

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

SIMULACIÓN DE UN MÓDULO REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE POR CORRIENTE DE CAMPO PARA UN GENERADOR SINCRÓNICO

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA

CHRISTIAN ALEXIS ARCOS FLORES

christian.arcos@epn.edu.ec

JOSSIMAR DAVID RUALES LAICA

jossimar.ruales@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ABRAHAM LOJA MSC.

abraham.loja@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS ROMO MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2020

DECLARACIÓN

Nosotros, Christian Alexis Arcos Flores y Jossimar David Ruales Laica, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaremos toda la información técnica pertinente. En el caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.

Con sentimientos de distinguida consideración



Christian Alexis Arcos Flores

CI: 172679232-6



Jossimar David Ruales Laica

CI: 1724023070

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Alexis Arcos Flores, y por Jossimar David Ruales Laica, bajo nuestra supervisión.



Ing. Abraham Loja MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO



Ing. Carlos Romo MSc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Padre misericordioso por permitirme continuar con vida y salud, además con la suficiente fuerza para concluir mis objetivos.

A mi padre Elías Arcos por dejarme claro que la perseverancia es cosa de todos los días y la rendición no es una alternativa, sus enseñanzas que forjaron este ser a su semejanza.

A mi madre Hilda por los valores inculcados, sabiduría, dedicación, paciencia y sacrificios de mujer diarios, además de nunca perder la fe en mí.

A mi hermano incondicional Henry compañero fiel en las adversidades de la vida y colaboración para permitirme realizar el proyecto.

A los docentes Msc. Abraham Loja y Msc. Carlos Romo, director y codirector respectivamente por su determinación en la enseñanza para con nosotros los estudiantes.

A la Escuela Politécnica Nacional y toda su comunidad que la conforma, por permitirme asimilar sus conocimientos y valores en toda mi carrera universitaria.

Un agradecimiento general para toda la familia Arcos Flores que a pesar de la distancia estuvo enfocada en la superación de cada uno de sus integrantes.

Alexis Arcos F.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por haber hecho posible que estudie una carrera superior y poder ser un profesional universitario, por apoyarme en todas las adversidades que he pasado en la vida y darme fuerzas para seguir cada día adelante, por ser un buen ejemplo en mi vida y querer siempre lo mejor para mí, también quiero agradecer a toda mi familia por motivarme cada día con sus palabras y por sus actos económicos que tuvieron conmigo cuando fueron necesarios para continuar en la universidad.

Agradezco a los docentes de la Escuela Politécnica Nacional por impartir los conocimientos, por su ayuda brindada y por la dedicación que ponen en formar grandes profesionales para la vida laboral.

David Ruales L.

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres y hermano, incondicionales en cada momento del desarrollo del proyecto quienes a pesar de las circunstancias depositaron su confianza en mi persona, espero no haberles defraudado.

A una persona especial Dra. Esmeralda Paspuel, compañera incondicional y ejemplo de mujer con virtudes difíciles de encontrar, quien a cada paso y decisión tomada ha estado presente para brindar su apoyo desinteresado.

A aquellos familiares quienes por ciertas circunstancias ya no se encuentran a mi lado; pero siguen presentes en cada memoria y sueños en donde puedo conversar con ellos, espero que con el trabajo realizado sepan que no les quedé mal.

Alexis Arcos F.

DEDICATORIA

Quiero dedicarles de manera muy especial a mis padres por querer el mejor futuro en mi vida, por todos los sacrificios que han hecho para que pueda estudiar en la universidad y lo más importante por forjar mi carácter e impartirme muy buenos valores en la vida que me han convertido en la persona que soy actualmente, espero poder agradecerles todo lo que han hecho por mí.

Gracias Padre y Madre.

David Ruales L.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos	4
2 METODOLOGÍA.....	5
2.1 Descripción de la metodología usada.	5
2.2 Técnicas e instrumentos empleados en la ejecución del proyecto.	6
3. EJECUCIÓN Y RESULTADOS.....	8
3.1. Identificación de variables de entrada y salida para la función de transferencia de la planta a controlar.....	8
3.2. Adquisición de datos.....	10
3.3. Sintonización del control PID.	11
3.4. Diseño y simulación del circuito eléctrico y electrónico para un convertor AC/DC.	17
➤ Circuito generador de señal modulador por ancho de pulso (PWM)	18
➤ Circuito convertor AC/DC controlado	26
➤ Circuito acondicionador	30
3.5. Algoritmo de control PID.	31
3.6. Simulación general del sistema.....	34
➤ Parámetros de simulación.....	34
3.7 Diseño de la estructura física.....	42
3.8 Pruebas de Funcionamiento	43
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
4.1 CONCLUSIONES.....	55
4.2 RECOMENDACIONES.....	57
5 BIBLIOGRAFÍA.....	59

6 ANEXOS.....	61
---------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Circuito de excitación actual del generador sincrónico en estudio.....	2
Figura 1.2	Circuito de excitación propuesto para el generador sincrónico.....	3
Figura 3.1	Partes generador Síncrono	9
Figura 3.2	Diagrama de Bloques de la planta General.....	10
Figura 3.3	Gráfico de voltajes del generador en relación a un rango de tiempo.....	11
Figura 3.4	Ingreso de datos de entrada y salida en IDENT	12
Figura 3.5	Gráfica función de trasferencia estimada	13
Figura 3.6	Características de la función de transferencia de la planta.....	14
Figura 3.7	Simulacion de la planta en simulink.....	15
Figura 3.8	Señales de respuesta de la planta sin ajuste	15
Figura 3.9	Control PID sintonizado.....	16
Figura 3.10	Señales de respuesta de la planta con ajuste	17
Figura 3.11	Circuito generador de PWM con rampa lineal sincronizada con la red.....	18
Figura 3.12	Detector de cruce por cero.....	19
Figura 3.13	Conexion interna optoacoplador 4n25.....	20
Figura 3.14	Circuito Generador diente de sierra.....	23
Figura 3.15	Circuito comparador de voltaje.....	24
Figura 3.16	Formas de onda generadas	26
Figura 3.17	Puente rectificador controlado de onda completa.....	27
Figura 3.18	Rectificador de onda completa controlado con disparo máximo.....	28
Figura 3.19	Rectificador de onda completa controlado con disparo	29
Figura 3.20	Circuito de Acondicionamiento	30
Figura 3.21	Diagrama de bloques Control PID.....	32
Figura 3.22	Diagrama de flujo algoritmo de control	33
Figura 3.23	Placa electrónica Arduino Mega.....	35
Figura 3.24	Teclado matricial 4x4	36
Figura 3.25	Decodificador 74C922.....	37
Figura 3.26	Pantalla LCD 4x20	38
Figura 3.27	Sensor ACS712	39
Figura 3.28	Módulo transformador de voltaje AC.....	40
Figura 3.29	Generador de señales en Isis de Proteus.....	40

Figura 3.30 Esquema simulación del control PID para AVR.....	41
Figura 3.31 Diseño placa PCB Circuitos PWM y Conversor AC/DC.....	43
Figura 3.32 Simulación funcionamiento del sistema.....	44
Figura 3.33 Respuesta ante un voltaje bajo al Set Point	47
Figura 3.34 Respuesta ante un voltaje medio al Set Point	48
Figura 3.35 Respuesta con un voltaje cercano al Set Point.....	50
Figura 3.36 Respuesta de voltaje censado igual al Set Point.....	51
Figura 3.37 Set Point ingresado fuera de rango.....	53
Figura 3.38 Protección de bobinado de campo	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Datos de placa del generador sincrónico marca CETEL.....	1
Tabla 3.1 Características eléctricas - ópticas del optoacoplador 4n25.....	20
Tabla 3.2 Características de transferencia del optoacoplador 4n25.....	21
Tabla 3.3 Descripción de pines utilizados de la placa Arduino.....	42
Tabla 3.4 Registro de datos comprobación de funcionamiento.....	45
Tabla 3.5 Valores resultantes con un voltaje generado bajo.....	47
Tabla 3.6 Valores resultantes con un voltaje generado medio.....	49
Tabla 3.7 Valores resultantes de un voltaje cercano e igual al Set Point	51

RESUMEN

El presente proyecto, "SIMULACIÓN DE UN MÓDULO REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE POR CORRIENTE DE CAMPO PARA UN GENERADOR SINCRÓNICO", representa una aportación formativa hacia los estudiantes de las carreras de Ingeniería, y Tecnología. El proyecto beneficia al Laboratorio de Conversión de Energía o Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, el cual permitirá las respectivas aplicaciones teóricas para el desarrollo del perfil profesional de los estudiantes.

Para el desarrollo del proyecto se diseñó y simuló un circuito PWM con rampa lineal sincronizado a la red para comandar un puente rectificador totalmente controlado (convertor AC/DC). Este convertor AC/DC variará su señal senoidal rectificada debido a la variación de la señal PWM producida por el controlador. Estos circuitos deben ser conectados al bobinado de campo de la máquina, el cual al ser controlado permite variar el voltaje de salida del generador.

El control que permite variar el voltaje de salida del generador se lo simuló con un algoritmo PID (Proporcional Integral Derivativo), el cual se representa en una tarjeta electrónica Arduino con los respectivos elementos de entrada y salida como sensores de voltaje y corriente, un teclado matricial que permite ingresar el *SetPoint* y un *display* que muestra las variables a controladas.

En el presente documento también se detallan las respectivas pruebas eléctricas y electrónicas de los circuitos diseñados, pruebas de funcionamiento de los sensores, así como del algoritmo de control. Finalmente se extrajeron las conclusiones y recomendaciones de todo el desarrollo del proyecto.

Palabras Claves: Modulación por ancho de pulso PWM, Control PID, *SetPoint*, Arduino MG.

ABSTRACT

The present project, "SIMULATION OF AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR MODULE BY FIELD CURRENT FOR A SYNCHRONIC GENERATOR", represents a formative contribution towards students of Engineering and Technology careers. The project benefits the Laboratory of Energy Conversion or Electrical Machines of the Faculty of Electrical Engineering, which will allow the respective theoretical applications for the development of the professional profile of the students.

For the development of the project, a PWM circuit with a linear ramp synchronized to the network was designed and simulated to control a fully controlled rectifier bridge (AC / DC converter). This AC / DC converter will vary its rectified senoidal signal due to the variation of the PWM signal produced by the controller. These circuits must be connected to the field winding of the machine, which when controlled allows the generator output voltage to be varied.

The control that allows the generator output voltage to be varied was simulated with a PID (Proportional Integral Derivative) algorithm, which is represented on an Arduino electronic board with the respective input and output elements such as voltage and current sensors, a keyboard matrix that allows entering the SetPoint and a display that shows the controlled variables.

This document also details the respective electrical and electronic tests of the designed circuits, sensor operation tests, as well as the control algorithm. Finally, the conclusions and recommendations of the entire development of the project were drawn.

Keywords: PWM pulse width modulation, PID control, SetPoint, Arduino MG.

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

El laboratorio de Máquinas Eléctricas capacita e instruye a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ingeniería Mecánica y Tecnología Electromecánica en la operación y mantenimiento de las diferentes máquinas industriales, éste se encuentra ubicado en el edificio de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional; cuenta con mesas de trabajo para el estudio práctico de los temas impartidos hacia los estudiantes. Las prácticas se realizan con máquinas eléctricas como los generadores y motores de los que dispone el laboratorio; para ello los estudiantes deben conectar una serie de dispositivos de manera adecuada para evitar poner en riesgo la seguridad de las máquinas, y cumplir con los objetivos de trabajo que se exigen en el plan de estudio. (EPN, 2019).

La regulación de voltaje se realiza de forma manual en un generador sincrónico que dispone el laboratorio de Máquinas Eléctricas cuyas características están dadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Datos de placa del generador sincrónico marca CETEL.

CIRCUITO DE ARMADURA					
MAGNITUD	VALOR	UNIDAD	MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
V	220	V	I	7.25	A
S	2.75	KVA	n	1800	rpm
Cos Φ	0.8				
CIRCUITO DE CAMPO					
MAGNITUD	VALOR	UNIDAD	MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
Vf	110	V	I	1.2	A
VALORES BASE					
MAGNITUD	VALOR	UNIDAD	MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
VB	220	V	IB	7.217	A
SB	2.75	KVA	ZB	17.600	ohm

Fuente: (Berbegal, 2016)

En la Figura 1.1 Se puede observar las respectivas conexiones que se realizaran en el laboratorio para el funcionamiento de la maquina como generador sincrónico.

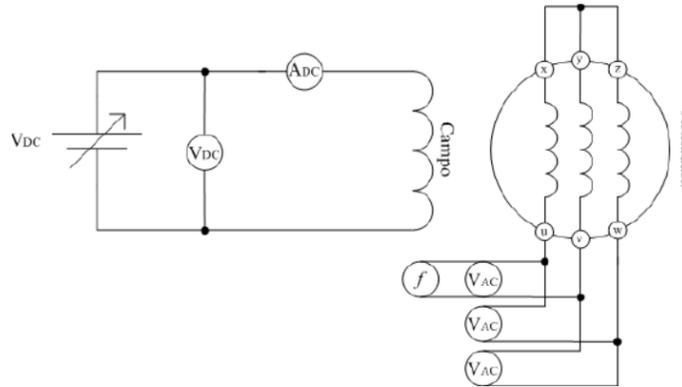


Figura 1.1 Circuito de excitación actual del generador sincrónico en estudio.
Fuente: (Berbegal, 2016)

Para excitar al generador se necesita de una persona que esté encargada de medir constantemente el voltaje en los bornes de la armadura de la máquina síncrona y de otra persona que debe regular la intensidad de la corriente de excitación en el campo por medio de reóstatos variables, para mantener esa corriente siempre dentro del rango seguro de trabajo definido por la corriente máxima que soporta el bobinado de campo del generador síncrono. Esto en la vida real es impráctico y puede poner en riesgo a la máquina debido a que las variaciones de corriente realizadas con los reóstatos pueden ser bruscas y llevar al campo más allá de sus límites, también una distracción en el trabajo de las personas puede llevarlas a cometer errores humanos y llevar a la máquina a condiciones inseguras. En las aplicaciones actuales los generadores siempre poseen sus reguladores automáticos de voltaje (Berbegal, 2016).

Las ventajas de la electrónica en esta aplicación permiten tener limitadores de corriente y voltaje con sus respectivas protecciones para evitar daños en la máquina, son más rápidos

que una persona para corregir desviaciones en el voltaje de la armadura, permiten observar el comportamiento dinámico de la máquina. Todas esas ventajas no se pueden presentar a los estudiantes en el laboratorio debido a la inexistencia de este controlador.

1.2. Justificación.

En este proyecto se modela un Regulador Automático de Voltaje (AVR), para cerrar el lazo de control del generador síncrono descrito según la Figura 1.2.

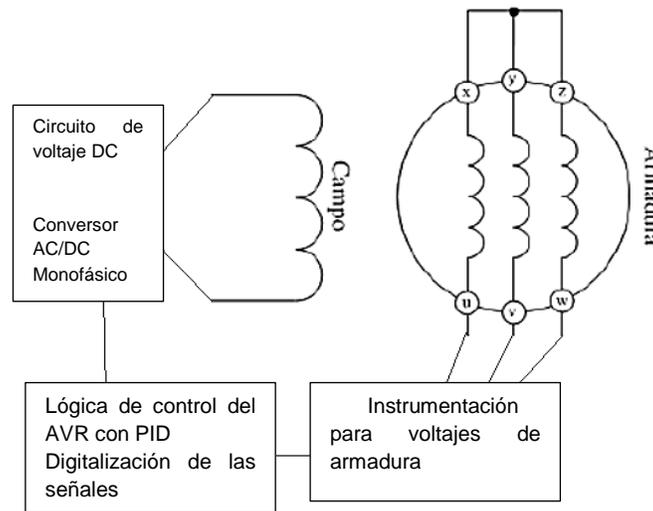


Figura 1.2 Circuito de excitación propuesto para el generador síncrono.
Fuente: (Andrade, 2000)

El diseño del regulador de voltaje tendrá protecciones, limitadores de corrientes y voltajes para evitar llevar a la máquina a condiciones inseguras independientemente de los errores humanos del operador. El control electrónico permitirá realizar un control rápido según las variaciones de la carga que alimenta el generador síncrono.

Los generadores están sometidos a variaciones continuas de carga, es por esta razón que se requiere que mantengan en todo momento un voltaje terminal de armadura constante,

pues las variaciones de voltaje ocasionan daños en los equipos y es una muestra de falta de calidad de servicio (Andrade, 2000).

El módulo regulador básicamente monitorea el voltaje de armadura y lo toma como una entrada, aplica una lógica de control y actúa sobre el voltaje de campo del generador por medio de un convertor electrónico que inyecta voltaje DC, siendo este funcionamiento auto regulable. Como principal función asegura que el voltaje que se genere sea constante, y pueda ser estable de acuerdo con los límites especificados a pesar de que las condiciones de carga vayan cambiando (motors, s.f.).

Se realizará una aportación al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y se propone a futuro construir un módulo sencillo y de bajo costo por lo que, se puede construir un convertor AC/DC monofásico de 120 [V] que tome voltaje desde la red eléctrica del laboratorio y utilice tarjetas de adquisición de datos. Este regulador podrá ser utilizado en las diversas prácticas para realizar una gran variedad de ensayos que actualmente solo pueden ser realizados mediante simulación por ordenador o manualmente. Estos ensayos en máquinas reales ayudarán a entender los principios de la regulación de voltaje y los fenómenos asociados en los generadores sincrónicos en el sistema eléctrico.

1.3. Objetivos

➤ Objetivo general

Simular un módulo regulador automático de voltaje por corriente de campo para un generador sincrónico.

➤ Objetivos específicos

- Identificar las variables de entrada y salida para la función de transferencia de la planta a controlar.
- Sintonizar el control PID
- Diseñar y simular el circuito eléctrico y electrónico para un convertidor AC/DC
- Realizar la programación de una tarjeta electrónica para un algoritmo de control PID
- Diseñar la estructura física con las entradas y salidas necesarias para comandar la planta
- Comprobar la simulación del módulo regulador de voltaje

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada.

La correcta elaboración del proyecto exige una investigación aplicada, debido a que se trata de un aporte técnico por simulación el cual se emplearon competencias y conocimientos alcanzados en el transcurso de la formación profesional. Este proceso permite transformar el conocimiento teórico que proviene de conceptos en prototipos y productos satisfaciendo la innovación tecnológica en la industria. (Lozada, 2014)

Debido a las variables monitoreadas constantemente se empleó una metodología cuantitativa pues al utilizar instrumentos que recogen datos implican una medición sistemática para un análisis con una característica resultante, esta metodología va de la mano con la experimental ya que se necesita manipular los datos para obtener un control sobre ellas, es decir, realizar pruebas que garanticen su correcto funcionamiento dentro del sistema. (Ferrer, 2010)

2.2 Técnicas e instrumentos empleados en la ejecución del proyecto.

El alcance del proyecto exige la utilización de algunos programas especializados en simulación de circuitos, cálculos matemáticos, solución de algoritmos, etc. Entre ellos se mencionan los siguientes programas que se emplearon para la ejecución del proyecto:

MATLAB permitió encontrar la función de transferencia en una planta, es decir, se pudo determinar los valores de las diferentes variables para realizar el control PID adecuado en un proceso dentro de los parámetros permitidos de la máquina a controlar. Además, Matlab permitió la correcta sintonía del controlador PID, obteniendo una respuesta sin muchas oscilaciones al momento que se presenten perturbaciones internas o externas a la planta. La respuesta del controlador PID debe ser rápida cuando la variable presente cambios grandes dentro del rango permitido de control. Para la correcta determinación de estas variables se introdujo en MATLAB dos diferentes tablas, en estas tablas se muestra el comportamiento del voltaje de entrada (VDC) y el voltaje de salida (VG) con respecto al tiempo respectivamente en intervalos de 0.2[s]. Luego de tener el comportamiento de la entrada con respecto a la salida de la planta, se determinó el tipo de control que se necesita en la planta, en este caso el control es PI. Después se procedió a ingresar el número de polos necesarios para que MATLAB realice automáticamente el cálculo de las variables constante proporcional (K_p) y constante integral (K_i). La planta solo tiene un polo, ya que solo posee un parámetro eléctrico que es inductivo, debido a los bobinados del generador, además, no existen otros parámetros eléctricos adicionales. Finalmente, MATLAB mostró una gráfica de la respuesta o función de transferencia de la planta requerida. Se puede realizar algunos ajustes en los parámetros determinados para lograr que el control tenga un mejor comportamiento en la planta. Con la ayuda de Simulink, una aplicación de Matlab, se comprobó el correcto funcionamiento del controlador en la planta, simulando todos los elementos de la planta.

MULTISIM facilitó el diseño de circuitos y simulación para electrónica de potencia. Permitió visualizar y entender el circuito de potencia diseñado para comandar la planta, ya que se requiere transformar la Energía de la Red (120V), que es un voltaje alterno a un voltaje continuo variable que pueda ser controlado según requiera el sistema. MULTISIM posibilitó conocer el comportamiento de los diferentes elementos eléctricos utilizados cuando están energizados en todo este proceso de transformación de voltaje, como son diodos, opto acopladores, tiristores, capacitores, resistencias, etc., con el fin de determinar los valores correctos de los dispositivos electrónicos y también utilizar correctamente todos los elementos electrónicos que sean necesarios para obtener un voltaje de salida correcto y adecuado en el circuito de potencia.

Proteus permitió el diseño de placas de circuitos impresos. Se realizó el diseño de la placa electrónica de los circuitos en Proteus, creado antes en MULTISIM. Proteus permitió visualizar la correcta colocación y diseño de los elementos electrónicos utilizados para una implementación física, evitando errores como cortocircuitos, malos dimensionamientos de placa, con el fin de implementar el circuito de la manera más eficiente posible en la práctica.

Arduino permitió la creación de códigos de programación para realizar diferentes funciones en los circuitos electrónicos. Se diseñó el código del proyecto con Arduino, ya que posee librerías orientadas al control PI que la planta necesita. Arduino cuenta con entradas analógicas que permiten el ingreso de datos al código, en este caso se puede ingresar un *Set Point* con la ayuda de un teclado matricial. Arduino cuenta con salidas digitales que pueden ser conectadas a un LCD para mostrar el comportamiento de cualquier variable, en este caso permite visualizar los parámetros eléctricos que están variando en tiempo real. Arduino cuenta con salidas analógicas variables en función de voltaje (PWM), estas salidas permiten variar y controlar la respuesta de los circuitos anexados dependiendo de las perturbaciones externas

que la planta requiera. El código se realizó para utilizar todas estas herramientas de Arduino como controlador de la planta.

3. EJECUCIÓN Y RESULTADOS

3.1. Identificación de variables de entrada y salida para la función de transferencia de la planta a controlar.

Para lograr un funcionamiento correcto se identificó las necesidades, requerimientos, límites del regulador y para ello es necesario conocer la máquina a la que se va a gobernar. Se tomó nota de los datos de placa de la máquina como se indicó en la tabla 1.1.

En la Figura 3.1 se aprecia las distintas partes que tiene el generador sincrónico, el funcionamiento de este consiste en aplicar en el rotor (jaula de ardilla) una corriente DC en el devanado de campo produciendo un campo magnético rotacional dentro de la máquina, este campo magnético inducirá un grupo trifásico de voltajes en los devanados de la armadura que forma parte del estator de la máquina. Esta máquina posee dos tipos de bobinados que están colocados en distintas partes de la estructura del generador, el bobinado de campo se encuentra en el rotor el cual induce un campo magnético rotatorio en los devanados de la armadura que forma parte del estator, produciendo un voltaje alterno en los bornes del generador sincrónico.

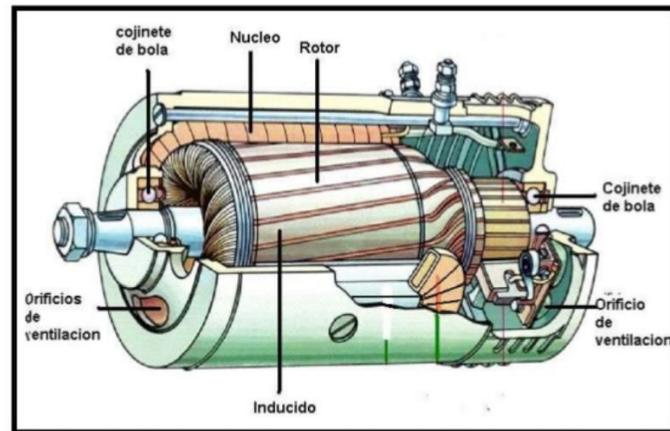


Figura 3.1 Partes generador Síncrono
Fuente: (Berbegal, 2016)

El eje de la máquina que se observa en la Figura 3.1 está acoplado a un motor externo que produce el movimiento del mismo para generar un campo magnético, dependiendo de la velocidad de rotación del eje se determinara la frecuencia de las corrientes generadas, es decir, se necesita conservar la velocidad del eje de la maquina constante para que no existan variaciones de frecuencia en los voltajes trifásicos generados.

Los diagramas de bloques en la Figura 3.2 muestran el lazo cerrado de control que se realizó en la planta, con los diferentes elementos que se utilizaran y sus respectivas conexiones.

