

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**



FACULTAD DE INGENIERÍAS

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN SISTEMAS
INDUSTRIALES**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TÍTULO O TEMA:

***“MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA,
CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW”***

AUTORES:

PINTO BONILLA GENARO AMADO

CELLERI MENDOZA KLEBER XAVIER

TUTOR DE TESIS:

ING. GABRIEL GARÍA

GUAYAQUIL, 14 DE MAYO DEL 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Señor Genaro Amado Pinto Bonilla portador de la cédula de ciudadanía número 0914315825 y Señor Kleber Xavier Celleri Mendoza portador de la cedula de ciudadanía número 0916047160, declaramos que los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, 14 de mayo del 2015

PINTO BONILLA GENARO A.

CELLERI MENDOZA KLEBER X.

DEDICATORIA

El regalo más grande que he recibido es:
la vida que el CREADOR me ha dado, a través de
dos seres maravillosos que son mis padres:
Sr. JOSE LUCIO PINTO SÁNCHEZ que en paz descanse
y Sra. EDITA EUFEMIA BONILLA PEÑAFIEL,
y en agradecimiento a ellos, dedico ésta obra
lo cual los llenará de orgullo y satisfacción
al ver que se ha cumplido, uno de los tan apreciados sueños
que tenemos los padres para con nuestros hijos :
el verlo convertido en un profesional.
Ahora que me he recibido de ingeniero.
siento el deseo de agradecer:
a mis dos hijitos: niño GENARO PINTO MUÑOZ
y niña ALISON PINTO MUÑOZ, a la mujer
que me acompaña en ésta vida, mi señora:
CINTHIA MUÑOZ CHIRIBOGA,
a mis hermanos, amigos y familiares
que también arrimaron el hombro
en mis momentos difíciles,
a mis maestros, que uno a uno fueron
formando profesionalmente, a éste servidor.

gracias, gracias, gracias.

Att.

Genaro Amado Pinto Bonilla

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado su infinita bondad, amor y salud para lograr mis objetivos.

A mis padres Ernesto y Gloria, por ser los pilares fundamentales en todo lo que soy y por su incondicional apoyo en todo este tiempo.

A Mari, Aylín y Xavier por ser mis motores y mi fuente de energía para culminar esta etapa de mi vida.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Xavier Celleri Mendoza

RESUMEN

AÑO	ALUMNO/S	DIRECTOR DE TESIS	TEMA TESIS
2015	GENARO AMADO PINTO BONILLA KLEBER XAVIER CELLERI MENDOZA	ING. GABRIEL GARCÍA	MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA, CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW

Se diseñó un módulo didáctico y entrenador, de rectificadores trifásicos de potencia, para que los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana con sede en Guayaquil, puedan realizar prácticas de rectificación trifásica controlada y monitoreada por LabVIEW.

Por medio de una fuente generadora de corriente trifásica se utilizó un banco de tres (3) transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella (YY) con el objetivo de reducir los voltajes de fases de entrada.

Para controlar y presentar las curvas en forma gráfica, se utilizó el software de National Instruments LabVIEW, con el módulo de interface NI-USB 6008, que permite visualizar las curvas de las diferentes magnitudes, tales como: V_o , I_o y V_{AK} , entre otras.

Por ser éste módulo entrenador de carácter didáctico, los circuitos se diseñaron para que soporten una corriente de carga máxima de 3 amperios, utilizando cargas

resistivas, cargas inductivas y cargas capacitivas. El manejo del rectificador trifásico controlado lo ejecutará un circuito generador de 6 pulsos, correctamente sincronizados y desfasados 60 grados entre sí.

Cada dispositivo de potencia tiene su respectiva protección (fusibles en este caso) expuesta en el panel frontal para facilitar el reemplazo en caso de averías.

Tanto los dispositivos rectificadores (diodos y SCR's), como los elementos de cargas están ubicados en forma matricial en el panel frontal para dar una facilidad visual de los diferentes arreglos que se vayan a realizar.

PALABRAS CLAVES

Diseño, ensamblaje y elaboración de un módulo didáctico para rectificación trifásica, controlada, semi controlada y no controlada, monitoreada con el software Labview, para el laboratorio de electrónica de potencia. Rectificador. Trifásico. Controlado. Semi controlado. No controlado. Adquisición de datos.

ABSTRACT

YEAR	STUDENT/S	THESIS DIRECTOR	THESIS TOPIC
2015	GENARO AMADO PINTO BONILLA KLEBER XAVIER CELLERI MENDOZA	ING. GABRIEL GARCÍA	MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA, CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW

A training module and trainer, three-phase power rectifiers are designed for students of the Salesiana Polytechnic University based in Guayaquil, practices can perform controlled phase rectification and monitored by LabVIEW.

Given through an AC generator of a bank of three (3) single-phase transformers connected in star - star (YY) with the aim of reducing input phase voltages are used.

To monitor and present the curves in graphic form, the National Instruments LabVIEW software has been accomplished with the NI USB - 6008, interface module that displays the curves of different magnitudes, such as V_O , I_O and V_{AK} , among others.

This coach didactic module, circuits were designed to support a maximum load current of 3 amps, using resistive, inductive and capacitive loads. The management phase it is execute a controlled rectifier, properly synchronized with each other, outdated 60 grades 6-pulse generating circuit.

Each device has its respective power protection (fuse in this case) displayed on the front panel for easy replacement in case of malfunction.

Both devices rectifiers (diodes and SCR's) as load elements are located in matrix form on the front panel to give a visual ease of the different arrangements that will be made.

KEY WORDS

Design, assembly and preparation of a training module for three-phase controlled, semi-controlled and uncontrolled rectification, monitored with Labview software for power electronics lab. Rectifier. Phase. Controlled. Semi controlled. Uncontrolled. Data acquisition.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Preliminares.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Delimitación.....	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación.....	4
1.6 Variables e indicadores	5
1.7 Metodología	5
1.7.1 Método Deductivo.....	6
1.7.2 Método Inductivo	6
1.7.3 Clasificación.....	6
1.7.4 Análisis.....	7
1.7.5 Planeación	7
1.7.6 Ejecución.....	7
1.7.7 Verificación.....	7
1.8 Técnicas.....	8
1.8.1 Técnica Documental.....	8
1.8.2 Técnica de Campo.....	8
1.9 Población y muestra	8
1.10 Beneficiarios	9
1.11 Impacto.....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Introducción	10
2.2 Corriente alterna.....	11
2.3 Ventajas de la corriente alterna.....	12
2.4 Electrónica de Potencia	12
2.5 Generación trifásica	13
2.6 Generador perfecto.....	14
2.7 Mejoramiento del factor de potencia en redes trifásicas.....	14

2.8	Rectificadores.....	15
2.9	Tipos de Rectificadores.....	15
2.9.1	Rectificador trifásico no controlado.....	16
2.9.2	Rectificador trifásico controlado.....	20
2.10	Resistores	22
2.11	Capacitores.....	23
2.12	Inductores.....	24
2.12.1	Modelo equivalente del inductor.....	25
2.12.2	Clasificación de los inductores.....	26
2.13	Dispositivos semiconductores de potencia	27
2.14	Dispositivos semiconductor no controlados (DIODO).....	28
2.14.1	Característica tensión-corriente.....	29
2.15	Dispositivo semiconductores semicontrolado (SCR).	29
2.15.1	Característica tensión-corriente.....	31
2.15.2	Activación, disparo y bloqueo de los SCR	32

CAPÍTULO 3: DISPOSITIVOS UTILIZADOS Y MONTAJE DEL PROYECTO. 34

3.1	Dispositivos y elementos utilizados para la estructura.	34
3.2	Reporte fotográfico del montaje de la estructura.	34
3.3	Características técnicas del módulo didáctico.....	38
3.4	Dispositivos y elementos utilizados para los circuitos.....	38
3.5	Diagramas del proyecto.....	39
3.6	Diagrama del banco de transformadores.....	40
3.7	Diagrama del circuito generador de pulsos	41
3.8	Diagrama del circuito de operacionales	42
3.9	Diagrama del circuito opto acoplador	43

CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL PROYECTO 44

4.1	Diseño y montaje del banco de transformadores trifásicos.....	44
4.2	Diseño y montaje del circuito rectificador trifásico no controlado.....	49
4.3	Diseño y montaje del circuito rectificador trifásico con SCR´s.....	52
4.4	Diseño y montaje del circuito de fuentes de poder.	54
4.5	Diseño y montaje del circuito generador de los pulsos de disparos.....	55

4.5.1	Toma de referencia trifásica.....	56
4.5.2	Circuito detector de cruce de fases.....	56
4.5.3	Integrador o Generador de rampas.....	59
4.5.4	Circuito comparador o Modulador por ancho de pulsos (PMW).....	59
4.5.5	Etapas de acoplamiento.....	61
4.5.6	Circuito de interface para medir señales.....	62
4.6	Diseño y ensamblaje del circuito de cargas RLC.....	62
4.7	Diseño del programa con el software LabVIEW.....	64
4.7.1	Adquisición de datos.....	64
4.7.2	Generador de señal.....	68

CAPÍTULO 5: MANUAL DE USUARIO Y PRACTICAS DE

LABORATORIO.....	69	
5.1	Manual de usuario del módulo didáctico.....	69
5.1.1	Sección de alimentación trifásica.....	70
5.1.2	Sección de entrada de señales.....	71
5.1.3	Sección de rectificadores no controlados (diodo).....	71
5.1.4	Sección de rectificadores controlados (SCR's).....	72
5.1.5	Sección de cargas resistivas, inductivas y capacitivas.....	72
5.2	Prácticas de laboratorio.....	74
5.2.1	Práctica 1: Reconocimiento del módulo didáctico.....	74
5.2.3	Práctica 2: Rectificador trifásico de media onda, no controlado con carga resistiva.....	77
5.2.4	Práctica 3: Rectificador trifásico de media onda no controlado con carga inductiva.....	83
5.2.5	Práctica 4: Rectificador trifásico de onda completa no controlado con carga resistiva.....	89
5.2.6	Práctica 5: Rectificador trifásico de onda completa no controlado con carga inductiva.....	95
5.2.7	Práctica 6: Rectificador trifásico de media onda controlado con carga resistiva.....	101
5.2.8	Práctica 7: Rectificador trifásico de media onda controlado con carga inductiva.....	107

CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	115
CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN	116
PRESUPUESTO	117
BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. DIAGRAMA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO.	10
FIGURA 2.2. ONDA SENOIDAL MONOFÁSICA.....	11
FIGURA 2.3. ONDA SENOIDAL TRIFÁSICA.....	14
FIGURA 2.4. CIRCUITO DEL RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA.	15
FIGURA 2.5. CIRCUITO DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO	16
FIGURA 2.6. ONDA SENOIDAL TRIFÁSICA.....	18
FIGURA 2.7. ONDA SENOIDAL TRIFÁSICA RECTIFICADA.	19
FIGURA 2.8. CIRCUITO DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO.	20
FIGURA 2.9. MODELO EQUIVALENTE DEL INDUCTOR.	26
FIGURA 2.10. MODELO EQUIVALENTE DE UN DIODO.....	28
FIGURA 2.11. MODELO EQUIVALENTE DEL SCR.	30
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.	37
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.	40
FIGURA 3.2. DIAGRAMA DEL CIRCUITO GENERADOR DE PULSOS.	41
FIGURA 3.3. DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE OPERACIONALES.....	42
FIGURA 3.4. DIAGRAMA DEL CIRCUITO OPTO ACOPLADOR.	43
FIGURA 4.1. CIRCUITO FUENTE DE PODER DE 5V DC 600MA.....	54
FIGURA 4.2. TRANSFORMADOR DE ALIMENTACIÓN DE LAS FUENTES..	54
FIGURA 4.3. CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR FASE.....	58

FIGURA 4.4. CIRCUITO GENERADOR DE RAMPAS.	59
FIGURA 4.5. CIRCUITO MODULADOR POR ANCHO DE PULSO.	60
FIGURA 4.6. CIRCUITO OPTO ACOPLADOR.	61
FIGURA 4.7. CIRCUITO INTERFACE DE SEÑAL.	62
FIGURA 4.8. PASO 1, VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	65
FIGURA 4.9. PASO 3, VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	66
FIGURA 4.10. PASO 5, VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	66
FIGURA 4.11. PASO 4, VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	67
FIGURA 4.12. PASO 7, VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	67
FIGURA 5.1. VISTA FRONTAL POR BLOQUES.	69
FIGURA 5.2. BLOQUE DE ALIMENTACIÓN TRIFÁSICA.	70
FIGURA 5.3. BLOQUE DE ENTRADAS DE SEÑAL AC - DC.	71
FIGURA 5.4. BLOQUE DE DIODOS DE POTENCIA.	71
FIGURA 5.5. BLOQUE DE SCR'S DE POTENCIA.	72
FIGURA 5.6. BLOQUE DE CARGAS.	73
FIGURA 5.7. VISTA FRONTAL POR BLOQUES.	75
FIGURA 5.8. CONEXIÓN DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON DIODO.	78

ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 2.1. CARGA RESISTIVA INSTALADA EN EL MÓDULO.	23
FOTO 2.2. CARGA CAPACITIVA INSTALADA EN EL MÓDULO.	23
FOTO 2.3. CARGA PURAMENTE INDUCTIVA INSTALADA EN EL MÓDULO.	25
FOTO 2.4. DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA.	27
FOTO 2.5. PUENTE DE DIODOS.	28
FOTO 2.6. DISPOSITIVO SEMICONDUCTOR SCR.....	30
FOTO 3.1. CORTE DE TUBO RECTANGULAR DE ALUMINIO.....	34
FOTO 3.2. COMPROBACIÓN DE MEDIDAS DEL MARCO.	35
FOTO 3.3. ENSAMBLAJE DE LA ESTRUCTURA DE ALUMINIO.....	35
FOTO 3.4. INSTALACIÓN DE LOS SOPORTES INTERIORES.	35
FOTO 3.5. PRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA CON SOPORTES INTERNOS INSTALADOS.	36
FOTO 3.6. PRESENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS EN PANEL FRONTAL. ...	36
FOTO 3.7. PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE BORNERAS.	36
FOTO 3.8. INSTALACIÓN DE COMPUTADOR.	37
FOTO 3.9. VISTA DE PANEL FRONTAL.....	37
FOTO 3.10. VISTA FINAL PANEL FRONTAL.	37
FOTO 4.1. BANCO DE TRANSFORMADORES REDUCTORES.	44
FOTO 4.2. FORMA DE ONDA DE VOLTAJE DE LÍNEA V_{RN}	46
FOTO 4.3. VALOR DE VOLTAJE DE LÍNEA V_{LN}	46

FOTO 4.4. FORMA DE ONDA DEL VOLTAJE LÍNEA- LÍNEA V_{RS}	47
FOTO 4.5. VALOR DE VOLTAJE LÍNEA- LÍNEA V_{RS}	47
FOTO 4.6. PUENTE DE DIODOS.	50
FOTO 4.7. DISTRIBUCIÓN DE DIODOS EN PANEL FRONTAL.....	50
FOTO 4.8. DISTRIBUCIÓN DE DIODOS EN PANEL POSTERIOR.....	51
FOTO 4.9. CONEXIÓN DE RECTIFICADOR CON DIODOS.	51
FOTO 4.10. DISTRIBUCIÓN DE SCR'S EN PANEL POSTERIOR.....	52
FOTO 4.11. DISPOSICIÓN Y CONEXIÓN DE LOS SCR'S.....	53
FOTO 4.12. TRANSFORMADOR DE LA FUENTE DE PODER DE 12V DC 600MA.	55
FOTO 4.13. CIRCUITO FUENTE DE PODER DE 12V DC 600MA.	55
FOTO 4.14. VISTA DEL BLOQUE DE CARGA DEL PANEL FRONTAL SEÑALES.	63
FOTO 4.15. VISTA DEL BLOQUE DE CARGA DEL PANEL POSTERIOR.....	64

ÍNDICE DE TABLA

TABLA 5.1 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON DIODO Y CARGA R.	82
TABLA 5.2 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON DIODO Y CARGA L.	88
TABLA 5.3 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO DE MEDIA ONDA Y CARGA R.....	94
TABLA 5.4 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON DIODO Y CARGA L.	100
TABLA 5.5 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON SCR Y CARGA R.....	106
TABLA 5.6 VALORES MEDIDOS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CON SCR Y CARGA L.....	113

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Preliminares

El presente documento, se redacta con carácter de Trabajo de Tesis de Fin de Carrera, para la obtención del título de Ingeniero Electrónico con mención en Sistemas Industriales, por parte de quienes lo suscriben y siguiendo las recomendaciones de tutorías profesionales, se ha diseñado y elaborado éste proyecto práctico: “MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA, CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW”.

En el documento que se presenta a continuación, se recogen todos los datos y características que han sido obtenidas como resultado de los cálculos desarrollados en los correspondientes capítulos y que permiten marcar directrices para la materialización de dicho proyecto.

El presente trabajo de tesis refleja los siguientes documentos:

- Memoria técnica
- Diagramas
- Manual de usuario
- Manual de Practicas

Para llevar a cabo el presente trabajo de tesis se ha realizado lo siguiente:

- Un estudio de ingeniería en Electrónica de Potencia.
- Diseño de la estructura física del banco de pruebas.
- Diseño electrónico de tarjetas de control y de potencia.
- Uso y reconocimiento de dispositivos y elemento electrónicos. de potencia.
- Instalación y configuración del interface y el equipo de control.
- Diseño e implementación del software de control programado en LabVIEW.
- Diseño e implementación del manual de usuario.

- Diseño e implementación del manual de prácticas.
- Redacción del documento basado en toda la experiencia obtenida durante este trabajo de tesis.

1.2 Planteamiento del problema.

El ámbito laboral dedicado a la industria exige ingenieros con gran capacidad teórica y experimental, por lo tanto este proyecto servirá para fomentar, incentivar y reforzar los conocimientos teóricos de una rama muy importante en la carrera de Ingeniería Electrónica, como es la Electrónica de Potencia mediante múltiples ejercicios prácticos.

La Universidad Politécnica Salesiana con sede en Guayaquil tiene como objetivo formar excelentes profesionales en el campo tecnológico y de investigación, por lo que se coloca a vuestra disposición una serie de prácticas de laboratorio debidamente estructuradas y ordenadas en base a la propia asignatura.

1.3 Delimitación.

Es iniciativa de quienes suscriben éste trabajo de tesis, proveer un banco de pruebas didáctico para rectificadores trifásicos, controlado y monitoreado por el software Labview, que permita mejorar el aprendizaje experimental en la materia de Electrónica de Potencia de la Facultad de Ingenierías.

Para tal fin, este proyecto está dirigido al laboratorio de Electrónica de Potencia ubicado en el salón 303 del tercer piso del bloque B, de la Universidad Politécnica Salesiana con sede en la ciudad de Guayaquil, ubicado en la Calle Chambers 227 y Calle 5 de Junio, de la ciudad de Guayaquil.

Los datos de voltaje y corriente, obtenidos en el armado de las prácticas de laboratorio, son presentados en el software diseñado sobre la plataforma de Labview,

mediante un computador instalado en el banco de pruebas didáctico, con la ayuda del interface NI-USB 6008, permiten comparar, monitorear y visualizar, los niveles de intensidad, de amplitud y forma de onda que presentan los rectificadores trifásico en cada una de sus configuraciones.

1.4 Objetivos

A continuación se mencionan los objetivos: general y específicos del proyecto.

1.4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un módulo didáctico de pruebas del rectificador trifásico, controlado y monitoreado por el software Labview, desde un computador por medio de un interface NI USB 6008, para ser utilizado en el laboratorio de electrónica de potencia.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Diseñar y ensamblar, un circuito rectificador trifásico controlado, con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
2. Diseñar y ensamblar, un circuito rectificador trifásico no controlado, con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
3. Diseñar y ensamblar, un circuito que represente un kit de cargas eléctricas y que esté dentro de las especificaciones técnicas de los circuitos rectificadores.
4. Diseñar y ensamblar, un circuito de protección para el sistema en general (sobre todo en la parte de potencia), para posibles cortocircuitos o sobrecargas eléctricas, con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.

5. Diseñar y ensamblar, un circuito electrónico para controlar el ángulo de conducción del rectificador trifásico controlado con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
6. Diseñar y ensamblar, un circuito electrónico que sea capaz de tomar muestras de la señal de entrada (acometida de 3 fases), con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
7. Diseñar y ensamblar, un circuito electrónico que aisle eléctricamente, la toma de señal de cualquier punto del circuito de potencia, con la parte de control, con sus respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
8. Diseñar e instalar, un software que permita habilitar al módulo NI USB 6008 como sistema de control de este proyecto y que a su vez sea interfaz, entre el usuario y el banco de pruebas, a través de un computador personal, dando las respectivas especificaciones técnicas, cálculos y recomendaciones.
9. Diseñar y ensamblar, un gabinete que garantice la ejecución de la práctica, basándose en las especificaciones técnicas necesarias.
10. Diseñar y redactar, un manual para llevar a cabo el desarrollo de las 10 prácticas de laboratorio.
11. Diseñar y redactar un manual de usuario que facilite la utilización del banco de pruebas.
12. Elaborar el análisis financiero del trabajo de tesis.

1.5 Justificación

Con el presente proyecto “MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA, CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW”, la materia de electrónica de potencia ya no solo será teórica, también el estudiante tendrá la facilidad de realizar las diferentes prácticas y lo mejor, es que podrá visualizar lo que sucede con las señales de corriente y voltaje, cuando modificamos alguna variable.

Con este banco de prueba el estudiante obtendrá las siguientes ventajas:

- Materia práctica y teórica.
- Conocimientos adquiridos se podrán probar de forma práctica.
- El nivel de aprendizaje será mayor.
- Destreza en la manipulación de equipos electrónicos.
- Mayor capacidad en el campo laboral.
- Reconocimiento fácil de esta clase de equipos.

