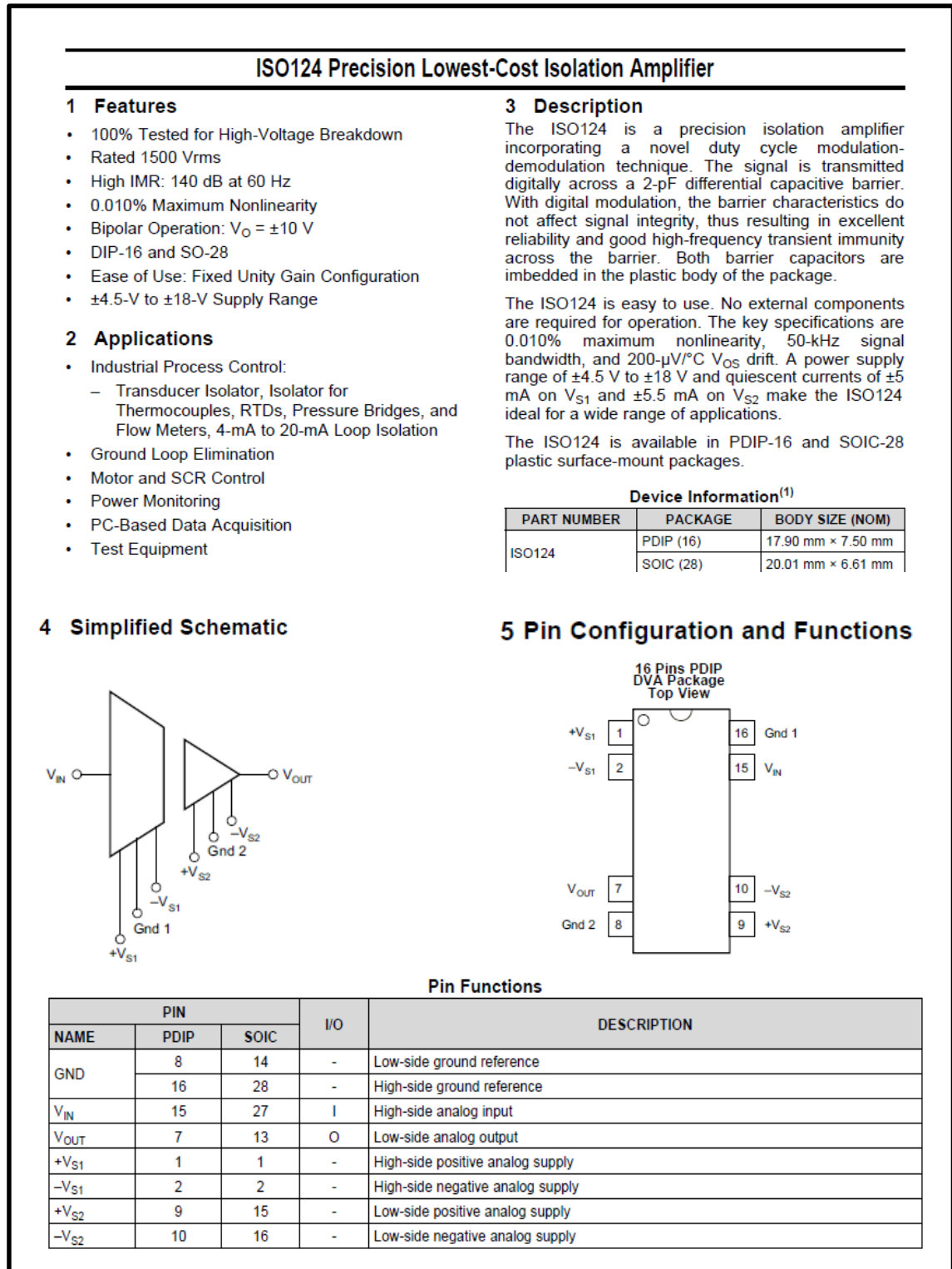


Figura A.4. Hoja de datos TLP250

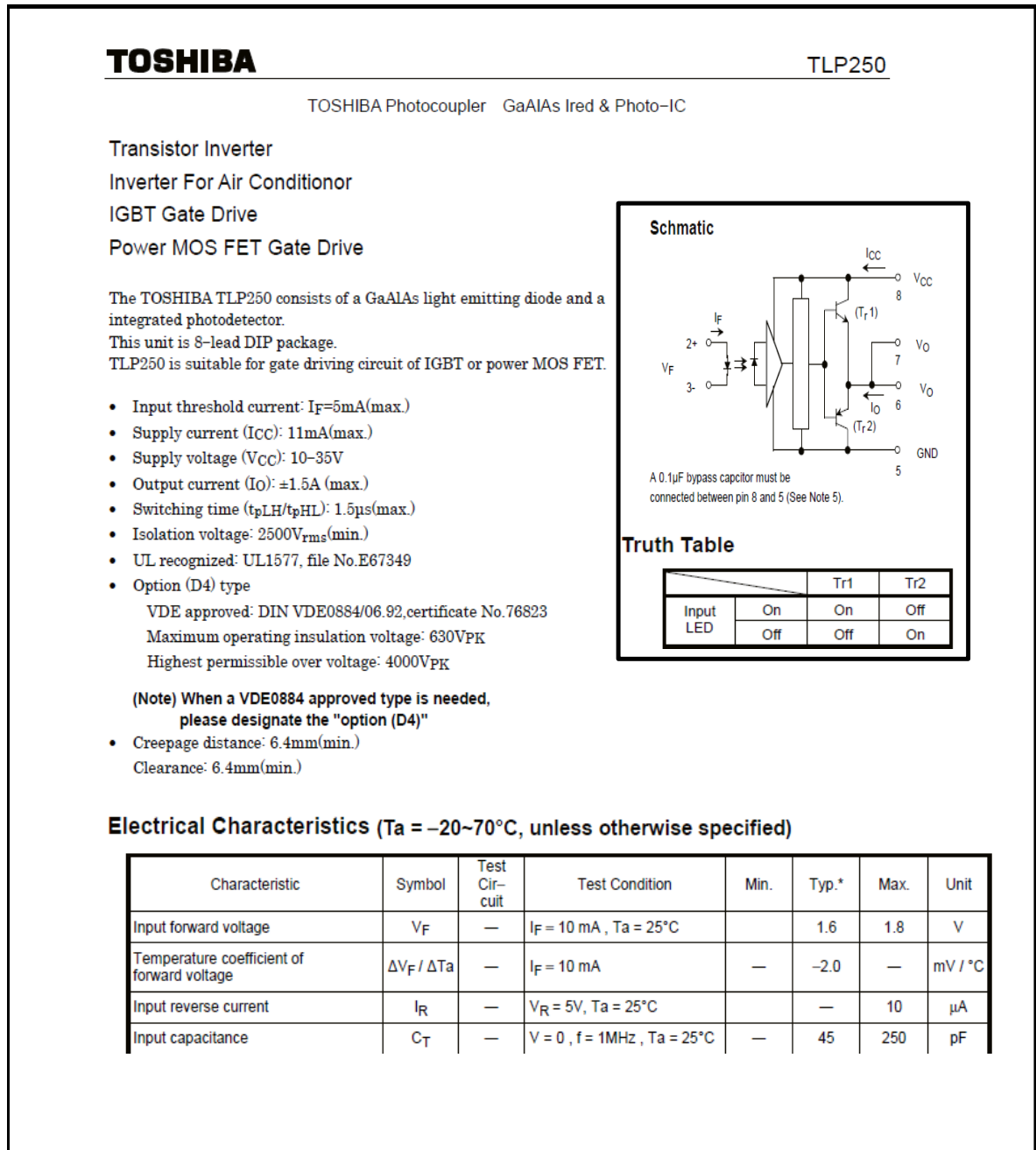


Figura A.5. Hoja de datos SCR

International IOR Rectifier


Bulletin I2401 rev.A 07/00

50RIA SERIES

MEDIUM POWER THYRISTORS

Major Ratings and Characteristics

Parameters	50RIA		Units
	10 to 120	140 to 160	
$I_{T(AV)}$	50	50	A
@ T_C	94	90	°C
$I_{T(RMS)}$	80	80	A
I_{TSM}	@ 50Hz	1430	A
	@ 60Hz	1490	A
I^2t	@ 50Hz	10.18	KA ² s
	@ 60Hz	9.30	KA ² s
V_{DRM}/V_{RRM}	100 to 1200	1400 to 1600	V
t_q typical	110		µs