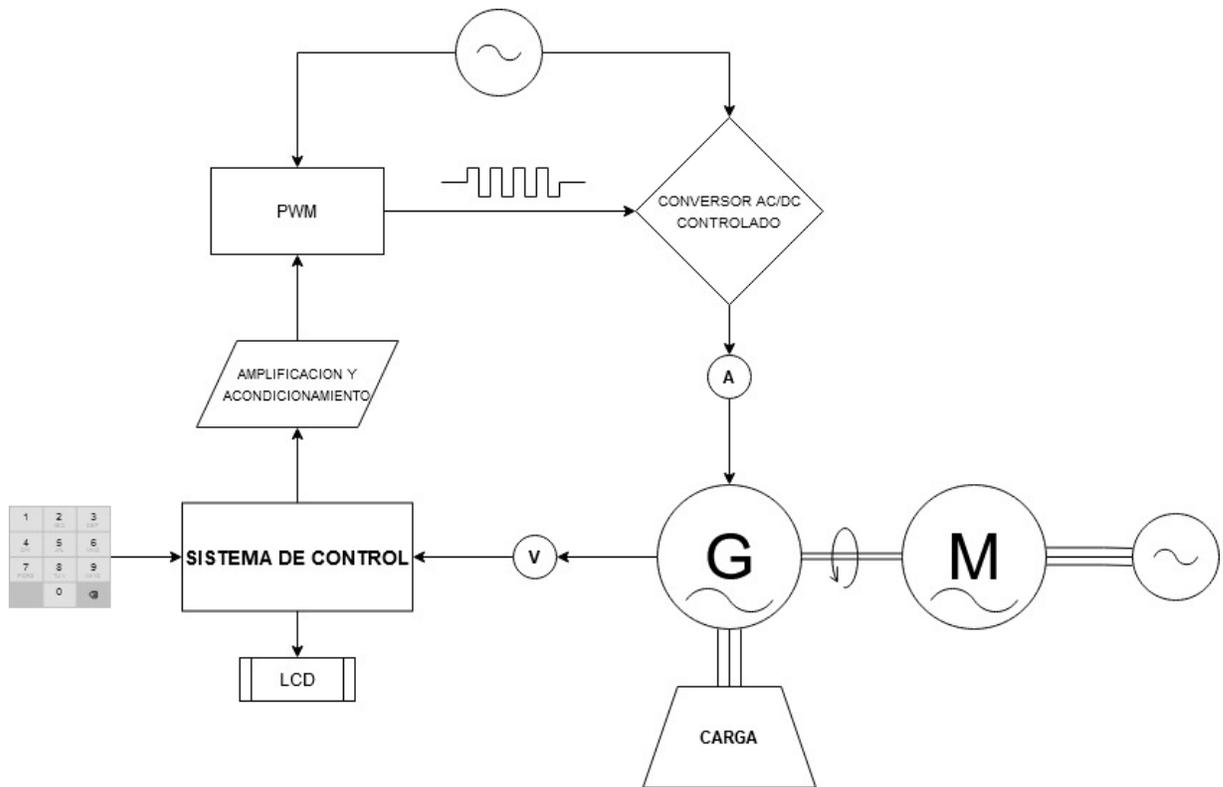


Figura 3.2 Diagrama de Bloques de la planta General
Fuente: Propia

3.2. Adquisición de datos

Los datos de voltaje DC en el bobinado de campo y voltaje AC generado en la armadura de la planta fueron tomados con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos DAQ, en el instante que cambia la corriente de campo de la máquina, analizando el régimen transitorio del generador hasta producir un voltaje constante en la planta. Se energizó la planta de tal manera que en los bornes del generador se obtenga un voltaje constante de 220 [V_{AC}], después se desconectó el bobinado de campo, y al momento de volverlo a conectar se realizó la captura de las ondas de voltaje DC y de voltaje AC sobrepuestas, para observar las variaciones que ocurren en la planta en un intervalo de 0.2 [s]. Estos datos fueron transportados a una hoja de cálculo (Excel) para observar el comportamiento de máquina

respecto a sus condiciones iniciales de trabajo como se aprecia en la Figura 3.3. Además, más adelante estos valores fueron de utilidad para determinar la Función de Transferencia de la planta.

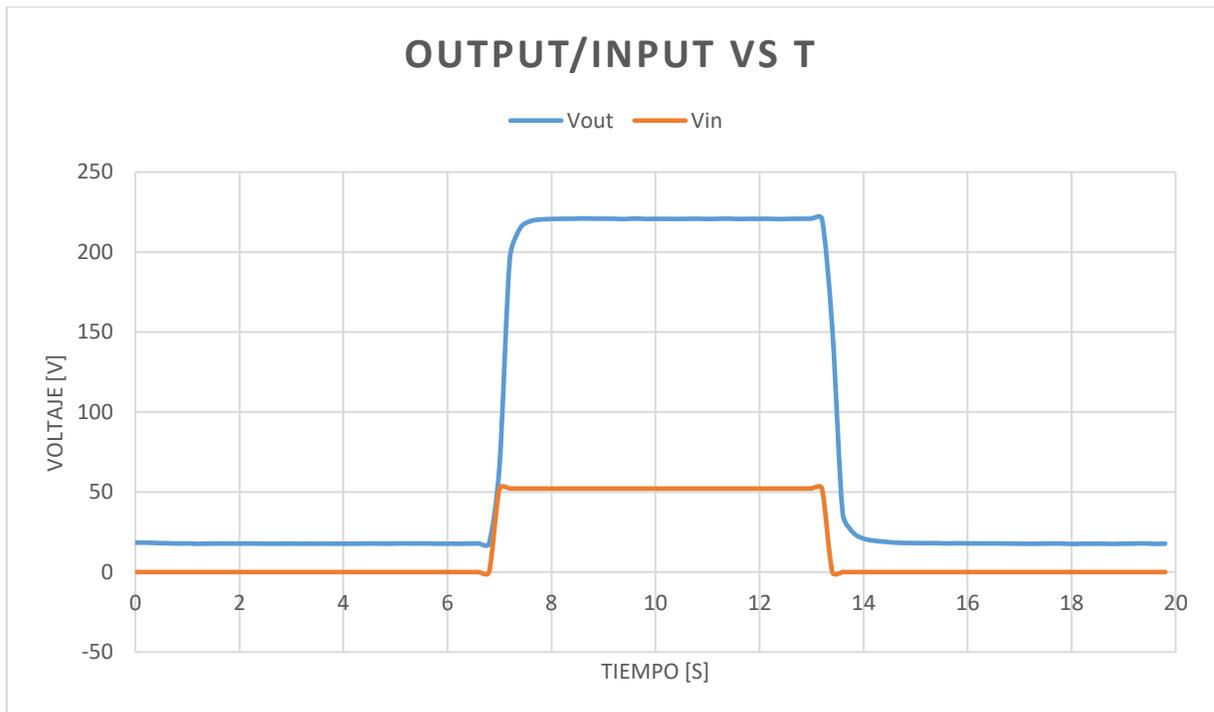


Figura 3.3 Gráfico de voltajes del generador en relación a un rango de tiempo
Fuente: Propia

Los valores obtenidos mediante el proceso de adquisición de datos se pueden observar en el Anexo A.

3.3. Sintonización del control PID.

Para obtener el controlador se debe determinar un modelo de la planta en términos matemáticos. Una vez definidas las variables a controlar se procedió a crear un *software* con un control PID “Proporcional Integral Derivativo”.

Para obtener los modelos matemáticos de la planta, es necesario tomar datos de entrada y salida, determinar la función de transferencia, y finalmente sintonizar el controlador PID, mediante herramientas de MATLAB como son IDENT y SISOTOOL (Vallejo, 1997).

Los valores obtenidos de la adquisición de datos fueron ingresados a la herramienta IDENT de MATLAB como se observa en la Figura 3.4, el programa identifica los valores definidos como entrada y salida a la planta, luego estos datos son procesados en base a un tiempo de muestreo que fue definido al momento de adquirir los datos (0.2 s), y entrega una función de transferencia que representa el comportamiento de la planta.

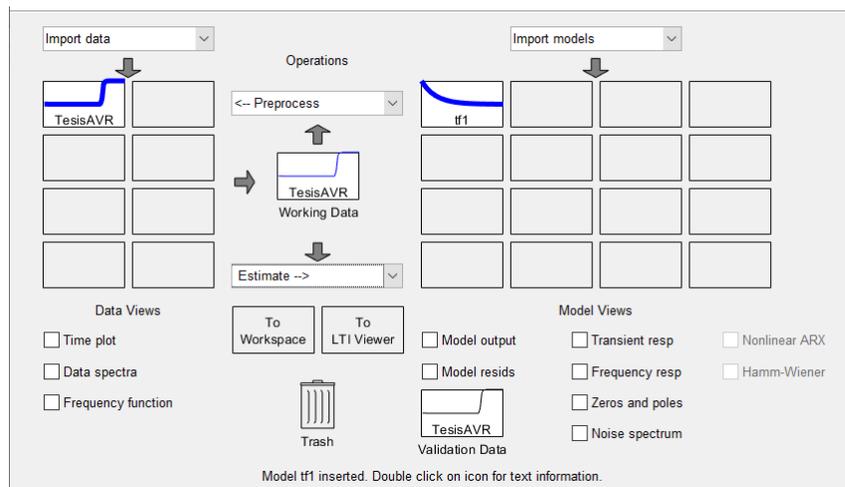


Figura 3.4 Ingreso de datos de entrada y salida en IDENT
Fuente: Propia

En la Figura 3.5, se muestra en negro la gráfica procedente de los valores de la adquisición de datos y en azul la función generada con una aproximación del 84.55 % a la función de transferencia de la planta original, cabe mencionar que la aproximación a la función original depende de la cantidad de muestras tomadas que para el caso fueron de 100 datos que se visualizan en el Anexo A.

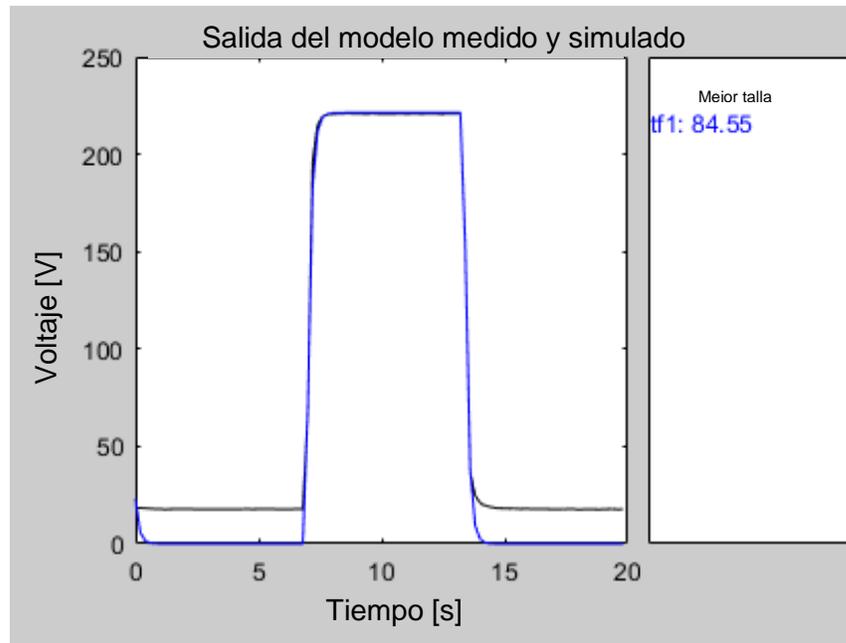


Figura 3.5 Gráfica función de trasferencia estimada
Fuente: Propia

En la siguiente ecuación se muestra la función de transferencia expresada en términos matemáticos de la planta desde la entrada “u1” hasta la salida “y1” representada como función Tf1:

$$tf1 = \frac{1.321 s + 29.34}{s + 6.921} \quad (1)$$

En la Figura 3.6 muestra las características de la función de transferencia de la planta obtenidas de Ident en Matlab.

```

Nombre: tf1

Tiempo - continuo función de transferencia identificada.

Parametrización:

Número de polos: 1 Número de ceros: 1

Número de coeficientes libres: 3

"tfdata", "getpvec", "getcov" usados para sus parámetros y sus
incertidumbres.

Estado:

Uso estimado de TFEST en datos del dominio del tiempo "TesisAVR1"

Ajuste de estimación de datos: 84.55% (estabilidad impuesta)

FPE: 224, MSE: 206.8

```

Figura3.6 Características de la función de transferencia de la planta
Fuente: Propia

La función de transferencia $tf1$, ecuación (1), representa la aproximación a la planta general, ahora lo que se necesita es encontrar una función de transferencia del Controlador en base a la de la planta para encontrar los valores de las constantes proporcional (k_p) e integral (k_i). La aplicación SISOTOOL permite encontrar la función de transferencia del controlador "C" en términos matemáticos representada en la ecuación 2.

$$C = \frac{0.11042 (s + 662.1)}{s} \quad (2)$$

Una vez obtenido la función de transferencia del controlador se puede simular la respuesta de la planta ante una condición inicial o referencia y visualizarla mediante graficas su comportamiento y en base a estas ajustar la respuesta hasta obtener una señal de salida rápida y sin sobre impulsos. En la figura 3.7 se muestra mediante simulación por bloques en Simulink el comportamiento de la planta, colocando en el bloque PI(s) la ecuación de la función "C" para conectarlo al bloque que contiene la función de transferencia de la planta ($tf1$).

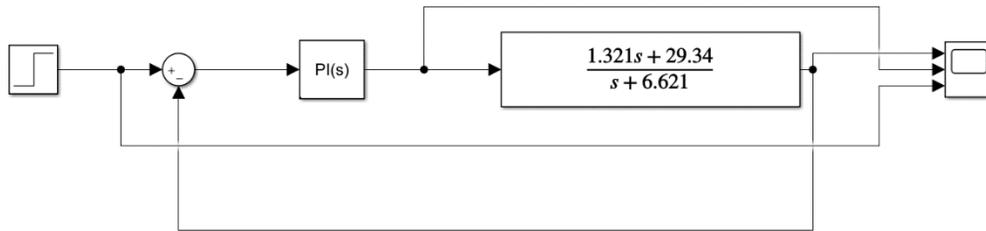


Figura 3.7 Simulación de la planta en simulink
Fuente: Propia

Las gráficas resultantes de la simulación se muestran en la figura 3.8, donde se aprecia en verde la señal de referencia, en azul la salida del controlador y en rojo la entrada del controlador. En base a estas graficas se visualiza que la entrada del controlador tiene un sobre impulso significativo el cual debe ser corregido.



Figura 3.8 Señales de respuesta de la planta sin ajuste
Fuente: Propia

Ajustando el controlador se debe reducir el sobre impulso para tener una señal suave y rápida. En la figura 3.9 se observa que el resultado procedente de un cambio de estado inicial

no va a generar desperfectos como sobre impulsos, respuestas lentas, etc. Pues, estas variaciones ocasionan que la planta funcione fuera de los estándares a los que se le está sometiendo.

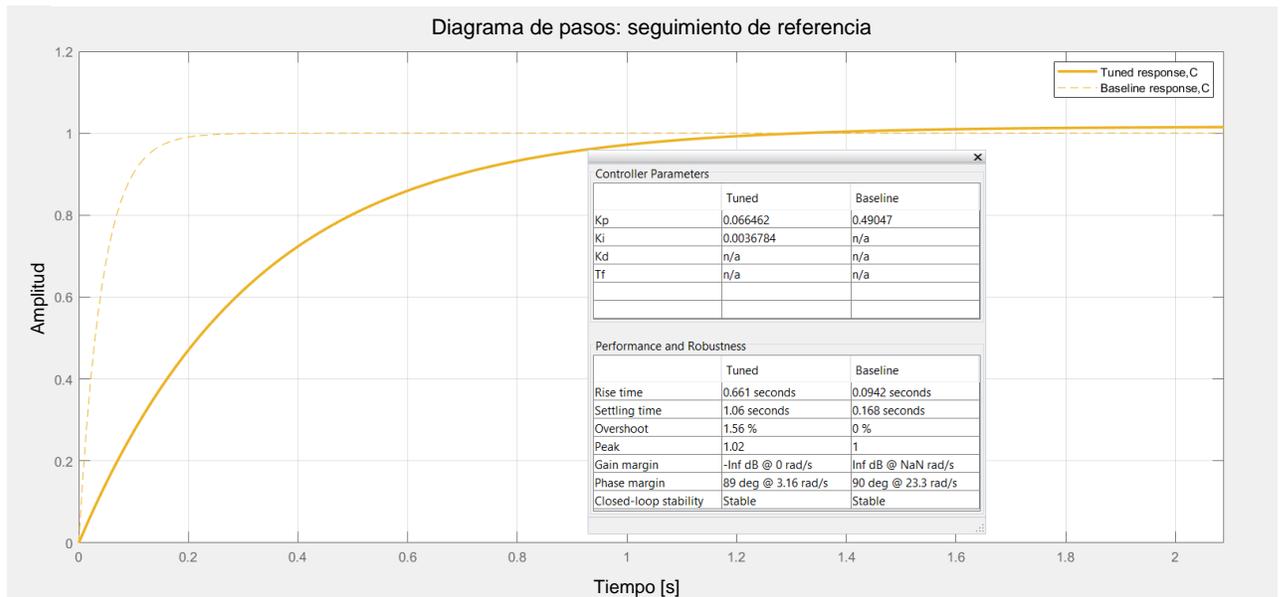


Figura 3.9 Control PID sintonizado
Fuente: Propia

La respuesta se estabiliza a 1.06 [s], tiempo suficiente para que la tarjeta electrónica pueda responder para el control de la planta, finalmente los valores sintonizados para la función de transferencia del controlador son: Para **$K_p=0.066462$** y **$K_i=0.0036784$** .

El valor de la constante derivativa (K_d) es nulo debido a que se aplica necesariamente para procesos de control que tardan más tiempo en responder a una señal inicial como por ejemplo el control de temperatura y control de nivel, es decir, procesos con control de aceleración. En este caso la respuesta del voltaje de salida del generador con respecto a la señal de entrada es casi instantánea.

La ecuación 3 muestra la nueva función de transferencia del controlador, ya que se corrigió el sobre impulso de la señal de entrada y salida del controlador.

$$C = 3.1623 \times \frac{1}{s} \quad (3)$$

El resultado del ajuste se aprecia en la figura 3.10 de donde se observa en rojo la reducción de sobre impulsos obteniendo así una respuesta estable y rápida.

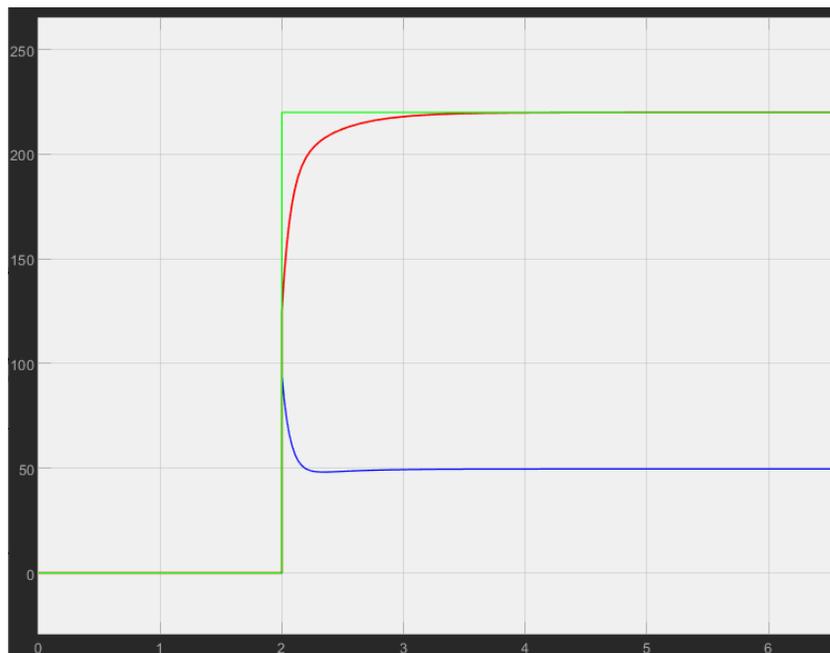


Figura 3.10 Señales de respuesta de la planta con ajuste
Fuente: Propia

3.4. Diseño y simulación del circuito eléctrico y electrónico para un convertidor AC/DC controlado por una PWM con rampa lineal sincronizada a la red.

Consiste en analizar las características de la máquina eléctrica a controlar. Es necesario conocer las características nominales y los límites de la máquina eléctrica para dimensionar tanto el circuito de medida como el de potencia con sus respectivas protecciones, datos como

intensidades y tensiones nominales o límites de corriente de estator y rotor, ya que el conversor AC/DC está conectado directamente y no debe sobrepasar la corriente nominal que soporta el bobinado de campo.

El conversor AC/DC tienen que interactuar con el dispositivo electrónico de control (Arduino), así que es necesario conocer los límites de esta placa electrónica con respecto a voltajes de entrada, además se tiene que conocer cuál es la capacidad de voltaje de salida máximo en sus pines, ya que se debe tomar en cuenta estas características para crear una interfaz entre los circuitos de potencia y datos de la placa electrónica.

➤ **Circuito generador de señal modulador por ancho de pulso (PWM)**

La planta por controlar consta de un generador síncrono en el cual la frecuencia de trabajo depende de velocidad de rotación de su eje, por lo que el circuito debe estar conectado a la red para operar a una frecuencia general en toda la planta. El circuito PWM cuenta con fusibles de protección como se ve en la Figura 3.11 En caso de cortocircuitos.

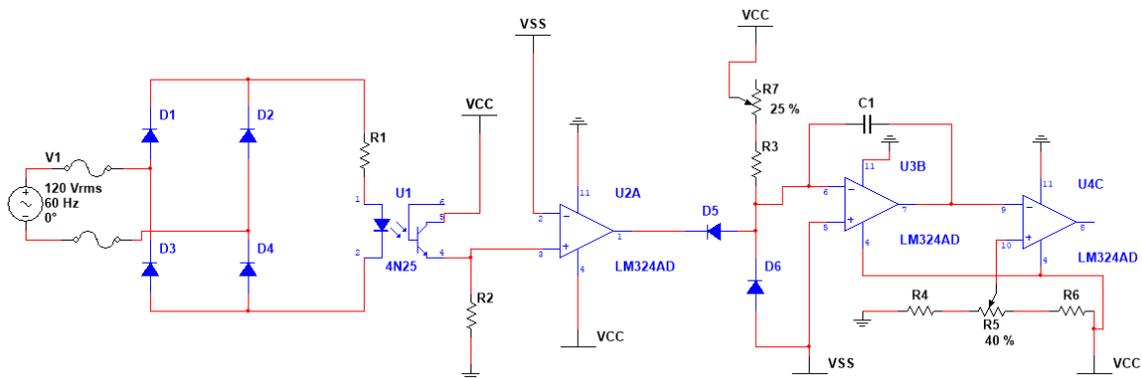


Figura 3.11 Circuito generador de PWM con rampa lineal sincronizada con la red
Fuente: Propia

La parte izquierda del circuito, véase Figura 3.12. Es un detector de cruce por cero constituido por un puente rectificador, una resistencia limitadora y un opto acoplador de aislamiento. La resistencia colocada en el emisor del fototransistor se calcula de acuerdo con la relación de transferencia de corriente $CTR = (\text{corriente en fototransistor} / \text{corriente del LED})$.

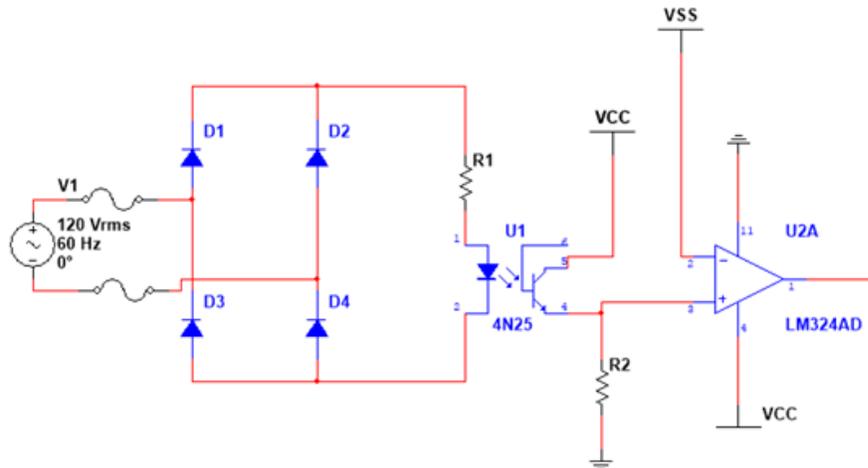


Figura 3.12 Detector de cruce por cero
Fuente: Propia

Para obtener el voltaje medio de una señal de voltaje alterna se debe realizar la siguiente ecuación 4:

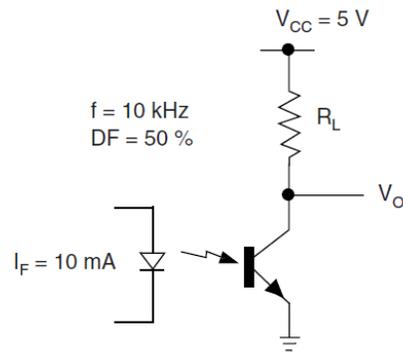
$$VDC = \frac{2 \times \sqrt{2} \times V_{rms}}{\pi} \quad (4)$$

Donde el voltaje efectivo de la red es 120 V, por lo tanto:

$$VDC = \frac{2 \times \sqrt{2} \times 120}{\pi} = 108.03 \text{ [V]}$$

En el circuito de la Figura 3.13 se muestra la corriente a la cual el diodo led empieza a conducir y emitir luz, se toma como dato para los cálculos la corriente a la que conduce el led.