1.6 Variables e indicadores

La cátedra de electrónica de potencia se complementa con sus respectivas prácticas de laboratorio. Al realizar una superficial evaluación a nuestros compañeros sobre el aprendizaje de esta materia se observó que la parte teórica estaba clara, pero que existen limitaciones de conocimientos experimentales. Por lo tanto este es el punto de partida, que nos indica la necesidad de un módulo didáctico como el que se presenta en este trabajo de tesis.

Otro punto indicador es el campo laboral; ya que los sistemas de rectificadores fijos, semi-controlados y controlados, son parte de un sistema de potencia a nivel de las industrias. Por lo tanto el futuro profesional en electrónica industrial debe ser capaz de desenvolverse en esta área teórica y práctica.

1.7 Metodología

La metodología utilizada en este trabajo de tesis consiste en aplicar el método deductivo y el método inductivo.

1.7.1 Método Deductivo

Para el banco de pruebas didáctico, la implementación y diseño, tiene como finalidad comprobar las mediciones realizadas con un multímetro o un osciloscopio, aplicando todos los conocimientos académicos y especialmente de la materia de electrónica de potencia. Haciendo uso de la tecnología especializada, como es el caso del software de Labview.

1.7.2 Método Inductivo

Se utilizó el método inductivo, debido a que aplicando todos los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera fue posible diseñar, ensamblar, instalar, configurar y probar el modulo didáctico para rectificadores trifásicos, que permite experimentar las formas de ondas y los niveles de, voltaje y corriente, en cada punto de interés.

Además, se utilizó la metodología lógica, ordenada y sobre todo técnico, por lo que se exponen los siguientes pasos:

1. Clasificación.
2. Análisis.
3. Planeación.
4. Ejecución.
5. Verificación.

1.7.3 Clasificación

Consiste en segmentar al proyecto en etapas bien definidas, reconociendo sus funciones, propiedades, características técnicas y además, poder seleccionar los diferentes dispositivos eléctricos, los electrónicos e interconectarlo entre sí.

1.7.4 Análisis

En este paso hacemos uso de los cálculos matemáticos, basados en las características técnicas de los múltiples dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados, para diseñar todas las etapas de este proyecto. También se ha analizado el diseño del software basado en el lenguaje gráfico LabVIEW, para programar el módulo NI USB 6008.

1.7.5 Planeación

Se ha utilizado una secuencia ordenada y una técnica de pasos, que se ejecutaron para obtener el mejor resultado posible y minimizar los posibles errores de diseño.

1.7.6 Ejecución

Se muestran las diferentes etapas, previamente diseñadas, tomando las precauciones de conexión, polaridad, potencia de disipación, características de los elementos, acabado de los materiales ensamblados y resistencia física del módulo.

1.7.7 Verificación

Luego de haber ejecutado el proyecto, se sometió a la etapa de prueba, donde se corrigieron y se ajustaron los mínimos detalles para obtener resultados reales.

1.8 Técnicas

La técnica utilizada en este trabajo de tesis consiste en aplicar la técnica documental y la técnica de campo expresada a continuación:

1.8.1 Técnica Documental

Para la elaboración y redacción, del marco teórico de este trabajo de tesis se utilizó todos los compendios y conceptos, relacionados con la teoría para la demostración experimental de los rectificadores trifásicos.

1.8.2 Técnica de Campo

Todas las pruebas de campo fueron realizadas en el módulo didáctico, obteniendo mediciones, formas de ondas y ciertos comportamientos solo expresados en las pruebas reales, una vez que se interconectan las diferentes etapas y dispositivos, con el programa grafico Labview.

1.9 Población y muestra

La población estudiantil de la Universidad Politécnica Salesiana con sede en Guayaquil, crece de manera rápida, demandando así una mayor infraestructura técnica y especialmente infraestructura de tipo práctica.

Aproximadamente más de 140 estudiantes por semestre serán beneficiados directamente al hacer uso de este proyecto de laboratorio (*MODULO DIDÁCTICO PARA RECTIFICACIÓN TRIFÁSICA, CONTROLADO Y MONITOREADO CON EL SOFTWARE LABVIEW*), además de estudiantes externos que lo podrán utilizar en seminarios y cursos especiales.

En los próximos años y a la medida de crecimiento de la demanda, de seguro esta necesidad será mayor, debido a la exigencia del ambiente industrial en nuestro país.

1.10 Beneficiarios

Los beneficiarios de este proyecto de tesis, son todos los estudiantes que cursan la carrera de ingeniería eléctrica y electrónica, también los docentes que imparten la materia de Electrónica de Potencia y la Universidad Politécnica Salesiana con sede en Guayaquil.

1.11 Impacto

El impacto que causa este proyecto es un impacto positivo, ya que beneficia tanto a los estudiantes como a los docentes, pudiendo experimentar con los cálculos teóricos expuestos a lo largo de la carrera.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El rectificador trifásico de la *figura 2.1*, cumple con la misma función que un rectificador monofásico, con la diferencia que este rectificador es alimentado por una fuente trifásica de la red de energía eléctrica, por lo que resulta más eficiente y puede manejar una mayor potencia, ya que en su salida presenta menor rizado de la señal. Los rectificadores trifásicos, son utilizados principalmente en la industria para producir voltajes y corrientes continuas, que generalmente impulsan cargas de gran potencia, como motores de corriente directa (DC). A pesar que estos rectificadores presentan menos rizo que un rectificador convencional, en muchas aplicaciones el factor de potencia, y la distorsión armónica total de la línea se ven afectados, es por ello que se requiere el uso de filtros de armónicos. Una de las aplicaciones en donde se presenta este fenómeno, es en los enlaces de transmisión de alto voltaje, *High Voltage Direct Current* (HVDC), en donde las estaciones de conversión cuentan con filtros de armónicos, que reducen la distorsión en la señal que producen los convertidores, para que sea transmitida con calidad, y no se introduzcan perturbaciones a la red eléctrica. (GIMENO, SEGUI, ORTS, & SANCHEZ, 2004).

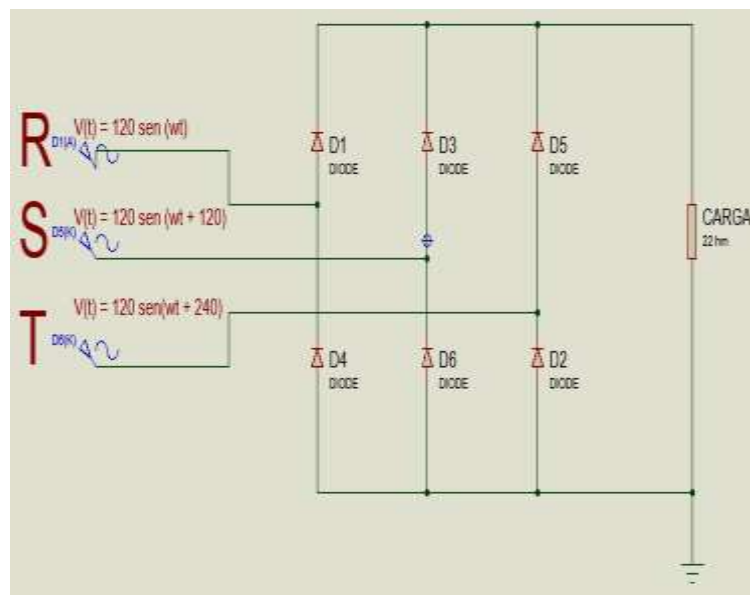


Figura 2.1. Diagrama del rectificador trifásico. Nótese la disposición de elementos para el rectificador trifásico no controlado con carga resistiva. Fuente: (Electronics)

Dentro de las múltiples aplicaciones de un rectificador trifásico en la industria podemos mencionar las siguientes:

- Cargadores de batería.
- Fuentes de poder.
- Control de velocidad y posición de máquinas de corriente continua.
- Transmisión en Corriente Continua (HVDC).
- Excitación de máquinas sincrónicas.
- Electro filtros.
- Entre otras.

2.2 Corriente alterna

Es aquella corriente cuya intensidad varía de dirección y magnitud, en un conductor. El cambio de la tensión (magnitud) con respecto al tiempo, tiene diferentes formas: senoidal, triangular, cuadrada, trapezoidal, etc.

En las ondas NO SENOIDALES, se descomponen por el desarrollo de series de Fourier, permitiendo el estudio matemático de sus circuitos.

La función de la corriente alterna senoidal con respecto al tiempo se representan con la siguiente ecuación y se muestra en la *figura 2.2*: (Boylestad, 1997).

$$v(t) = Vp \text{ sen}(\omega t + \theta)$$

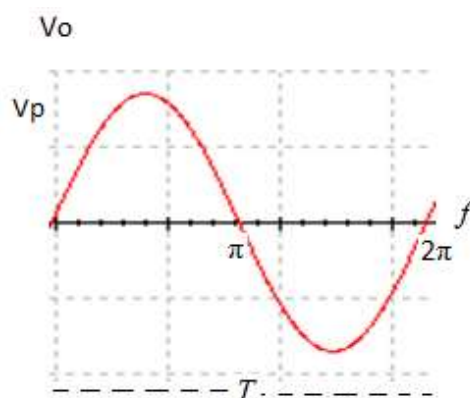


Figura 2.2. Onda senoidal monofásica. Nótese la señal senoidal de corriente alterna de la red eléctrica pública. Fuente: (Autores)

Donde;

- V_p : Indica el nivel máximo de voltaje
- ωt : Indica la velocidad angular del voltaje.
- θ : Es el ángulo de desfase con relación a otra señal.
- f : Es la nomenclatura de la frecuencia y es la magnitud que calcula el número de repeticiones en un tiempo determinado. La unidad es el Hertzio (Hz).

$$Hz = 1 \text{ ciclo} / s$$

La red de energía eléctrica en el Ecuador provee corriente alterna con una frecuencia de 60 Hz y la inversa de la frecuencia es el período, que tiene nomenclatura (T).

$$T = 1 / f$$

2.3 Ventajas de la corriente alterna

Presenta ventajas determinantes, respecto a la producción y transferencia de la energía eléctrica, con relación a la corriente continua:

- Motores y generadores menos complejos, más económicos y eficientes
- Transforma la tensión de forma barata y simple.
- Se puede transportar grandes cantidades de energía a grandes distancias
- Disipación de fenómenos eléctricos no deseados.
- Se acumula directamente y todavía es utilizado para sistemas eléctricos aislados de baja tensión, (alternadores).

2.4 Electrónica de Potencia

Define a las aplicaciones que se les da a los diferentes dispositivos electrónicos para controlar y transformar grandes niveles de voltajes y corrientes. En esta aplicación

se combina la electrónica y la electricidad, pues los grandes niveles de voltaje y corriente, son controlados por dispositivos electrónicos de gran precisión para activar y desactivar sendas cargas.

Por esta razón, la electrónica de potencia, nos permite transformar y adaptar la energía eléctrica para distintos fines, tales como: proveer de alimentación controlada a otros equipos, transformar la energía eléctrica continua en energía eléctrica alterna, conocido como inversor, también transformar la energía eléctrica alterna en energía eléctrica continua, llamado rectificador. Controlar la velocidad y controlar el funcionamiento de máquinas eléctricas, mediante el uso de dispositivos electrónicos, especialmente semiconductores. Incluyendo, tanto aplicaciones en sistemas de control, sistemas de compensación de factor de potencia y/o de armónicos, como para suministro eléctrico a consumos industriales, o incluso la interconexión de sistemas eléctricos de potencia de distinta frecuencia.

El principal objetivo de la electrónica de potencia, es manejar y transformar la energía eléctrica de forma eficiente, por tal razón se evitan utilizar elementos puramente resistivos, ya que son potenciales generadores de pérdidas. Los principales dispositivos utilizados son condensadores y bobinas, así como semiconductores que funcionan en modo de corte y saturación. (Rashid, 1995)

2.5 Generación trifásica

La distribución y generación de energía eléctrica se da a través de sistemas trifásicos de corriente alterna (A.C.).

En la mayoría de los sistemas de distribución y utilización de energía eléctrica, se realiza a través de sistemas polifásicos. La fuente trifásica de voltaje está compuesta de tres fuentes monofásicas que tienen idéntico nivel de voltaje pero desfasadas una de otra 120 grados. En la *figura 2.3*, se muestra la señal trifásica con sus tres fuentes, que denominamos como **R** a la Línea 1, luego **S** a la Línea 2 y **T** a la Línea 3. Por tal razón la fuente S está desfasada 120 grados con respecto a R y la fuente T, está

desfasada 240 grados con respecto a la fuente R. De forma analítica podemos definir a las fuentes trifásicas de la siguiente manera (Rashid, 1995):

$$\text{Linea 1 (R)} = V_{(t)} = V_p \sin(\omega t)$$

$$\text{Linea 2 (S)} = V_{(t)} = V_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$\text{Linea 3 (T)} = V_{(t)} = V_p \sin(\omega t + 240^\circ)$$

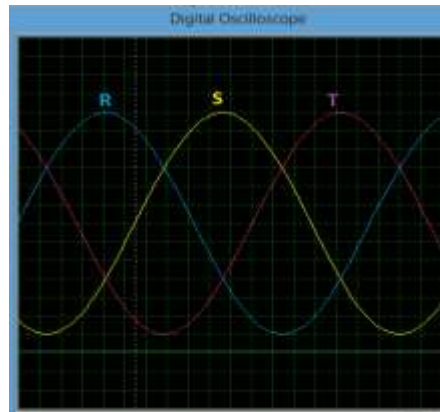


Figura 2.3. Onda senoidal trifásica. Nótese la señal senoidal de corriente alterna trifásica de la red eléctrica pública. Fuente: (Electronics)

2.6 Generador perfecto

Cuando un generador produce en cada fase una fuerza electromotriz de forma senoidal y con un desfase por línea de 120° con respecto al tiempo, además que al sumar fasorialmente las mismas, y su resultado sea igual a cero en todo instante, se lo denomina generador perfecto. (Rashid, 1995)

2.7 Mejoramiento del factor de potencia en redes trifásicas

En todas las instalaciones eléctricas de carácter óhmico - inductivo, el factor de potencia es mejorado mediante capacitores en el sistema. La conexión puede realizarse agrupándolos en forma triangulo o estrella, el valor será diferente. (Rashid, 1995)

2.8 Rectificadores

En casi todas las aplicaciones de electrónica, la entrada que está en forma de voltaje alterno obtenido del sistema de distribución pública, debe ser convertida en voltaje continuo. Para tal fin se emplean los rectificadores.

Los rectificadores, también llamados convertidores de corriente, transforman la corriente alterna en corriente continua. Nótese en la *Figura 2.4*, un circuito de rectificación monofásica de media onda con la relación de los transformadores primario y secundario. (Rashid, 1995)

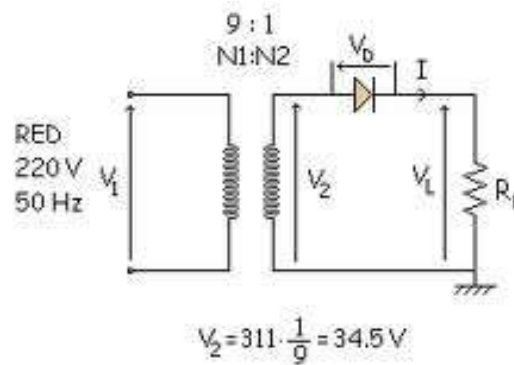


Figura 2.4. Circuito del rectificador monofásico de media onda. Elementos y relación de conversión entre el primario y secundario.
Fuente: (GIMENO, SEGUI, ORTS, & SANCHEZ, 2004)

2.9 Tipos de Rectificadores

Por la configuración de conexión de los elementos rectificadores tenemos:

- Rectificadores de media onda.
- Rectificadores de onda completa.

Por la forma de controlar el voltaje de salida rectificado tenemos:

- Rectificadores no controlados.

- Rectificadores controlados.
- Rectificadores Semi-controlados

2.9.1 Rectificador trifásico no controlado

En la *figura 2.5*, nótese el diagrama de un rectificador trifásico no controlado de onda completa.

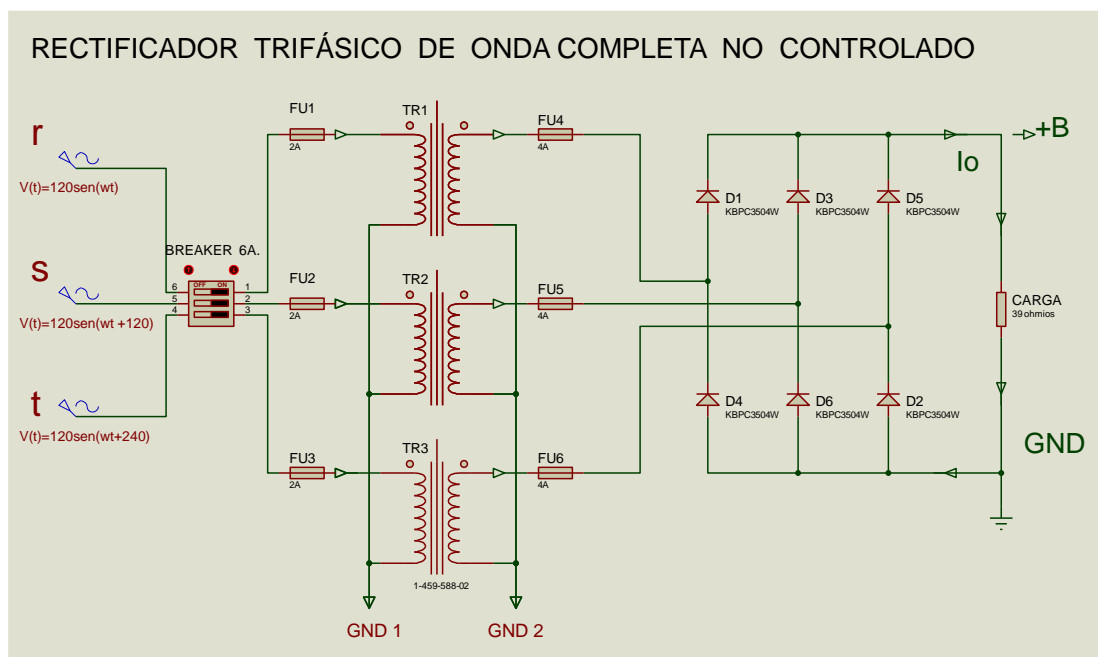


Figura 2.5. Circuito del rectificador trifásico no controlado. Circuito del rectificador trifásico de onda completa, con diodos y carga resistiva. Fuente: (Electronics)

Los rectificadores de onda completa son circuitos utilizados para transformar una señal de entrada de voltaje alterno (V_i) en una señal de salida de voltaje continuo (V_o) pulsante. En este caso, la parte negativa de la señal se transforma en positiva o bien la parte positiva de la señal se transforma en negativa. (Rashid, 1995).