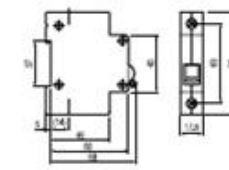
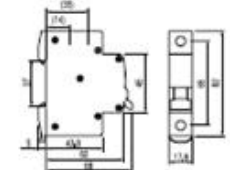


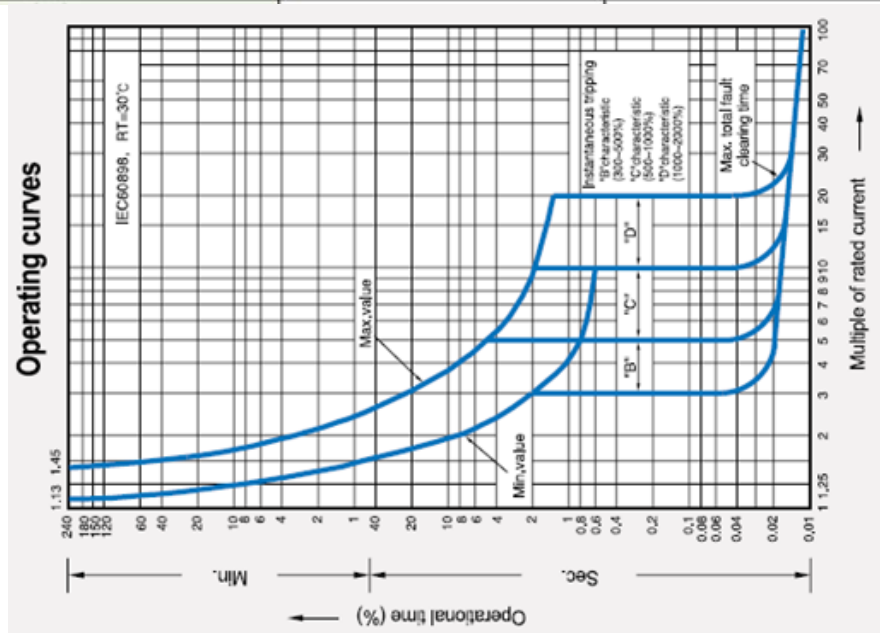
Case Style
TO 208AC (TO 65)

Triggering

Parameter	50RIA	Units	Conditions
P_{GM} Maximum peak gate power	10	W	$T_J = T_J \text{ max, } t_p \leq 5\text{ms}$
$P_{G(AV)}$ Maximum average gate power	2.5		
I_{GM} Max. peak positive gate current	2.5	A	
$+V_{GM}$ Maximum peak positive gate voltage	20	V	
$-V_{GM}$ Maximum peak negative gate voltage	10		
I_{GT} DC gate current required to trigger	250	mA	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$
	100		
	50		
V_{GT} DC gate voltage required to trigger	3.5	V	$T_J = -40^\circ\text{C}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$
	2.5		
I_{GD} DC gate current not to trigger	5.0	mA	$T_J = T_J \text{ max}$ $V_{DRM} = \text{rated voltage}$
V_{GD} DC gate voltage not to trigger	0.2	V	$T_J = T_J \text{ max}$ V_{DRM} anode-to-cathode applied