OPTOACOPLADOR: 4n25



i4n25_14

Figura 3.13 Conexión interna optoacoplador 4n25
Fuente: Propia

A continuación, en la Tabla 3.1, se muestran las características de voltajes y corrientes del optoacoplador 4n25 que son necesarias para realizar los cálculos posteriores:

Tabla 3.1 Características eléctricas - ópticas del optoacoplador 4n25

Características Eléctrico - Óptica						(T _a =25°C)
Parámetro	Símbolo	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidad	Condiciones
Tensión directa	V _F	-	1.2	1.5	V	I _F =10mA
Corriente Inversa	I _R	-	-	10	μ A	V _R =4V
Terminal de capacitancia	C _t	-	50	-	pF	V=0, f=1kHz

Fuente: Propia

Voltaje LED: 1.2 [v]

Corriente LED: 10 m [A]

Para encontrar el valor de la resistencia de potencia se debe utilizar la siguiente Ec. (5) resultante de la ley de ohm y diferencia de voltajes:

$$R1 = \frac{V_{DC} - V_{LED}}{I_F} \quad (5)$$

Reemplazando los valores de voltajes y corrientes del diodo se tiene:

$$R1 = \frac{108.03 - 1.2}{10mA} = 10.68 [k\Omega]$$

La ecuación 6, permite encontrar la potencia que consume la resistencia es la siguiente:

$$PR1 = (10mA)^2 \times 10k \quad (6)$$

De la cual se obtiene:

$$PR1 = 1 [W]$$

Ecuación para encontrar la corriente del fototransistor:

$$i_{TBJ} = CTR \times i_{LED} \quad (7)$$

Para encontrar la corriente del fototransistor es necesario conocer el valor CTR que será determinado por las características técnicas del optoacoplador, véase en la siguiente Tabla 3.2 el valor referencial.

Tabla 3.2 Características de transferencia del optoacoplador 4n25

Características opto acoplador 4N25/26/27/28						
Parámetro	Símbolo	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidad	Condiciones
Corriente de colector	I _c	1	-	2	mA	I _F =10mA V _{CE} =10V
Relación de transferencia de Corriente	CTR	10	-	20	%	I _F =10mA V _{CE} =10V

Fuente: Propia

Relación de transferencia de corriente directa (CTR): 20%

Reemplazando valores se tiene:

$$i_{TBJ} = 1.2 \times 10mA = 12 [mA]$$

Para encontrar el valor de la resistencia en el emisor del optoacoplador se utiliza la siguiente ecuación:

$$R2 = \frac{V_{cc}}{i_{TBJ}} \quad (8)$$

Reemplazando valores y aproximando a un valor comercial se tiene:

$$R2 = \frac{12}{12mA} = 1K[\Omega]$$

En la segunda parte del circuito, Véase Figura 3.14 Se tiene un primer amplificador operacional en configuración para reducir el ruido proveniente de la red, a continuación, otro amplificador en configuración integrador, que está funcionando como generador de diente de sierra. Para el correcto funcionamiento del integrador se calculan los valores de resistencia R3 y Capacitor para que se sature en un semiciclo de línea, es decir, 8.3 [ms] aproximadamente.

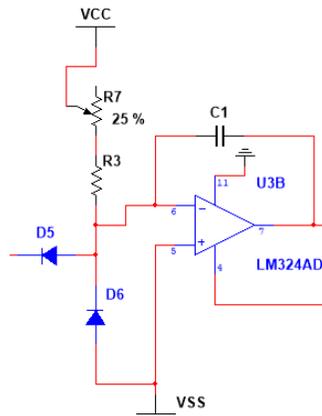


Figura 3.14 Circuito Generador diente de sierra
Fuente: Propia

A continuación, se muestra la ecuación para encontrar la resistencia que permite saturar el operacional en un semiciclo de línea (8.33ms):

Periodo: $\tau = 8.33 \text{ [ms]}$

Asumo: $C1 = 0.1 \text{ [uF]}$

De la fórmula para determinar el tiempo de carga del capacitor se tiene:

$$\tau = R \times C \text{ (9)}$$

Despejando R, para obtener el valor de la resistencia:

$$R = \frac{8.33ms}{0.1uF} = 83.3 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

El valor de las resistencias R3 y R7 debe ser 83.3 [kΩ], aproximando a un valor comercial más una resistencia fija para cuando P sea cero el circuito no se quede sin conexión se tiene:

$$R3 = 1 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$P = 100 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

En la última parte Figura 3.15. Se tiene un amplificador operacional en configuración comparador que produce la onda PWM al comparar la onda diente de sierra con un voltaje proporcionado por el potenciómetro que a futuro es un voltaje dado por la placa electrónica.

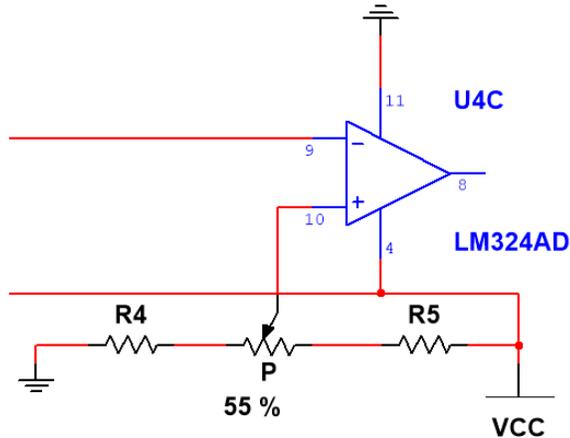


Figura 3.15 Circuito comparador de voltaje
Fuente: Propia

Para obtener el voltaje de salida del comparador se debe realizar la siguiente ecuación 9:

%Potenciómetro: Para $\delta = 0.1$

Para $R4 = 820 [\Omega]$

$$V_{out} = \frac{R4}{P+R4+R5} \times V_{cc} \quad (10)$$

Reemplazando valores conocidos se tiene:

$$0.1(12) = \frac{820}{P + 820 + R5} \times 12$$

Despejando Resistencias se obtiene:

$$P + R5 = 7.38 [k\Omega] \quad (11)$$

La ecuación para encontrar el voltaje de salida del comparador es la siguiente:

$$V_{out} = \frac{R_4 + P}{P + R_4 + R_5} \times V_{CC} \quad (12)$$

A continuación, se sustituye la ecuación 11 en la ecuación 12 obteniendo lo siguiente:

%Potenciómetro: Para $\delta = 0.9$

$$0.9(12) = \frac{P + 820}{820 + 7.38k} \times 12$$

Aproximando a un valor comercial se tiene:

$$P = 6.56K \gg 10 [k\Omega]$$

Para encontrar el resultado de R5 se reemplaza el valor de P en la ecuación 11:

$$R_5 = 7.38k - 6.56k$$

De la diferencia de valores se tiene:

$$R_5 = 820 [k\Omega]$$

Luego de diseñar el circuito se comprueba su funcionamiento mediante un programa simulador (Multisim), donde se obtiene lo siguiente, ver Figura 3.16.

- a) En Amarillo, onda a la salida del opto acoplador es decir la onda alterna rectificada.
- b) En Turquesa, onda diente de sierra correspondiente al circuito integrador.
- c) En Violeta, onda de salida PWM de todo el circuito

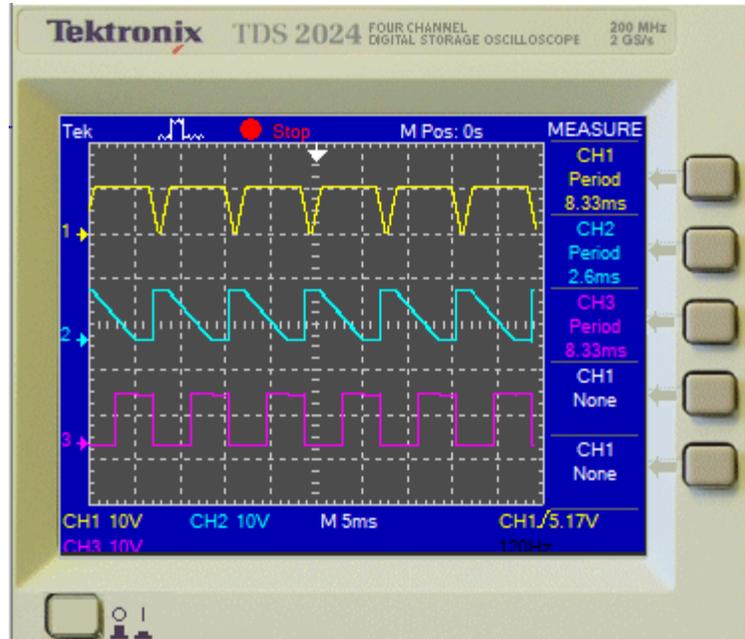


Figura 3.16 Formas de onda generadas
Fuente: Propia

➤ **Circuito conversor AC/DC controlado**

El modo de operación del generador síncrono es el resultado de la aplicación de voltaje DC al bobinado del rotor para producir un campo magnético rotacional dentro de la maquina el cual a su vez induce un campo magnético rotacional en los devanados del estator de la máquina. Existen 2 métodos conocidos para entregar potencia DC a los devanados de campo:

- a) Suministrar potencia DC desde una fuente DC externa al rotor por medio de anillos rozantes.
- b) Suministrar potencia DC desde una fuente DC especial montada directamente en el eje del generador sincrónico. (Chapman, 2000)

Para efecto del caso en estudio se consideró suministrar potencia DC desde una fuente externa mediante un circuito convertor de corriente alterna a corriente continua.

El circuito es un convertor AC/DC controlado, es decir un rectificador controlado de silicio SCR de onda completa, véase Figura 3.17.

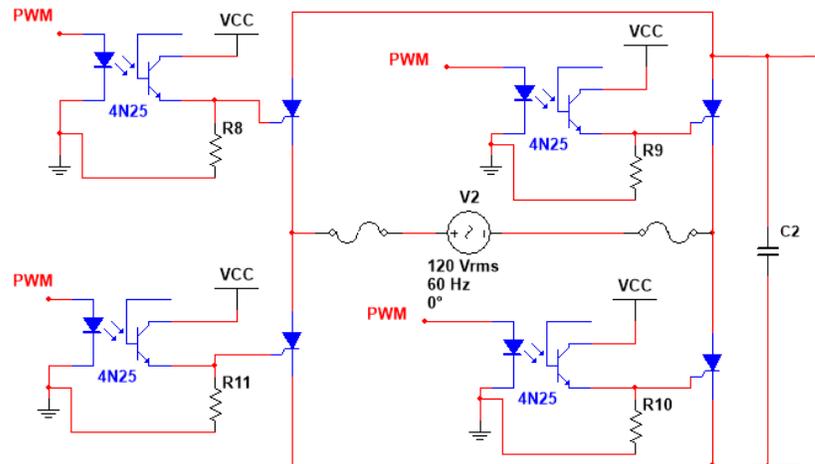


Figura 3.17 Puente rectificador controlado de onda completa
Fuente: Propia

La principal ventaja de los rectificadores controlados es que se puede modificar el valor medio de tensión obtenido para alimentar una carga determinada. Esta ventaja es aplicada en el control de velocidad en máquinas de CC. (Caro, 2004)

Para modificar el valor medio de tensión a la salida del rectificador se inyecta un disparo de corriente en la compuerta del SCR para obtener un control de potencia en la carga. Este disparo es suministrado por la señal PWM mencionada en el enunciado anterior y a la salida del circuito se coloca un filtro capacitivo para reducir el rizado de la señal y obtener así una señal DC constante.

En la siguiente Figura 3.18 se muestra en el canal 1 del osciloscopio, la señal del circuito PWM máximo que dispara los SCR del circuito rectificador controlado, el cual permite la rectificación de onda completa a la salida del conversor AC/DC que se observa en el canal 2 del osciloscopio.

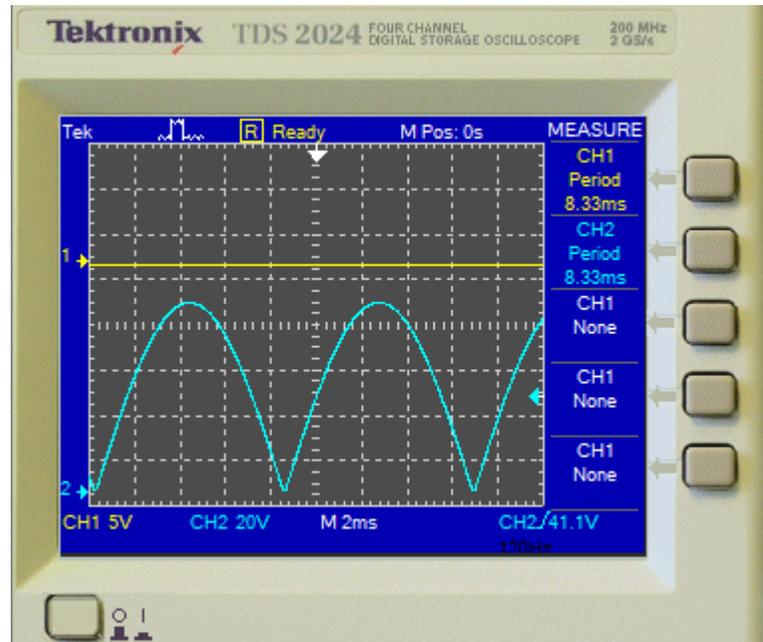


Figura 3.18 Rectificador de onda completa controlado con disparo máximo
Fuente: Propia

Ahora véase en la Figura 3.19 como al ocasionar una variación de corriente en la compuerta del SCR provoca que a la salida del rectificador la onda se vea cortada, es decir, solo una parte de ella es entregada, así es como en la carga se obtiene un control de potencia.

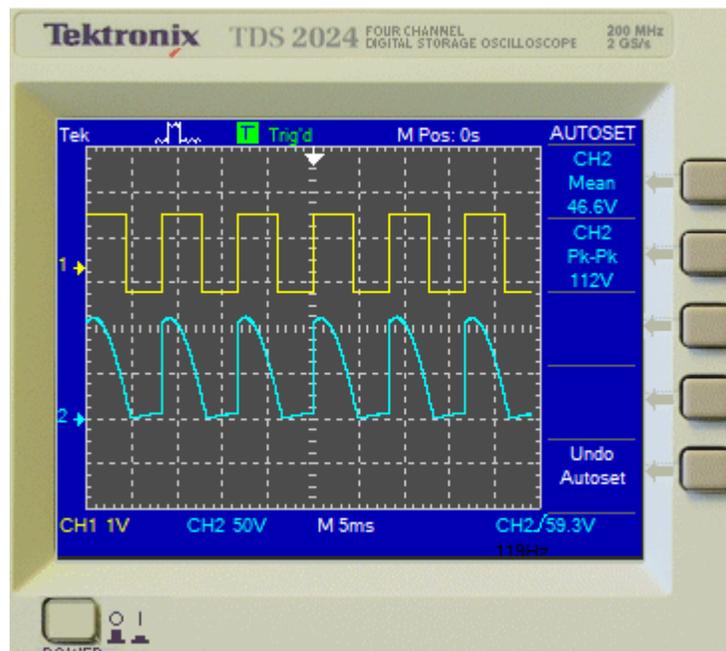


Figura 3.19 Rectificador de onda completa controlado con disparo
Fuente: Propia

Para una visualización general de los 2 circuitos véase en la sección de Anexo B.

El anexo B muestra el circuito PWM acoplado con el conversor AC/DC, ya que los dispositivos electrónicos SCR son controlados por la señal PWM permitiendo variar el voltaje DC desde el controlador.

La PWM que comanda el disparo del SCR en el conversor AC/DC, está por encima del voltaje máximo que la tarjeta electrónica puede proporcionar, por tanto, es necesario incorporar un circuito que relacione esta diferencia de voltajes conocido como circuito acondicionamiento.

➤ Circuito acondicionador

La tarjeta electrónica Arduino proporciona un voltaje de salida de $0 - 5V_{DC}$ y en el circuito PWM intervienen voltajes de hasta $12V_{DC}$, por esta razón es necesario crear un circuito de acondicionamiento o amplificación para que la señal emitida por la tarjeta electrónica alcance los valores que se utiliza el circuito PWM con rampa lineal sincronizada a la red. En la Figura 3.20 se aprecia el circuito de acondicionamiento con el amplificador LM741 de 2 etapas, la primera amplifica 3 veces la señal PWM producida por el controlador, en la segunda etapa se tiene la configuración diferencial de amplificación, produciendo un voltaje extra de $6 V_{DC}$ para acondicionar de manera correcta la señal PWM que se conecta al circuito de rampa lineal sincronizada con la red.

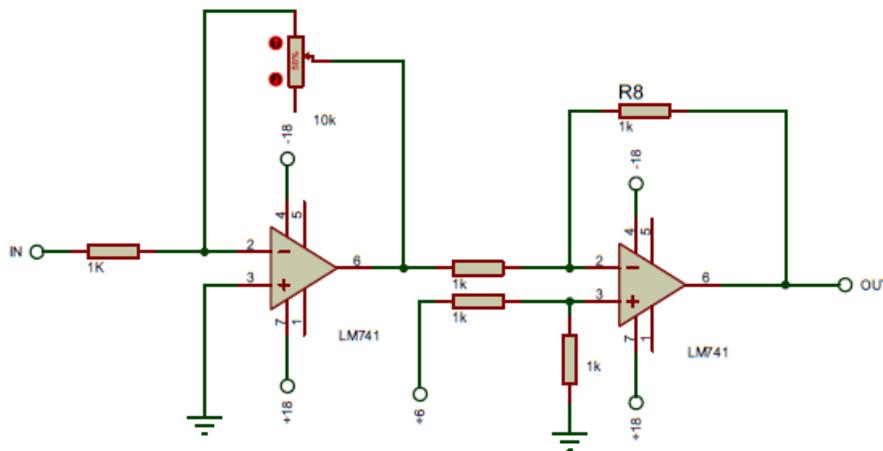


Figura 3.20 Circuito de Acondicionamiento
Fuente: Propia

Para una visualización general de los 2 circuitos véase el Anexo B.

En el anexo B se muestra los circuitos necesarios para acondicionar la salida del controlador (Arduino) a un voltaje de $6-18V_{DC}$, permitiendo al comparador funcionar de manera correcta.

Una vez determinado los circuitos electrónicos y de potencia se puede determinar el control que estos van a tener es decir mediante una tarjeta electrónica y un algoritmo de control que comande a estos circuitos.

3.5. Algoritmo de control PID.

Este apartado comprende la elección y diseño del control PI. Para implementar un controlador PI en un código o un programa se deben conocer 5 parámetros: Constante proporcional, integral, valor de entrada, valor de llegada y el periodo de muestreo. La programación del PI debe estar dentro de una función de bucle. Se determinará el error y por último la salida, esto de manera automática al implementar la función de transferencia PI en la planta (DescubreArduino, 2014).

El algoritmo de control PI en la planta se comporta de forma proporcional para reducir la señal de error que existe cuando el controlador compara el *SetPoint* con el valor de voltaje que está ingresando por el sensor de voltaje AC, es decir, la señal de salida PWM producida por el controlador (Arduino) aumenta proporcionalmente hasta igualar el valor del voltaje de entrada con el valor del *SetPoint* determinado, convirtiendo la señal de error cercana a cero. El control Proporcional-Integral permite tener una respuesta estable y rápida cuando existan perturbaciones externas en la planta, es decir, al variar el voltaje generado mediante la modificación del *SetPoint*, el controlador debe cambiar rápidamente el voltaje DC para influir en la planta, esta modificación aumenta o disminuye el voltaje AC dependiendo de los requerimientos que necesite la planta. Para tener una idea más clara, se muestra la siguiente ecuación:

$$u(t) = Kp [e(t)] + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t) dt + KpTd \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

De la ecuación, se puede hacer las siguientes afirmaciones:

- $e(t)$ es el error de la señal.
- $u(t)$ salida del controlador y entrada de control al proceso.
- K_p es la ganancia proporcional.
- T_i es la constante de tiempo integral.
- T_d es la constante de tiempo derivativa.

En la Figura 3.21 se observa cómo actúa un controlador PID en un lazo de control cerrado de una planta.

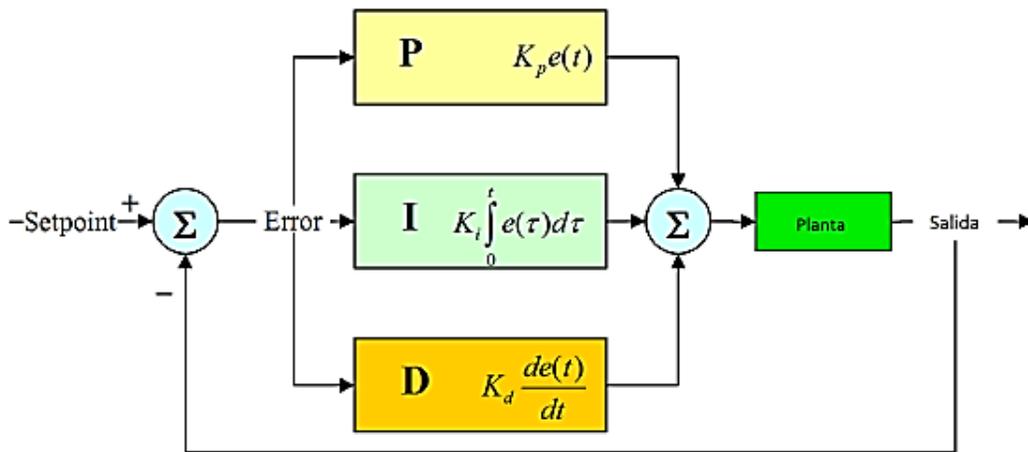


Figura 3.21 Diagrama de bloques Control PID

Fuente: (Ezequiel, 2011)

Arduino contiene librerías que permiten realizar e implementar fácilmente un control PID, sin necesidad de utilizar ninguna fórmula o realizar cálculos previos en el código, simplemente se debe ingresar los parámetros en cada una de las variables del PID y automáticamente Arduino producirá una respuesta PWM. Por medio del *software* Arduino se programa no solo el control sino también las rutinas de seguridad como un limitador de corriente, además de herramientas que faciliten la interacción con el usuario como un *display* en tiempo real a través del Arduino, la utilización de un teclado matricial ayudará al usuario a comprobar el funcionamiento del algoritmo de control.

En la siguiente Figura 3.22. Se muestra el diagrama de flujo del código de control que comanda todas las decisiones.

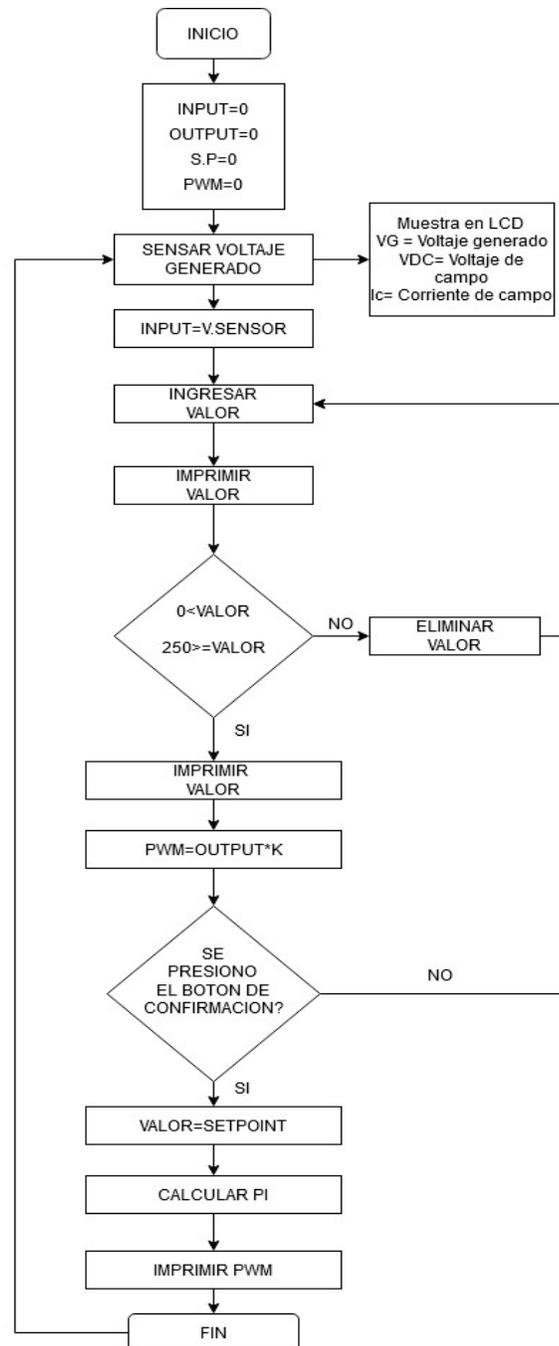


Figura 3.22 Diagrama de flujo algoritmo de control
Figura: Propia

3.6. Simulación general del sistema

Una vez definidos los parámetros de operación en cada componente de la planta, se compiló en un solo *software* de simulador para verificar su comportamiento lo más cerca posible a una respuesta física.

➤ Parámetros de simulación

El *software* adecuado para una simulación de la mayoría de los componentes es *Isis* de Proteus ya que contiene los elementos más recientes y brinda la posibilidad de ingresar y actualizarlos en caso de que sea necesario.

Placa Electrónica Arduino MEGA: Arduino Mega al contar con una memoria EEPROM (espacio de memoria) de mayor capacidad permite crear líneas de códigos más extensas permitiendo que el procesamiento de datos sea más rápido, cuenta con entradas analógicas que permiten la conexión de sensores de voltaje y corriente para la planta, también posee salidas analógicas con modulación de ancho de pulso PWM que es necesario para poder comandar los circuitos de potencia de la planta.