Según la ley de Kirchhoff para la tensión aplicada, solamente conduce un diodo a la vez, es decir; los diodos D_1 , D_3 y D_5 . Por tal razón en un tiempo t el diodo en

estado de conducción tendrá su ánodo conectado a la fase de mayor magnitud. Así mismo en la mitad inferior, es decir; los diodos D_2 , D_4 y D_6 se muestra que solo puede conducir un diodo a la vez cuando su cátodo tenga conectada la fase de menor valor en ese instante. (Ned Mohan, 1995)

Para calcular la tensión de salida (V_o) se puede expresar la siguiente ecuación (Rashid, 1995):

$$V_{oDC} = \frac{1}{t} \int_0^t \sqrt{3} V_p \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_{oDC} = \frac{1}{2\pi} 6 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} V_p \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_{oDC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_p \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_p \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_{oDC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_p \left(-\cos \omega t \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \right)$$

$$V_{oDC} = -\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_p \left(\cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{\pi}{3} \right)$$

$$V_{oDC} = -3\sqrt{3} V_p (-1)$$

$$V_{oDC} = \frac{3\sqrt{3} V_p}{\pi}$$

Para calcular la tensión de salida RMS (V_{RMS}) se puede expresar la siguiente ecuación (Rashid, 1995):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t (\sqrt{3} V_p \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} (\sqrt{3} V_p)^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{9}{\pi} V_p^2 \left[\left(\frac{1}{2} \omega t - \frac{1}{4} \sin 2 \omega t \right) \frac{2\pi/3}{\pi/3} \right]}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{9}{\pi} V_p^2 \left[\left(\frac{\pi}{3} + 0.216506 \right) - \left(\frac{\pi}{6} - 0.216506 \right) \right]}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{9}{\pi} V_p^2 \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} + 0.9566107 \right)}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{9}{\pi} V_p^2 \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} + 0.9566107 \right)}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{2,74 V_p^2}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{2,74} \sqrt{V_p^2}$$

$$V_{RMS} = 1,6554 V_p$$

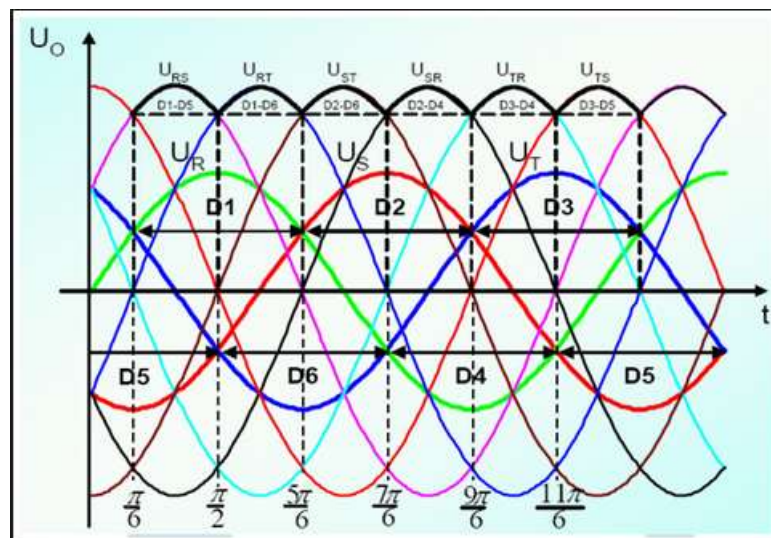


Figura 2.6. Onda senoidal trifásica. Muestra la señal trifásica en función del tiempo. Fuente: (Hart, 2001)

Se afirma que la corriente de un diodo en conducción es igual a la corriente de carga y se calcula la corriente en cada fase, aplicando la ley de Kirchhoff. (Boylestad, 1997).

$$i_a = i_{D1} - i_{D4}$$

$$i_b = i_{D3} - i_{D6}$$

$$i_c = i_{D5} - i_{D2}$$

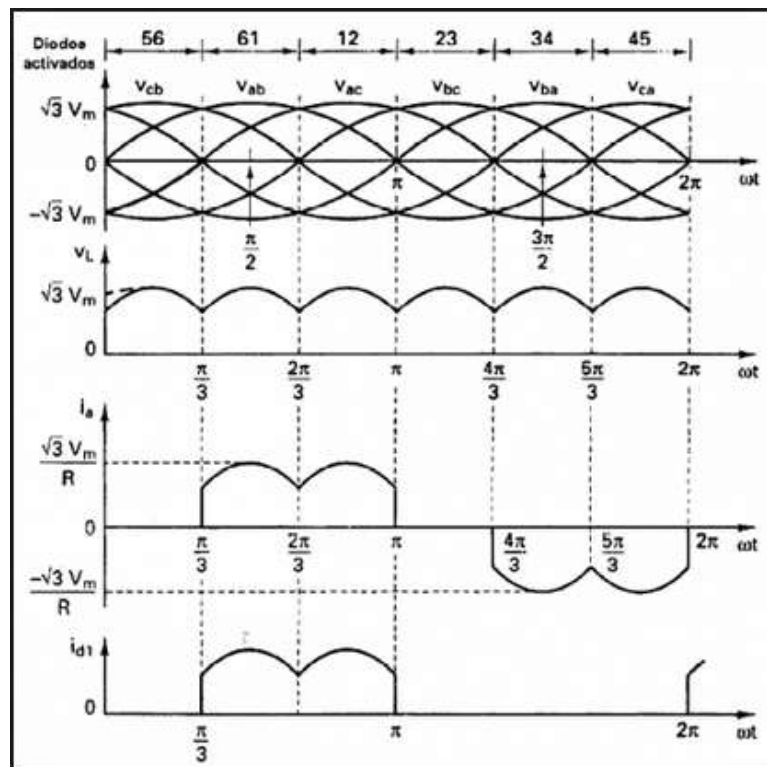


Figura 2.7. Onda senoidal trifásica rectificada. Muestra las señales triásicas de Voltaje y corriente función del tiempo. Fuente: (Hart, 2001)

Debido a que cada diodo conduce una tercera parte del tiempo, se concluye que la corriente RMS está dada por la siguiente ecuación (Rashid, 1995):

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{O\ RMS}$$

La potencia aparente del generador trifásico tiene como nomenclatura la letra S y se la determina mediante la siguiente ecuación (Rashid, 1995):

$$S = \sqrt{3} V_{RMS} I_{RMS}$$

2.9.2 Rectificador trifásico controlado

En estos circuitos se pueden sustituir los diodos por tiristores, de tal forma que se obtenga un sistema de rectificación controlada. Este sistema permitirá la regulación del valor de la tensión en la carga. El cambio del diodo por el tiristor retrasa la entrada en conducción, lo cual sucede no sólo cuando el voltaje es positivo sino también cuando se inyecta un pulso a la puerta del tiristor. (Ned Mohan, 1995)

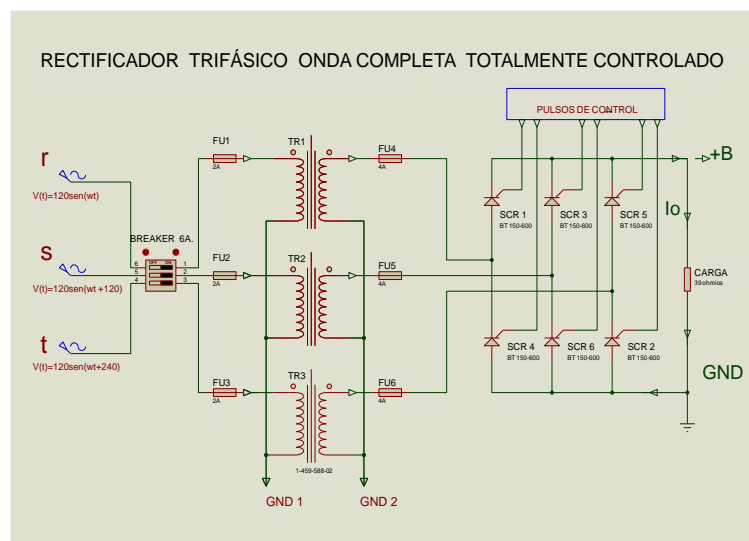


Figura 2.8. Circuito del rectificador trifásico controlado. Circuito del rectificador trifásico de onda completa, controlados mediante los pulsos de los SCR's y carga resistiva. Fuente: (Electronics)

Como principio de funcionamiento se dispara los tiristores con cierto ángulo con relación al punto natural de conmutación o también llamado paso por cero de entrada, con esto se obtiene usar el voltaje de la fuente sobre la carga en un tiempo variable, que depende mucho del disparo, por tal razón se obtiene alterar los valores de la tensión en la carga.

El ángulo de disparo α , es el intervalo en el cual se polariza en directa el SCR y el momento de aplicación de la señal de puerta. Se debe mantener la excitación de puerta hasta que el tiristor alcance la conducción. En este evento es más recomendable utilizar un tren de impulsos (Rashid, 1995).

Los voltajes de línea a neutro se definen con la siguiente ecuación:

$$v_{an} = V_m \sin \omega t$$

$$v_{bn} = V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$v_{cn} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Los voltajes de línea a línea se definen por:

$$v_{ab} = v_{an} - v_{bn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$v_{ca} = v_{cn} - v_{an} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

El voltaje promedio de salida se determina con la siguiente ecuación:

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} v_{ab} d(\omega t)$$

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cos \alpha$$

El voltaje rms de salida se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{RMS} = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} 3 V_m^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} V_m \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha \right)^{1/2}$$

2.10 Resistores

En electrónica se define como la oposición al paso de la corriente eléctrica. Es el componente más simple por su construcción y funcionamiento, también el más utilizado en los aparatos electrónicos. Existen muchos aparatos en donde se utilizan resistores para convertir energía eléctrica en energía calorífica, es el caso de las estufas, los hornos, las planchas, los calentadores de agua, etc.

En la *figura 2.9* se puede observar resistencia que utilizamos en este proyecto como carga resistiva.

La unidad de medida de un resistor es el OHMIO y se representa con el símbolo de omega (Ω) del alfabeto griego. Por ejemplo, un resistor de 1000 ohmios se representa como 1000 Ω o 1 K Ω y presenta una oposición a la corriente cuatro veces más que uno de 25 Ω . (Boylestad, 1997)



Foto 2.1. Carga resistiva instalada en el módulo. Elemento resistivo de 43 ohmios a 600 W. Fuente: (Autores)

2.11 Capacitores

Se llama capacitor a un dispositivo que almacena carga eléctrica. El capacitor está formado por dos conductores próximos uno a otro, separados por un aislante, de tal modo que puedan estar cargados con el mismo valor, pero con signos contrarios.



Foto 2.2. Carga capacitiva instalada en el módulo. Elemento capacitivo de 8 μf a 60V. Fuente: (Autores)

En su forma más sencilla, un capacitor está formado por dos placas metálicas o armaduras paralelas, de la misma superficie y encaradas, separadas por una lámina no conductora o dieléctrico. Al conectar una de las placas a un generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa. Por su parte, teniendo una de las placas cargada negativamente Q^- y la otra positivamente Q^+ sus cargas son iguales y la carga neta del sistema es cero, sin embargo se dice que el capacitor se encuentra cargado con una carga Q . (Boylestad, 1997)

Los capacitores pueden conducir corriente continua durante sólo un instante, por tal razón se concluye que los capacitores, para las señales continuas, es como un cortocircuito. Es por esta propiedad, que lo convierte en un dispositivo muy útil cuando se debe impedir que la corriente continua entre a determinada parte de un circuito eléctrico, pero también, cuando si se requiere que pase la corriente alterna.

Los capacitores se utilizan junto con las bobinas, formando circuitos en resonancia, en las radios y otros equipos electrónicos. Además, en los tendidos eléctricos se utilizan grandes capacitores para producir resonancia eléctrica en el cable y permitir la transmisión de más potencia. Además se utilizan en: motores de aire acondicionado, ventiladores, iluminación, compresores, refrigeración, motores de corriente alterna y bombas de agua, por la propiedad antes mencionada.

De esta forma podemos distinguir los siguientes tipos de capacitores:

- Cerámicos.
- Plástico.
- Mica.
- Electrolíticos.
- De doble capa eléctrica.

2.12 Inductores

El inductor es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

Un inductor está constituido normalmente por una bobina de conductor, típicamente alambre o hilo de cobre esmaltado. Existen inductores con núcleo de aire o con núcleo hecho de material ferroso como el acero magnético, para incrementar su capacidad de magnetismo.

Los inductores pueden también estar construidos en circuitos integrados, empleando el mismo proceso utilizado para realizar microprocesadores. En estos casos se usa, comúnmente el aluminio como material conductor. Sin embargo, es raro que se construyan inductores dentro de los circuitos integrados; es mucho más práctico usar un circuito llamado "girador" que, mediante un amplificador operacional, hace que un condensador se comporte como si fuese un inductor.



Foto 2.3. Carga puramente inductiva instalada en el módulo. Elemento inductivo de 54 mH a 5 A. Fuente: (Autores)

2.12.1 Modelo equivalente del inductor

Los inductores ideales no disipan energía como lo hacen los resistores. Pero en la práctica, el inductor real presenta una resistencia de devanado que disipa energía. Nótese en la *figura 2.12*, un modelo práctico y simplificado del inductor.

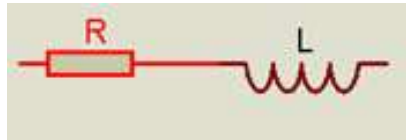


Figura 2.9. Modelo equivalente del inductor.
Circuito equivalente del inductor, formado por una bobina y una resistencia. Fuente: (Electronics)

Donde, R representa las pérdidas en el devanado, cuyo valor generalmente es pequeño pero puede llegar a varios cientos de ohmios. Un modelo más completo contempla además la capacidad parásita o distribuida debido a la capacidad entre las vueltas del bobinado. (GIMENO, SEGUI, ORTS, & SANCHEZ, 2004)

2.12.2 Clasificación de los inductores

Según el núcleo o soporte:

- Núcleo de aire
- Núcleo de hierro.
- Núcleo de ferrita.

Según la forma constructiva:

- Solenoides.
- Toroides.

Según la frecuencia de la corriente aplicada:

- Alta frecuencia.
- Baja frecuencia.

Según el recubrimiento:

- Plástico

- Resina
- Metal (apantalladas).

Según la característica de su valor:

- Fijos
- Ajustables.

2.13 Dispositivos semiconductores de potencia

Los dispositivos semiconductores de la *figura 2.13*, son los dispositivos utilizados en Electrónica de Potencia y especialmente en este proyecto. Los podemos clasificar en tres grandes grupos, de acuerdo con el grado de controlabilidad, podemos dividirlo en:

- Dispositivos no controlados, básicamente encontramos los diodos.
- Dispositivos semicontrolados, dentro de la familia de los Tiristores, los SCR “Silicon Controlled Rectifier” y también los TRIAC “Triode of Alternating Current”.
- Dispositivos totalmente controlados: en este grupo están los transistores bipolares BJT “Bipolar Junction Transistor”, también los transistores de efecto de campo MOSFET “Metal Oxide semiconductor Field Effect Transistor”. (Rashid, 1995)

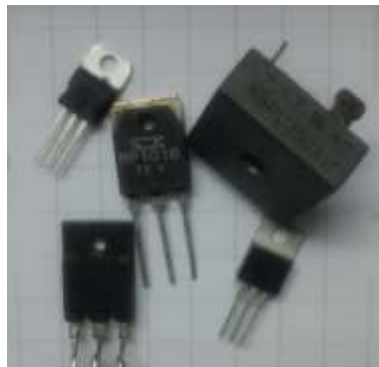


Foto 2.4. Dispositivos semiconductores de potencia.
Grupo de elementos semiconductores de potencia utilizados en el proyecto. Fuente (Autores)

2.14 Dispositivos semiconductor no controlados (DIODO).

Dentro de los dispositivos semiconductores no controlados, tenemos los diodos de potencia, los cuales soportan niveles altos de tensión y corriente, alrededor de los cientos o miles de voltios y amperios, respectivamente.



Foto 2.5. Puente de diodos. Encapsulado de un puente de diodos de potencia utilizado en el proyecto. Fuente: (Autores)

Los diodos de potencia, por lo general no tienen una repuesta de conmutación rápida y su voltaje ánodo - cátodo (V_{AK}) en polarización directa no es un valor pequeño. (GIMENO, SEGUI, ORTS, & SANCHEZ, 2004)

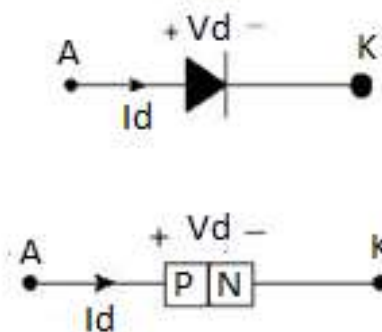


Figura 2.10. Modelo equivalente de un diodo. Simbología del diodo y capas internas. Fuente: (Rashid, 1995).

2.14.1 Característica tensión-corriente

En la *figura 2.15*, nótese que la zona N tiene muy baja concentración de portadores, ya que está diseñada para que en inversa caiga en esta zona toda la tensión de bloqueo (V_d) y en directa la corriente (I_d) tiene que pasar por esta zona que tiene alta resistividad, por lo que en principio podría parecer que la caída de tensión será también grande, de igual manera sucede en inversa, pero esto no ocurre porque cuando se polariza en directa como vemos se adicionan portadoras, se inyectan huecos de la zona P, por lo tanto hay un incremento de portadoras, una reducción de resistividad y a esto se le llama Modulación de conductividad.

Cabe mencionar que si el voltaje inverso de polarización sobrepasa el límite que puede soportar el diodo, se producirá una corriente de avalancha causando la destrucción del semiconductor. (Boylestad, 1997)

2.15 Dispositivo semiconductores semicontrolado (SCR).

Los dispositivos que se encuentran en este grupo, son de la familia de los Tiristores, como el SCR (Silicon Controlled Rectifier) de la *figura 2.16* y los TRIAC (Triode of Alternating Current).

Para estos casos su puesta en conducción (estado de OFF a ON), se debe a una señal externa de control que se aplica a uno de los terminales del dispositivo, generalmente llamado puerta. Por otro lado el bloqueo (estado de ON a OFF) lo determina el circuito de potencia. Quiere decir que se tiene control externo de la puesta en conducción pero no del bloqueo del dispositivo. Para nuestro objetivo se utilizó los SCR's.



Foto 2.6. Dispositivo semiconductor SCR.
Elemento SCR BT151, utilizado en el
módulo. Fuente: (Autores)

Para que el SCR entre en conducción hay que aplicar una corriente de puerta, cuando la tensión ánodo - cátodo sea positiva. Una vez el dispositivo haya entrado en conducción, la señal de puerta deja de ser necesario para mantener la corriente en el ánodo, el SCR seguirá conduciendo siempre y cuando la corriente en el ánodo siga siendo positiva y esté por encima de un valor mínimo.

El SCR está conformado de cuatro capas semiconductoras, que se alternan de la siguiente forma: *P-N-P-N*, teniendo 3 terminales: ánodo (*A*), cátodo (*K*) y puerta (*G*), que cuando se le inyecta una corriente hace que se establezca una corriente en sentido *A-K*, como muestra la *figura 2.7*. (Hart, 2001)

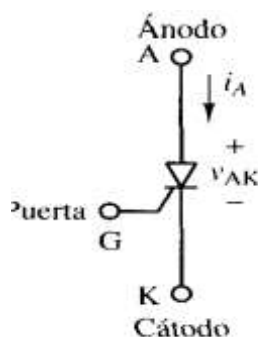


Figura 2.11. Modelo equivalente del SCR.
Nótese los terminales y la dirección de la
corriente. Fuente: (Hart, 2001)

2.15.1 Característica tensión-corriente

En su estado de no conducción o apagado (off), puede bloquear una tensión directa y no conducir corriente. Si no hay señal aplicada a la puerta, permanecerá en bloqueo independiente del signo de la tensión V_{AK} . El tiristor es encendido o disparado al estado de conducción (ON), aplicando un pulso de corriente positiva en el terminal de puerta, durante un corto intervalo de tiempo. La caída de tensión directa en conducción es de pocos voltios, alrededor de 1 a 3 voltios. Cuando el SCR empieza a conducir, éste lo seguirá haciendo, aunque la corriente de puerta sea 0 y no puede ser bloqueado por pulso de puerta. Solo se apagará o dejará de conducir, únicamente cuando la corriente del ánodo tiende a ser negativa o inferior a un valor umbral, debido a la influencia del circuito de potencia, entonces: se dice que el SCR pasará a estado de bloqueo.

En régimen estático, dependiendo de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo podemos distinguir tres regiones de funcionamiento:

- Zona de bloqueo inverso
- Zona de bloqueo directo
- Zona de conducción

A continuación describiremos cada una de las regiones de funcionamiento:

Zona de bloqueo inverso ($V_{AK} < 0$): Ésta condición corresponde al estado de no conducción en inversa, comportándose como un diodo, hasta alcanzar la tensión de ruptura inversa.

Zona de bloqueo directo ($V_{AK} > 0$ sin disparo): El SCR se comporta como un circuito abierto, hasta alcanzar la tensión de ruptura directa.

Zona de conducción ($V_{AK} > 0$ con disparo): El SCR se comporta como un interruptor cerrado; una vez ocurrido el disparo, por el dispositivo circula una corriente superior a la de enclavamiento. Estando en conducción, se mantendrá en dicho estado si el valor de corriente ánodo-cátodo es superior a la corriente de mantenimiento. (Hart, 2001)

2.15.2 Activación, disparo y bloqueo de los SCR

Podemos considerar cinco maneras distintas, de hacer que el SCR entre en conducción:

- Disparo por tensión excesiva
- Disparo por impulso de puerta
- Disparo por derivada de tensión
- Disparo por temperatura
- Disparo por luz

A continuación describiremos cada una de las formas de conducción del SCR:

Disparo por tensión excesiva.- Cuando está polarizado directamente, en el estado de bloqueo, el aumento de la tensión V_{AK} lleva a una expansión de la región de transición, tanto para el interior de la capa de la puerta, como para la capa N adyacente.

Disparo por impulso de puerta.- Siendo el disparo a través de la corriente de puerta la manera más usual de disparar el SCR, es importante el conocimiento de los límites máximos y mínimos para la tensión V_{GK} y la corriente I_G .

Disparo por derivada de tensión.- Si a un SCR, se le aplica un escalón de tensión positivo entre ánodo y cátodo, con tiempo de subida muy corto, del

orden de microsegundos, los portadores sufren un desplazamiento infinitesimal, para hacer frente a la tensión exterior aplicada.

Disparo por temperatura.- A altas temperaturas, la corriente de fuga en una unión *PN* inversamente polarizada, aproximadamente se duplica. Así, el aumento de temperatura puede llevar una corriente suficiente para hacer que el SCR pase al estado de conducción.

Disparo por luz.- La acción combinada de la tensión ánodo-cátodo, temperatura y radiación electromagnética, de longitud de onda apropiada puede provocar también la elevación de la corriente de fugas del dispositivo, por encima del valor crítico y obligar al disparo.

CAPÍTULO 3: DISPOSITIVOS UTILIZADOS Y MONTAJE DEL PROYECTO.

3.1 Dispositivos y elementos utilizados para la estructura.

Con el objetivo de tener una estructura sólida y duradera se utilizó los siguientes elementos y dispositivos:

- 2 Tubos rectangulares de aluminio de 4pulg x 1½pulg x 6m.
- 2 tubos cuadrado de hierro de 2pulg x 2pulg x 6m.
- 1 plancha de fibra laminada blanca de 2m x 3.5m x 5mm.
- 1 plancha de fibra cruda de 2m x 3.5m x 15mm
- 4 varillas de hierro con hilos de 2m
- Kit de pernos y tornillos.
- Base de hierro de 1.5m de ancho x 1.2m de alto.