Figura A.6. Hoja de datos Interruptor automático

Type	MCB					
	BKN		BKN-c	BKN-b		
Protection	Overload and short circuit			Overload and short circuit		
Rated current	1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63A			1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63A		
Characteristic	B, C, D curve			B, C, D curve		
Poles	1p, 1p+N, 2p, 3p, 3p+N, 4p			1p, 1p+N, 2p, 3p, 3p+N, 4p		
Breaking capacity	1pole		2-4pole		1pole	
	1A - 63A 6kA at 230/400VAC		1A - 63A 6kA at 400VAC		1A - 63A 10kA at 240/415VAC	
Standard	IEC 60898			IEC 60898		
Approval	CCC, SABS, SEMKO CB			KEMA CB, SABS, SEMKO CB, UL 1077 †		
Type of trip	Thermal magnetic release			Thermal magnetic release		
Electrical endurance	6,000 operations			8,000 operations		
Mount	On 35mm DIN rail			On 35mm DIN rail		
Width	17.8mm per pole			17.8mm per pole		
Terminal	Lug type (cable up to 25mm ²)		Dust type (Lug & Screw)		Lug type (cable up to 25mm ²)	
Auxiliary switch, AX & AL Optional	 <p>1 changeover contact 6A at 240VAC, 3A at 415VAC (AX) 6A at 230VAC, 3A at 415VAC (AL) 2A at 48VDC, 1A at 125VDC Lug terminal Cable capacity 2.5mm² 9mm wide *Only for BKN</p>			 <p>1 changeover contact 6A at 240VAC, 3A at 415VAC (AX/AL) 6A at 24VDC, 2A at 48VDC, 1A at 130VDC Lug terminal Cable capacity 0.75-2.5mm² 8.8mm wide</p>		
Dimension						