Arduino Mega cuenta con librerías orientadas a control PID que facilitan la programación de este controlador y utiliza lenguaje de alto nivel que es más fácil de comprender para los estudiantes, además, Arduino Mega cuenta con salidas digitales en las cuales se puede conectar dispositivos electrónicos donde se pueda visualizar las variables de proceso.

Las salidas digitales de Arduino también permiten activar leds para mostrar que está funcionando correctamente, permiten activar relés que desconectaran circuitos en caso de fallos como protección. Arduino Mega también posee 2 pines especiales utilizados para una comunicación serial mediante recepción y transmisión de datos, esto se utilizó para visualizar

de cuatro filas y cuatro columnas utilizadas para el proyecto en el *software* de simulación Proteus.

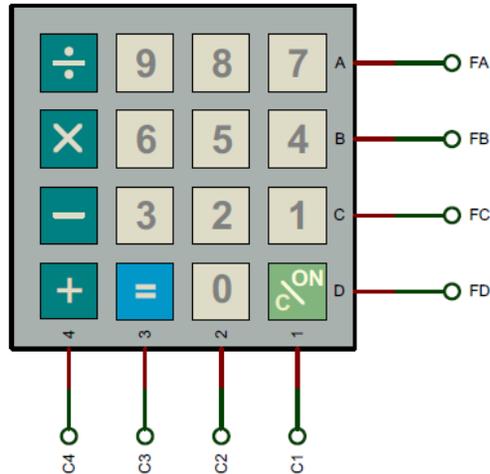


Figura 3.24 Teclado matricial 4x4
Fuente: Propia

Este dispositivo fue utilizado para variar el *SETPOINT* desde el exterior y pueda ser comandado por el operador dependiendo de las necesidades que la planta requiera. Este teclado matricial permite corregir o eliminar el S.P si el operador ha cometido un error al momento de ingresar el valor, además cuenta con un botón que inicio el funcionamiento del generador para asegurar que el valor del S.P fue ingresado correctamente.

Decodificador 74C922: El decodificador 74C922 es un integrado que permite utilizar un número menor de pines al momento de conectar el teclado matricial al *firmware*, véase Figura 3.25, ya que envía al controlador números BCD que son procesados por el controlador fácilmente, además permite tener una lectura constante del teclado en el programa debido a que el pin DA permite activar la interrupción del controlador cada vez que se pulse cualquier botón del teclado matricial.

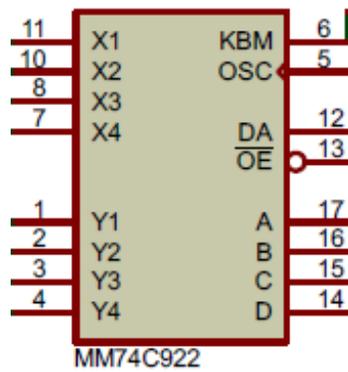


Figura 3.25 Decodificador 74C922
Fuente: Propia

El destino del integrado 74C922 es ahorrar pines digitales de la tarjeta electrónica y ahorrar memoria al momento de crear el algoritmo de control pues con el uso del integrado no es necesario añadir librerías del teclado.

Pantalla de cristal líquido (LCD): Es un dispositivo que permitirá mostrar el estado en tiempo real de las variables que están siendo controladas y manipuladas en la planta. Para el caso se utilizó un LCD de 4x20, es decir, 4 filas de 20 caracteres donde se mostrarán los parámetros más importantes de la planta como: *SetPoint*, VDC, VAC, IDC, voltaje de error PI mensajes de confirmación o error de proceso, véase en la Figura 3.26 el LCD utilizado para el proyecto (Cuti, 2006).

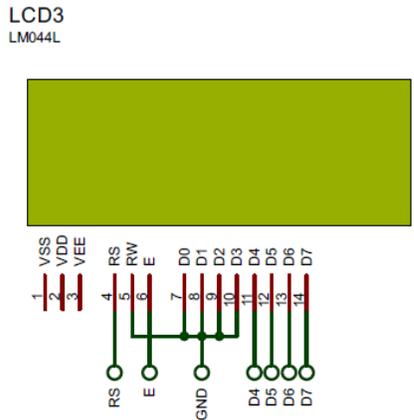


Figura 3.26 Pantalla LCD 4x20
Fuente: Propia

La pantalla LCD tiene la función de presentar el estado del sistema en tiempo real, el valor *SETPOINT* ingresado y los valores de los sensores (Voltaje Generado y corriente de Campo).

Sensor ACS712: Es un sensor de corriente que tiene la capacidad de detectar corriente DC o AC, permitiendo conocer los valores de corriente DC en el bobinado de campo que son enviados al controlador para realizar una desconexión inmediata del conversor AC/DC de la máquina cuando la corriente censada exceda los 1.5 [A], que es el valor máximo de corriente que soporta el bobinado de campo, ya que si no se realiza una desconexión este bobinado se quemaría y dañaría el generador. En el simulador se muestra el integrado del sensor Figura 3.27 del cual se destaca las siguientes características:

- Sensor de corriente ACS712 – 5 A.
- Tensión de alimentación 5V DC.
- Módulo bidireccional puede medir desde -5A hasta +5A, equivalente a 66mV/A
- Sensor invasivo
- Tolerancia de error 1.5%
- Resistencia interna 1.2 MΩ
- Sensibilidad ajustable de 66 a 185 mV/A

- Salida de voltaje proporcional de corriente AC o DC

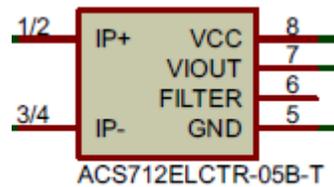


Figura 3.27 Sensor ACS712
Fuente: Propia

- Por tratarse de un sensor invasivo, debe ir conectado entre el circuito de conversor AC/DC y el bobinado de campo pues es un sensor destinado a monitorear la corriente máxima que puede soportar el bobinado retórico. El sensor activa un relé de protección para inhabilitar la conexión y proteger el bobinado de campo.

Transformador de voltaje AC ZMPT101B: Este módulo permite medir voltaje alterno, ya que la tarjeta *firmware* no es capaz de medir voltajes alternos se opta por conectar un módulo indirecto de medida véase la Figura 3.28. El módulo está integrado por un micro transformador, el lado primario se conecta a los bornes del generador y el secundario a un circuito amplificador operacional LM358 para acondicionar una señal con desplazamiento positivo de salida. El módulo entrega una señal senoidal de amplitud regulable por un potenciómetro. El transformador de voltaje AC cuenta con un voltaje máximo de admisión de $250V_{AC}$ apropiado para el generador que se va a utilizar, donde se puede generar de 0 a $250V_{AC}$ fácilmente, este voltaje variable será transformado proporcionalmente de 0V a $5V_{DC}$ que pueden ser procesados por el controlador.



Figura 3.28 Módulo transformador de voltaje AC
Fuente: Propia

Es posible simular el funcionamiento mediante un generador de señales ver Figura 3.29, el generador proporciona formas de onda senoidales con frecuencias entre 0 [Hz] y 12 [MHz] y señales de amplitud de 0 – 12V. Esta señal va a reemplazar la onda senoidal desplazada y entregada por el módulo.

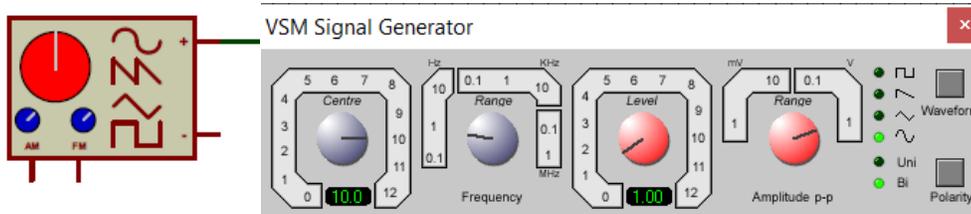


Figura 3.29 Generador de señales en Isis de Proteus
Fuente: Propia

Finalmente, en la Figura 3.30 se aprecia el diagrama de conexiones de la simulación completa, al sensor de corriente conectado al pin analógico A1, se le añadió una fuente DC para representar el convertor AC/DC y un motor DC para representar el bobinado de campo con un potenciómetro para variar el voltaje proporcional a la corriente. El estado lógico en el pin 14 de la tarjeta Arduino representa la activación o desactivación del relé de protección para la corriente máxima del bobinado de campo.

El generador de señales que representa el módulo transformador AC se conecta al pin analógico A1, los pines del A8 al A11 conectados al decodificador que interpreta el teclado matricial, se muestran también los pines de conexión al LCD, los pines de comunicación serial hacia un monitor para verificar los valores generados. La salida del control PID debe darse por un pin capaz de reproducir señales PWM, el pin 5 cumple con el requisito y es el encargado de enviar esa señal hacia el circuito amplificador.

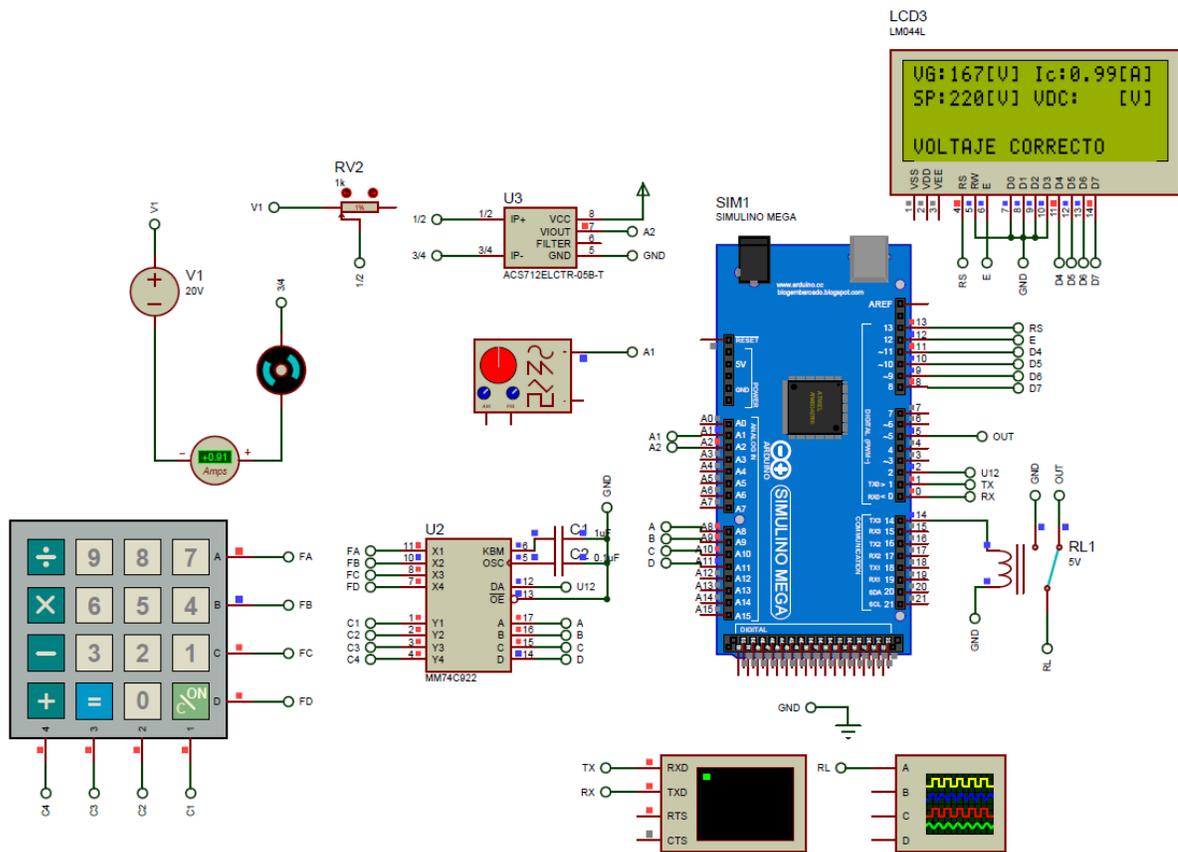


Figura 3.30 Esquema simulación del control PID para AVR
Fuente: Propia

La simulación representa el control y la señal que se debe entregar a los circuitos acoplados al generador, la conexión de todos los mencionados se encuentra en el Anexo D y en la siguiente Tabla 3.3 se describe los pines utilizados de la Placa Arduino.

Tabla 3.3 Descripción de pines utilizados de la placa Arduino

Pin	Definición	Tipo	Descripción
A1	Entrada	Analógica	Generador de señales / modulo sensor de voltaje ZMPT101B
A2	Entrada	Analógica	Sensor de corriente ACS712
A8	Entrada	Digital	Numero binario recibido del decodificador 74C922
A9	Entrada	Digital	Numero binario recibido del decodificador 74C922
A10	Entrada	Digital	Numero binario recibido del decodificador 74C922
A11	Entrada	Digital	Numero binario recibido del decodificador 74C922
0	Entrada	Digital	RX, Recepción de datos, comunicación serial
1	Salida	Digital	TX, Transmisión de datos, comunicación serial
5	Salida	Analógica	Señal de control PWM
8	Entrada/Salida	Digital	Bus de datos bidireccional / LCD
9	Entrada/Salida	Digital	Bus de datos bidireccional / LCD
10	Entrada/Salida	Digital	Bus de datos bidireccional / LCD
11	Entrada/Salida	Digital	Bus de datos bidireccional / LCD
12	Entrada	Digital	Habilitación del módulo: E=1 Módulo conectado / LCD
13	Entrada	Digital	Selección del registro de control/registro de datos: Rs= 1 Selección de registro de datos / LCD
14	Salida	Digital	Relé de protección bobinado de campo

Fuente: Propia

3.7 Diseño de la estructura física

Consiste en realizar todos los montajes necesarios, una vez conocidos los límites y necesidades de los dos principales elementos (máquina eléctrica y placa electrónica) y después de diseñar y comprobar los circuitos de medida y potencia estos serán impresos en

una placa PCB para ser colocados en una caja o módulo en donde se aprecien sus componentes, atendiendo también a otros factores como disponibilidad, dimensiones. En la siguiente Figura 3.31 Se muestra el diseño para una implementación de placa PCB de los circuitos PWM y Conversor AC/DC.

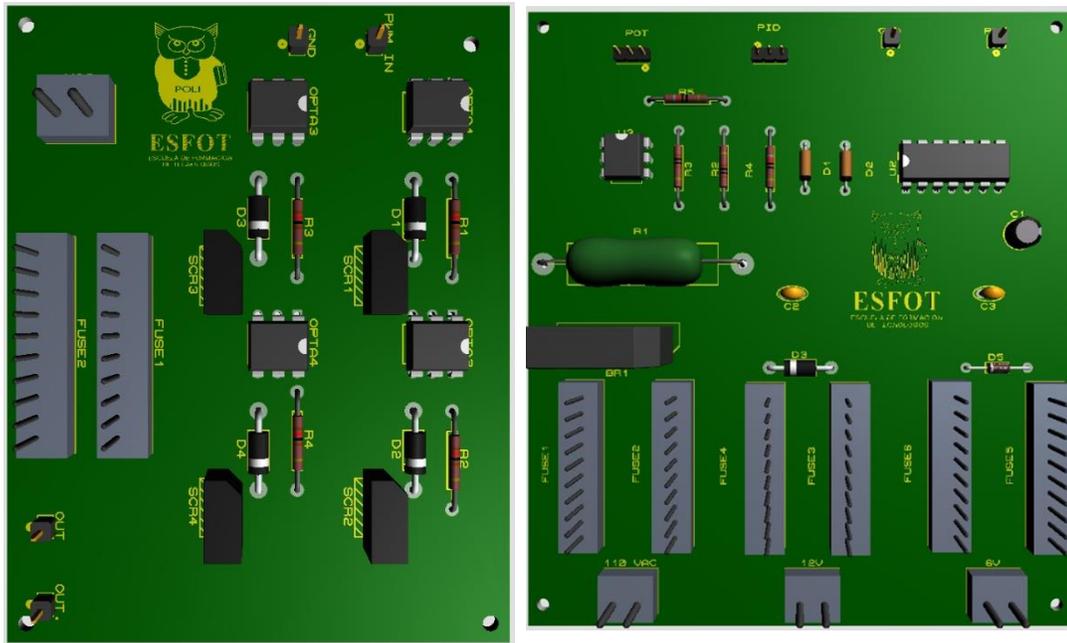


Figura 3.31 Diseño placa PCB Circuitos PWM y Conversor AC/DC
Fuente: Propia

En el Anexo E se redacta un manual para el diseño de las placas electrónicas y de potencia mencionadas anteriormente.

3.8 Pruebas de Funcionamiento

El proyecto consiste en simular un control automático para que el generador síncrono estabilice su voltaje de salida con o sin cargas conectadas, para comprobar este control se realizó un registro de datos donde se verifican los valores de las señales de entrada y salida con los dispositivos que simulan el funcionamiento físico de los componentes como ;

Generador de señales en función del módulo de voltaje AC , sensor de corriente, un osciloscopio para visualizar la señal emitida por la tarjeta electrónica, un monitor virtual para comprobar los valores intrínsecos del control, teclado matricial y LCD anteriormente mencionados. Todos estos elementos se visualizan en la Figura 3.32.

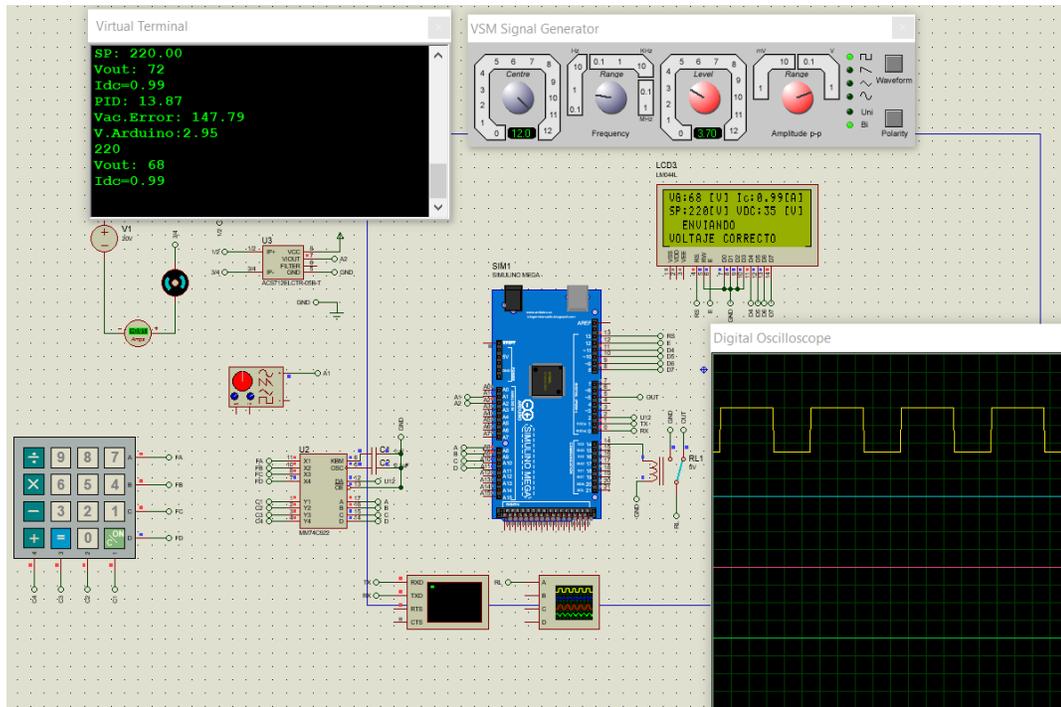


Figura 3.32 Simulación funcionamiento del sistema
Fuente: Propia

El registro de datos que se visualiza en la Tabla 3.4, se lo realizó mediante pasos de 10V desde el generador de funciones y un *SetPoint* máximo de 220V para comprobar que la señal emitida por el control PI reaccione inversamente proporcional al voltaje generado VG. El valor PI se muestra para verificar que el control está produciendo una respuesta, voltaje diferencial “Vac: Error” es la diferencia entre el SetPoint ingresado y el voltaje generado “VG”, voltaje Arduino “V.Arduino” es el voltaje de 0 a 5 VDC en el pin 5 correspondiente a la señal PWM emitida y VDC el voltaje que debe inducir el bobinado de campo al bobinado estatórico.

Tabla 3.4 Registro de datos comprobación de funcionamiento

Generador de señales	Voltaje generado	Valor control	Vac Error	V Arduino	V Campo
Nivel	VG [VAc]	PI	[VAc]	[VDc]	[VDc]
0	0	14.70	219.80	4.22	0
500m	10	13.43	210.75	4.05	1
1.10	20	13.19	200.10	3.85	2
1.70	31	12.52	186.12	3.63	4
2.20	40	12.12	183.23	3.52	6
2.80	51	11.18	169.18	3.25	9
3.30	61	10.56	158.85	3.05	11
3.80	70	9.98	150.20	2.89	13
4.40	81	9.25	139.21	2.68	16
4.90	90	8.64	130.21	2.50	18
5.40	99	8.04	121.21	2.33	21
5.90	109	7.44	111.21	2.14	23
6.50	120	6.64	100.19	1.93	26
7.00	129	6.03	91.18	1.75	28
7.60	140	5.35	79.93	1.54	30
8.20	151	4.56	69.13	1.33	32
8.70	161	3.94	58.95	1.13	34
9.20	170	3.47	50.93	0.98	36
9.70	179	3.26	42.79	0.82	38

10.3	190	2.01	30.09	0.61	41
10.8	200	1.35	20.21	0.39	43
11.3	209	0.78	11.71	0.23	46
11.9	220	0.07	1	0.02	49
12.0	222	0.03	0.1	0.01	52

Fuente: Propia

Para un estudio más profundo se realizó un análisis por casos, en los cuales para cada uno de ellos se ingresó un *Set Point* general de 220V con esto en cada caso se analiza el comportamiento de las señales a medida que el voltaje generado se acerca al voltaje requerido, se verifican los valores y señales generadas con un voltaje censado bajo, mínimo, máximo, *Set Point* fuera de rango y Corriente de campo máxima.

Caso 1: Mediante el teclado matricial se ingresó un *Set Point* de 220V_{AC}, es decir, el usuario requiere a la salida del generador 220 V_{AC}. En el generador de señales se coloca un nivel de 2.80 que representa 51 voltios alternos censados (voltaje bajo). En la pantalla LCD se muestran los valores VG (Voltaje generado), SP (*Set Point*) ingresado, VDC (voltaje en bobinado de campo), IDC (corriente de campo). En la Figura 3.33 se visualiza la señal generada por el algoritmo de control en el osciloscopio.

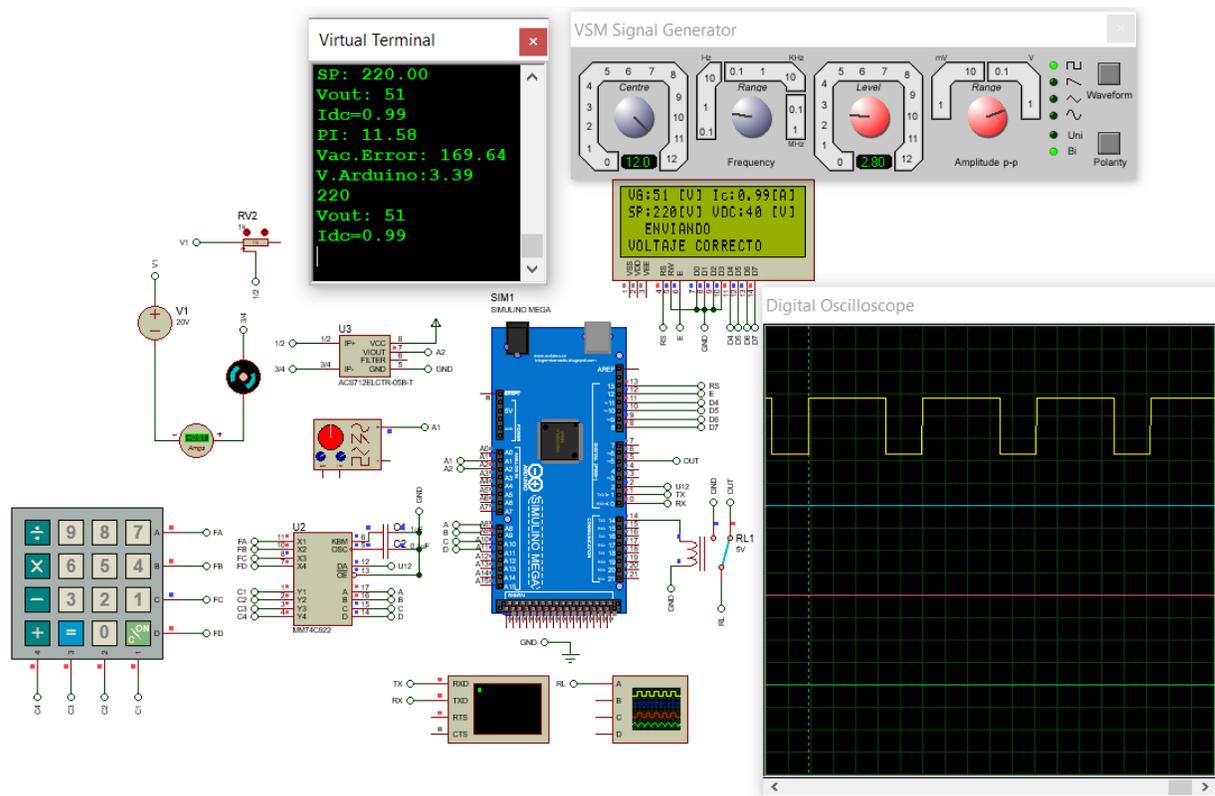


Figura 3.33 Respuesta ante un voltaje bajo al *Set Point*
Fuente: Propia

Se aprecia que la señal emitida por la tarjeta Arduino esta casi a su totalidad pues la diferencia entre voltajes de salida del generador y el *Set Point* ingresado (voltaje de error) es demasiada por ende la señal proporcionada debe compensar esa diferencia enviando más energía. Los valores registrados y generados se aprecian en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores resultantes con un voltaje generado bajo

Generador de señales Nivel	Voltaje generado VG [VAc]	Valor control PI	Vac Error [VAc]	V Arduino [VDC]	V Campo [VDC]
2.8	51	11.58	169.64	3.39	9

Fuente: Propia

Caso 2: En el generador de señales se coloca un nivel de 5.90 que representa 109 voltios alternos censados (voltaje medio). De la misma manera que en el caso anterior se muestran los valores respectivos en el LCD. En la Figura 3.34 se visualiza la señal generada por el algoritmo de control en el osciloscopio.