3.2 Reporte fotográfico del montaje de la estructura.



Foto 3.1. Corte de tubo rectangular de aluminio. Preparación del marco de la estructura. Fuente: (Autores)



Foto 3.2. Comprobación de medidas del marco. Preparación del marco de la estructura. Fuente: (Autores)



Foto 3.3. Ensamblaje de la estructura de aluminio. Perforación de la estructura para colocación de pernos. Fuente: (Autores)



Foto 3.4. Instalación de los soportes interiores. Perforación de la estructura para colocación de marco del panel frontal y posterior. Fuente: (Autores)



Foto 3.5. Presentación de la estructura con soportes internos instalados. Fuente: (Autores)



Foto 3.6. Presentación de los elementos en panel frontal. Distribución de los elementos utilizados en el panel frontal. Fuente: (Autores)



Foto 3.7. Perforación e instalación de borneras. Distribución de las borneras en el panel frontal. Fuente: (Autores)



Foto 3.8. Instalación de computador. Perforación, instalación y montaje del computador. Fuente: (Autores)



Foto 3.9. Vista de panel frontal. Presentación de panel frontal con borneras y monitor. Fuente: (Autores)



Foto 3.10. Vista final panel frontal. Presentación final del panel frontal con todos los elementos utilizados. Fuente: (Autores)

3.3 Características técnicas del módulo didáctico

- Voltaje entrada: 120 V AC
- Fases: 3
- Corriente máx.: 3 A
- Potencia: 400 W
- Peso: 90 kg.
- Altura: 2 m.
- Ancho: 1.5m
- Profundidad: 0.2m
- Estructura: Metálica, fibra laminada.

3.4 Dispositivos y elementos utilizados para los circuitos.

Para el diseño, instalación y montaje, de los circuitos de control, circuitos de potencia y sistema de interface, utilizamos los siguientes elementos y dispositivos:

- 1 rollo de cable de 100 metros #14
- 10 metros de cable par trenzado de 8 pares # 22
- 6 Canaletas de 1" x 5" x 3 m.
- Conectores pequeños para bananas.
- 104 Conectores grandes para bananas.
- 104 Bananas
- 24 porta fusibles grandes.
- 1 Breaker trifásico de 10 A.
- 1 Conector de acometida trifásica.
- 1 Switch de tres polos.
- 1 Computador de escritorio Intel® Atom™ CPU D425 @1.80 GHz
- 1 Modem transmisor - receptor wifi.
- 1 Módulo de interface USB-NI 6008 de LabVIEW.

- Resistencias de 600 w.
- Capacitores de 3 uf y 8 uf.
- 1 Bobina de 54 mH.
- 1 Motor de 120 v 1/8 hp
- 6 Diodos de potencia KBPC3504W
- 6 Tiristores BT-150-600
- 2 Circuitos operacionales TL082
- 6 Circuitos opto-acopladores MOC3011
- 6 Transistores FET
- 12 Transistores bipolares
- 11 Circuitos reguladores LM7812
- 1 Circuito regulador LM7805
- Resistencias de 1/2W
- Condensadores electrolíticos
- Tarjetas de baquelita de 10 cm x 15 cm

3.5 Diagramas del proyecto

A continuación se presentan los circuitos de control utilizados en este proyecto, con cada una de sus etapas de funcionamiento:

- Diagrama del banco de transformadores.
- Diagrama del circuito de operaciones.
- Diagrama del circuito generador de pulsos.
- Diagrama del circuito de opto acopladores.

3.7 Diagrama del circuito generador de pulsos

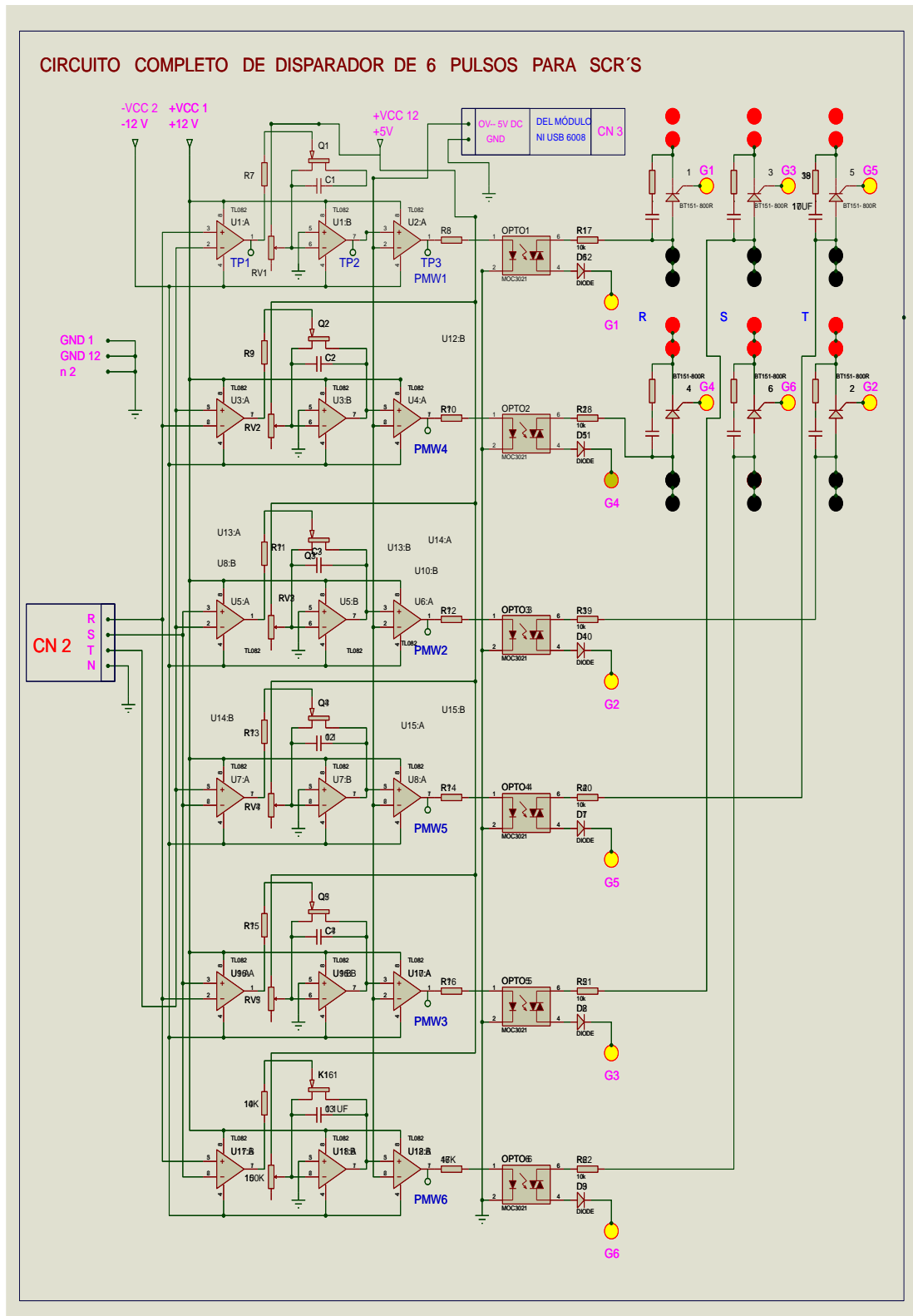


Figura 3.2. Diagrama del circuito generador de pulsos. Diagrama de circuito generador de pulsos para los 6 SCR's que controlan la rectificación trifásica.

Fuente: (Electronics)

3.8 Diagrama del circuito de operacionales

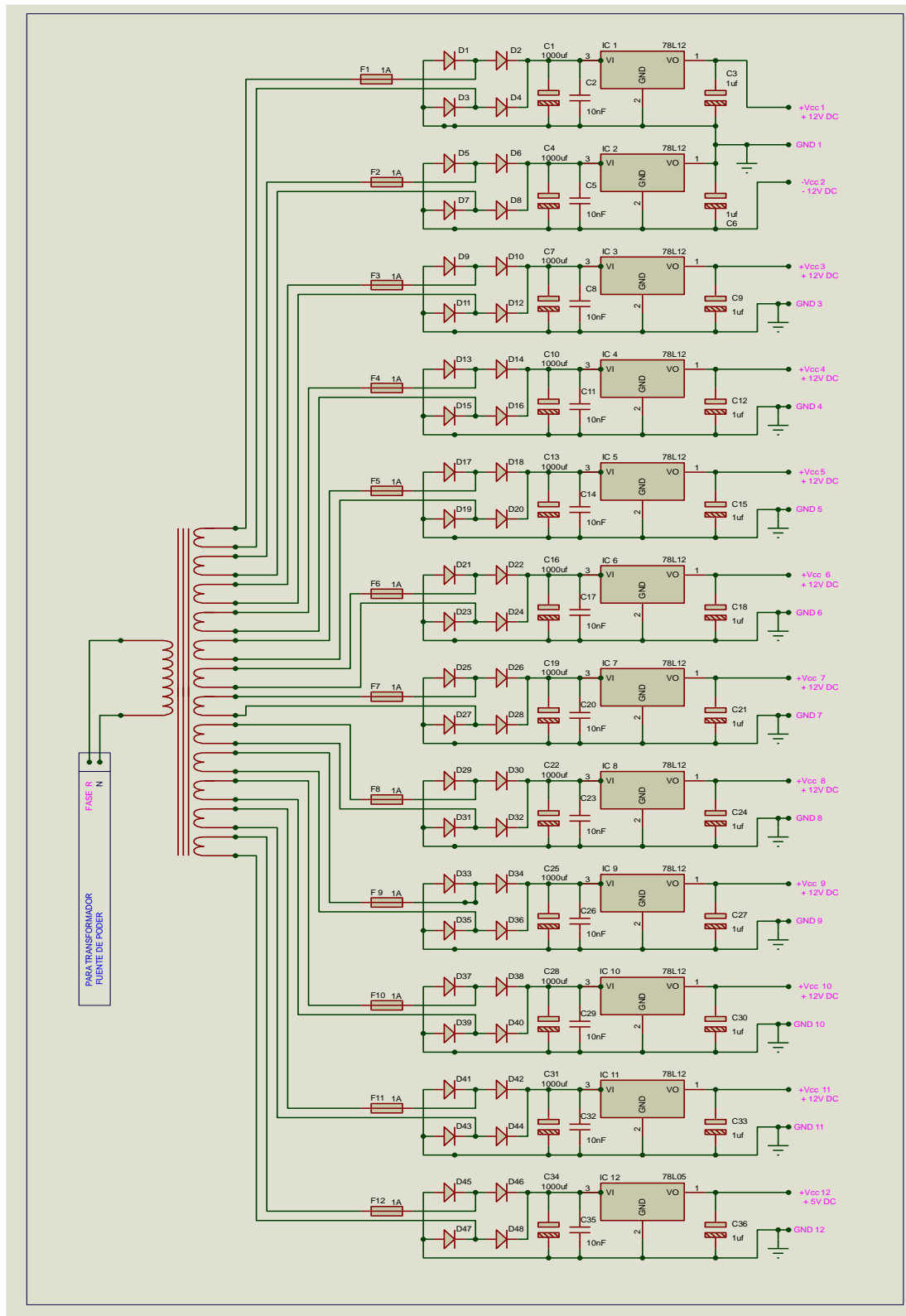


Figura 3.3. Diagrama del circuito de operacionales. Diagrama de circuito de operacionales. Fuente: (Electronics)

3.9 Diagrama del circuito opto acoplador

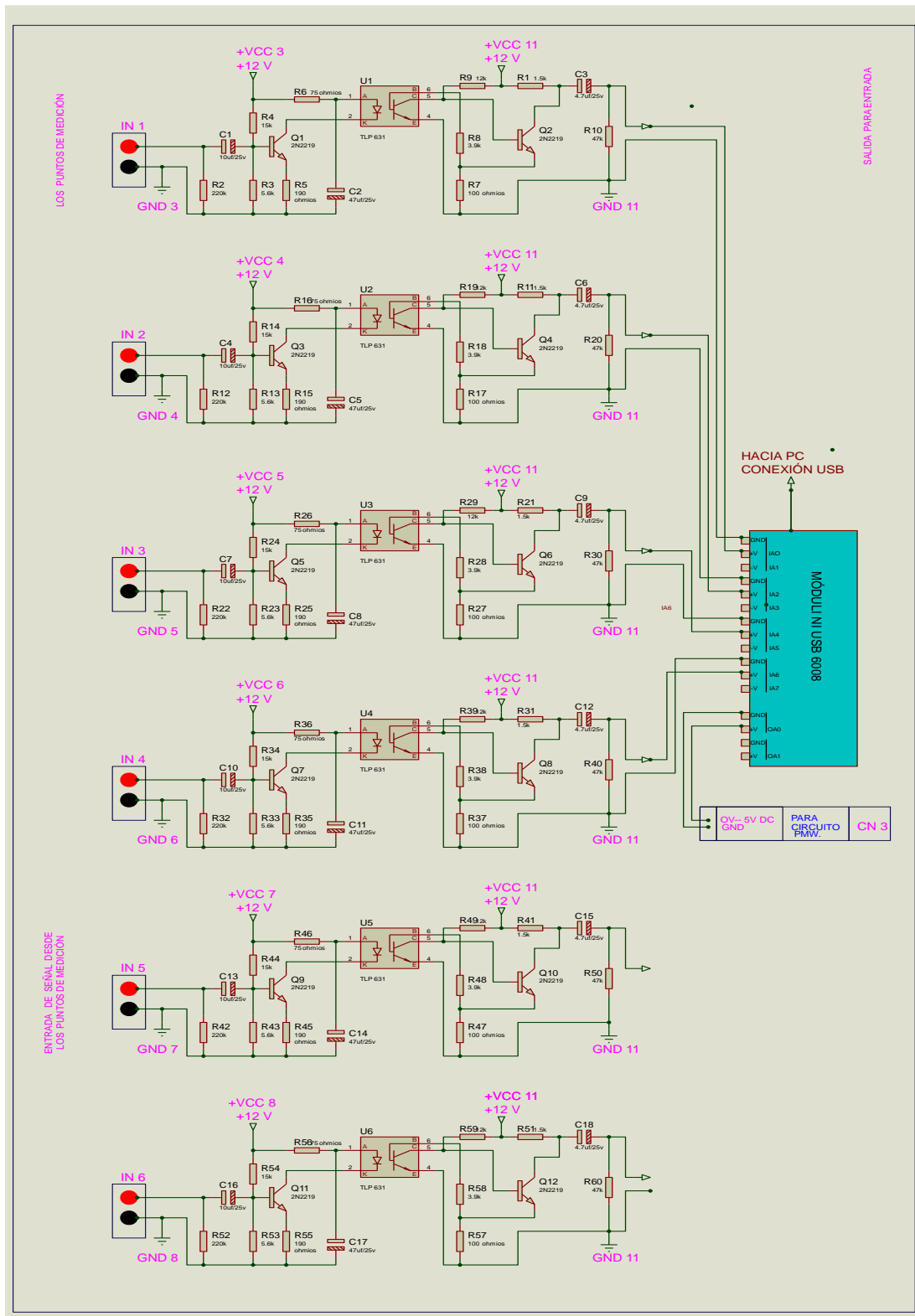


Figura 3.4. Diagrama del circuito opto acoplador. Diagrama de circuito opto acoplador que permite el interface entre la sección de potencia y la sección de control. Fuente: (Electronics)

CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL PROYECTO

4.1 Diseño y montaje del banco de transformadores trifásicos.

Para esta etapa se utilizó tres transformadores monofásicos, que mediante un arreglo de conexiones estrella – estrella, se convirtió en un banco de transformadores trifásicos reductores.

Los valores nominales de los transformadores que se utilizan son:

Corriente de primario:	$I_p = 4A$
Corriente de secundario:	$I_s = 8A$
Voltaje de primario:	$V_p = 120V$
Voltaje de secundario:	$V_s = 50V$
Potencia aparente:	$S = 400 VA$



Foto 4.1. Banco de transformadores reductores. Tres transformadores conectados en estrella – estrella. Fuente (Autores).

Para obtener un voltaje de salida (V_O) de $115 V_{DC}$ con una corriente de carga máxima de $3A$ se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

Para rectificadores trifásicos onda completa no controlados

$$V_{O\ DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{fase\ max}$$

$$V_{O(dc)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} V_{fase\ rms}$$

$$V_{O(dc)} = \frac{3}{\pi} V_{LL\ max}$$

Para: $V_{O\ DC} = 115V$ y $I_{O\ DC} = 3\ A$:

$$V_{O(dc)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_{fase\ max}$$

$$V_{O\ DC} = 1.653986 * V_{fase\ max}$$

$$115\ V_{O\ DC} = 1.653986\ V_{fase\ max}$$

$$V_{fase\ max} = \frac{(115)}{1.653986}$$

$$V_{fase\ max} = 69.53V$$

$$V_{fase\ rs} = \frac{V_{fase\ max}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{fase\ rms} = \frac{69.53V}{\sqrt{2}}$$

$V_{fase\ rms} = 49.16V$ (Valor detectado por el voltímetro)

$$V_{LL\ rms} = \sqrt{3} * V_{fase\ rms}$$

$$V_{LL\ rms} = 85.15\ V$$

$$V_{LL\ max} = \sqrt{2} * V_{LL\ rms}$$

$$V_{LL\ max} = \sqrt{2} * 85.15\ V$$

$$V_{LL\ max} = 120.42 \quad (\text{Valor detectado por el osciloscopio})$$



Foto 4.2. Forma de onda de voltaje de línea V_{RN} . Medición tomada del voltaje LN desde el osciloscopio.



Foto 4.3. Valor de voltaje de línea V_{LN} . Lectura medida del voltaje RMS de LN desde multímetro. Fuente: (Autores)

Con estos datos tenemos todos los valores del banco de transformadores:

$$V_{rn}(\text{prim.}) = 120V_{rms} \qquad V_{RN}(\text{sec.}) = 49.16V_{rms}$$

$$V_{sn}(\text{prim.}) = 120V_{rms} \qquad V_{SN}(\text{sec.}) = 49.16V_{rms}$$

$$V_{tn}(\text{prim.}) = 120V_{rms} \qquad V_{TN}(\text{sec.}) = 49.16V_{rms}$$

$$V_{rs}(\text{prim.}) = 207.8V_{rms} \qquad V_{RS}(\text{sec.}) = 85.15V_{rms}$$

$$V_{st}(\text{prim.}) = 207.8V_{rms} \qquad V_{ST}(\text{sec.}) = 85.15V_{rms}$$

$$V_{tr}(\text{prim.}) = 207.8V_{rms} \qquad V_{TR}(\text{sec.}) = 85.15V_{rms}$$



Foto 4.4. Forma de onda del voltaje línea-línea V_{RS} . Medición tomada del voltaje LL desde el osciloscopio. Fuente: (Autores)



Foto 4.5. Valor de voltaje línea-línea V_{RS} . Lectura medida del voltaje RMS de LL desde multímetro. Fuente: (Autores)

Para calcular la corriente del primario y secundario de cada transformador tenemos:

$$I_o (rms) = 3A \quad (\text{Corriente máxima de carga que requerimos})$$

$$i_2(sec.rms) = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_o (rms)$$

$$i_2(sec.rms) = \sqrt{\frac{2}{3}} * 3 = 2.45 A(rms)$$

$$i_2(sec.rms) = 2.45 A(rms)$$

Valiéndose de la relación fundamental de transformación y asumiendo, un transformador ideal $R_{primario} = 0$ y $R_{secundario} = 0$

$$\frac{v_1(prim.)}{v_2(sec.)} = \frac{N_1(prim.)}{N_2(sec.)} = \frac{i_2(sec.)}{i_1(prim.)}$$

$$i_1(prim.) = \frac{v_2}{v_1} * i_2$$

$$i_1 = \frac{49.16V}{120V} * 2.45 A$$

$$i_1 = 1 A$$

Potencia que debe entregar cada transformador:

$$P_1(prim.) = P_2(sec.)$$

$$P_1(prim.) = v_1(prim.rms) * i_1(prim.rms)$$

$$P_1 = v_2(rms) * i_2(rms)$$

$$P_1 = 120V(rms) * 1A(rms)$$

$$P_1 = 120 VA$$

Potencia en el secundario

$$S_2 = 49.16V(rms) * 2.45A(rms)$$

$$S_2 = 120 VA$$

Por precauciones de diseño, es recomendable utilizar transformadores que entreguen un 40% más de potencia, que la consumida por la máxima carga.

4.2 Diseño y montaje del circuito rectificador trifásico no controlado.

Para elegir los diodos rectificadores para un diseño de este tipo, se tomó en cuenta el parámetro del voltaje máximo, en sentido directo e inverso (voltaje de bloqueo), que pueden soportar estos elementos sin llegar a su destrucción. También, la corriente máxima de conducción es otro de los parámetros válido para su elección. Los otros parámetros, como temperatura de operación, no son de tanta importancia para éste proyecto, porque los voltajes y corrientes máximas, directas e inversas, que fluyen son de niveles inferiores comparados con los valores nominales del dispositivo elegido.

Tomando en consideración todo lo anterior, se decidió por utilizar el KBPC3504W, dispositivo que es un encapsulado integrado, formado por 4 diodos en configuración puente, que soporta un voltaje de bloqueo 400 V y puede manejar una corriente de 35 A. Se utilizó 6 de éstos elementos, en la cual solo tomamos 1 diodo por cada encapsulado.

Como se explicó en el capítulo anterior, éste tipo de rectificador no tiene control alguno en la potencia de salida, por lo tanto su nivel de voltaje siempre es el máximo, es decir; $115 V_{DC}$ para este proyecto.

Vale recordar que los diodos conducen por pares, es decir, con siguiente secuencia: 6-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-1,... y así sucesivamente. Por lo tanto estos se activan siguiendo la secuencia: 1, 2, 3, 4, 5, 6,..., 1,2...



Foto 4.6. Puente de diodos. Dispositivo puente rectificador, utilizando un diodo de potencia. Fuente: (Autores)

Estos diodos, tienen conectados dos borneras en cada una de sus extremos y a su vez éstas, están expuestas en el exterior del panel frontal listas para recibir conexiones de acuerdo a la práctica solicitada. La posición física de los 6 diodos nos recuerda a una matriz de 2 x 3.



Foto 4.7. Distribución de diodos en panel frontal. Fuente: (Autores)

Por el nivel de corriente continua máxima, que se maneja en el circuito rectificador (3 A), se ha dispuesto fusibles de protección de 4 A, para cada diodo rectificador. Los porta-fusibles también están expuestos en el panel frontal, con el objetivo de facilitar el reemplazo en caso de averías.