ANEXO B. TARJETA DISEÑADA

Figura B.1. Esquemático general de la tarjeta impresa

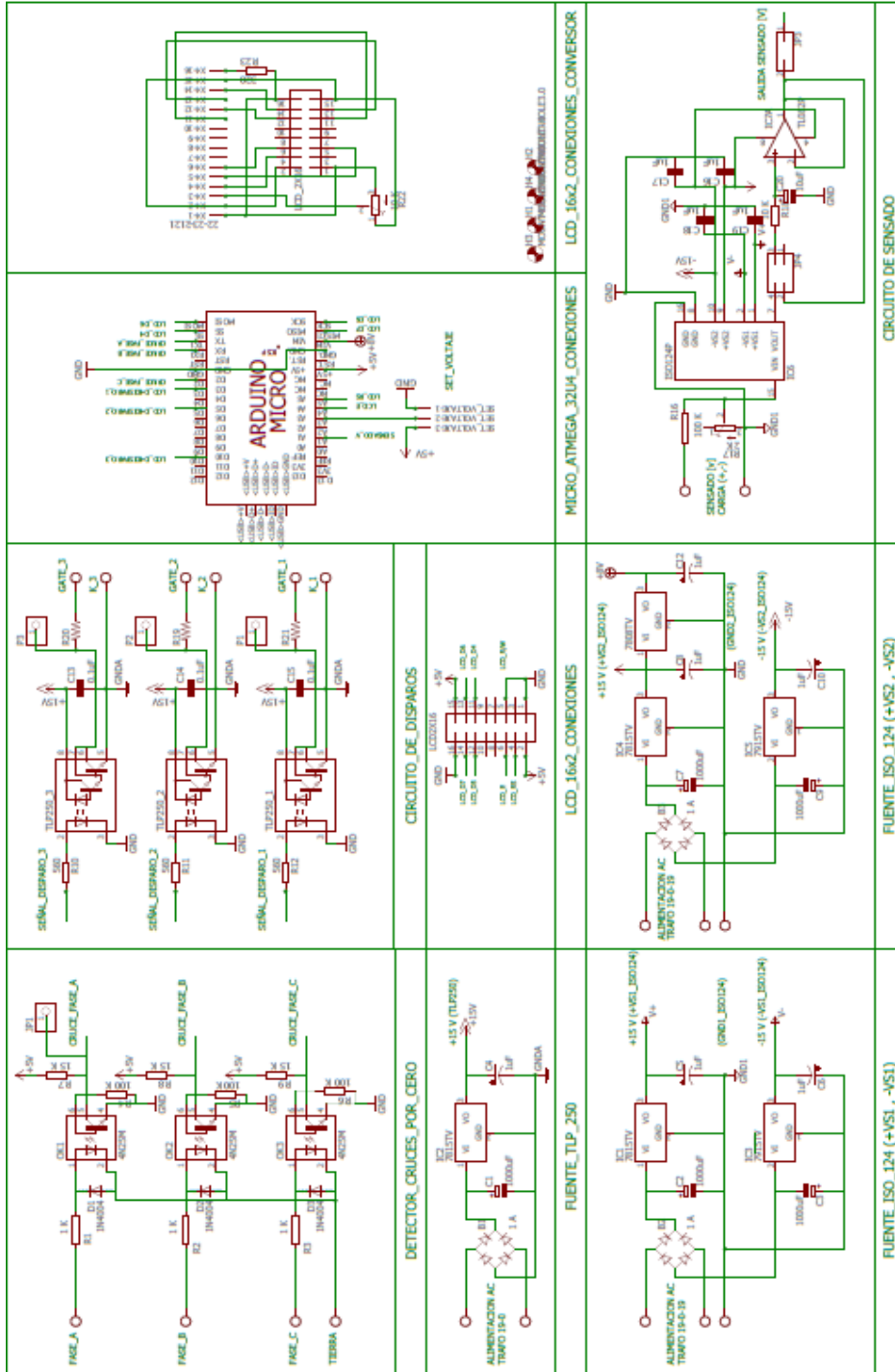