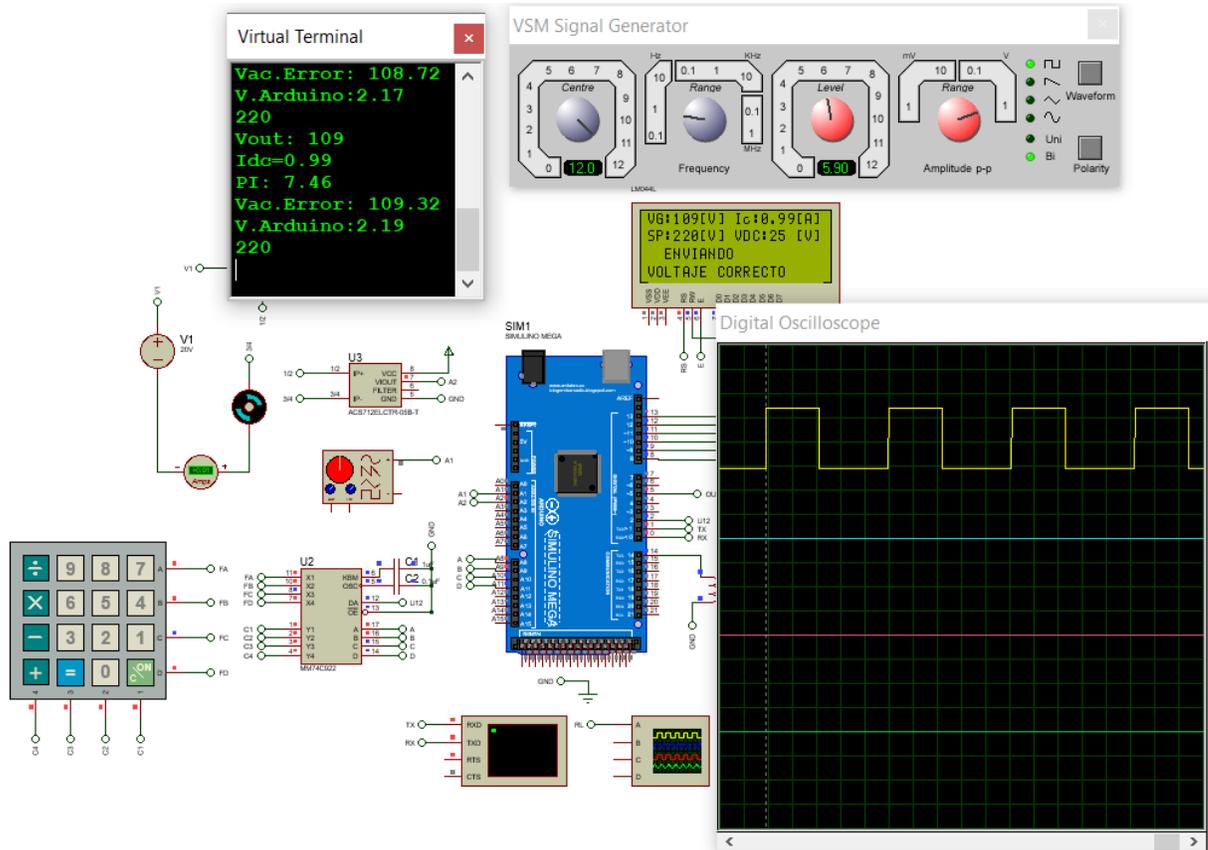


Figura 3.34 Respuesta ante un voltaje medio al *Set Point*
Fuente: Propia

En esta ocasión se nota que, la señal emitida por la tarjeta Arduino está a la mitad de su capacidad pues el voltaje de error es también la mitad de lo que falta para llegar a los 220V requeridos. Se aprecia como la señal va cambiando con relación al aumento del voltaje censado. Los valores resultantes de este caso se verifican en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores resultantes con un voltaje generado medio

Generador de señales Nivel	Voltaje generado VG [VAc]	Valor control PI	Vac Error [VAc]	V Arduino [VDc]	V Campo [VDc]
5.9	109	7.46	109.32	2.19	23

Fuente: Propia

Caso 3: Como en los casos anteriores el voltaje de referencia *Set Point* es de 220V_{AC} y la señal responde a medida que se acerca la referencia, en la siguiente figura 3.35 se observa que el voltaje generado es cercano a los 220V_{AC} y la señal emitida se encuentra acercándose al cero absoluto, es decir, la señal está a punto de alcanzar el valor requerido y en el momento que lo haga debe llegar a cero para no sobrepasar la referencia.

En el generador de señales se coloca 11.0 de nivel para obtener un voltaje de 203V y posterior se sube el nivel a 11.9 del cual se obtienen los 220 V_{AC} igual al voltaje *Set Point* ingresado.

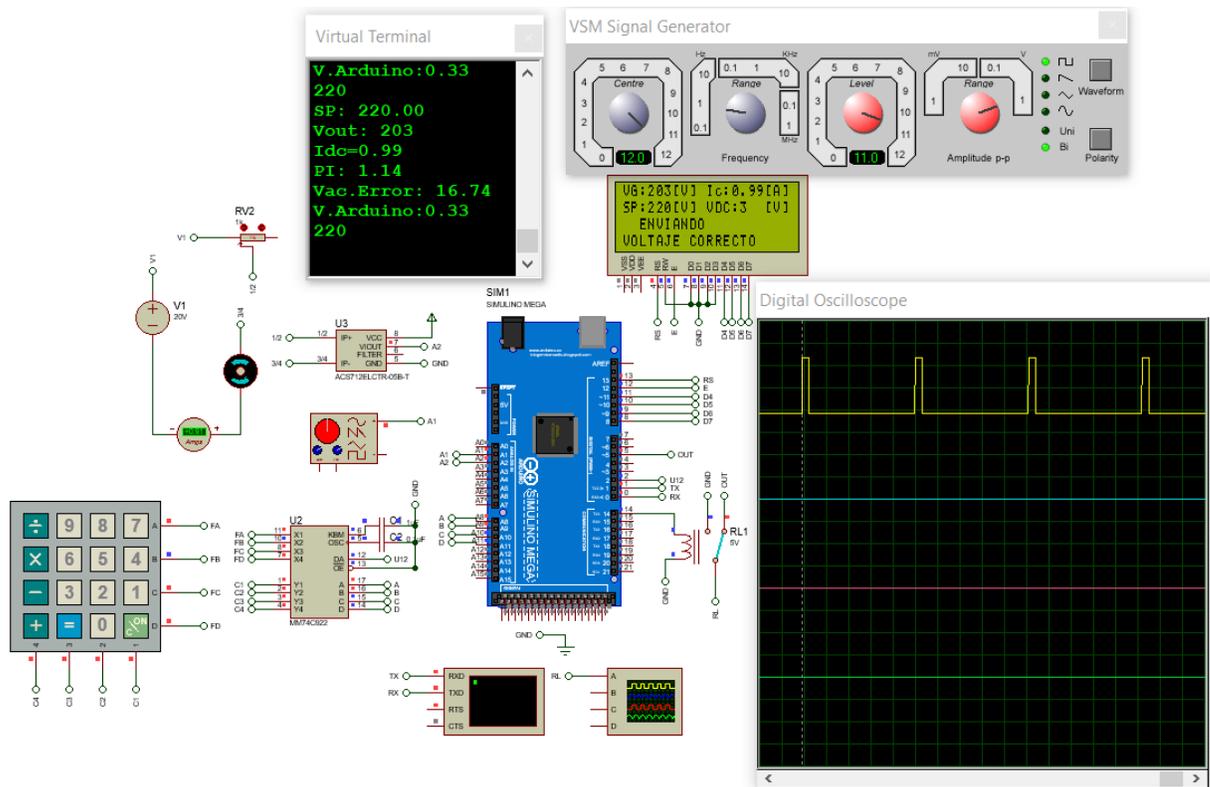


Figura 3.35 Respuesta con un voltaje cercano al *Set Point*
Fuente: Propia

Finalmente, en la Figura 3.36, el Voltaje censado es igual al *Set Point*, por ende, no existe una señal de salida por parte de la tarjeta Arduino. Esto se debe a que el voltaje de error es cero y si no hay diferencia no hay señal de respuesta se observa en el osciloscopio que no existe una señal de salida. En situaciones que requiera colocarse alguna carga a la salida del generador, éstas van a consumir energía y el voltaje generado va a variar provocando nuevamente que se genere una respuesta para volver a estabilizar los 220V_{AC} requeridos.

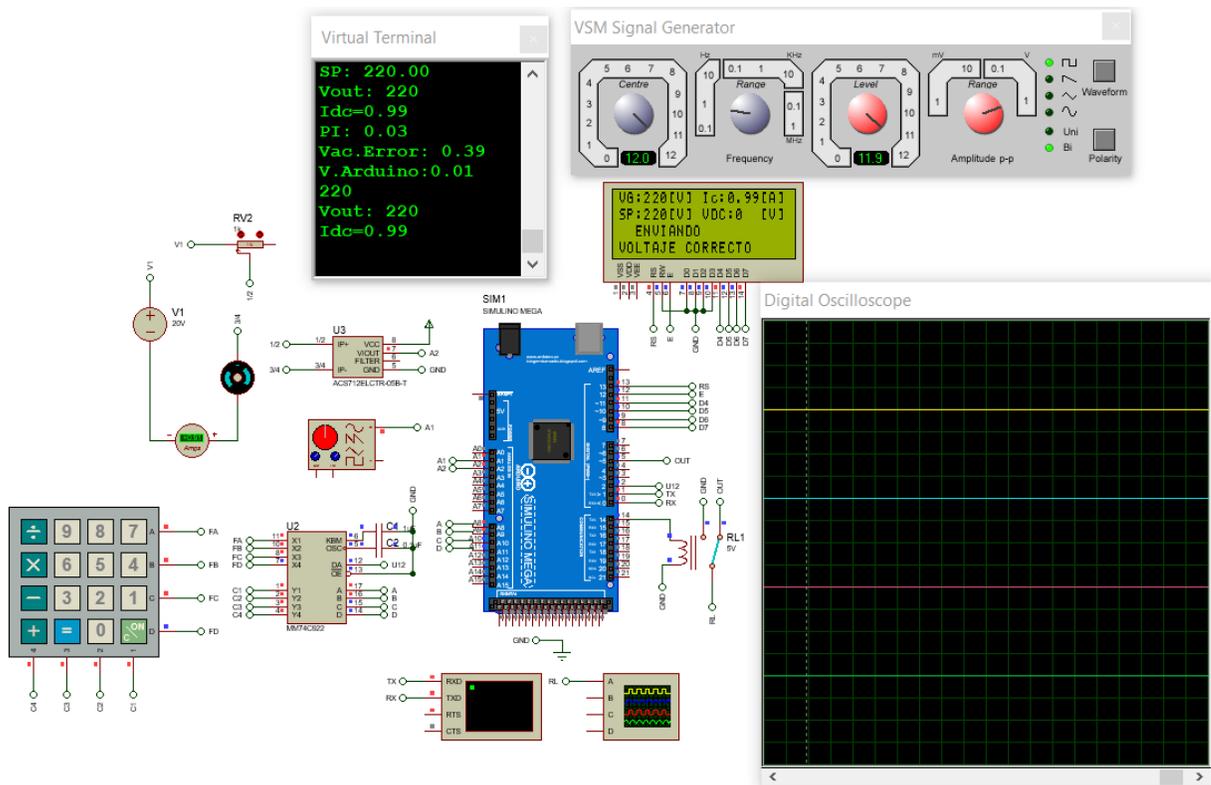


Figura 3.36 Respuesta de voltaje censado igual al *Set Point*
Fuente: Propia

Los valores y señales resultantes para los cuales la señal de control logró estabilizar al *Set Point* se muestran en la siguiente Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores resultantes de un voltaje cercano e igual al *Set Point*

Generador de señales	Voltaje generado	Valor control	Vac Error	V Arduino	V Campo
Nivel	VG [VAc]	PI	[VAc]	[VDC]	[VDC]
11.3	203	1.14	16.74	0.33	46
11.9	220	0.03	0.39	0.01	52

Fuente: Propia

Nótese que a pesar de haber estabilizado el voltaje generado con el *Set Point* existe una presencia de voltaje de error, esto se debe a la aproximación de la función de transferencia de la planta anteriormente definida del 84%, si aquella aproximación fuese por sobre el 95% no existirían estos valores remanentes.

Caso 4: Para efecto de análisis de este caso, mediante el teclado matricial se ingresó un voltaje fuera del rango permitido para verificar las protecciones definidas en el algoritmo de control.

En el código se establece un rango de voltaje de 0 a $250V_{AC}$ admitido por el módulo sensor de voltaje alterno. Al momento de ingresar un valor fuera del rango se despliega un mensaje de alerta "FUERA DE RANGO" en el LCD como se ve en la Figura 3.37, al detectar este ingreso erróneo el algoritmo bloquea el pin de salida de la señal dejando así de enviar voltaje a los demás circuitos, con esto se logra proteger a los componentes electrónicos sensibles a sobrevoltajes.

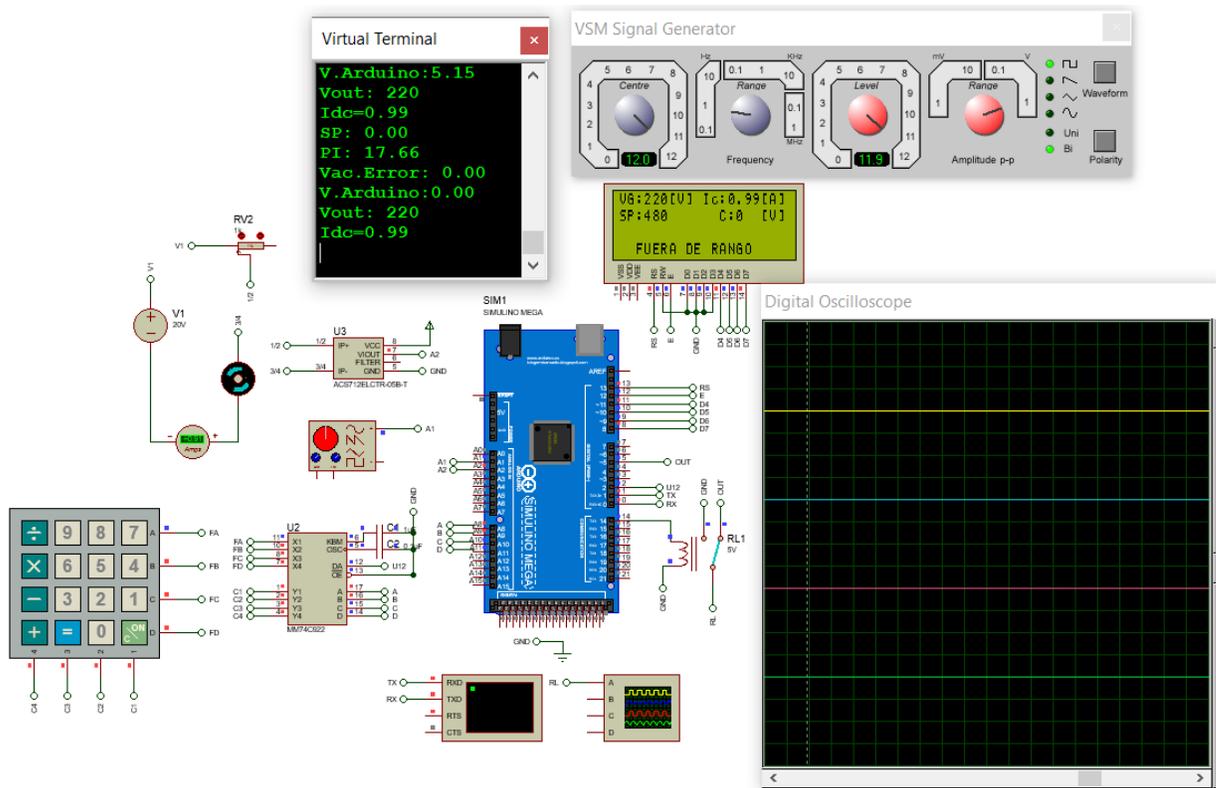


Figura 3.37 Set Point ingresado fuera de rango
Fuente: Propia

Caso 5: Según los datos de placa del generador el bobinado de campo soporta una corriente máxima de 2 Amperios para ello se debe colocar una protección en caso de que se intente sobrepasar aquel límite. En el algoritmo de control se colocó una condición de que si el sensor de corriente detecta 1.5 Amperios o más se active un relé de conectado al Pin 14 del Arduino, y este debe estar conectado en serie al bobinado de campo para inhabilitar la conexión entre el bobinado de campo y circuito conversor AC/DC cuando se sobrepase el amperaje de seguridad mencionado.

En la Figura 3.38 se aprecia que la corriente de Campo IC es de 1.81 Amperios sobrepasando el amperaje de seguridad activando así el cambio de estado del pin 14 y

conmutando el relé que desconectaría el bobinado de campo del convertor AC/DC además de, bloquear la señal de salida para dejar de enviar voltaje.

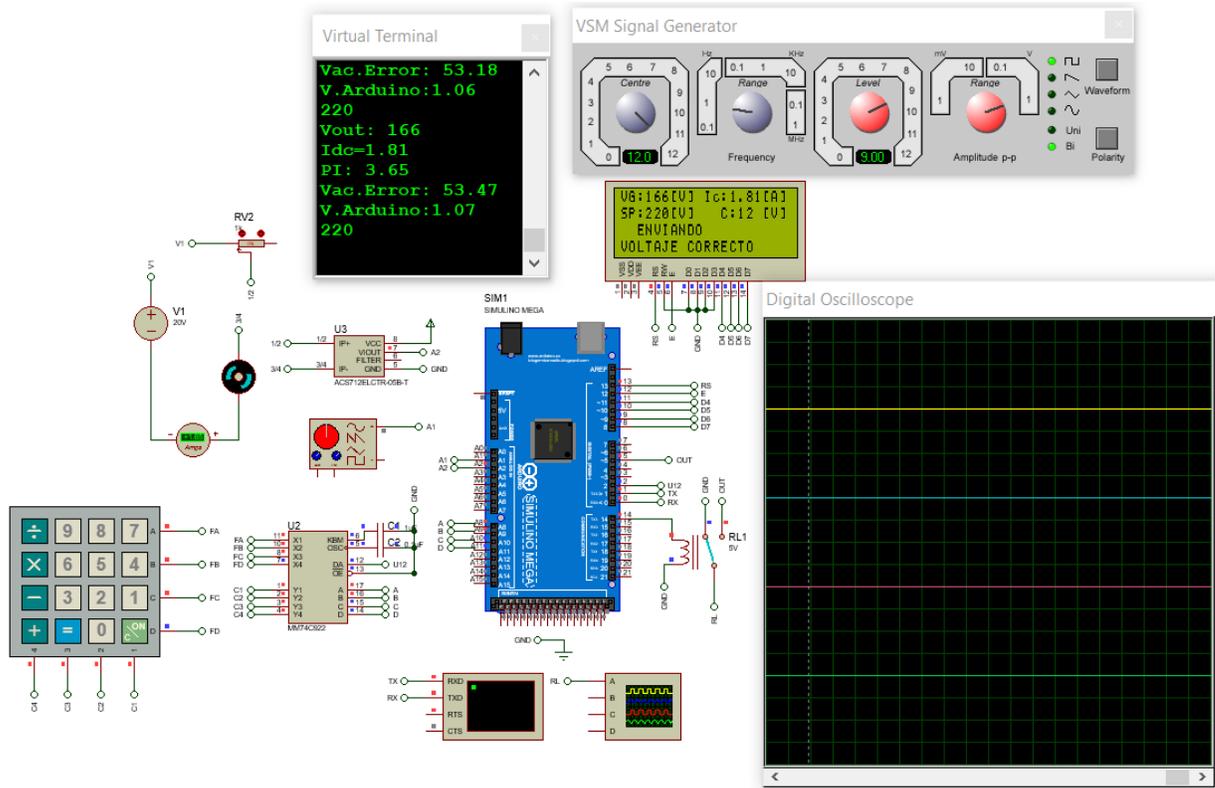


Figura 3.38 Protección de bobinado de campo
Fuente: Propia

Cabe mencionar que sobrepasar el amperaje de 1.5 Amperios sería en situaciones donde se obtenga más de 300V_{AC} a la salida del generador, sin embargo, el sensor de voltaje permite trabajar hasta 250V_{AC} así que sobrecargar al bobinado de campo sería casi imposible.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El trabajo realizado como proyecto de titulación cumple con el objetivo principal de simular un regulador automático de voltaje por voltaje de campo para obtener un voltaje AC deseado a la salida de un generador síncrono. Esto a través de circuitos eléctricos de potencia para suministrar voltaje DC al devanado de campo, una tarjeta electrónica Arduino para el control y suministro de señales en conjunto con sensores de voltaje y corriente para monitorear la planta.
- Una función de transferencia expresada en términos matemáticos representa el comportamiento de la planta, ésta permite conocer, interpretar y determinar sus parámetros para la obtención de constantes de control que optimizan su rendimiento.
- La calidad de respuesta ante el valor de referencia ingresado depende del correcto ajuste de la acción del controlador, en base a esto determina una reacción inmediata y apropiada para contrarrestar el cambio y así tratar de llegar a igualar el valor referencial.
- Una limitante del sistema es la sincronización de la frecuencia del generador con los demás circuitos, pues la máquina trabaja a una frecuencia común en toda la planta por ello los circuitos de potencia como el conversor AC/DC y PWM de rampa lineal también deben trabajar a la misma frecuencia eléctrica tomada de la red la cual, no siempre es constante y tiene perturbaciones que provocan una pérdida de sincronismo en el sistema generando pérdidas de rendimiento y potencia. Para combatir esto, se incluyen más componentes y un tratamiento de los mismos enfocado en conservar las señales

que proporcionan, añadiendo sus respectivas protecciones sin perjudicar su funcionamiento.

- Después del ajuste del controlador se obtuvo una función de transferencia de la cual se obtuvieron los valores de las constantes proporcional e integral para el control PI, sin embargo, en la señal de salida se notó que el control es prácticamente proporcional siendo la parte integral despreciable.
- La adquisición de datos de la entrada y salida deben tener una gran exactitud y precisión para alcanzar la mayor compatibilidad posible en el momento de determinar la función de transferencia que permitirá la sintonización del control PI.
- La sintonización de un PI se determinó variando K_p y K_i hasta obtener la forma de respuesta deseada, es decir, obtener una forma de respuesta donde la variable se estabilice rápidamente sin tener demasiados sobreimpulsos y sin sobre oscilaciones.
- El convertor AC/DC permite controlar el voltaje suministrado en el bobinado de campo del generador. Este convertor está comandado por una PWM variable que debe estar sincronizada a la misma frecuencia de la red para realizar recortes en la señal de voltaje AC rectificadas en el mismo periodo de tiempo de la señal PWM producida por el controlador, permitiendo variar el voltaje DC que alimenta el bobinado de campo para producir el voltaje de salida del generador.
- La tarjeta electrónica recibe la señal del sensor de voltaje AC producida por el generador para modular la señal PWM dependiendo de las necesidades que la planta requiera, esta PWM es variada por el control PI. Cuando se realiza un control PI se tiene que censar constantemente la señal de entrada, ya que el controlador tratará de reducir el error de la señal de entrada con respecto a un valor de *SetPoint* determinado.

La señal de salida del controlador no posee sobreimpulsos y cuenta con un tiempo de establecimiento aceptable, logrando igualar el valor del *SetPoint* con la señal de entrada durante el proceso de generación de voltaje AC.

- El control PI en un generador sincrónico permite tener un voltaje constante cuando esté sometido a una carga variable, ya que si existen caídas de tensión por carga el controlador aumentara la corriente de excitación produciendo el incremento de campo magnético y a su vez el voltaje en los terminales aumentara, también si existen desconexiones de carga en el generador el controlador reducirá la de corriente de campo y el voltaje generado disminuirá, logrando el control PI estabilizar el voltaje generado dependiendo del consumo de potencia que pueda existir en la planta.

4.2 RECOMENDACIONES

- Este proyecto fue realizado a manera de simulación, sin embargo, se recomienda realizar un estudio más profundo sobre el modelamiento de la planta y la influencia de la velocidad del motor acoplado al eje del generador si se quisiera realizar una implementación práctica.
- Debido a que, simulaciones de circuitos electrónicos y eléctricos en programas de simulación no cumplen con las condiciones reales de los elementos que los conforman va a existir una diferencia entre resultados reales con respecto a los simulados teóricamente, para ello se debe calibrar y ajustar los parámetros de operación en caso de que la diferencia sea demasiado grande.
- Los parámetros del sensor de voltaje pueden ser ajustados por constantes presentes en las librerías del algoritmo como físicamente en caso de una implementación, posee un potenciómetro para calibrar la sensibilidad de percepción

de la señal. El sensor de corriente solo puede ser ajustado mediante código y ambos deben tener filtros de tipo pasa bajos para atenuar frecuencias altas perjudiciales para el desempeño del sensor y de toda la planta.