Foto 4.8. Distribución de diodos en panel posterior. Fuente: (Autores)

Al alimentar y probar nuestro rectificador trifásico de onda completa, observamos en la onda del V_O un rizo de 6 fluctuaciones, razón por la cual lo hace un convertidor con mejor eficiencia comparado con otros rectificadores de menor categoría.



Foto 4.9. Conexión de rectificador con diodos. Vista de panel frontal del rectificador trifásico de onda completa con diodos. Fuente: (Autores)

4.3 Diseño y montaje del circuito rectificador trifásico con SCR's

El principal objetivo de éste rectificador, es tener una fuente DC con un potencial totalmente controlado. Los 6 tiristores tipo SCR BT151-600R, son los elementos rectificadores que se utilizaron en esta etapa. Su elección se basa en lo siguiente:

- VDRM (voltaje pico inverso o voltaje de bloqueo) = 600 V
- IT (corriente máxima en sentido directo) = 12A
- IG (corriente de compuerta) = 15mA

Como la corriente máxima que se maneja es de 3 A y el voltaje de bloqueo máximo es de 120 V_{LL} (V_{LL máx.}) entonces, estos SCR's cumplen con nuestra necesidad.

Para realizar éste circuito rectificador trifásico de onda completa, totalmente controlado y semi-controlado, se tuvo que diseñar un circuito de control, capaz generar 6 pulsos, correctamente sincronizados y desfasados a 60° entre ellos; pulsos que servirán para disparar a los SCR's.



Foto 4.10. Distribución de SCR's en panel posterior.

Fuente: (Autores)

De la misma manera que procedimos cuando montamos los 6 diodos, dispuestos para ser cableados externamente, desde el panel frontal y formar así el rectificador trifásico de onda completa o de media onda, lo hacemos ahora con los 6 tiristores (SCR's), con la diferencia de que también debemos presentar 6 puntos de donde tomaremos los pulsos de disparo, para las compuertas (gate) de los mismos.

La *figura 4.10*, muestra la disposición instalada de los SCR's, vista desde el interior del módulo.



Foto 4.11. Disposición y conexión de los SCR's. Vista desde el interior del módulo de los SCR's con sus respectivos disipadores.

Fuente: (Autores)

Para probar éste tipo de rectificadores trifásicos controlados, armamos nuestro circuito de onda completa tal como lo muestra la Figura 4.8, lo alimentamos y observamos en el monitor, la forma de onda del V_o (DC). Se observa también que al variar el ángulo de disparo, se provoca un cambio en la magnitud del $V_{O\ DC}$.

Recordemos que el V_o DC, será:

- Voltaje máximo cuando el ángulo de disparo sea: $\alpha = 0^\circ$.
- Voltaje mínimo cuando el ángulo de disparo sea: $\alpha = 120^\circ$.

4.4 Diseño y montaje del circuito de fuentes de poder.

Para alimentar las diferentes secciones de éste proyecto, se diseñaron 12 fuentes de alimentación de voltaje dc con las siguientes características:

V_o (dc) = 12V. (11 fuentes)

V_o (dc) = 5V. (1 fuente)

I_o (DC) = 600mA.

Las siguientes figuras, muestran los diagramas esquemáticos de las fuentes, y el circuito real:

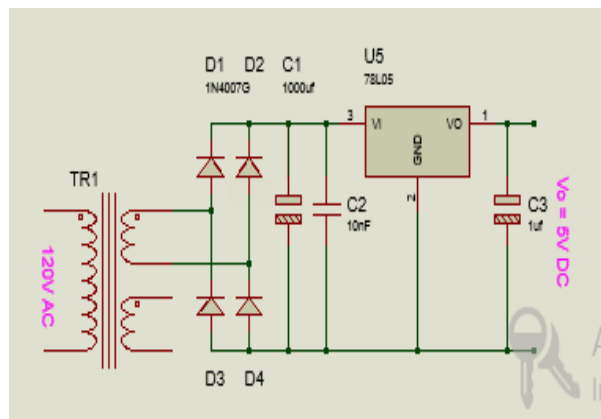


Figura 4.1. Circuito fuente de poder de 5V DC 600mA. Fuente: (Electronics)

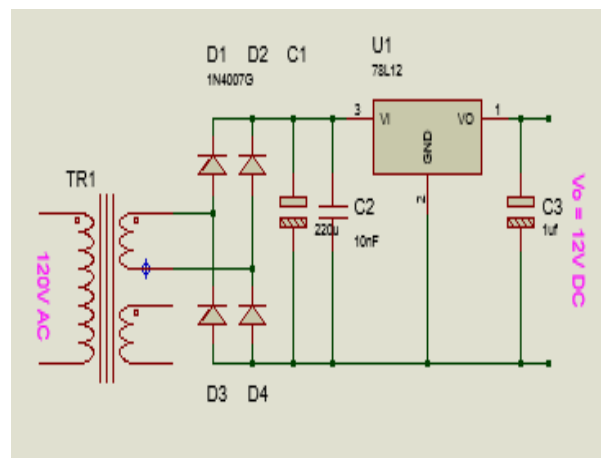


Figura 4.2. Transformador de alimentación de las fuentes. Fuente: (Electronics)



Foto 4.12. Transformador de la fuente de poder de 12V DC 600mA. Fuente: (Autores)



Foto 4.13. Circuito fuente de poder de 12V DC 600mA. Fuente: (Autores)

4.5 Diseño y montaje del circuito generador de los pulsos de disparos.

Este circuito disparador se compone de las siguientes secciones:

- Toma de referencia trifásica.
- Circuito detector cruce por cero.
- Integrador (generador de rampa).

- Comparador (PMW)
- Circuito de acoplamiento.
- Circuito de interface para medir señales

4.5.1 Toma de referencia trifásica.

Los tres transformadores de alimentación trifásica, para la etapa de potencia, tienen un devanado secundario totalmente independiente que suministran $5 V_{rms}$. Estas serán las señales de muestra o referencia para la etapa de detector de cruce de fases.

El objetivo de tener una señal trifásica de referencia, es para aprovechar los diferentes puntos formado por el cruce de fases, que es el dato que necesita la siguiente etapa.

Recuerde que como se tienen 3 fases, entonces tendremos 6 posibles combinaciones entre ellas, por lo tanto se presentarán 6 fluctuaciones en el V_o rectificado, de allí su nombre de rectificador de 6 pulsos.

4.5.2 Circuito detector de cruce de fases.

Para ésta etapa, usamos 6 circuitos integrados operacionales TL082. Estos circuitos se alimentan, con un voltaje simétrico $\pm 12 V_{DC}$. Se analizó solo uno de estos comparadores, pues los demás son idénticos. Su función es, comparar la fase de referencia R que está conectada al pin 3, no inversor del OPAM, con la otra fase de referencia T que está conectada al pin 2.

En el instante en que:

$$V_{fase R (pin3+)} > V_{fase T (pin2-)} \rightarrow V_o (pin1) = +V_{cc} \text{ por tener ganancia infinita.}$$

Por el contrario si:

$V_{\text{fase R}} (\text{pin3+}) < V_{\text{fase T}} (\text{pin2-}) \rightarrow V_o (\text{pin1}) = -V_{\text{cc}}$ por tener ganancia infinita.

El voltaje AC de referencia, de las diferentes fases es de 5 V (rms). Como resultado tenemos, una señal cuadrada simétrica con una frecuencia de 60 Hz. Y adelantada en 30°. Cabe anotar, que como estamos comparando señales de V_{LL} éstas sufren un adelanto de 30° con respecto a las señales de V_{fase} .

Necesitamos 6 de estos circuitos, para comparar todas las fases entre sí, tal como lo muestra el diagrama esquemático, y de ésta manera obtenemos 6 señales de pulsos. Estos pulsos son idénticos en amplitud y forma, pero con la particularidad de que tienen un desfase de 60° entre ellos. Cada señal que está designada para controlar el disparo de un SCR.

CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR FASES

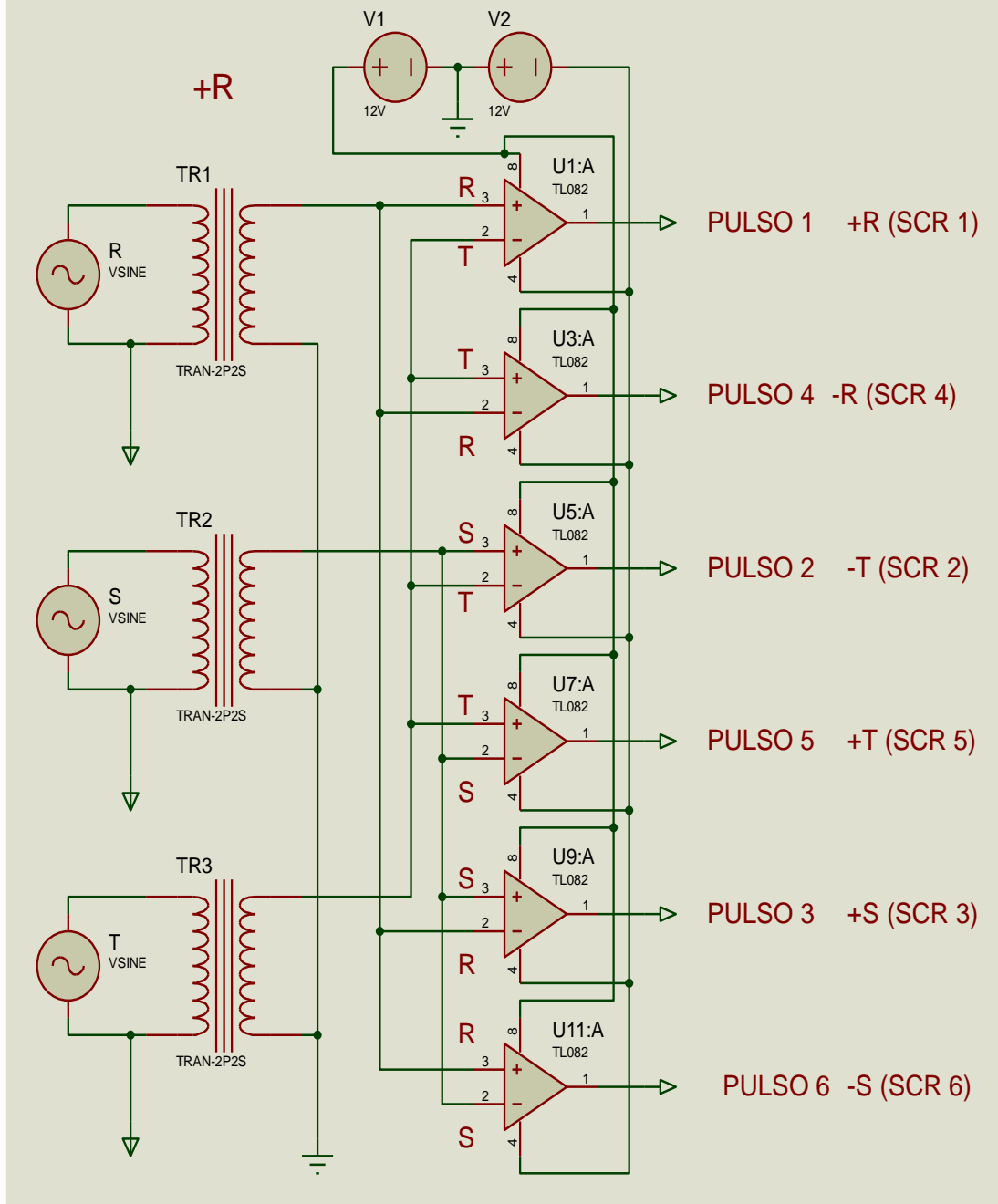


Figura 4.3. Circuito detector de cruce por fase. Fuente: (Autores)

4.5.3 Integrador o Generador de rampas

Se utilizó el circuito operacional TL082, integrando una señal constante positiva. La amplitud de la rampa, es controlada por la señal de pulsos que se obtiene en la etapa del detector de cruce de fases. En el momento en que el terminal gate del JFET recibe un voltaje negativo, éste se convierte en un circuito abierto entre drenador y source, por lo tanto el circuito actúa como integrador del voltaje fijo de entrada, por el contrario cuando la señal de pulsos está en el nivel alto polariza a la compuerta del jfet, haciendo que circule corriente entre drenador y source, reseteando al integrador.

La figura 4.4, muestra el diagrama de éste circuito.

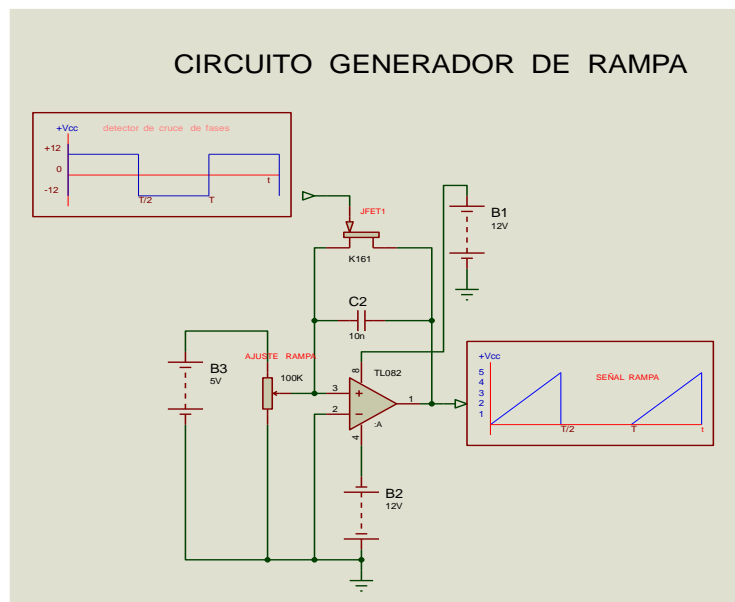


Figura 4.4. Circuito generador de rampas. Fuente: (Autores)

4.5.4 Circuito comparador o Modulador por ancho de pulsos (PMW)

Un voltaje variable de 0V→5V, controlado por el software, a través del módulo NI USB 6008, es comparado con la señal de rampa; nuevamente utilizamos el circuito OPAM TL082.

El voltaje de control es un voltaje variable de $0v \rightarrow 5v$. éste, es conectado al terminal 2 (inversor) del opam, y la señal de rampa al terminal 3 (no inversor).

El análisis es como sigue:

Si $V_{ctrol} (pin2) > V_{rampa}(pin3) \rightarrow V_o = 0V$.

Si $V_{ctrol} (pin2) < V_{rampa}(pin3) \rightarrow V_o = 5V$.

De ésta manera el V_o será una onda cuadrada con amplitud, fija pero con variación de su anchura, es decir tenemos un circuito modulador por ancho de pulsos (PMW). Entonces éste circuito será el encargado de controlar el ángulo de disparo de los diferentes SCR'S.

La siguiente *Figura 4.16*, muestra el diagrama esquemático de este circuito.

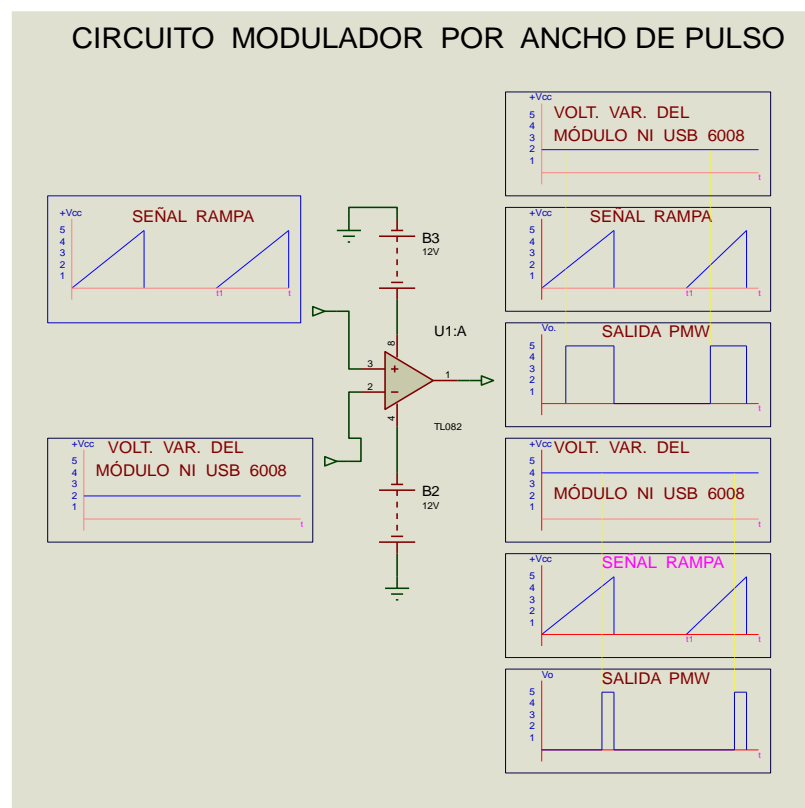


Figura 4.5. Circuito modulador por ancho de pulso.

Fuente: (Electronics)

4.5.5 Etapa de acoplamiento

Esta sección es la encargada de excitar a los diferentes circuitos rectificadores de potencia, SCR'S. El elemento base que hemos utilizado es el optoaislador MOC3021; su función es acoplar las señales que gobiernan el ángulo de disparo de los SCR'S, y mantener eléctricamente aislado la etapa de control, con la de potencia.

La señal que sale del PWM, es la encargada de polarizar directamente la entrada del MOC 3021, pin 1-2 correspondiente al diodo emisor de luz, integrado en el dispositivo, como consecuencia, ésta luz excita al opto-triac interno del MOC3021, cerrando el circuito entre ánodo y gate del tiristor SCR. Para ésta aplicación se diseñaron 6 de estos circuitos.

La *figura 4.17*, muestra la configuración de ésta etapa.

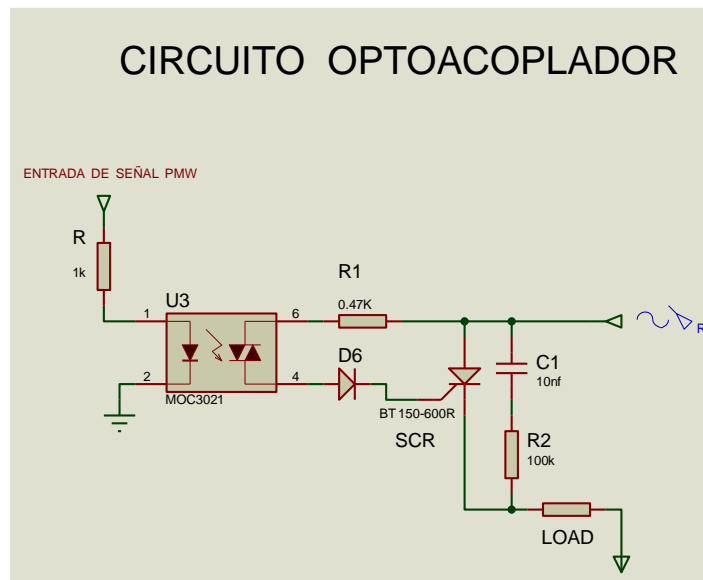


Figura 4.6. Circuito opto acoplador.
Fuente: (Electronics)

4.5.6 Circuito de interface para medir señales

Para poder medir las diferentes magnitudes de voltajes y corrientes en los diferentes puntos, se diseñó un circuito eléctricamente aislado entre su entrada y salida, capaz de tomar señales de diferentes magnitudes con diferentes referencias, es decir se podrá realizar las tomas de diferentes puntos del sistema de potencia, sin peligro de cortocircuitos.

Cabe mencionar que para éste proyecto utilizaremos 4 de estos circuitos, con sus referencias de entradas totalmente independiente entre ellos, con el objetivo de evitar corto circuitos.

La figura 4.18, muestra el circuito interface de señal:.

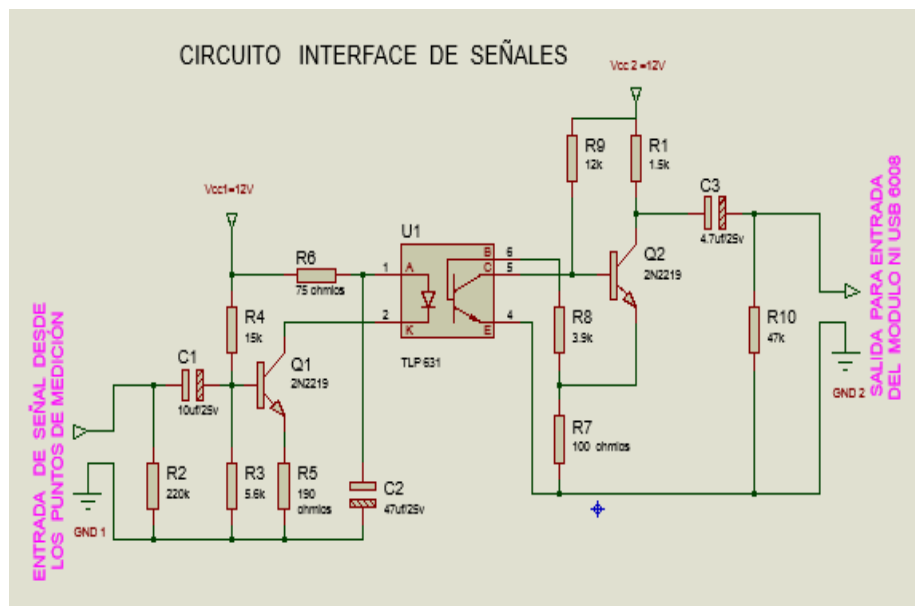


Figura 4.7. Circuito interface de señal.