Figura B.2. Capa superior (Top) circuito impreso

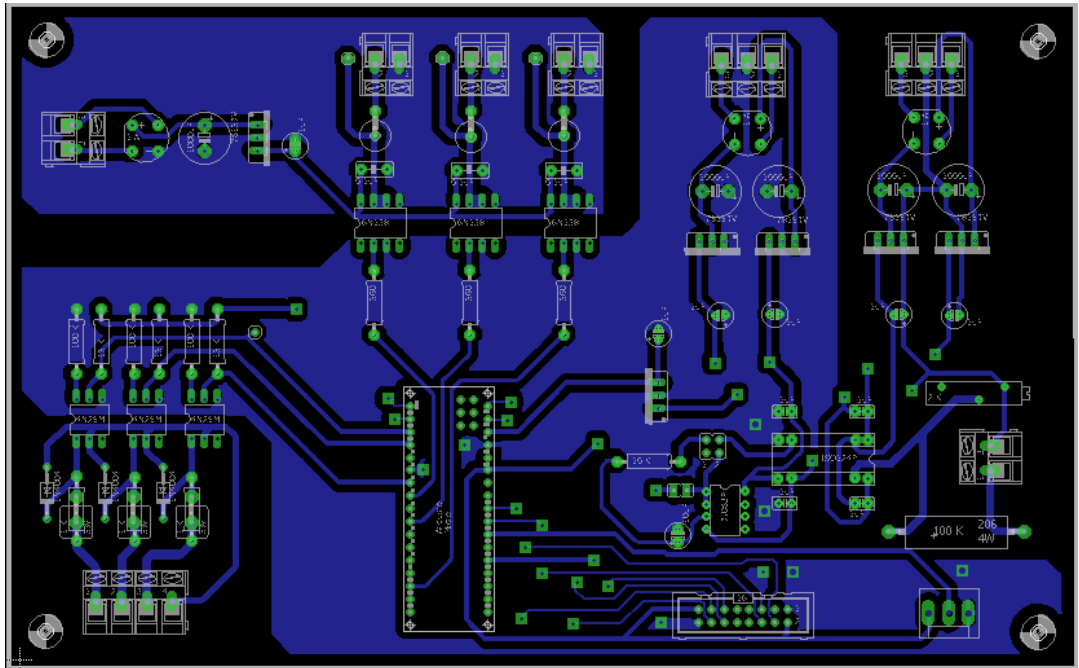


Figura B.3. Capa posterior (Bottom) circuito impreso