- El regulador de voltaje contiene protecciones para operar dentro de un rango. En tal caso no se debe exigir al regulador ni al generador operar fuera del rango de 0.2 [A] a 1.5 [A] en el bobinado de campo o sobrepasar los valores de trabajo establecidos en los datos de placa del generador.
- Al momento de tomar los datos de entrada y salida de la planta, hay que tener en cuenta que el osciloscopio se encuentre en buenas condiciones y las puntas utilizadas estén bien calibradas y se encuentren en el acoplamiento de voltaje correcto, ya que la incorrecta lectura de los voltajes en los instrumentos influirá directamente en el momento de realizar los cálculos para obtener la función de transferencia de la planta.
- Al momento de determinar la respuesta del control PI, hay que tomar en cuenta que la forma de onda alcance al *SetPoint* sin sobreimpulsos y se estabilice en el menor tiempo posible sin demasiadas oscilaciones, ya que los sobreimpulsos aumentarían la corriente de campo y podrían causar daños en los bobinados de la máquina.
- Al manipular los datos de los sensores de voltaje y corriente en el controlador, se debe interpretar de manera correcta las unidades que el controlador procesa, ya que es necesario tener todos los valores censados y procesados en una misma escala para programar adecuadamente el control PI y no existen errores en la señal de salida PWM que comanda el conversor AC/DC. Una mala modulación de PWM

produciría un voltaje DC erróneo y podría quemar el bobinado de campo del generador.

- Hay que tomar en cuenta la retroalimentación que necesita tener un control PI al momento de simular el funcionamiento de la planta, ya que si no existe variación de voltaje de entrada el controlador nunca podrá alcanzar el *SetPoint* establecido y su señal PWM crecerá progresivamente hasta su límite.
- Se debe programar de manera adecuada el teclado matricial de la planta, dándole funcionalidades para poder detener y comenzar el proceso de generación, permitiendo al operador tener el control de la planta dependiendo de los requerimientos que sean necesarios o parar el proceso en caso de que el controlador este dando valores erróneos.

5 BIBLIOGRAFÍA

Abraham Loja, M. A. (Mayo de 2014). *Resintonizacion de los PIDs, simulacion y modelamiento de las bandas alimentadoras de yeso,porcelana y clinker para el molino de cemento de la CIA. Industrias Guapan.* Recuperado el 05 de 07 de 2019, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8391>

Andrade, J. (2000). Rediseño de sistemas de excitacion y regulacion de voltaje en grupos generadores. Quito.

Apuntes de Conversion de Energia. (2009). Recuperado el 14 de 07 de 2019, de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/EL42C/1/material_docente/bajar?id

Arduino. (2020). *Arduino.* Obtenido de <https://www.arduino.cc/>

Berbegal, M. (2016). Diseño y ensayo de un regulador de tension automatico para maquinas sincronas. Madrid.

Caro, F. S. (2004). *Rectificadores Controlados*. Obtenido de frrq.cvg.utn.edu.ar

Chapman, S. J. (2000). *Maquinas Electricas 3ra edicion*. Mc graw hill.

Cuti, O. V. (2006). *Medidor de volúmenes de líquidos controlado por un microcontrolador PIC*. Quito.

DescubreArduino. (2014). *Como hacer un PID con Arduino*. Recuperado el 14 de 07 de 2019, de <https://descubrearduino.com/como-hacer-un-pid-con-arduino/>

EPN. (04 de 07 de 2019). *Laboratorio de Maquinas*. Obtenido de <https://www.epn.edu.ec/laboratorio-de-maquinas-herramientas/>

Ezequiel, M. J. (2011). *Arduino PID, guia de uso Libreria*.

Ferrer, J. (02 de Julio de 2010). *Metodología de la Investigación*. Obtenido de <http://metodologia02.blogspot.com/p/operacionalizacion-de-variables.html>

Hubor. (10 de 05 de 2020). *Proteus*. Obtenido de <http://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/2-proteus.html>

Instruments, N. (17 de 05 de 2019). *NI Multisim*. Obtenido de <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060>

Lozada, J. (2014). *Investigacion Aplicada*. Quito: Cienciamerica.

Matlab. (08 de 05 de 2020). *Matworks*. Obtenido de https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

motors, C. (s.f.). *El AVR*. Recuperado el 02 de 07 de 2019, de <http://casolli.com/BLOG/como-regular-el-voltaje-de-un-generador/>

Vallejo, E. (1997). *Identificación Paramétrica de sistemas dinámicos*. Ingeniería y Desarrollo.

6 ANEXOS

ANEXO A: VALORES RESULTANTES DE LA ADQUISICION DE DATOS

ANEXO B: CIRCUITO GENERAL CONVERTOR AC/DC

ANEXO C: ALGORITMO DE CONTROL

ANEXO D: CONEXIÓN GENERAL DE TODA LA PLANTA

ANEXO E: MANUAL DISEÑO PLACAS PCB

ANEXO A

VALORES RESULTANTES DE LA ADQUISICION DE DATOS

Tabla A – 1 Adquisición de datos generador síncrono.

TIEMPO	SALIDA (V)	ENTRADA (V)	SALIDA UNIT	TIEMPO	SALIDA (V)	ENTRADA (V)	SALIDA UNIT
(ms)				(ms)			
0	18,3954	0	0,08361545	6,4	17,7793	0	0,080815
0,2	18,3908	0	0,08359455	6,6	17,9063	0	0,08139227
0,4	18,1832	0	0,08265091	6,8	17,8383	0	0,08108318
0,6	18,033	0	0,08196818	7	66,027	52,2	0,30012273
0,8	17,8146	0	0,08097545	7,2	196,281	52,2	0,89218636
1	17,9083	0	0,08140136	7,4	214,996	52,2	0,97725455
1,2	17,6441	0	0,08020045	7,6	219,358	52,2	0,99708182
1,4	17,7828	0	0,08083091	7,8	220,399	52,2	1,00181364
1,6	17,8054	0	0,08093364	8	220,682	52,2	1,0031
1,8	17,8357	0	0,08107136	8,2	220,82	52,2	1,00372727
2	17,8071	0	0,08094136	8,4	220,842	52,2	1,00382727
2,2	17,8488	0	0,08113091	8,6	221	52,2	1,00454545
2,4	17,7569	0	0,08071318	8,8	220,87	52,2	1,00395455
2,6	17,7555	0	0,08070682	9	220,891	52,2	1,00405
2,8	17,7464	0	0,08066545	9,2	220,827	52,2	1,00375909
3	17,7713	0	0,08077864	9,4	220,647	52,2	1,00294091
3,2	17,7441	0	0,080655	9,6	220,971	52,2	1,00441364
3,4	17,7217	0	0,08055318	9,8	220,748	52,2	1,0034
3,6	17,7864	0	0,08084727	10	220,779	52,2	1,00354091
3,8	17,726	0	0,08057273	10,2	220,763	52,2	1,00346818
4	17,7414	0	0,08064273	10,4	220,717	52,2	1,00325909
4,2	17,7224	0	0,08055636	10,6	220,789	52,2	1,00358636
4,4	17,7801	0	0,08081864	10,8	220,859	52,2	1,00390455
4,6	17,8683	0	0,08121955	11	220,715	52,2	1,00325
4,8	17,7217	0	0,08055318	11,2	220,815	52,2	1,00370455
5	17,8581	0	0,08117318	11,4	220,913	52,2	1,00415
5,2	17,8717	0	0,081235	11,6	220,719	52,2	1,00326818
5,4	17,8304	0	0,08104727	11,8	220,816	52,2	1,00370909
5,6	17,885	0	0,08129545	12	220,794	52,2	1,00360909
5,8	17,714	0	0,08051818	12,2	220,815	52,2	1,00370455
6	17,7481	0	0,08067318	12,4	220,622	52,2	1,00282727

TIEMPO	SALIDA (V)	ENTRADA (V)	SALIDA UNIT
(ms)			
12,8	220,855	52,2	1,00388636
13	220,87	52,2	1,00395455
13,2	220,844	52,2	1,00383636
13,4	151,974	0	0,69079091
13,6	36,4722	0	0,16578273
13,8	24,7606	0	0,11254818
14	20,9446	0	0,09520273
14,2	19,6116	0	0,08914364
14,4	18,9716	0	0,08623455
14,6	18,4055	0	0,08366136
14,8	18,2024	0	0,08273818
15	18,1382	0	0,08244636
15,2	18,0508	0	0,08204909
15,4	18,0947	0	0,08224864
15,6	17,8747	0	0,08124864
15,8	18,0135	0	0,08187955
16	17,9105	0	0,08141136
16,2	17,8764	0	0,08125636

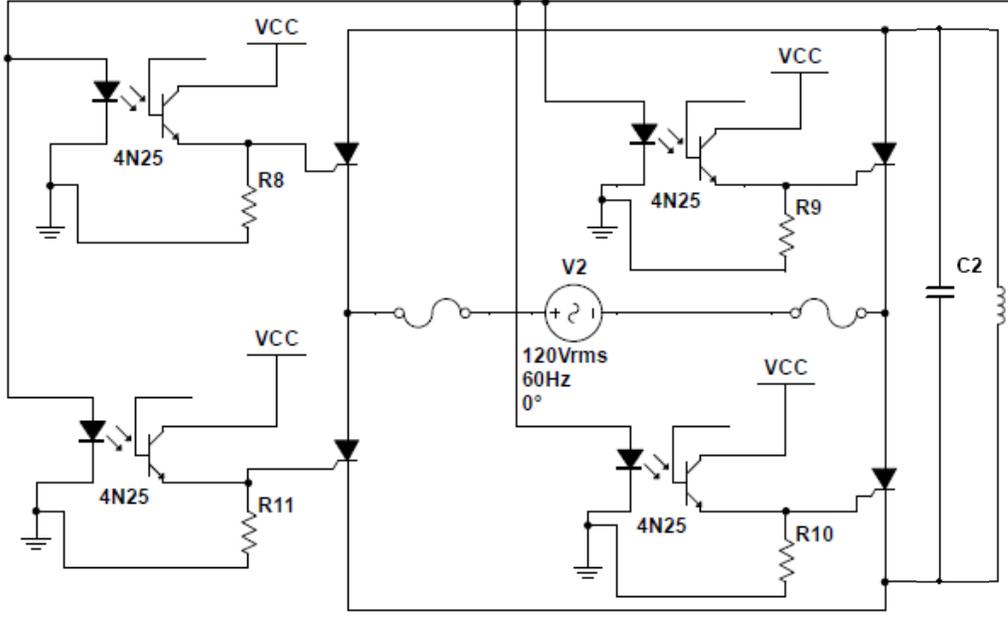
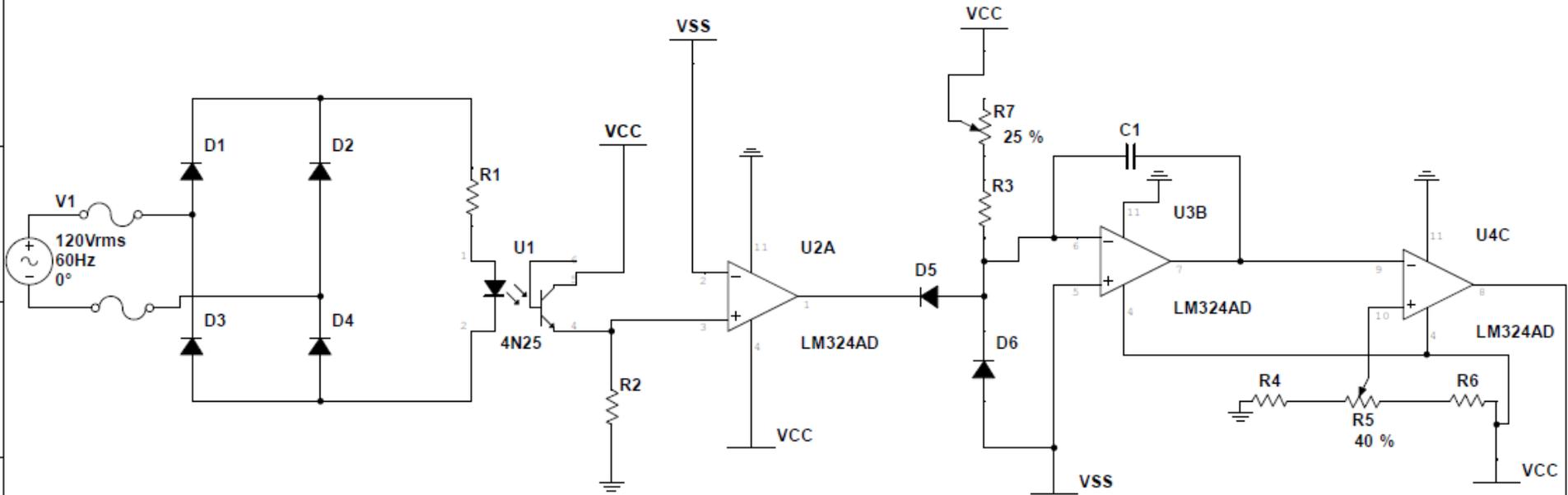
TIEMPO	SALIDA (V)	ENTRADA (V)	SALIDA UNIT
(ms)			
16,6	17,8803	0	0,08127409
16,8	17,7944	0	0,08088364
17	17,755	0	0,08070455
17,2	17,6649	0	0,080295
17,4	17,7284	0	0,08058364
17,6	17,8274	0	0,08103364
17,8	17,8312	0	0,08105091
18	17,5724	0	0,07987455
18,2	17,7036	0	0,08047091
18,4	17,6883	0	0,08040136
18,6	17,7549	0	0,08070409
18,8	17,579	0	0,07990455
19	17,7589	0	0,08072227
19,2	17,7684	0	0,08076545
19,4	17,9254	0	0,08147909
19,6	17,6111	0	0,08005045
19,8	17,775	0	0,08079545

Fuente: Propia

ANEXO B

CIRCUITO GENERAL CONVERSION AC/DC

(CIRCUITO PWM Y RECTIFICADOR ONDA COMPLETA CONTROLADO)



Title: CIRCUITO CONVERSOR AC/DC		
CONVERSOR AC/DC CON PWM DE RAMPA LINEAL		
Designed by:ARCOS-RUALES	Document N:B1	Revision: 1.0
Checked by: Ing. LOJA A.	Date: 17/11/2020	Size: N/A
Approved by:	Sheet 1 of 1	

ANEXO C

ALGORITMO DE CONTROL

```

//SENSOR VOLTAJE AC
#include "EmonLib.h" // INCLUYE LIBRERIA PARA MODULO
DE VOLTAJE AC ZMPT101B
#define VOLT_CAL 148.7 // DEFINE VALOR CONSTANTE PARA
CALIBRACION DE MODULO VOLTAJE AC
EnergyMonitor emon1; // CREA UN INSTANTE PARA
MUESTRA DE VALORES SENSADOS
int supplyVoltage=0; // VARIABLE GUARDAR VALOR
SENSADO
//-----//
//VARIABLES SENSOR DE CORRIENTE DC
double corrientedc=0; //DEFINE VARIABLE PARA VALOR
SENSADO DE CORRIENTE DC
double voltajedc=0; // DEFINE VARIABLE PARA VALOR
SENSADO DE VOLDAJE DC
double AscOffset=2.5; // VALOR DE TENSION DE SALIDA
PARA CORRIENTE = 0
double Sensibl=0.185; // VALOR DE SENSIBILIDAD DE
SENSOR
//-----//
//PID
#include <PID_v1.h> //INCLUYE LIBRERIA PID
#define PIN_INPUT A1 // DEFINE PIN SEÑAL DE LECTURA
#define PIN_OUTPUT 5 // DEFINE PIN SEÑAL DE SALIDA
double Setpoint, Input, Output; //VARIABLES PARA CONTROL PID
double Kp=0.066462,Ki=0.0036784,Kd=0; //VARIABLES
SINTONIZADAS DE LA PLANTA
PID myPID (&Input,&Output,&Setpoint,Kp,Ki,Kd, DIRECT); // PROCESO DE
ACCION DIRECTA/AUMENTAR
//-----//
#include <LiquidCrystal.h> // INCLUYE LIBRERIA PARA EL
FUNCIONAMIENTO DEL LCD

int RS=13, EN=12, d4=11, d5=10, d6=9, d7=8; // DECLARACION DE
VARIABLES PARA LA CONEXION DEL LCD CON LOS PINES DE ARDUINO
LiquidCrystal lcd(RS, EN, d4, d5, d6, d7); // DEFINE LOS PINES DE
FUNCIONAMIENTO DEL LCD
//-----//
int miles, centenas, decenas, unidades; //
VARIABLES AUXILIARES NUMEROS EN TECLADO
int numero, p1 = 0 , p2 = 0 , estado = 0 , valor1 = 0 ;
int valor; //
VARIABLE PARA GUARDAR NUMER

//-----//

void setup() {
//SENSOR VOLTAJE AC
emon1.voltage(1, VOLT_CAL, 1.7); // VOLTAJE: PIN DE LECTURA,
CALIBRACION, CAMBIO DE FASE
pinMode(14,OUTPUT); // PIN 14 SALIDA SEÑAL PARA
RELAY DE SEGURIDAD B. CAMPO
//-----//
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), tecla, RISING); //
INTERRUPCION: PIN, FUNCION, FLANCO
DDRK=0b0000; //
DECLARACION DE ENTRADAS EN EL PUERTO K
//-----//

```

```

    Serial.begin (9600); //
    INICIA LA COMUNICACION SERIAL
    //-----//
    lcd.begin(20,4); // DEFINE LAS FILAS Y
    COLUMNAS DEL LCD

    lcd.clear(); // LIMPIA PANTALLA LCD
    Limpia pantalla LCD
    delay(500); // RETARDO
    lcd.setCursor(0, 0); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 0 Y FILA 0
    lcd.print("VG: "); // IMPRIME TEXTO VOLTAJE
    GENERADO AC
    lcd.setCursor(6,0); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 6 Y FILA 0
    lcd.print("[V]"); // IMPRIME TEXTO UNIDAD PARA
    VOLTAJE AC
    lcd.setCursor(0, 1); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 0 Y FILA 1
    lcd.print("SP: "); // IMPRIME TEXTO SETPOINT
    lcd.setCursor(10, 0); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 10 Y FILA 0
    lcd.print("Ic: "); // IMPRIME TEXTO CORRIENTE
    DE CAMPO
    lcd.setCursor(17,0); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 17 Y FILA 0
    lcd.print("[A]");
    lcd.setCursor(10, 1); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 10 Y FILA 0
    lcd.print("VDC: "); // IMPRIME TEXTO CORRIENTE
    DE CAMPO
    lcd.setCursor(17,1); // POSICIONA CURSOR EN
    COLUMNA 17 Y FILA 0
    lcd.print("[V]");
    //-----//
    //ENCENDER PID
    myPID.SetMode (AUTOMATIC);

}

//-----//
void loop() {
    //VOLTAJE AC
    emon1.calcVI(20,2000); // CALCULA TODA LA LONGITUD
    DE ONDA NO DE MEDIA ONDA, TIEMPO DE SALIDA
    supplyVoltage = emon1.Vrms; // EXTRAE VRMS A LA VARIABLE

    Serial.print("Vout: ");
    Serial.println(supplyVoltage); // IMPRIME VALOR VOLTAJE
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print(supplyVoltage);

    //-----//
    //SENSOR DE CORRIENTE DC
    double lectura=analogRead (A2); // LECTURA SENSOR DE
    CORRIENTE
    voltajedc=(lectura*5.0/1023); // ACONDICIONAMIENTO DE 0
    A 5 V

```

```

corrientedc=(voltajedc-AscOffset)/Sensibl; // CALCULO DE CORRIENTE
EQUIVALENTE

lcd.setCursor(13,0); // IMPRIME VALOR DE
CORRIENTE
lcd.print(corrientedc);

Serial.print("Idc=");
Serial.println(corrientedc);
delay(500);

if(corrientedc >= 1.5){ // INTERRUMPE EL CIRCUITO
COVERSOR AC/DC
digitalWrite(14,HIGH);
}
else{digitalWrite(14,LOW);
}
delay(500);
//-----//
//PID
//CONTROL PID
Serial.print("PID: "); // IMPRIME VALOR
PID
Serial.println(Output);

Input=supplyVoltage; // ENTRADA
PID=SENSOR VOLTAJE AC
myPID.Compute(); // REALIZA EL
CALCULO DE RESPUESTA PID
double voltajesalidareal=Output*14.868; //
ACONDICIONAMIENTO DE LA RESPUESTA PID A UNIDADES DE PROCESAMIENTO

Serial.print("Vac.Error: "); // IMPRIME VALOR
VOLTAJE DE ERROR PID
Serial.println(voltajesalidareal*0.98039);
delay(50);

Serial.print("V.Arduino:"); // IMPRIME VOLTAJE
ARDUINO
double voltajeAC=voltajesalidareal*0.0196; //
ACONDICIONAMIENTO DE UNIDADES DE PROCESAMIENTO A VOLTAJE AC
Serial.println(voltajeAC);
delay(100);

//-----//

if (estado == 1 && p1 == 1 && p2 == 0){ //
GENERACION DE PWM

analogWrite(5,voltajesalidareal);
Serial.println(valor1); // IMPRIME
SET POINT PERMITIDO
int voltajein =voltajesalidareal*0.98039*0.2373; // CALCULO VOLTAJE
DC DE CAMPO
lcd.setCursor(14,1); // POSICIONA
CURSOR COLUMNA 14 FILA 1
lcd.print(" "); // IMPRIME
ESPACIO

```

```

    lcd.setCursor(14,1); // POSICIONA
CURSOR COLUMNNA 14 FILA 1
    lcd.print(voltajein); // IMPRIME VOLTAJE
DC
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print(" ENVIANDO "); // IMPRIME
MENSAJE DE FUNCIONAMIENTO
    delay (1000);
    }else { if (estado == 0 && p1 == 1 && p2 == 0) { // VERIFICA
SETPOINT
    valor=0;
    p1=0;
    p2=0;
    analogWrite(5,0); // ELIMINA LA PWM
    int voltajein = 0; // ENCERA EL
VALOR DC
    lcd.setCursor(14,1); // POSICIONA
CURSOR COLUMNNA 14 FILA 1
    lcd.print(" "); // IMMPRIME
ESPACIO
    lcd.setCursor(14,1); // POSICIONA
CURSOR COLUMNNA 14 FILA 1
    lcd.print(voltajein); // IMPRIME VOLTAJE
DC
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print(" "); // IMPRIME
ESPACIO
    delay (1000);

    }}}

//_____//
void tecla() // FUNCION
TECLADO
{
Setpoint=valor;

Serial.print("SP: "); // IMPRIME
SETPOINT
Serial.println(Setpoint);

    switch (PINK) //
DECLARACION DE TECLADO MATRICIAL
    {
        case 7: //
DECLARACION TECLA 0
        numero=0;
        break;
        case 2: //
DECLARACION TECLA 1
        numero=1;
        break;
        case 6: //
DECLARACION TECLA 2
        numero=2;
        break;
        case 10: //
DECLARACION TECLA 3
        numero=3;
        break;

```

```

        case 1: //
DECLARACION TECLA 4
    numero=4;
    break;
    case 5: //
DECLARACION TECLA 5
    numero=5;
    break;
    case 9: //
DECLARACION TECLA 6
    numero=6;
    break;
    case 0: //
DECLARACION TECLA 7
    numero=7;
    break;
    case 4: //
DECLARACION TECLA 8
    numero=8;
    break;
    case 8: //
DECLARACION TECLA 9
    numero=9;
    break;
    case 15: //
DECLARACION TECLA +
    numero='+';
    break;
    case 14: //
DECLARACION TECLA -
    numero='-';
    break;
    case 3: //
DECLARACION TECLA ON/AC
    numero = 'E' ;
    break;
    default: //
DECLARACION TECLA POR ERROR 0
    numero=0;
    break;
    }
    if (numero=='-') // PERMITE
ELIMINAR DIGITOS ERRONEOS DEL SETPOINT
    {
        unidades=decenas;
        decenas=centenas;
        centenas=0;
    }
    else
    {
        if (numero=='+') // PERMITE ELIMINAR
EL SETPOINT
        {
            unidades=0;
            decenas=0;
            centenas=0;
            miles=0;
            if (valor==0){
LCD lcd.setCursor(8,1); // IMPRIME VALOR EN

```

```

    lcd.print("  ");

  } }
  else {
    if (numero=='E'){
      SETPOINT // GUARDA EL
      p1 = 1 ;
      p2 = 0 ;
      valor1 = valor ;
      detachInterrupt(tecla) ;
    } else { // ESCRIBE EL
      SETPOINT
      centenas=decenas;
      decenas=unidades;
      unidades=numero;
    }}

    valor=unidades+decenas*10+100*centenas; // GUARDA VALOR
    INGRESADO

    if (valor > 0 && valor <= 250){ // DETERMINA EL
      SETPOINT DENTRO DEL RANGO PERMITIDO
      estado = 1 ;
      lcd.setCursor(3,1); // IMPRIME VALOR EN
      LCD
      lcd.print("  ");
      lcd.setCursor(3,1);
      lcd.print(valor);
      lcd.setCursor(6,1);
      lcd.print("[V]");

      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print ("VOLTAJE CORRECTO "); // IMPRIME MENSAJE DE
      CONFIRMACION

    }
    else { // DETERMINA EL
      SETPOINT FUERA DE RANGO
      estado = 0 ;
      lcd.setCursor(0,3); // IMPRIME MENSAJE DE
      ERROR
      lcd.print (" FUERA DE RANGO ");
      lcd.setCursor(3,1);
      lcd.print(valor); // IMPRIME VALOR EN
      LCD
      lcd.print("  ");

    }
  }
}