Fuente: (Electronics)

4.6 Diseño y ensamblaje del circuito de cargas RLC.

Como las exigencias de éste proyecto en voltajes y corrientes son:

- Corriente máxima de carga: $I_o = 3A$.
- Voltaje de salida: $V_o = 115 V_o (DC)$

Aplicando ley de ohm podemos obtener el valor de la resistencia de cargas:

$$R = \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_1 = \frac{115V}{3A}$$

$$R_1 = 38.33 \Omega$$

Por lo tanto como carga tenemos:

Resistivas: 2 resistencias de 43 Ω .

Inductivas: 1 bobina de 54 mH y 1 motor de 120Vrms AC = 120VDC.

La *Figura 4.19*, muestran el circuito real del circuito de carga.

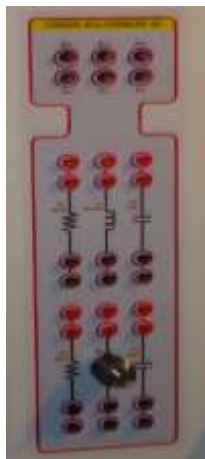


Foto 4.14. Vista del bloque de carga del panel frontal señales. Fuente: (Autores)



Foto 4.15. Vista del bloque de carga del panel posterior. Fuente: (Autores)

4.7 Diseño del programa con el software LabVIEW

DAQ ASSISTANT, es la principal herramienta que hemos utilizado para comunicarnos, con el mundo exterior utilizando como interface el módulo NI USB 6008 de LabVIEW. Esto nos permite poder tomar señales de las diferentes partes del circuito, y visualizarla en nuestro monitor.

De la misma manera hemos diseñado un programa, para poder controlar el ángulo de disparo del circuito rectificador controlado, a través de una señal salida analógica, y por supuesto utilizando la interface NI USB 6008.

4.7.1 Adquisición de datos

La programación para adquirir las señales de los diferentes puntos del arreglo del circuito rectificador trifásico, se basa en los siguientes pasos:

1. Abrimos un nuevo VI, en la pantalla de diagramación escogemos la opción daq assistant

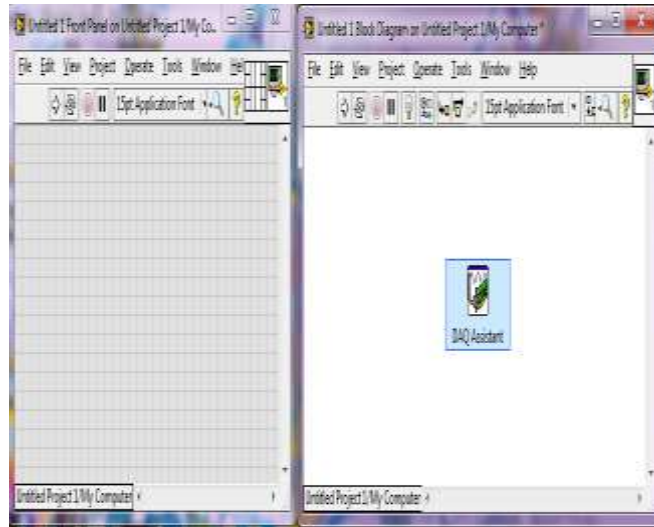


Figura 4.8. Paso 1, ventana de adquisición de datos. Fuente: (Instruments)

2. Esperamos a que se cargue, para luego realizar la configuración de la interface NI USB 6008 seleccionando:

acquire signals → analogic input → voltaje

3. Elegimos la entrada que vamos a utilizar. Para nuestro caso, elegimos todas las entradas es decir:

In 1 (ai0 - ai1)

In 2 (ai2 - ai3)

In3 (ai4 - ai5)

In 4 (ai6 - ai7)

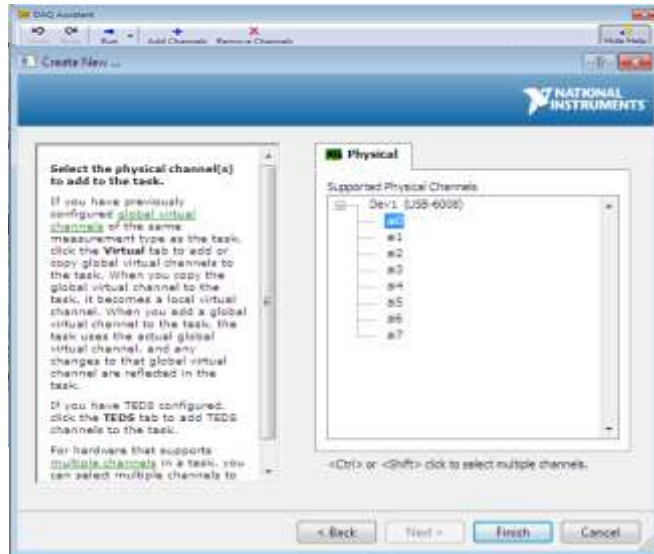


Figura 4.9. Paso 3, ventana de adquisición de datos. Fuente: (Instruments)

4. En este paso, designamos los niveles de entrada de la señal. Cabe indicar que esta interface solo puede manejar niveles de $\pm 10V$.
 Seleccionamos: tipo de entrada diferencial, la cantidad y rapidez de muestras para ser visualizada.

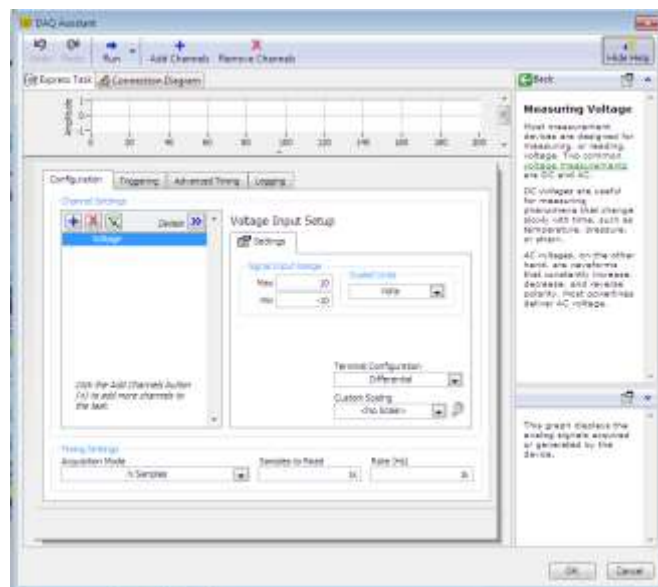


Figura 4.10. Paso 5, ventana de adquisición de datos. Fuente: (Instruments)

5. Aquí solo esperamos para que se cargue la configuración realizada.

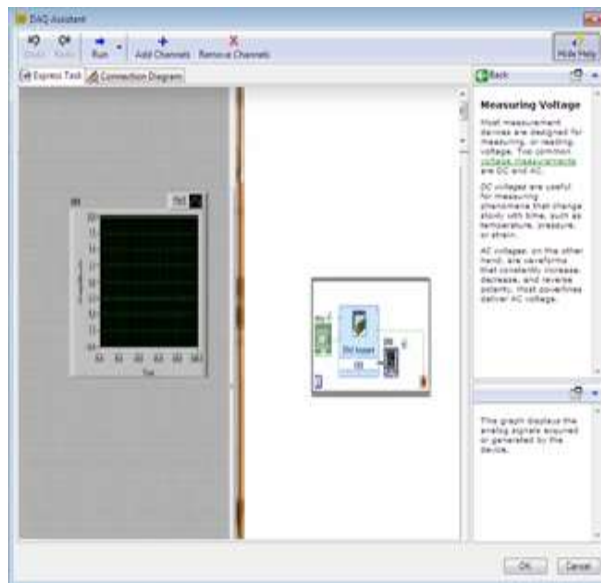


Figura 4.11. Paso 4, ventana de adquisición de datos. Fuente: (Instruments)

6. En ésta ventana nos pregunta si deseamos un bucle while loop, para que siempre se esté ejecutando la programación; respondemos sí.
7. Para visualizar la señal de entrada, escogemos un visualizador gráfico

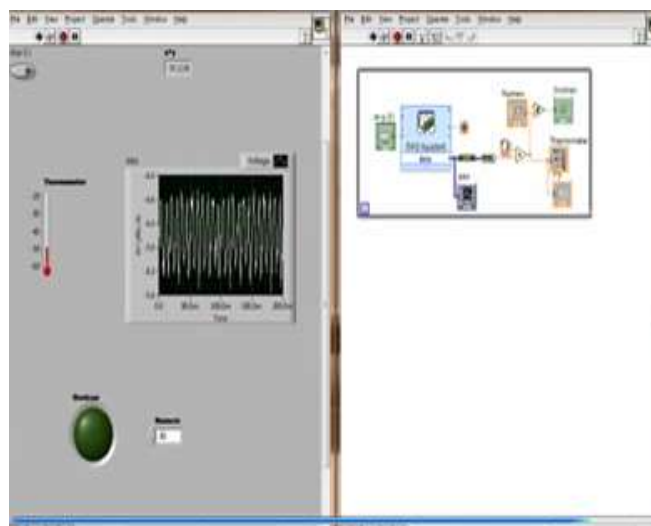


Figura 4.12. Paso 7, ventana de adquisición de datos. Fuente: (Instruments)

8. Estamos listos para dar **run** a nuestro programa.

4.7.2 Generador de señal

Generar una señal de voltaje de 0V-5V DC es nuestro objetivo. Con esta señal controlaremos el ángulo de disparo para los SCR'S, y de ésta manera controlar la amplitud del voltaje DC de salida. Para esto seguimos los siguientes pasos:

Los pasos son casi idénticos al proceso de adquisición de datos, con la diferencia de que en el paso 2, de la explicación anterior ponemos:

Generate signal → analogic → voltaje.

Y en el paso 4 seleccionamos nivel de salida 0v→5v.

CAPÍTULO 5: MANUAL DE USUARIO Y PRACTICAS DE LABORATORIO.

5.1 Manual de usuario del módulo didáctico.

Este módulo de prácticas para rectificadores trifásicos, consta de 6 secciones diferentes y totalmente señalados, y de fácil interpretación.

Las secciones se pueden distinguir en el panel frontal, y cada una indica su función con sus respectivas señalizaciones.

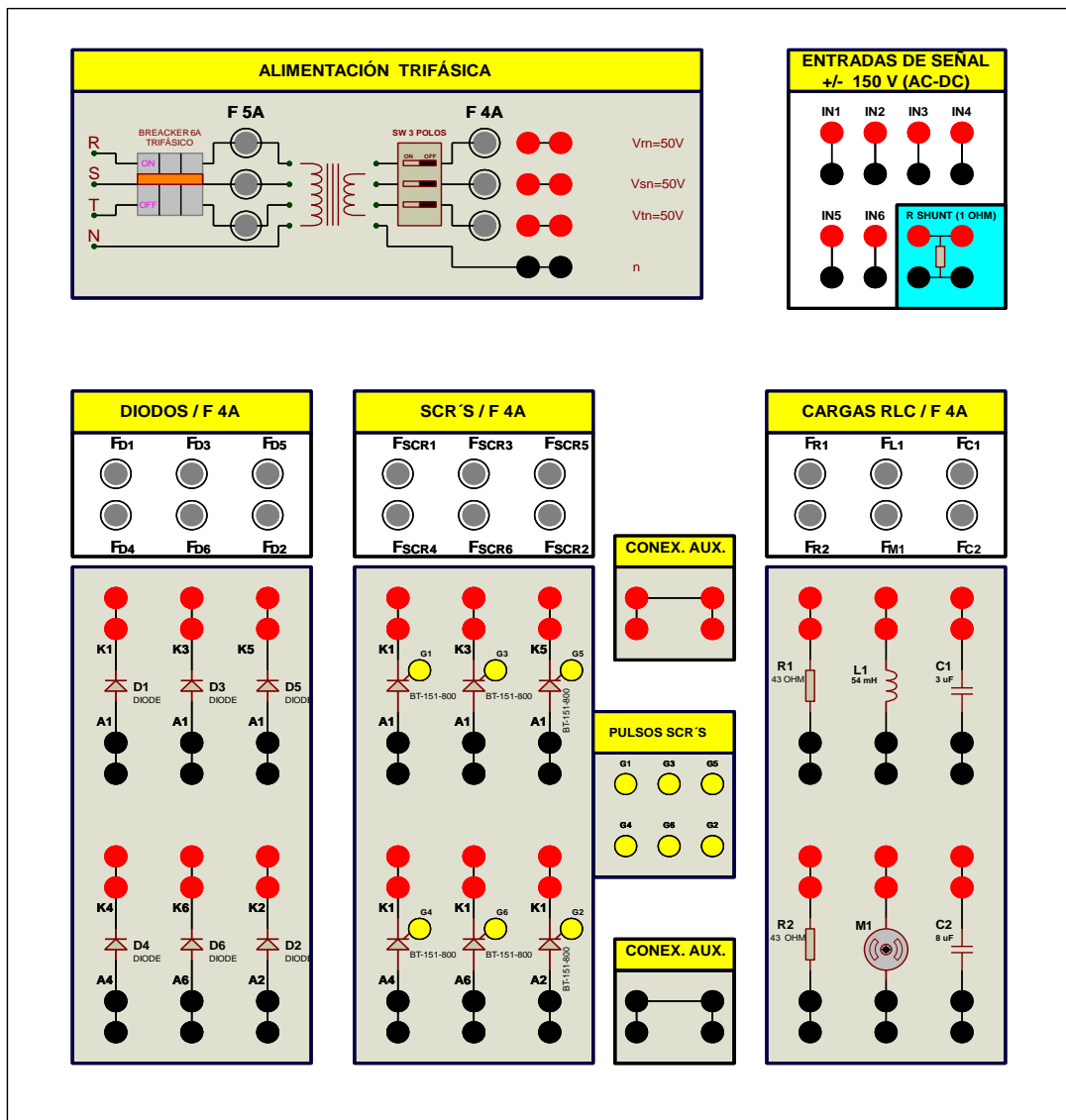


Figura 5.1. Vista frontal por bloques. Nótese todos los bloques que conforman el módulo didáctico. Fuente: (Instruments)

5.1.1 Sección de alimentación trifásica.

Esta es la entrada de la red trifásica de 120 V por fase (R-S-T), haciendo uso de un arreglo de 3 transformadores conectados en estrella – estrella, obtenemos un voltaje en los secundarios de 50 V por fase (r – s – t). Un breaker trifásico de 10 A, y fusibles de 5 A protegen la entrada de energía para los primarios de los transformadores.

Los secundarios de los transformadores, también tienen fusibles de protección de 4 A, aparte de esto las fases (r – s – t) pasan por un interruptor, que servirá para simular caídas de línea (cortes).

Por lo tanto el voltaje trifásico disponible para las prácticas es:

$$V_{rn} = 50 \text{ V}$$

$$V_{sn} = 50 \text{ V}$$

$$V_{tn} = 50 \text{ V}$$

Estos voltajes aparecerán en las borneras de conexión correctamente señalados.



Figura 5.2. Bloque de alimentación trifásica.

Fuente: (Instruments)

5.1.2 Sección de entrada de señales

Aquí podemos conectar cualquier tipo de señal de diferentes niveles de voltaje, tomando cualquier referencia sin provocar cortocircuitos, pues estos son totalmente independientes. En esta sección también se encuentra un pequeño bloque que representa la R SHUNT, usada para ver forma de onda de la corriente.

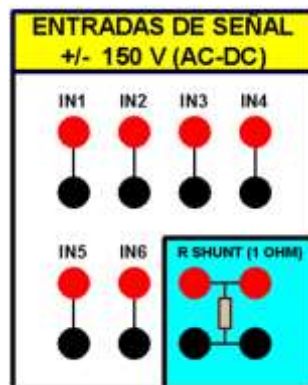


Figura 5.3. Bloque de entradas de señal AC - DC. Fuente: (Instruments)

5.1.3 Sección de rectificadores no controlados (diodo).

Esta disposición de los diodos nos permite realizar fácilmente los diferentes arreglos de rectificadores. Cada diodo tiene un fusible de protección, éstos están correctamente identificados. Ejemplo: el fusible FD1 protege al diodo D1 y así sucesivamente.

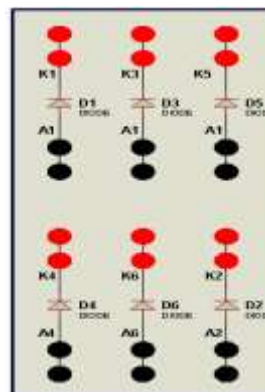


Figura 5.4. Bloque de diodos de potencia. Fuente: (Instruments)

5.1.4 Sección de rectificadores controlados (SCR's).

Igual que la sección anterior tiene la misma configuración, con la diferencia de que aquí, existen las tomas de los pulsos de disparos. Estos también están señalados.

Ejemplo: la bornera G₁ corresponde al pulso para la compuerta del SCR₁.

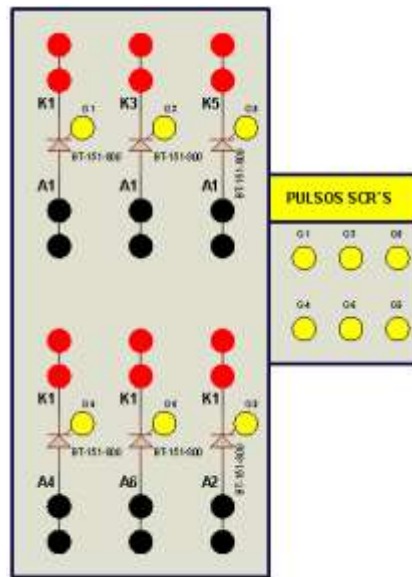


Figura 5.5. Bloque de SCR's de potencia.
Fuente: (Instruments)

5.1.5 Sección de cargas resistivas, inductivas y capacitivas.

De la misma manera que las secciones anteriores, esta presentación de las cargas está totalmente identificadas, con sus respectivos valores y protecciones. Listas para las diferentes conexiones.

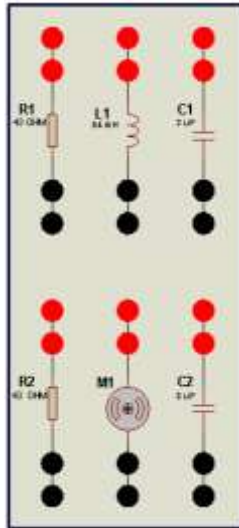


Figura 5.6. Bloque de cargas.
Fuente: (Instruments)

5.2 Prácticas de laboratorio.

A continuación desarrollamos varias prácticas de laboratorio, en el módulo didáctico con la finalidad de comprobar y experimentar el desarrollo de este trabajo de tesis.

5.2.1 Práctica 1: Reconocimiento del módulo didáctico.

Objetivos:

- Reconocer de forma visual cada uno de los bloques del banco de pruebas
- Conocer el funcionamiento de cada una de las etapas que conforman el módulo didáctico, haciendo uso del manual de usuario.

Elementos utilizados:

- Módulo didáctico del rectificador trifásico
- Manual de usuario

Procedimiento:

Este banco para prácticas de rectificadores trifásicos está formado por:

- Un breaker trifásico de 6A que protegerá solo a los diferentes arreglos de circuitos rectificadores con sus respectivas cargas.
- Un bloque de transformadores trifásicos reductores de 120Vrms, a 50Vrms.
- Un bloque de 3 interruptores con indicadores conectados a cada línea (R,S,T) para simular fallos de líneas.
- Un bloque de 3 fusibles de 4 A, a 250 V que protegerá a cada fase.
- Un arreglo de 6 diodos rectificadores, número KBPC3504W de 35 A y de 400Vpiv.
- Ubicados en forma matricial y conectados internamente a 2 conectores en cada extremo (AK), expuestos para realizar las diferentes conexiones externas.

- Un arreglo de 6 SCR número BT151-600 de 12 A. a 600Vpiv. ubicados en forma matricial y conectados internamente a 2 conectores en cada extremo(A,K,G), expuestos para realizar las diferentes conexiones externas.