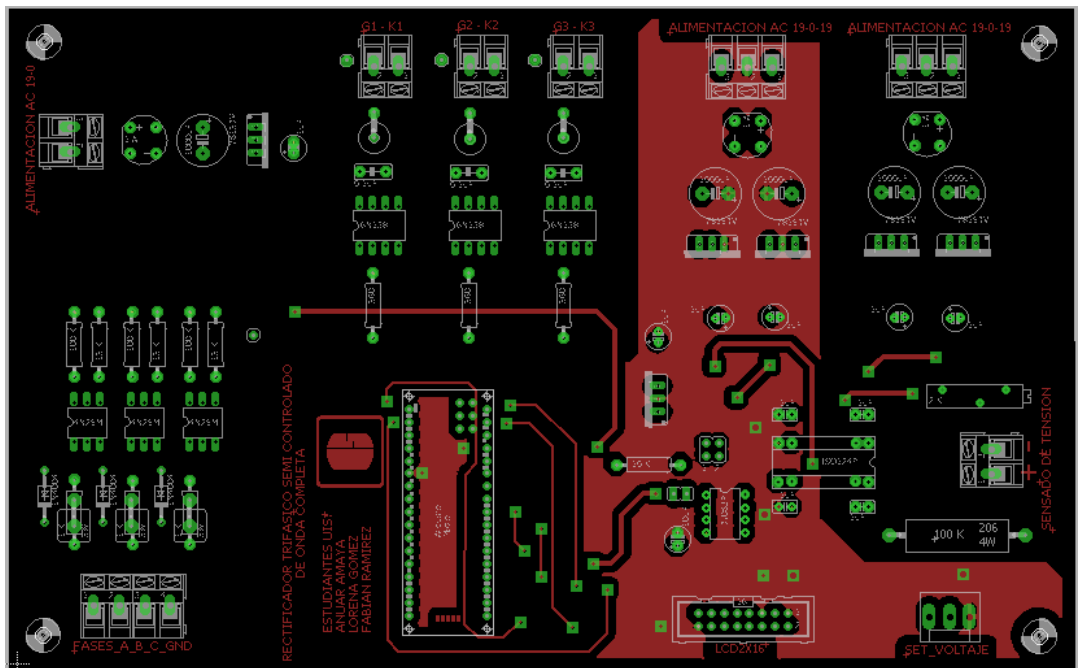


Figura B.4. Cara anterior tarjeta

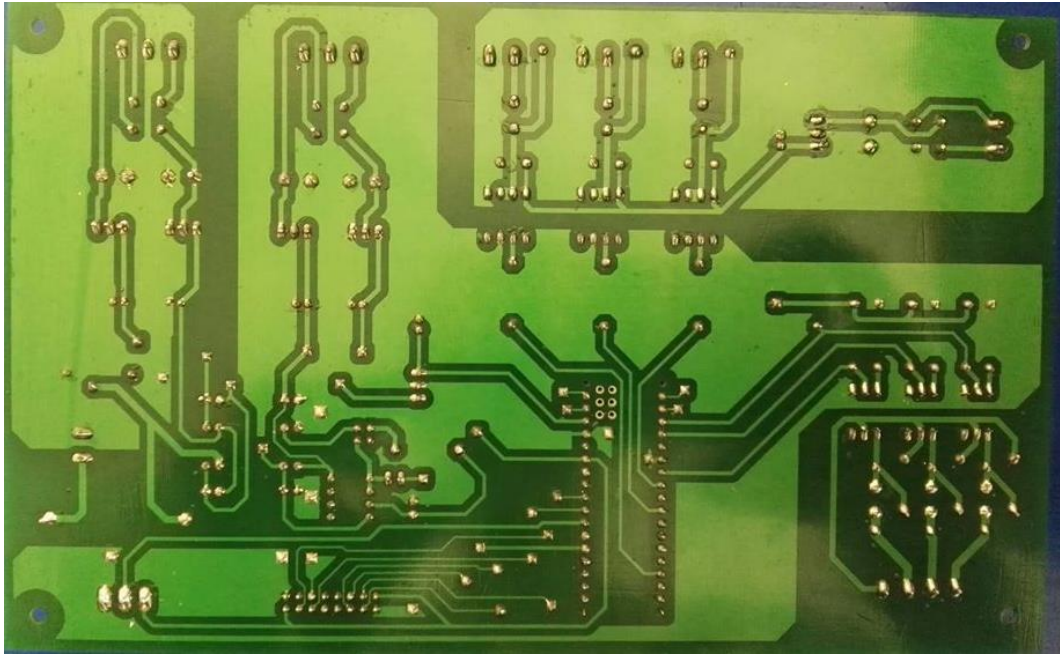
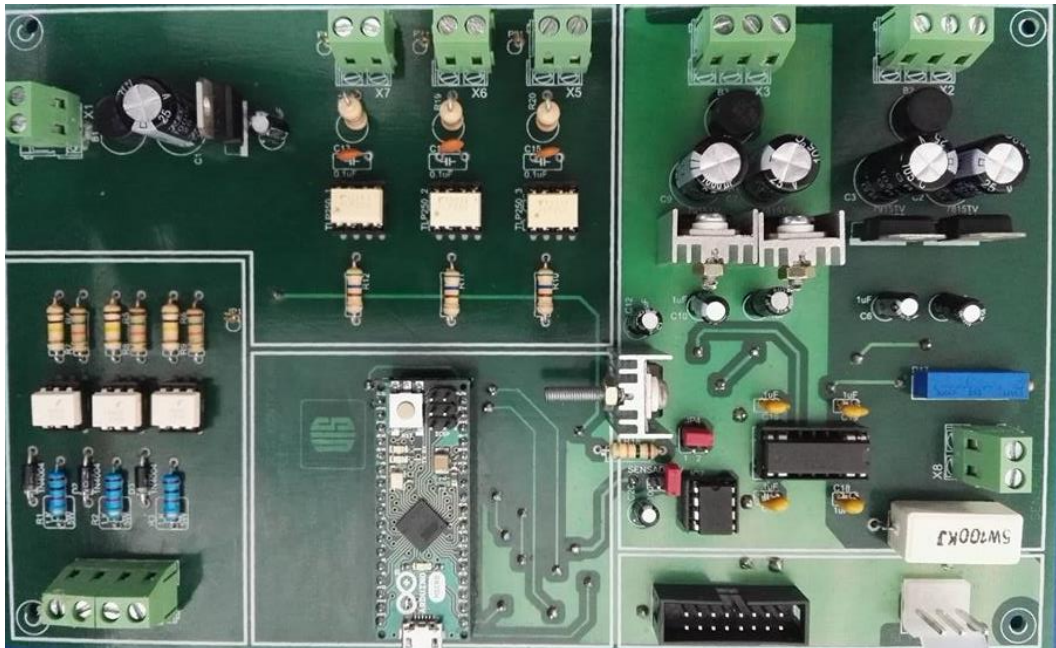