```

ANEXO D

CONEXIÓN GENERAL DE LA PLANTA

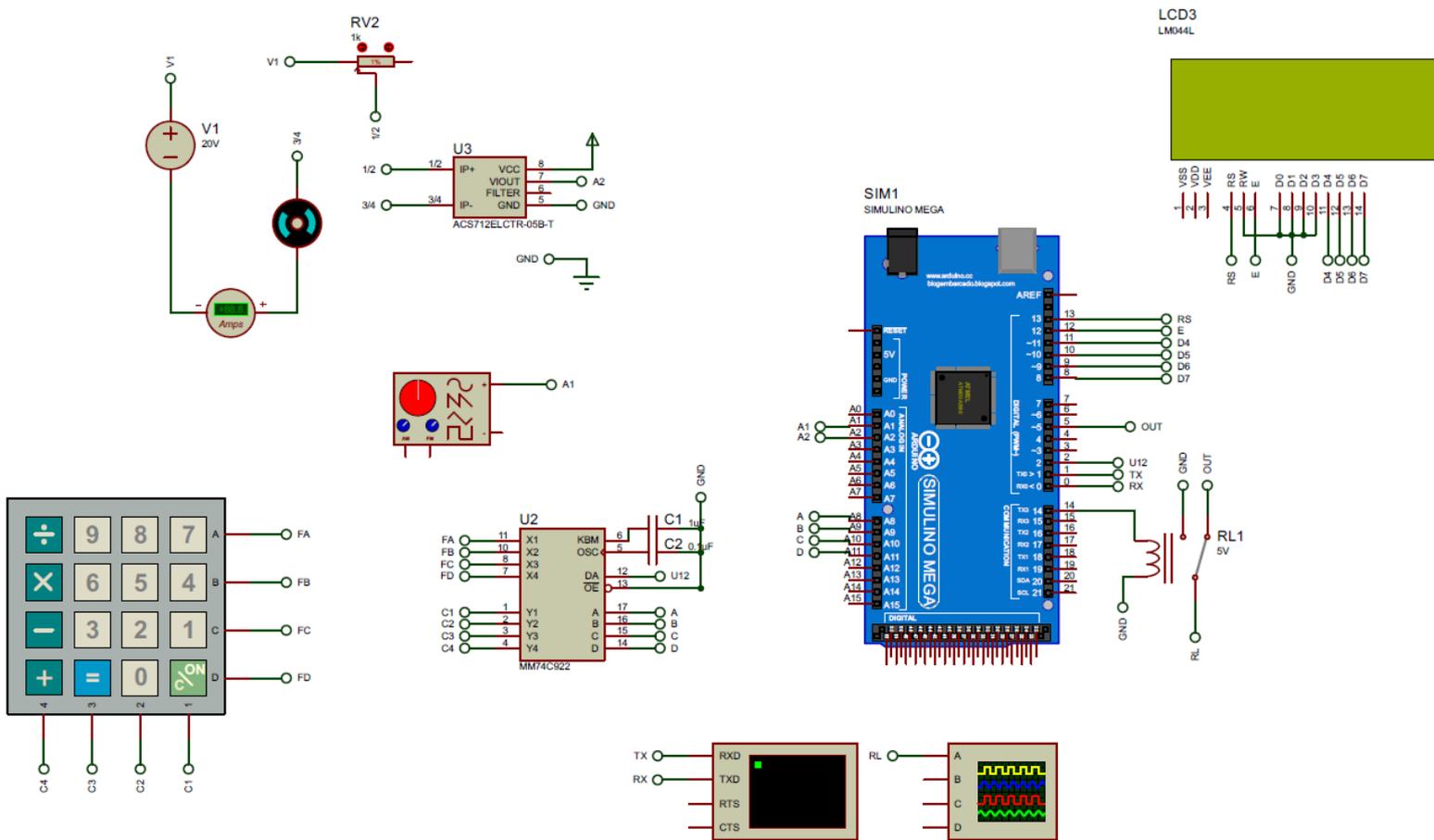


Figura D – 1 Conexión general de la simulación.
Fuente: Propia

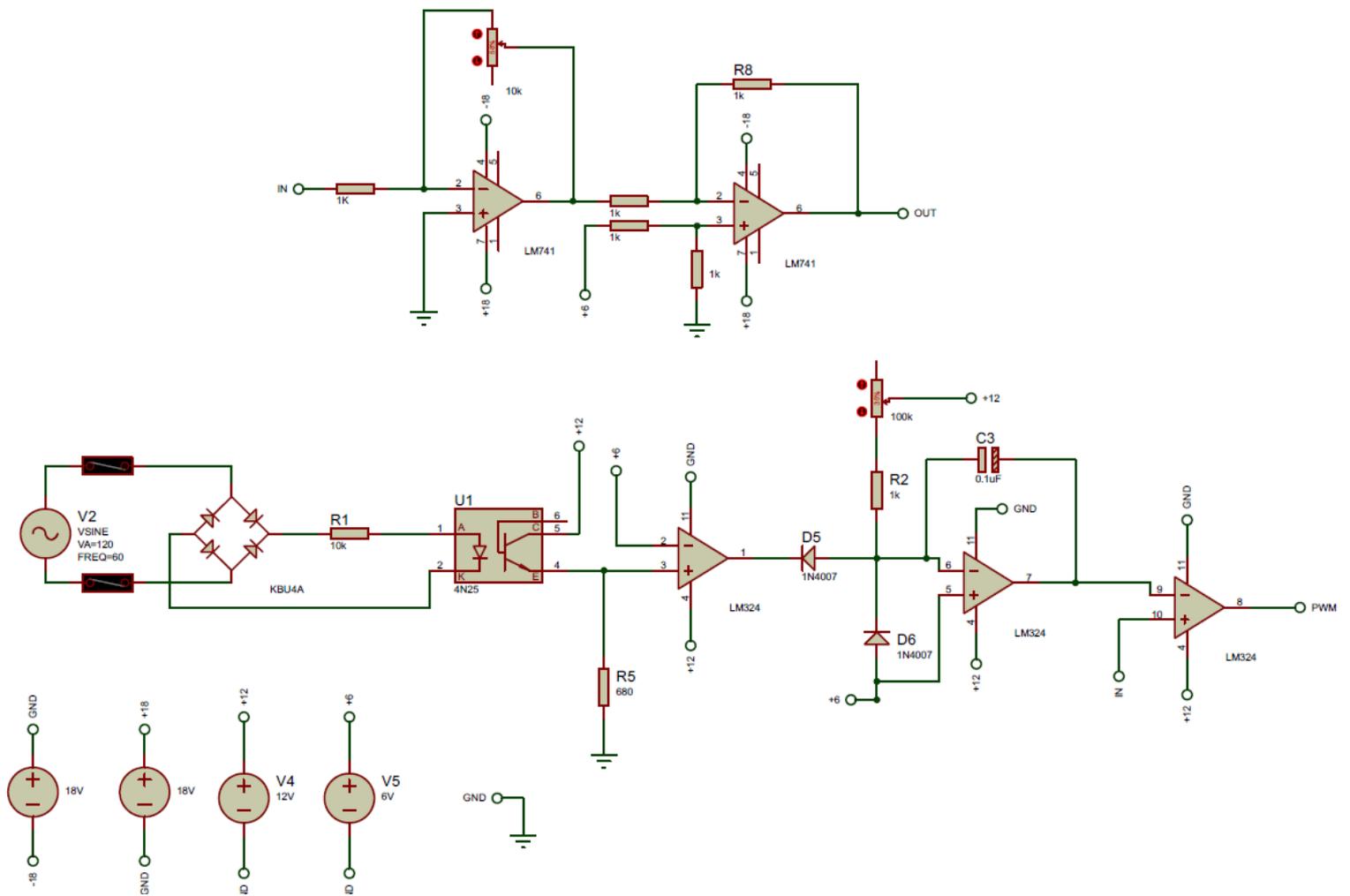


Figura D – 2 Circuito de acondicionamiento y PWM de rampa lineal sincronizada a la red.
Fuente: Propia

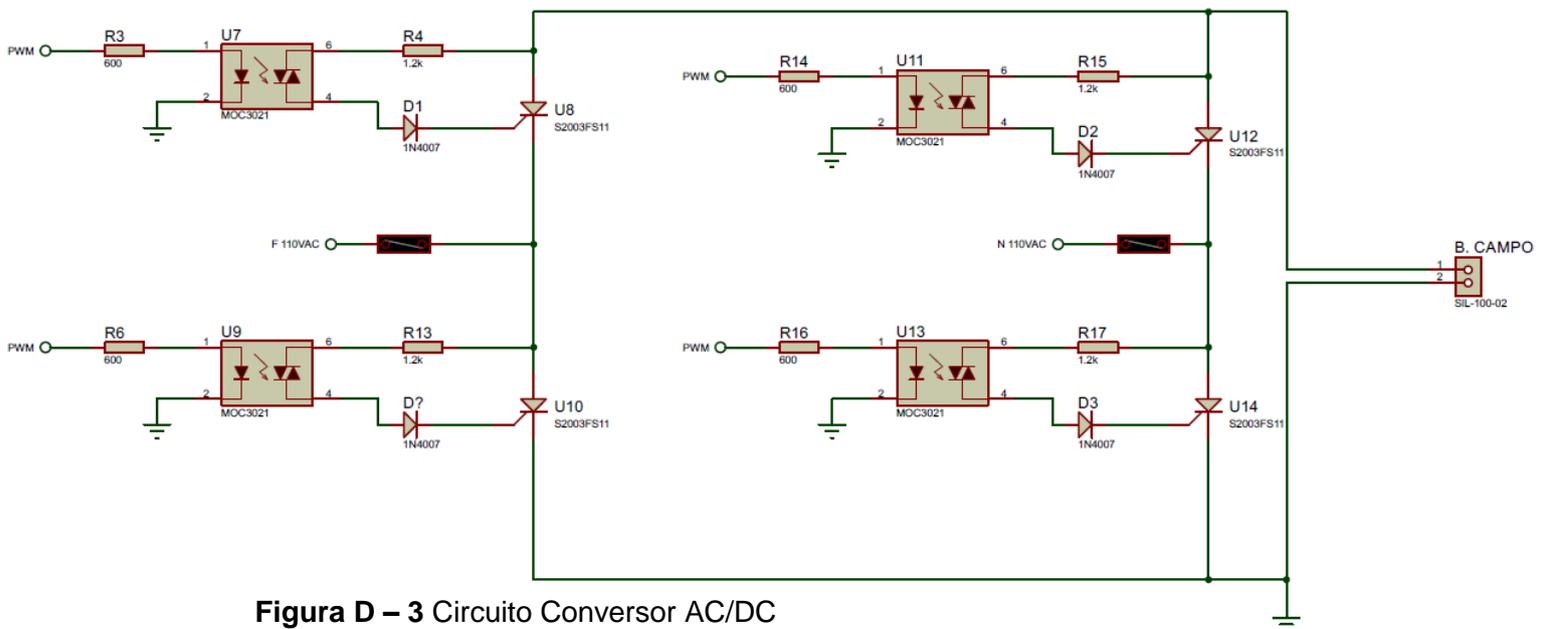


Figura D – 3 Circuito Conversor AC/DC
Fuente: Propia

ANEXO E

MANUAL DE DISEÑO DE PLACAS PCB

	ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS	
Fecha de efectividad: Septiembre del 2020		N° revisión: 1
		N° de páginas: 21
MANUAL DE DISEÑO		

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

MANUAL DE DISEÑO DE LAS PLACAS PCB DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL Y POTENCIA

TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA

2020

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	82
2. Objetivos	82
2.1. General	82
2.2. Específicos	82
3. Diseño Placas PCB	83
3.1. Circuito generador de señal modulador por ancho de pulso (PWM)	83
3.2. Circuito conversor AC/DC controlado	88
3.3. Circuito de acondicionamiento	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura E-1 Circuito Generador se señal PWM sincronizado con la red	83
Figura E-2 Diseño Placa PCB, Diagrama de conexión.....	85
Figura E-3 Prototipo Placa PWM vista frontal	86
Figura E-4 Prototipo placa PWM, vista trasera.....	86
Figura E-5 Circuito Conversor AC/DC controlado	88
Figura E-6 Diseño placa PCB circuito conversor AC/DC controlado	90
Figura E-7 Prototipo placa Conversor AC/DC, vista frontal	91
Figura E-8 Prototipo placa Conversor AC/DC, vista trasera	91
Figura E-9 Circuito de Acondicionamiento	80
Figura E-10 Diseño placa PCB circuito de acondicionamiento.....	82
Figura E-11 Prototipo placa del circuito de acondicionamiento, vista frontal	83
Figura E-12 Prototipo placa del circuito de acondicionamiento, vista trasera	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla E-1 <i>Materiales sugeridos para implementación de placa PCB PWM</i>	87
Tabla E-2 <i>Materiales sugeridos para implementación de placa Conversor AC/DC</i>	92
Tabla E-3 <i>Materiales sugeridos para implementación de placa Circuito de acondicionamiento</i>	84

1 INTRODUCCIÓN

La simulación del regulador de voltaje automático para un generador síncrono constituye un aporte al conocimiento teórico para los estudiantes de las carreras de Ingeniería Eléctrica y Tecnología en Electromecánica, fue realizado con definiciones y técnicas aprendidos durante la carrera, este aporte puede ser utilizado como una herramienta de análisis y comparación entre las prácticas realizadas en el laboratorio y una realizada de manera virtual.

La simulación combina una serie de circuitos de control para generar señales y circuitos de potencia para obtener un control de energía suministrada, además de, un *firmware* que contiene un algoritmo de control y sensores para monitorear el estado de la planta. Todos estos dispositivos trabajan en conjunto con un sistema de lazo cerrado.

Después de una simulación es costumbre implementar y verificar su funcionamiento, para lo cual es de vital importancia generar un manual de diseño para circuitos impresos tomando en cuenta los parámetros de protección, calibración y filtración de señales en tal medida que no afecte el desempeño del sistema.

2 Objetivos

2.1 General

- Generar un documento que permita a los estudiantes la implementación de un regulador de voltaje para un generador síncrono

2.2 Específicos

- Diseñar placas para circuitos impresos mediante el *software* de diseño más viable y de fácil ejecución
- Complementar la simulación añadiendo dispositivos de protección
- Enlistar los componentes necesarios para una implementación óptima

3 Diseño Placas PCB

3.1 Circuito generador de señal modulador por ancho de pulso (PWM)

Partiendo del circuito original en el simulador ver Figura E-1 se procede a diseñar una placa PCB para una implementación práctica. Para esta sección se debe tomar en cuenta las protecciones necesarias tanto para los componentes como para las señales que emiten.

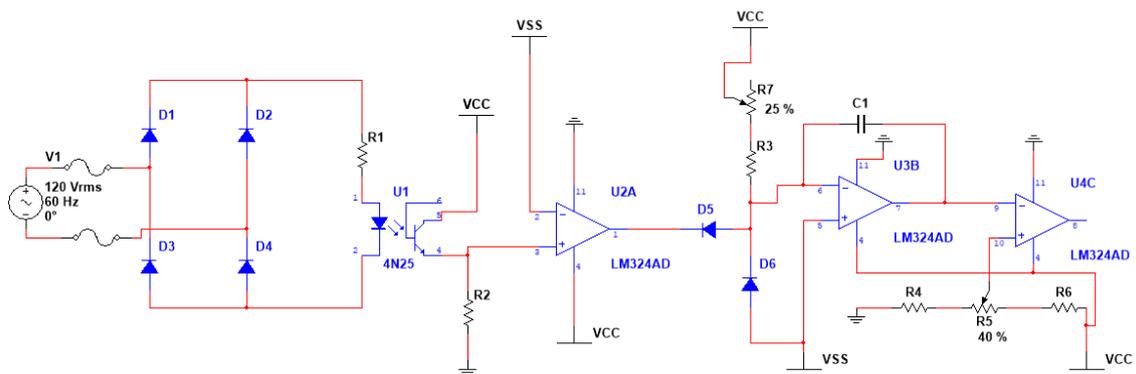
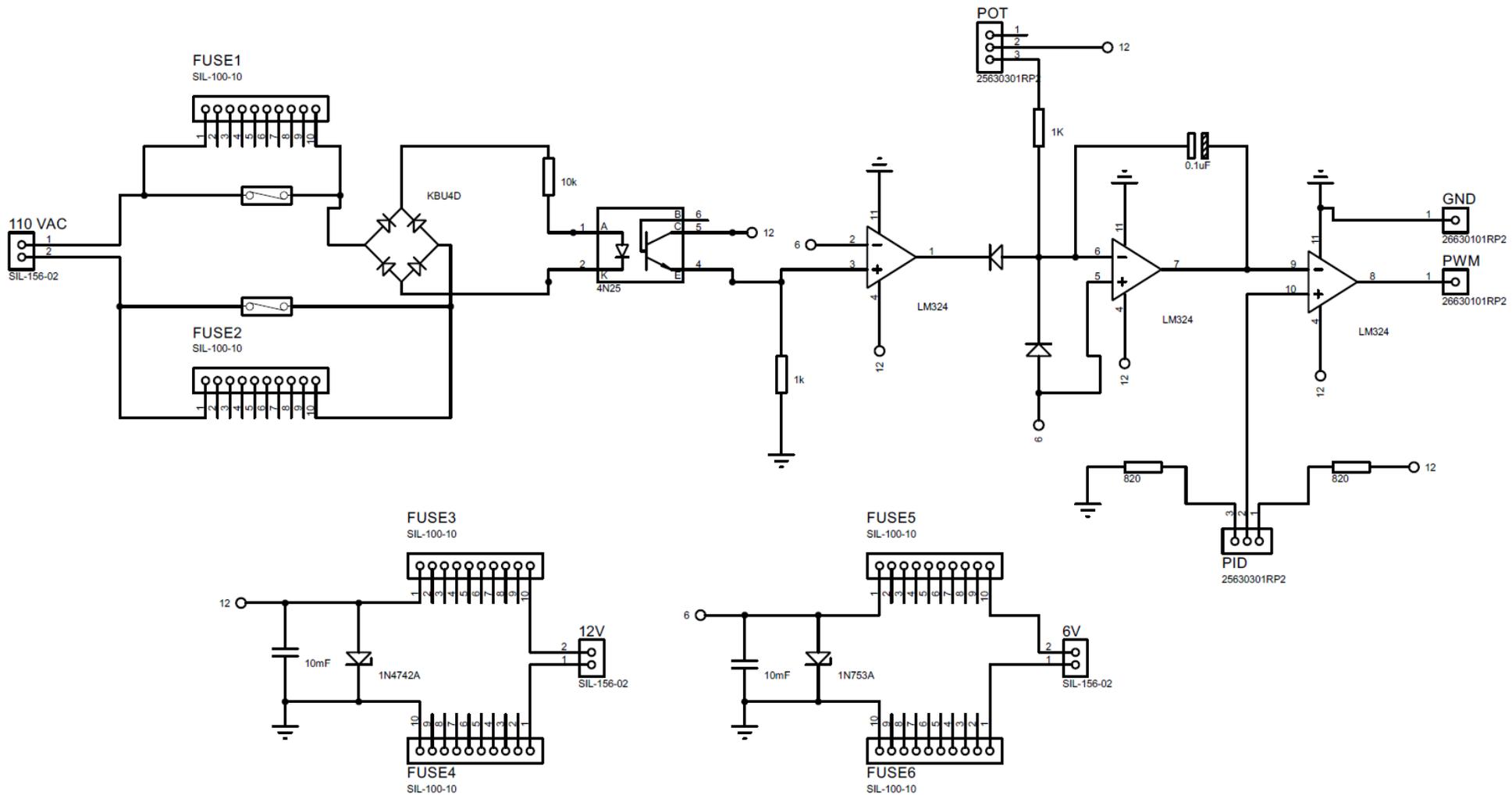


Figura E-1 Circuito Generador se señal PWM sincronizado con la red
Fuente: Propia

El circuito fue diseñado y simulado en MULTISIM, sin embargo, para el diseño de placas PCB se lo hizo en Proteus debido a que contiene los paquetes de diseño para placas PCB de dispositivos electrónicos actualizados, además su interfaz es de fácil operación y de conocimiento general para estudiantes.



Escala: N/A	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	ELABORADO POR: ARCOS FLORES CHRISTIAN ALEXIS RUALES LAICA JOSSIMAR DAVID	
	DISEÑO PLACA CIRCUITO GENERADOR PWM	REVISADO POR: ABRAHAM LOJA	
	PROYECTO INTEGRADOR	15/07/2020	N° E1



Figura E-3 Prototipo Placa PWM vista frontal
Fuente: Propia

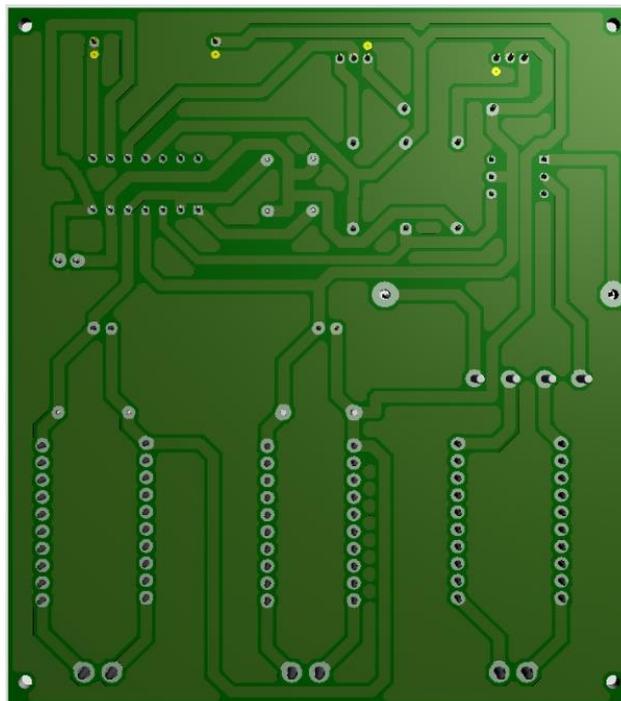


Figura E-4 Prototipo placa PWM, vista trasera
Fuente: Propia

Lo siguiente es adquirir los materiales para su implementación. En la siguiente Tabla E-1 se describen los elementos que componen el diseño de la placa correspondiente al circuito generador de PWM, sus características y parámetros.

Tabla E-1 Materiales sugeridos para implementación de placa PCB PWM

DISPOSITIVO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Terminal	26630101RP2 x1 salida Macho	Utilizado para salida de señales PWM y conexión GND para otros circuitos.	
Bornera	SIL 156-02 x2 entradas Hembra	Entrada para alimentación de fuentes voltaje Ac y DC	
Terminal	25630301RP2 x3 entrada/salida Macho/Hembra	Conexión de potenciómetros de precisión, entrada de señal PID	
Porta Fusible	SIL 100-10	Porta fusibles para placa, Pequeño	
Puente Rectificador	KBU4D 4A	Puente rectificador de onda completa	
Resistencia de Potencia	10 K Ω 5W	Resistencia disipadora de potencia	
Resistencias	Varios valores $\frac{1}{2}$ W	Resistencias divisoras de voltaje	
Optoacoplador	4N25 opto transistor	Permite interacción entre Voltaje Ac y Dc Protección y aislamiento entre Ac y DC	
Amplificador operacional	Integrado lm324	Consta de 4 amplificadores operacionales internos Genera y acondiciona la señal PWM	
Diodos	1N4007 1 W	Diodos de protección ante corrientes inversas	
Diodo Zener	1N753A 1 W 6 V	Diodo estabilizador para fuente de 6 VDC	
Diodo Zener	1n4742A 1 W 12 V	Diodo estabilizador para fuente de 12 VDC	

Capacitor	Electrolítico 0.1uf 25 V	Elemento generador de señal diente de sierra	
Capacitores	Tipo Gota 10 mF	Filtro Pasa bajos para fuentes DC	
Placa	Baquelita Perforada Fibra de vidrio	Placa para implementación de circuitos electrónicos	

Fuente: Propia

3.2 Circuito conversor AC/DC controlado

Partiendo del circuito ya simulado y comprobado su funcionamiento Figura E-5, el diseño de la placa también diseñada en Proteus sigue los mismos estándares definidos en el literal anterior.