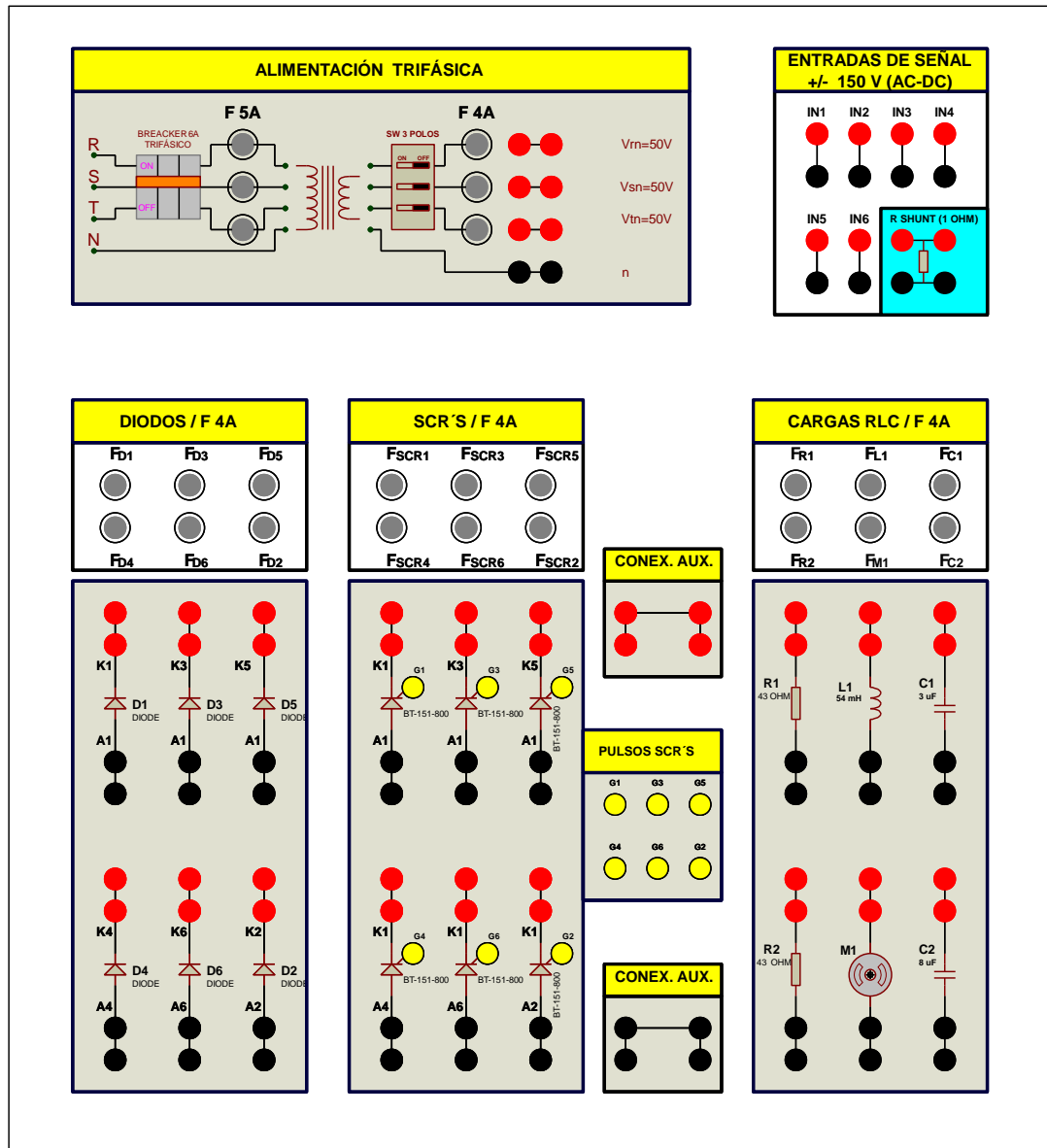


Figura 5.7. Vista frontal por bloques. Fuente: (Instruments)

- Un bloque de circuitos generadores de los 6 pulsos necesarios para disparar a cada SCR. las tomas de los pulsos están numeradas expuestas y para ser conectados a sus correspondientes SCR.
- Un bloque de cargas resistivas, inductivas y capacitivas
- Cargas resistivas: 2 resistencias de 43Ω cada una.

- Cargas inductivas: 1 bobina de 54mH., 1 motor universal de 1/8 HP.
- Cargas capacitivas: 2 condensadores de 1.5uf, 3uf., respectivamente.
- Tres bloques de 6 fusibles cada uno de 4 A, que protegerán a cada uno de los dispositivos.
- Un bloque de entradas de señales donde se podrán ingresar las diferentes magnitudes a medir.
- Un computador el cual será el controlador principal de éste proyecto.

5.2.3 Práctica 2: Rectificador trifásico de media onda, no controlado con carga resistiva.

Objetivos:

- Reconocer y armar el rectificador trifásico de media onda, no controlado con carga resistiva.
- Medir los valores de tensión y corriente de un rectificador trifásico de media onda con diodos y carga resistiva.
- Determinar los valores de potencia y eficiencia de un rectificador trifásico de media onda con diodos y carga resistiva.

Elemento utilizados:

- Bloque de alimentación trifásica
- Bloque diodos
- Bloque de carga R
- Bloque de entradas de señal
- Juego de cables conectores

Procedimiento:

1. Arme un circuito rectificador trifásico no controlado de media onda con carga $R_1 = 43 \Omega$, y $R_2 = 43 \Omega$ conectadas en serie, tal como lo indica la figura.
2. Mida el voltaje de salida, V_o .
3. Mida la corriente de salida, I_o .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_o .
7. Obtenga la forma de onda de I_o .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.

13. Escriba sus conclusiones.

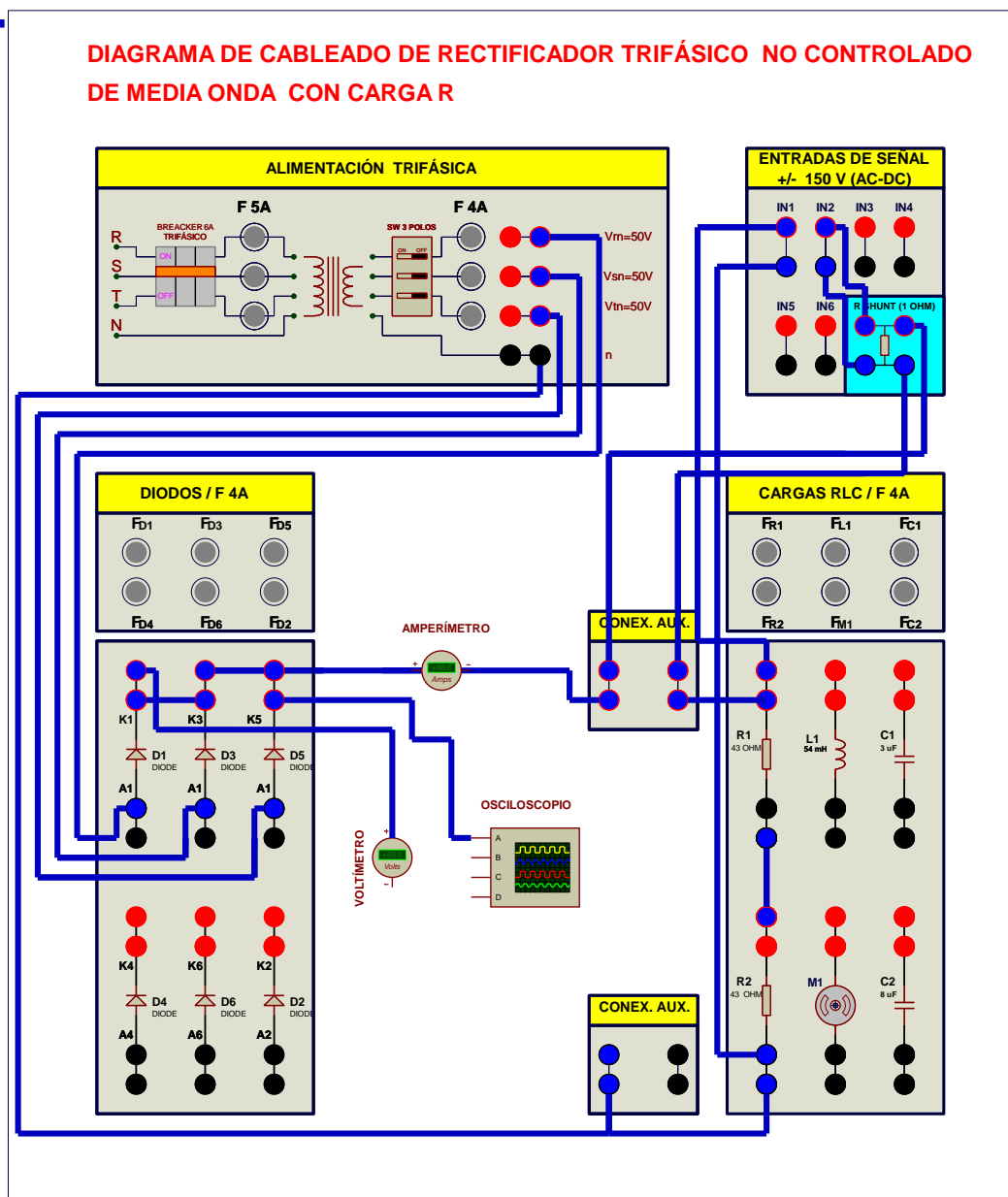


Figura 5.8. Conexión del rectificador trifásico de media onda con diodo. Fuente: (Instruments)

Datos:

$$V_{rn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$R_1 = 43 \Omega$$

$$R_2 = 43 \Omega$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = 0.827 V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 0.84 V_P$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$





$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

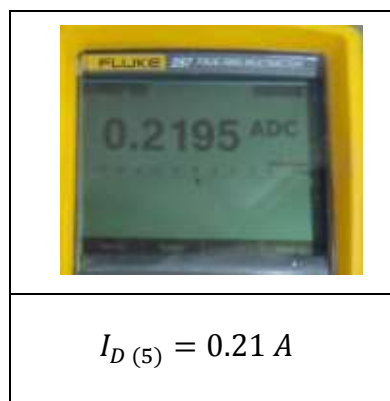
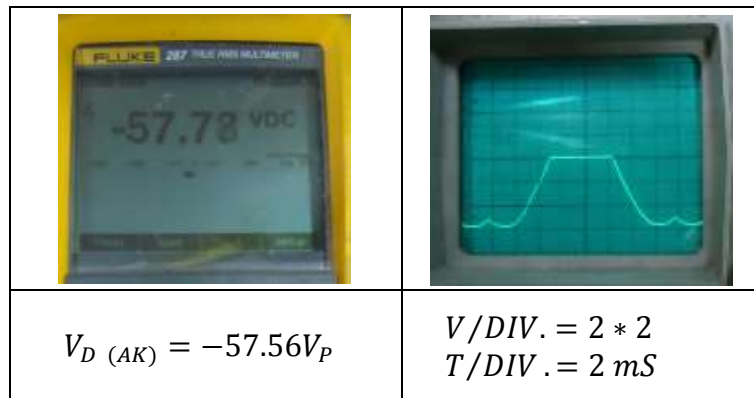
$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(0.827 V_P)^2}{(0.84 V_P)^2} = 96.77\%$$

Valores medidos:

	
$V_{O(DC)} = 56.77 V$	$V/DIV. = 20 * 2$ $T/DIV. = 0.2 mS$
	
$I_{O(DC)} = 0.66 A$	$V/DIV. = 0.2 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$



Cálculos:

$$V_{O(DC)} = 0.827 V_P$$

$$V_{O(DC)} = 0.827 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O(DC)} = 58.47 V$$

$$V_{O(RMS)} = 0.84 V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 0.84 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O(RMS)} = 59.39 V$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$R = 43 \Omega + 43 \Omega$$

$$R = 86 \Omega$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(DC)} = \frac{58.47 V}{86 \Omega}$$

$$I_{O(DC)} = 0.67 A$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{59.39 V}{86 \Omega}$$

$$I_{O(RMS)} = 0.69 A$$

$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

$$I_{D(5)} = \frac{0.67 A}{3}$$

$$I_{D(5)} = 0.22 A$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R}$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(58.47 W)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O(DC)} = 39.75 W$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(59.39 W)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O(RMS)} = 41.01 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(0.827 V_P)^2}{(0.4 V_P)^2} = 96.77\%$$

$$\eta_R = \frac{39.75 W}{41.01 W}$$

$$\eta_R = 0.9692$$

$$\eta_R = 96.92\%$$

Tabla:

	Valores teóricos	Valores <i>prácticos</i>
$V_{O(DC)}$	58.47 V	56.63 V
$V_{O(RMS)}$	59.39 V	
$I_{O(DC)}$	0.67 A	0.66 A

$I_O (RMS)$	0.69 A	
$I_D (5)$	0.22 A	0.21 A
$V_{AK} (D5)$		-57.56 V
$P_O (DC)$	39.75 W	
$P_O (RMS)$	41.01 W	
η_R	96.92%	

Tabla 5.1 Valores medidos del rectificador trifásico de media onda con diodo y carga R. Fuente: (Instruments)

5.2.4 Práctica 3: Rectificador trifásico de media onda no controlado con carga inductiva.

OBJETIVO:

Determinar los valores de tensión, corriente y potencia de un rectificador trifásico de media onda con diodos y carga inductiva.

ELEMENTO UTILIZADOS:

Bloque de alimentación trifásica

Bloque diodos

Bloque de carga L.

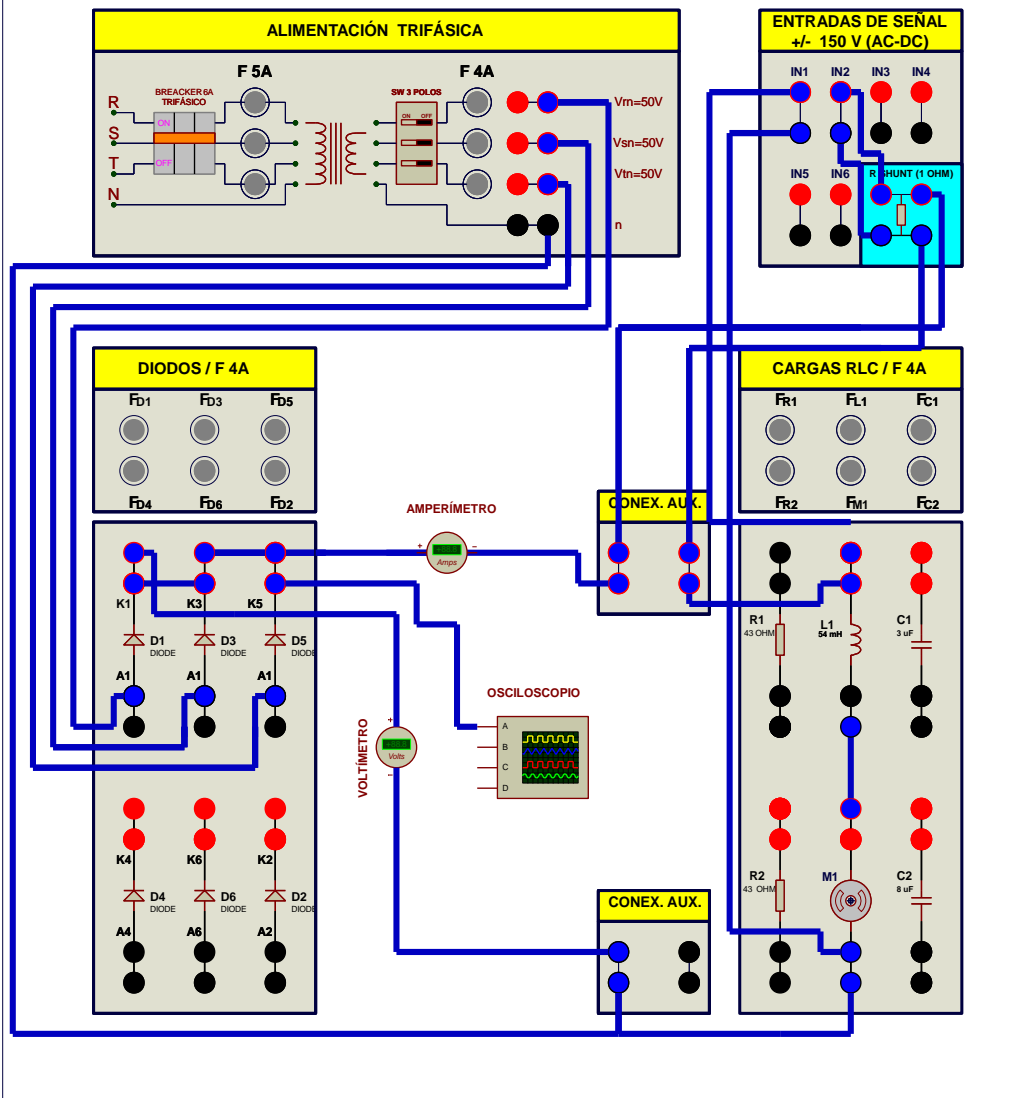
Bloque de entradas de señal

Juego de cables conectores

PROCEDIMIENTO:

1. Arme un circuito rectificador trifásico no controlado de media onda con carga $L_1 = 54\text{mH}$ y M_2 conectadas en serie, tal como lo indica la figura, y realice lo sig.:
2. Mida el voltaje de salida, V_O .
3. Mida la corriente de salida, I_O .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_O .
7. Obtenga la forma de onda de I_O .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.
13. Escriba sus conclusiones.

DIAGRAMA DE CABLEADO DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO DE MEDIA ONDA CON CARGA L



Datos:

$$V_{rn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$L_1 = 54 mH$$

$$M_{12} = \frac{1}{8} hp$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = 0.827 V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 0.84 V_P$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$

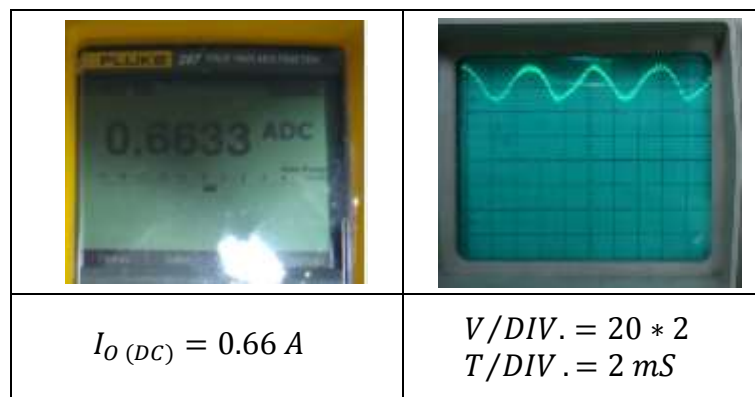
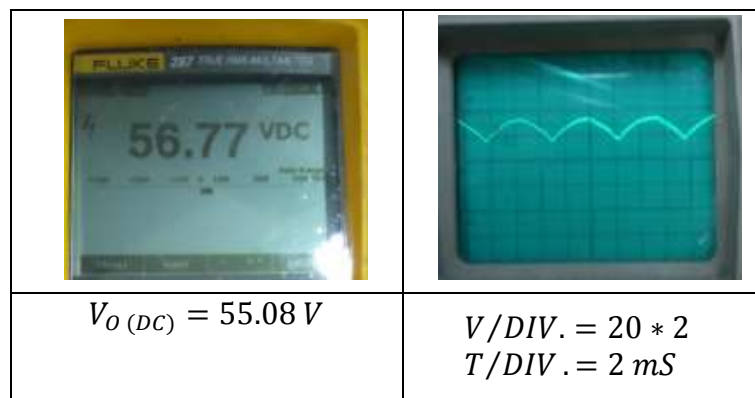
$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$



$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$


$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(0.827 V_P)^2}{(0.84 V_P)^2} = 96.77\%$$

Valores medidos:



	
$V_{D (AK)} = -57.17V_P$	$V/DIV. = 2 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$


$I_{D (5)} = 0.48 A$

Cálculos:

$$V_{O (DC)} = 0.827 V_P$$

$$V_{O (DC)} = 0.827 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O (DC)} = 58.47 V$$

$$V_{O (RMS)} = 0.84 V_P$$

$$V_{O (RMS)} = 0.84 * \sqrt{2} * 49.16 V$$

$$V_{O (RMS)} = 59.39 V$$

$$I_{O (DC)} = 1.48 A \text{ (VALOR MEDIDO)}$$

$$I_{O (DC)} = \frac{V_{O (DC)}}{R}$$

$$R = \frac{V_{O (DC)}}{I_{O (DC)}}$$

$$R = \frac{58.47 V}{1.48 A}$$

$$R = 39.50 \Omega$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{V_{O (RMS)}}{R}$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{59.39 V}{39.50 \Omega}$$

$$I_{O (RMS)} = 1.50 A$$

$$I_D = \frac{I_{O (DC)}}{3}$$

$$I_{D (5)} = \frac{1.48 A}{3}$$

$$I_{D (5)} = 0.49 A$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{R}$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(58.47 W)^2}{39.50 \Omega}$$

$$P_{O (DC)} = 86.55 W$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(V_{O (RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(59.39 W)^2}{38.84 \Omega}$$

$$P_{O (RMS)} = 89.29 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O (DC)}}{P_{O (RMS)}} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{(V_{O (RMS)})^2} = \frac{(0.827 V_P)^2}{(0.84 V_P)^2} = 96.77 \%$$

$$\eta_R = \frac{86.55 W}{89.29 W}$$

$$\eta_R = 0.9693$$

$$\eta_R = 96.93 \%$$

Tabla:

	Valores teóricos	Valores <i>prácticos</i>
$V_O (DC)$	58.47 V	55 V
$V_O (RMS)$	59.39 V	
$I_O (DC)$		1.48 A
$I_O (RMS)$	1.50 A	
$I_D (S)$	0.49 A	0.48 A
$V_{AK} (D5)$		-57.17 V
$P_O (DC)$	86.55 W	
$P_O (RMS)$	89.29 W	
η_R	96.93%	

Tabla 5.2 Valores medidos del rectificador trifásico de media onda con diodo y carga L. Fuente: (Instruments)

5.2.5 Práctica 4: Rectificador trifásico de onda completa no controlado con carga resistiva.

OBJETIVO:

Determinar los valores de tensión, corriente y potencia de un rectificador trifásico de onda completa con diodos y carga resistiva.