Figura B.5. Vista superior tarjeta y dispositivos



ANEXO C. ETAPA DE POTENCIA

Figura C.1. SCR's

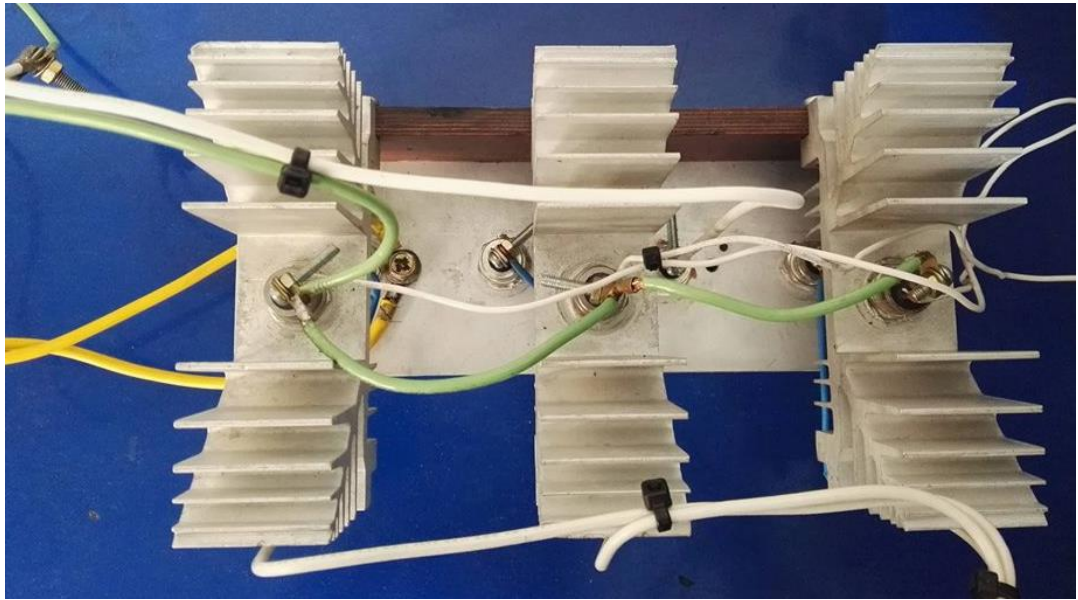


Figura C.2. Diodos de potencia