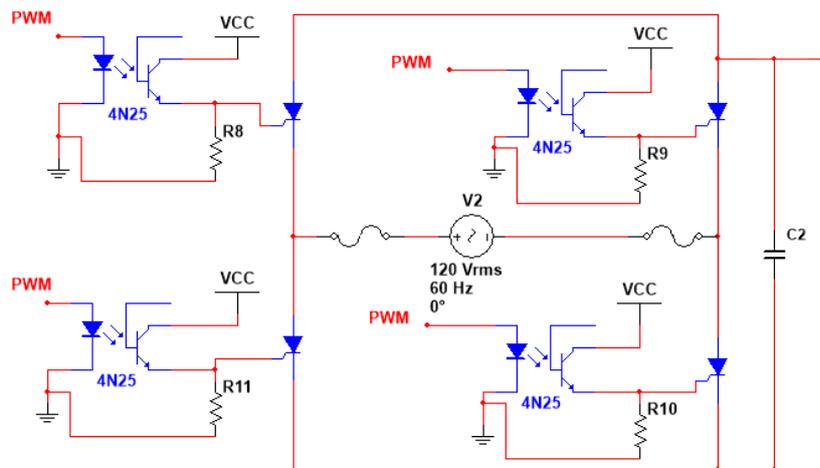
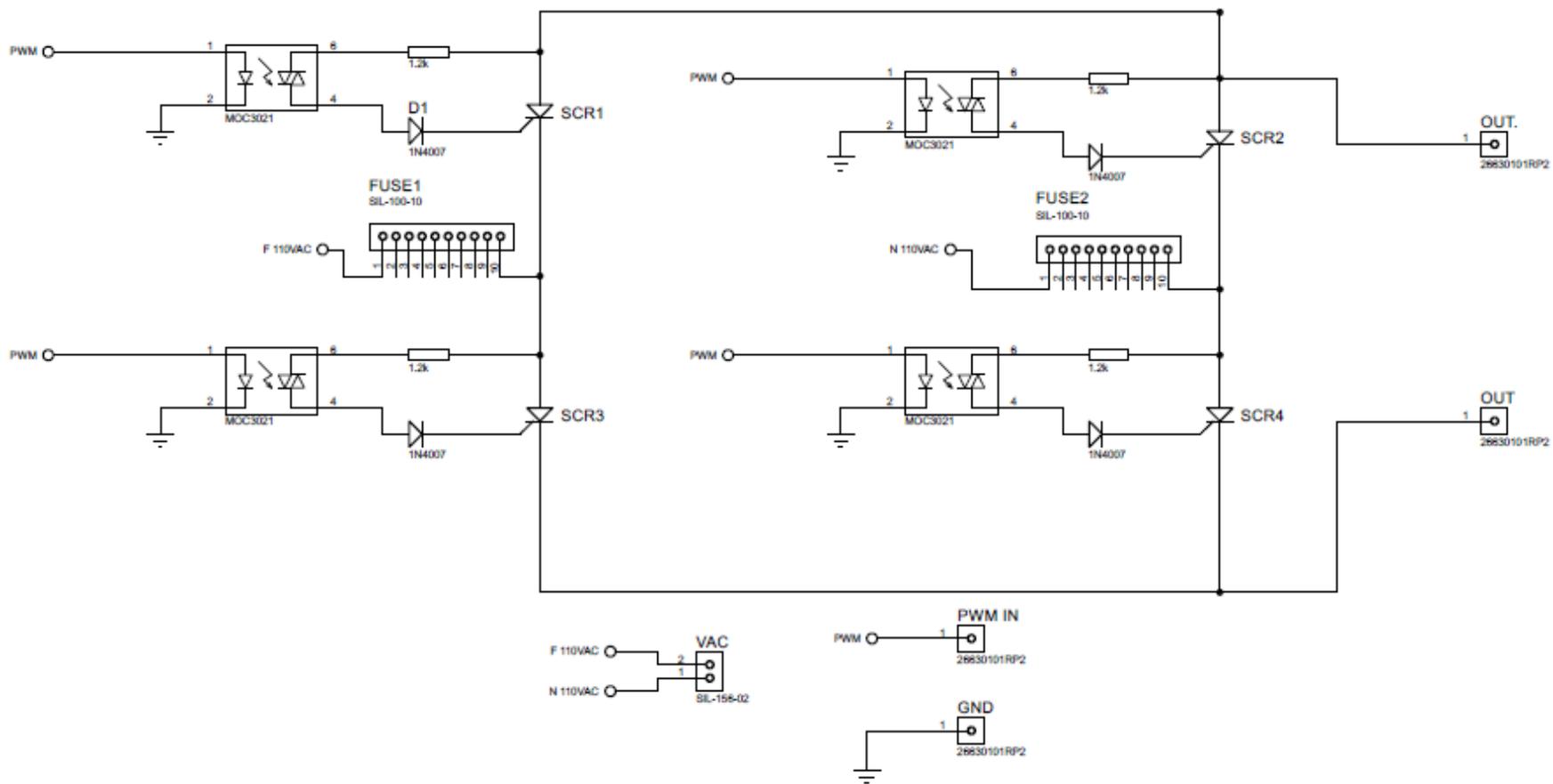


Figura E-5 Circuito Conversor AC/DC controlado

Fuente: Propia

Este circuito opera con voltajes de 120 V Ac, comandados por una señal de voltaje DC por lo tanto es necesario incorporar dispositivos que proteja y vincule la acción de ambas, el uso de optoacopladores es indispensable para dicha acción, así como fusibles para fase y neutro del suministro AC, diodos de protección contra corrientes inversas para los SCR sensibles ante ese efecto.



Escala: N/A	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	ELABORADO POR: ARCOS FLORES CHRISTIAN ALEXIS RUALES LAICA JOSSIMAR DAVID	
	DISEÑO PLACA CIRCUITO CONVERSOR AC/DC CONTROLADO	REVISADO POR: ABRAHAM LOJA	
	PROYECTO INTEGRADOR	15/07/2020	N° E2

Para el diseño de la placa PCB Figura E-6, se tomó en cuenta el voltaje Ac de 120 V entregado por la red para configurar un ancho de las líneas de conducción, estas deben ser lo más anchas posible para disipar potencia evitan sobrecalentamientos en la placa. El aterrizaje de la placa a GND también se lo hizo para reducir ruido en los optoacopladores y tiristores.

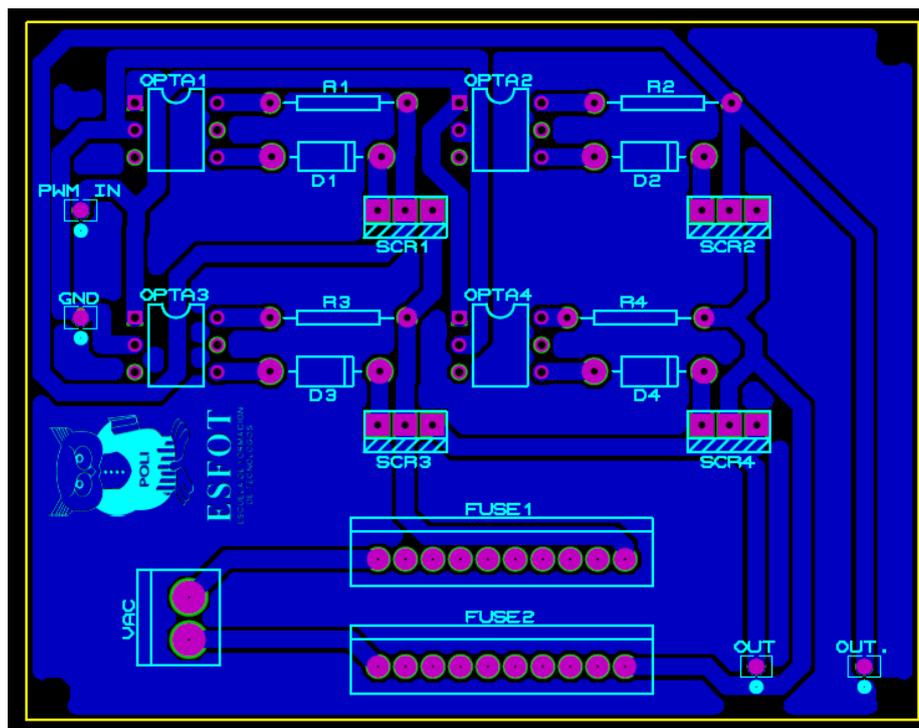


Figura E-6 Diseño placa PCB circuito convertidor AC/DC controlado
Fuente: Propia

Aprovechando la herramienta de visualización 3D de Proteus también se visualiza un prototipo de cómo se vería la placa diseñada ya en su implementación con sus componentes incorporados, véase las figuras E-7 y E-8.

Se recomienda colocar los nombres de los dispositivos para ubicarlos en el circuito.

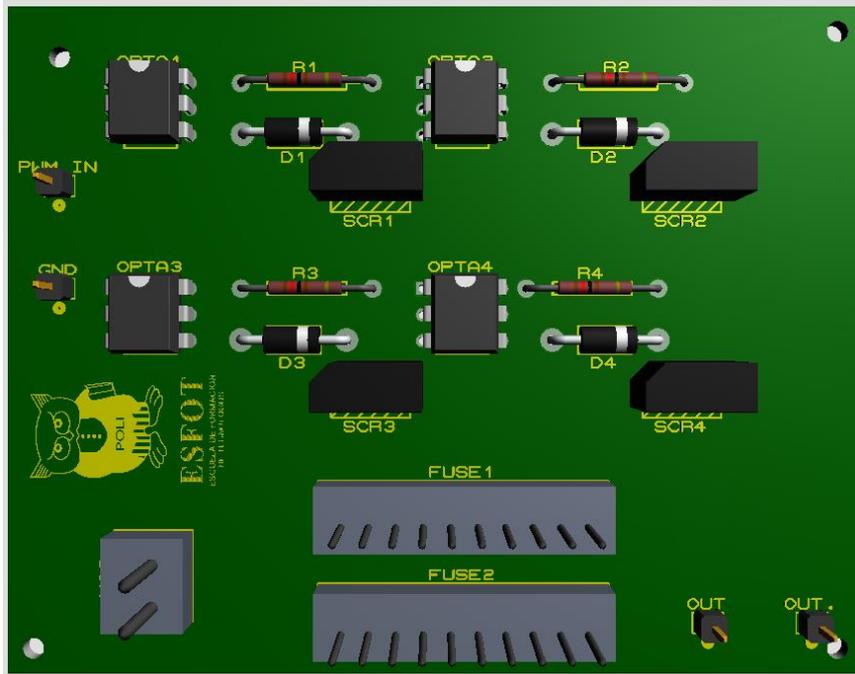


Figura E-7 Prototipo placa Conversor AC/DC, vista frontal
Fuente: Propia

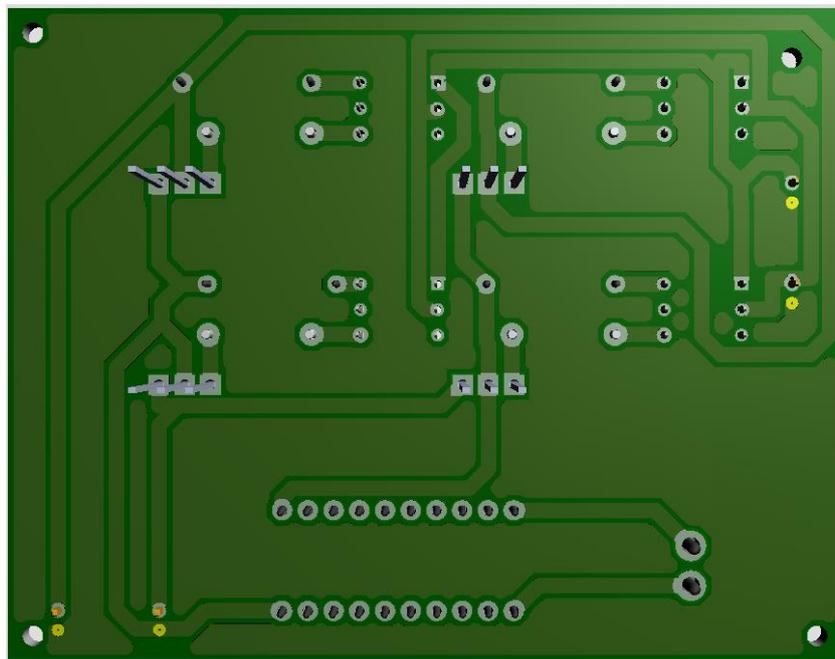


Figura E-8 Prototipo placa Conversor AC/DC, vista trasera
Fuente: Propia

En la Tabla E-2, se enlistan los dispositivos a adquirir para la implementación.

Tabla E-2 Materiales sugeridos para implementación de placa Conversor AC/DC

DISPOSITIVO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Terminal	26630101RP2 x1 salida Macho	Utilizado para salida de señales PWM y conexión GND para otros circuitos.	
Bornera	SIL 156-02 x2 entradas Hembra	Entrada para alimentación de fuentes voltaje Ac y Dc	
Porta Fusible	SIL 100-10	Porta fusibles para placa, Pequeño	
SCR	BT-151 600 R	Tiristor, Rectificador controlado de silicio 600 R, voltaje pico inverso de ruptura que soporta	
Resistencias	Varios valores ½ W	Resistencias divisoras de voltaje	
Optoacoplador	MOC 3021 Opto triac	Permite interacción entre Voltaje Ac y Dc Protección y aislamiento entre Ac y DC	
Diodos	1N4007 1 W	Diodos de protección ante corrientes inversas	
Placa	Baquelita Perforada Fibra de vidrio	Placa para implementación de circuitos electrónicos	

Fuente: Propia

3.3 Circuito de Acondicionamiento

Con el diseño del circuito de acondicionamiento mediante Proteus realizado anteriormente, se puede observar en la Figura E-9 los elementos electrónicos requeridos y sus conexiones para realizar la placa PCB, que permitirán la implementación práctica del circuito.

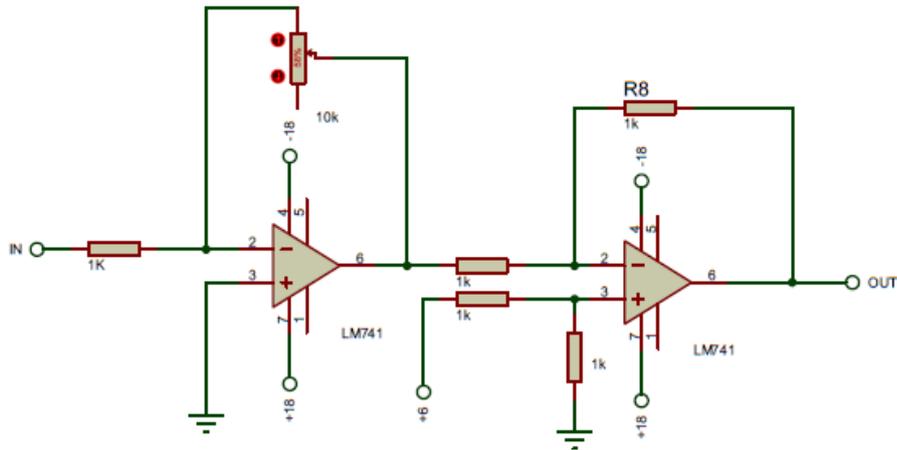
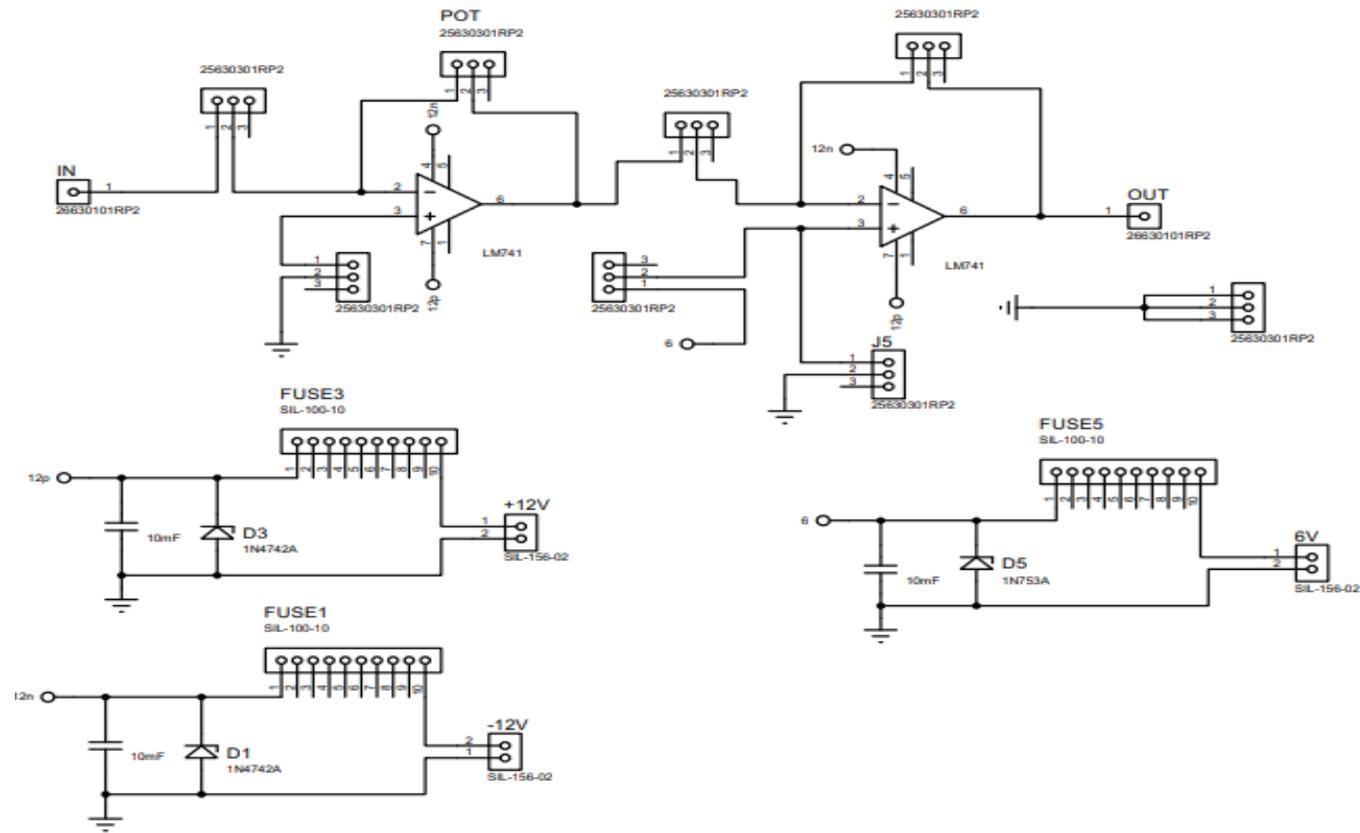


Figura E-9 Circuito de Acondicionamiento.
Fuente: Propia

El circuito de acondicionamiento permite modificar la amplitud del voltaje en la señal generada por el controlador, ya que el controlador utilizado (Arduino) produce una señal de salida máxima de 5V, entonces con la ayuda de amplificadores y resistencias se puede diseñar un circuito que permite aumentar la amplitud de este voltaje, utilizando diferentes configuraciones de amplificación, en este caso se utilizó una configuración proporcional de amplificadores y una sumadora para conseguir una función de transferencia adecuada que fue determinada matemáticamente, permitiendo tener una amplificación proporcional del voltaje de 6V a 18V.



Escala: N/A	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	ELABORADO POR: ARCOS FLORES CHRISTIAN ALEXIS RUALES LAICA JOSSIMAR DAVID	
	DISEÑO PLACA CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO	REVISADO POR: ABRAHAM LOJA	
		15/07/2020	N° E3

En el circuito de la Figura E-10 se observa el diseño de la placa PCB del circuito de acondicionamiento realizada en Proteus, además permite visualizar la posición adecuada de los elementos electrónicos para que no existan cortocircuitos, dimensionamiento erróneo de los dispositivos, en el momento de implementar el circuito en la práctica. Hay que tener en cuenta la conexión de la placa a GND, para evitar ruidos o perturbaciones externas que puedan cambiar la señal amplificada.

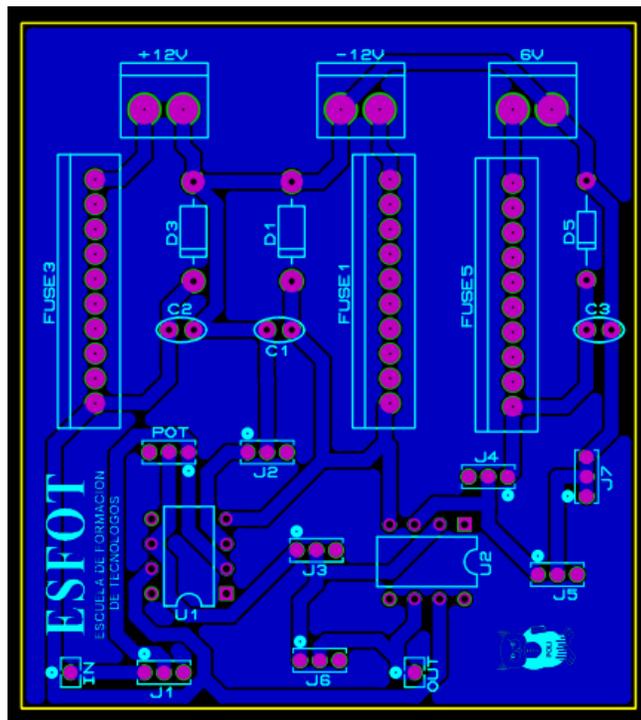


Figura E-10 Diseño placa PCB circuito de acondicionamiento
Fuente: Propia

Proteus permite visualizar la placa PCB montada con sus elementos electrónicos, con el fin de cambiar la estética de la placa dependiendo de las necesidades que se requiera en la práctica o la implementación de esta.

Se recomienda etiquetar los elementos para evitar montajes erróneos.

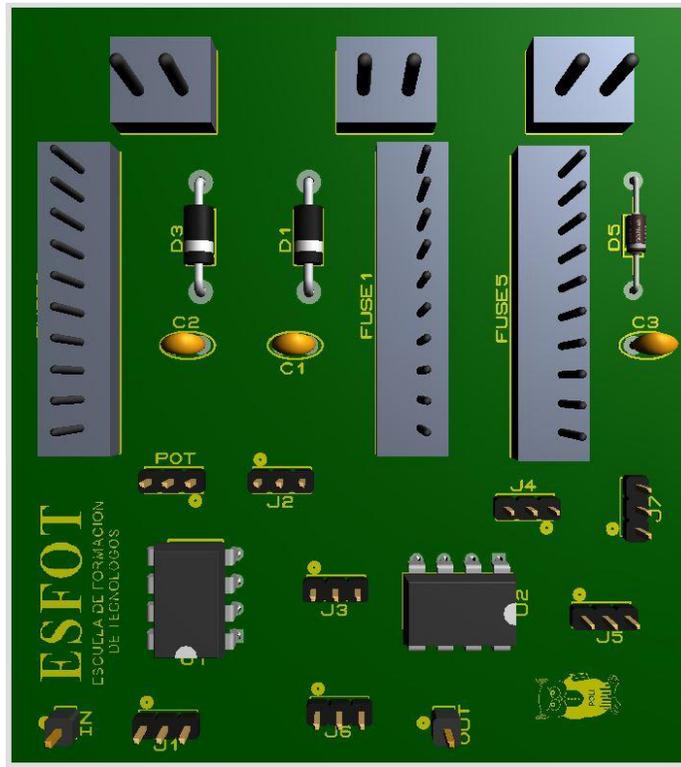


Figura E-11 Prototipo placa del circuito de acondicionamiento, vista frontal
Fuente: Propia

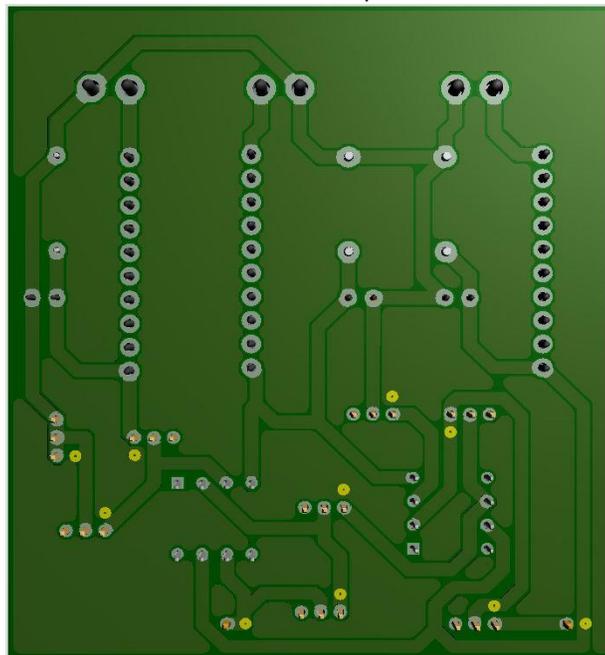


Figura E-12 Prototipo placa del circuito de acondicionamiento, vista frontal
Fuente: Propia

En la Tabla E-3, Se observan los dispositivos que necesarios para realizar la implementación del circuito de acondicionamiento.

Tabla E-3 Materiales sugeridos para implementación de placa Circuito de acondicionamiento

DISPOSITIVO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Terminal	26630101RP2 x1 salida Macho	Utilizado para salida de señales PWM y conexión GND para otros circuitos.	
Bornera	SIL 156-02 x2 entradas Hembra	Entrada para alimentación de fuentes voltaje Ac y DC	
Amplificador Operacional	Lm 741	Amplificador operacional polarizado	
Potenciómetro	Potenciómetro de varios valores	Potenciómetro digital de escala lineal.	
Porta Fusible	SIL 100-10	Porta fusibles para placa, Pequeño	
Resistencias	Varios valores ½ W	Resistencias divisoras de voltaje	
Diodos	1N4007 1 W	Diodos de protección ante corrientes inversas	
Placa	Baquelita Perforada Fibra de vidrio	Placa para implementación de circuitos electrónicos	
Diodo Zener	1n4742A 1 W 12 V	Diodo estabilizador para fuente de 12 VDC	
Capacitores	Tipo Gota 10 mF	Filtro Pasa bajos para fuentes DC	
Diodo Zener	1N753A 1 W 6 V	Diodo estabilizador para fuente de 6 VDC	

Fuente: Propia