ELEMENTO UTILIZADOS:

Bloque de alimentación trifásica

Bloque diodos

Bloque de carga R

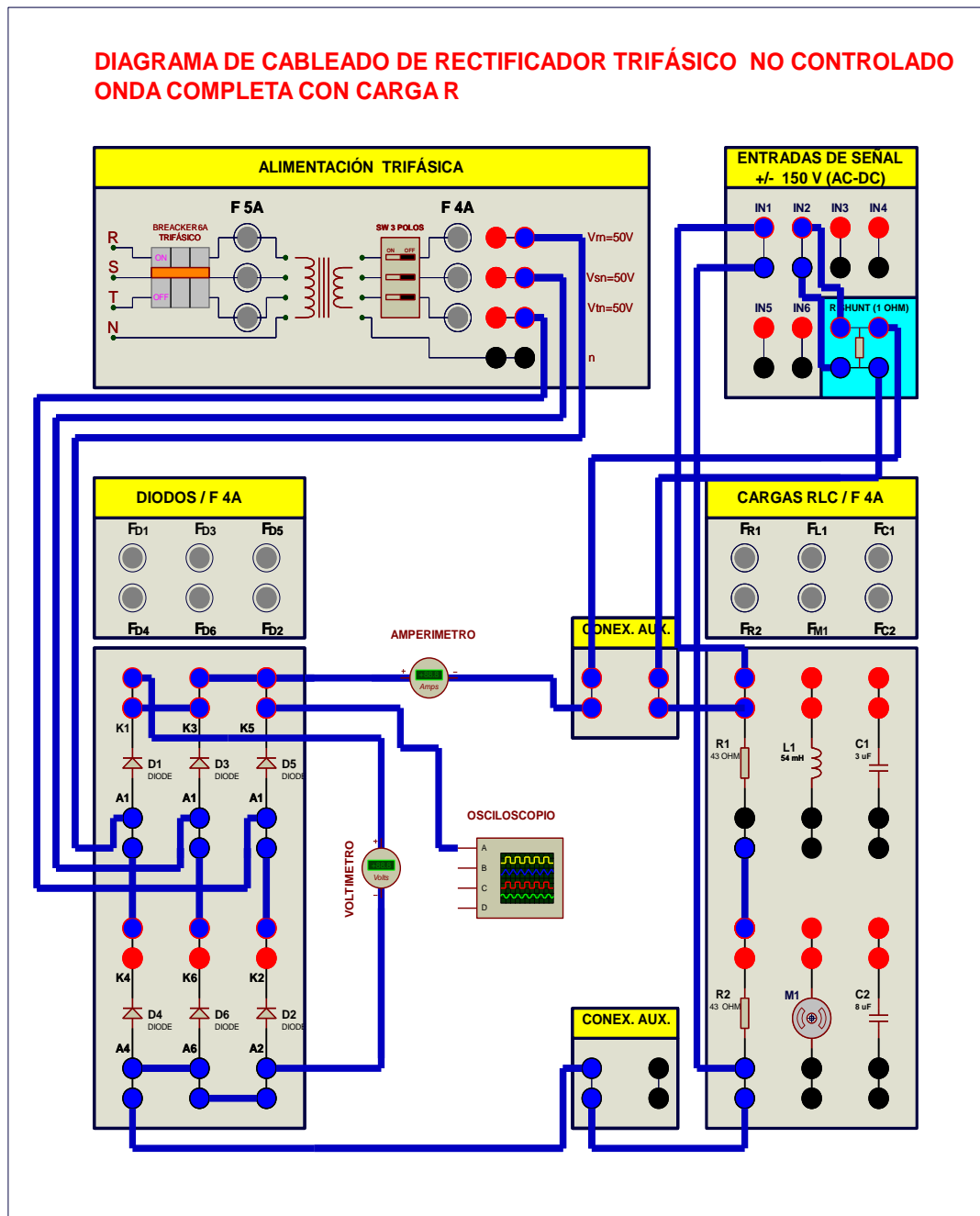
Bloque de entradas de señal

Juego de cables conectores

PROCEDIMIENTO:

1. Arme un circuito rectificador trifásico no controlado de onda completa con carga $R_1 = 43 \Omega$, y $R_2 = 43 \Omega$ conectadas en serie, tal como lo indica la figura, y realice lo sig.:
2. Mida el voltaje de salida, V_O .
3. Mida la corriente de salida, I_O .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_O .
7. Obtenga la forma de onda de I_O .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.
13. Escriba sus conclusiones.

DIAGRAMA DE CABLEADO DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO ONDA COMPLETA CON CARGA R



Datos:

$$V_{rn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec.)} = 50 V_{rms}$$

$$R_1 = 43 \Omega$$

$$R_2 = 43 \Omega$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 1.6554 V_P$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_O}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$


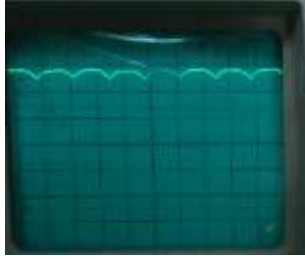
$$I_D = \frac{I_O}{3}$$



$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$



$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$


$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(1.654 V_P)^2}{(1.6554 V_P)^2} = 99.83 \%$$

Valores medidos:

	
$V_{O(DC)} = 112.2 V$	$V/DIV. = 20 * 2$ $T/DIV. = 0.2 mS$

	
$I_{O(DC)} = 1.312 A$	$V/DIV. = 0.2 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$

	
$V_{D(AK)} = -57.13 V_P$	$V/DIV. = 2 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$


$I_{D(5)} = 0.43 A$

Cálculos:

$$V_{O(DC)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_P$$

$$V_{O(DC)} = 1.654 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O(DC)} = 116.95 V$$

$$V_{O(RMS)} = 1.6554 * V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 1.6554 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O(RMS)} = 117.05 V$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$R = 43 \Omega + 43 \Omega$$

$$R = 86 \Omega$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(DC)} = \frac{116.95 V}{86 \Omega}$$

$$I_{O(DC)} = 1.35 A$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{117.05 V}{86 \Omega}$$

$$I_{O(RMS)} = 1.36 A$$

$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

$$I_{D(5)} = \frac{1.35 A}{3}$$

$$I_{D(5)} = 0.45 A$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R}$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(116.95 V)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O(DC)} = 159.03 W$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(117.05 V)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O(RMS)} = 159.31 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(1.654 V_P)^2}{(1.6554 V_P)^2} = 99.83 \%$$

$$\eta_R = \frac{159.03 W}{159.31 W}$$

$$\eta_R = 0.9982$$

$$\eta_R = 99.82 \%$$

Tabla:

	Valores teóricos	<i>Valores prácticos</i>
$V_{O (DC)}$	116.95 V	112.2 V
$V_{O (RMS)}$	117.05 V	
$I_{O (DC)}$	1.35 A	1.31 A
$I_{O (RMS)}$	1.36 A	
$I_{D (5)}$	0.45 A	0.43 A
$V_{AK (D5)}$		-57.56 V
$P_{O (DC)}$	159.03 W	
$P_{O (RMS)}$	159.31 W	
η_R	99.82 %	

Tabla 5.3 Valores medidos del rectificador trifásico no controlado de media onda y carga R. Fuente: (Instruments)

5.2.6 Práctica 5: Rectificador trifásico de onda completa no controlado con carga inductiva.

OBJETIVO:

Determinar los valores de tensión, corriente y potencia de un rectificador trifásico de onda completa con diodos y carga inductiva.

ELEMENTO UTILIZADOS:

Bloque de alimentación trifásica

Bloque diodos

Bloque de carga L.

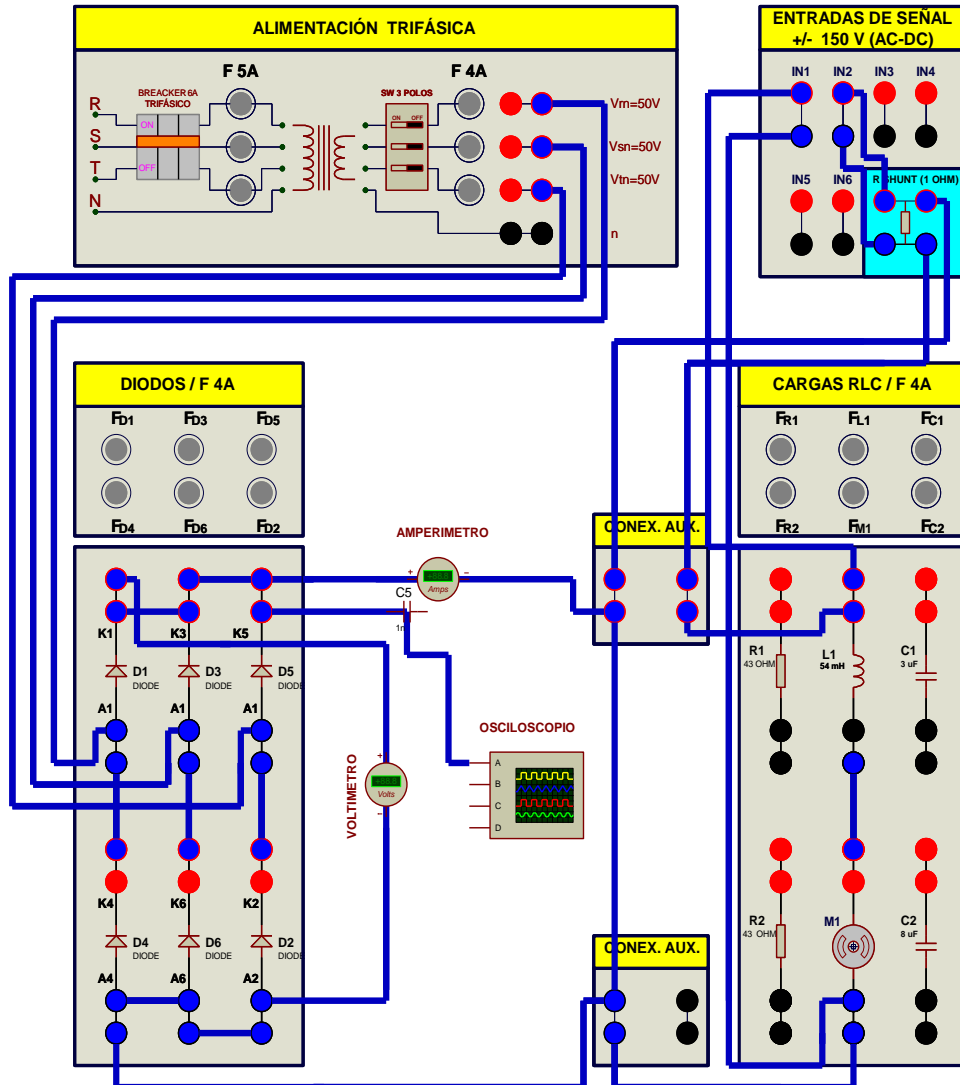
Bloque de entradas de señal

Juego de cables conectores

PROCEDIMIENTO:

1. Arme un circuito rectificador trifásico no controlado de onda completa con carga $L_1 = 54\text{mH}$ y M_2 conectadas en serie, tal como lo indica la figura, y realice lo sig.:
2. Mida el voltaje de salida, V_o .
3. Mida la corriente de salida, I_o .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_o .
7. Obtenga la forma de onda de I_o .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.
13. Escriba sus conclusiones.

DIAGRAMA DE CABLEADO DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO ONDA COMPLETA CON CARGA L



Datos:

$$V_{rn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$L_1 = 54 mH$$

$$M_{12} = \frac{1}{8} hp$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = 0.827 V_P$$

$$V_{O(RMS)} = 0.84 V_P$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$





$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

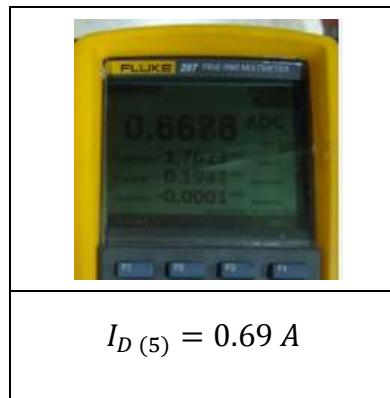
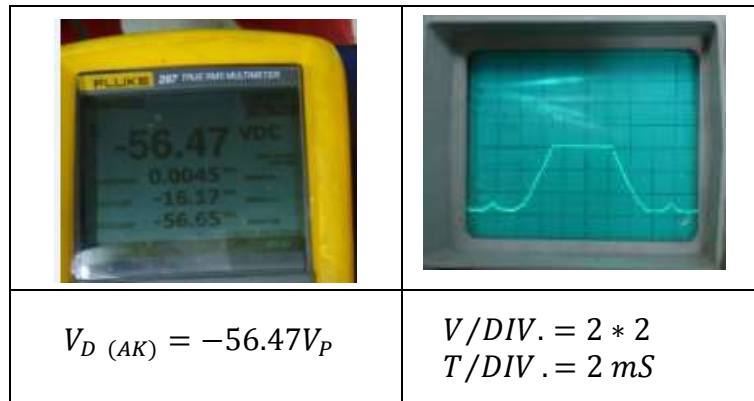
$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2} = \frac{(0.827 V_P)^2}{(0.84 V_P)^2} = 96.77\%$$

Valores medidos:

	
$V_{O(DC)} = 110.90 V$	$V/DIV. = 20 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$
	
$I_{O(DC)} = 2.03 A$	$V/DIV. = 0.2 * 2$ $T/DIV. = 2 mS$



Cálculos:

$$V_{O (DC)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_P$$

$$V_{O (DC)} = 1.654 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O (DC)} = 116.95 V$$

$$V_{O (RMS)} = 1.6554 * V_P$$

$$V_{O (RMS)} = 1.6554 * \sqrt{2} * 50 V$$

$$V_{O (RMS)} = 117.05 V$$

$$I_{O (DC)} = 2 A \text{ (VALOR MEDIDO)}$$

$$I_{O (DC)} = \frac{V_{O (DC)}}{R}$$

$$R = \frac{V_{O (DC)}}{I_{O (DC)}}$$

$$R = \frac{116.95 V}{2 A}$$

$$R = 58.47 \Omega$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{V_{O (RMS)}}{R}$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{117.05 V}{58.47 \Omega}$$

$$I_{O (RMS)} = 2 A$$

$$I_D = \frac{I_{O (DC)}}{3}$$

$$I_{D (5)} = \frac{2 A}{3}$$

$$I_{D (5)} = 0.66 A$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{R}$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(116.95 V)^2}{58.47 \Omega}$$

$$P_{O (DC)} = 233.92 W$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(V_{O (RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(117.05 V)^2}{58.47 \Omega}$$

$$P_{O (RMS)} = 234.32 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O (DC)}}{P_{O (RMS)}} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{(V_{O (RMS)})^2} = \frac{(1.654 V_P)^2}{(1.6554 V_P)^2} = 99.83 \%$$

$$\eta_R = \frac{233.92 W}{234.32 W}$$

$$\eta_R = 0.9682$$

$$\eta_R = 96.82 \%$$

Tabla:

	Valores teóricos	Valores <i>prácticos</i>
$V_O (DC)$	116.95 V	110.90 V
$V_O (RMS)$	117.05 V	
$I_O (DC)$		2 A
$I_O (RMS)$	2 A	
$I_D (S)$	0.66 A	0.67 A
$V_{AK} (D5)$		-56.5 V
$P_O (DC)$	233.92 W	
$P_O (RMS)$	234.32 W	
η_R	99.82 %	

Tabla 5.4 Valores medidos del rectificador trifásico de media onda con diodo y carga L. Fuente: (Instruments)

5.2.7 Práctica 6: Rectificador trifásico de media onda controlado con carga resistiva.

OBJETIVO:

Determinar los valores de tensión, corriente y potencia de un rectificador trifásico de media onda controlado y carga resistiva.

ELEMENTO UTILIZADOS:

Bloque de alimentación trifásica.

Bloque scr's.

Bloque de carga R.

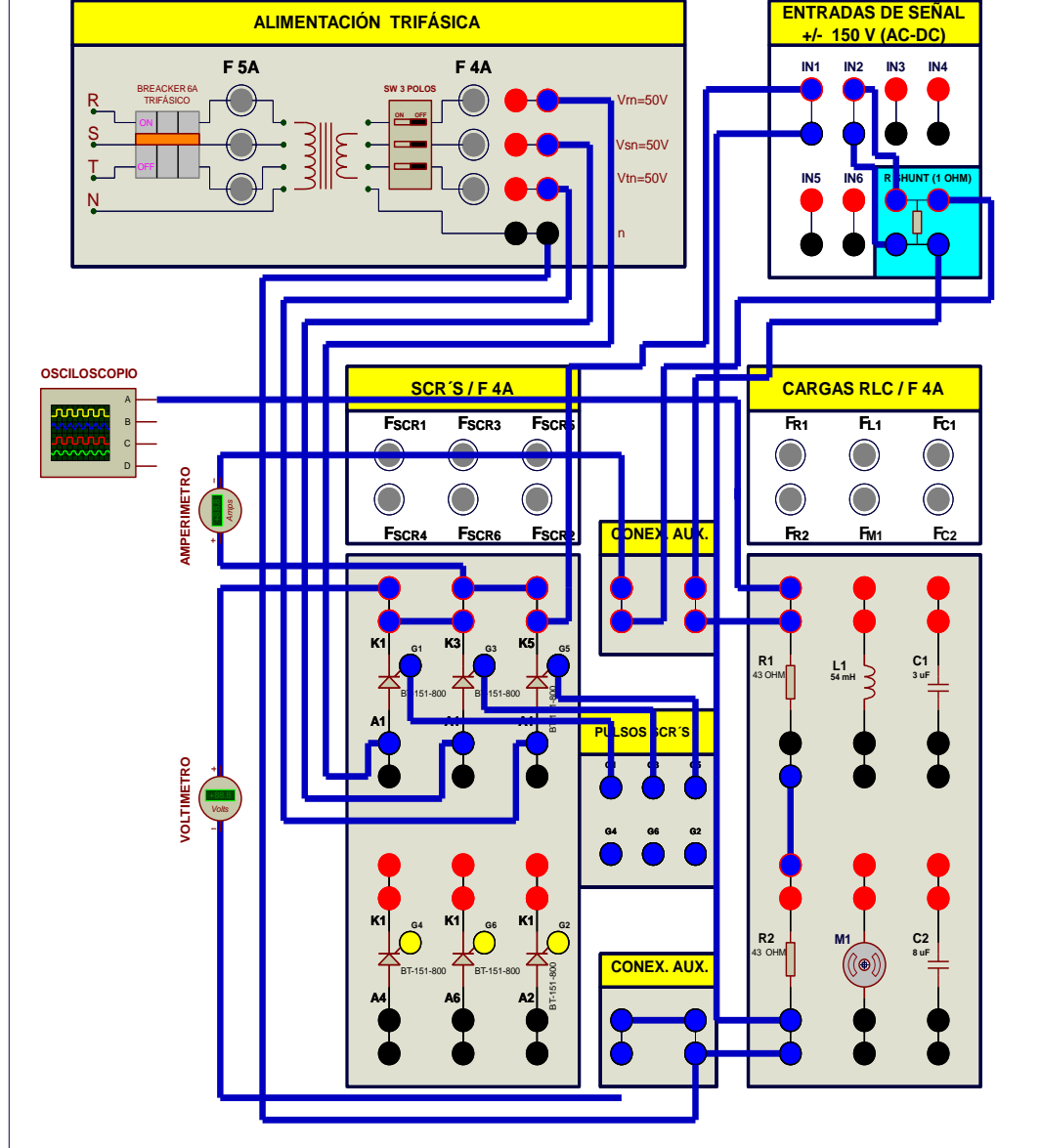
Bloque de entradas de señal.

Juego de cables conectores.

PROCEDIMIENTO:

1. Arme un circuito rectificador trifásico controlado de media onda con carga $R_1= 43 \Omega$ y $R_2= 43 \Omega$ conectadas en serie, tal como lo indica siguiente figura, y realice lo sig.:
2. Mida el voltaje de salida, V_o .
3. Mida la corriente de salida, I_o .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_o .
7. Obtenga la forma de onda de I_o .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.
13. Escriba sus conclusiones.

DAIGRAMA DE CABLEADO DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE MEDIA ONDA CON CARGA R



Datos:

$$V_{rn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$R_1 = 43 \Omega$$

$$R_2 = 43 \Omega$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = \frac{3 V_P}{2\pi} \cos \left[1 + \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 0.477 * V_P * \cos \left[1 + \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$

$$V_{O(RMS)} = V_P * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3\alpha}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]}$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$


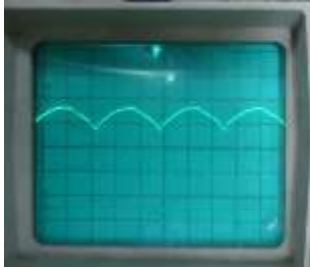
$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

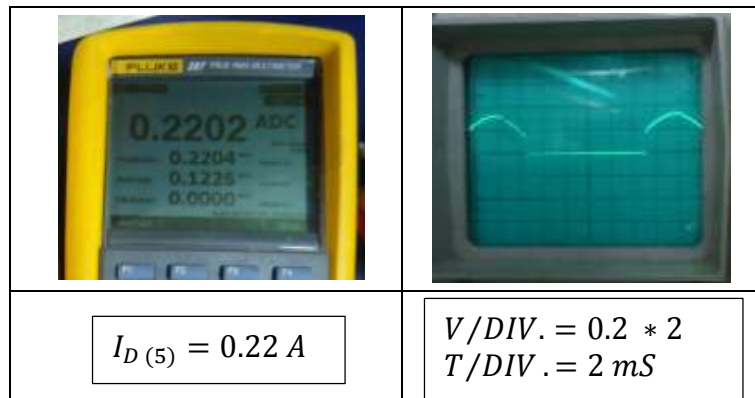
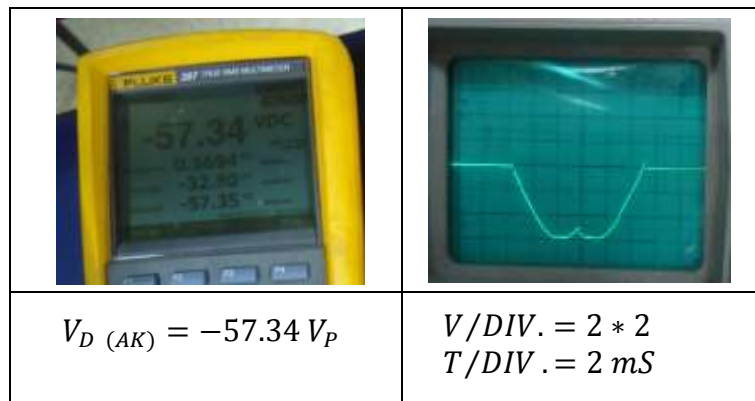
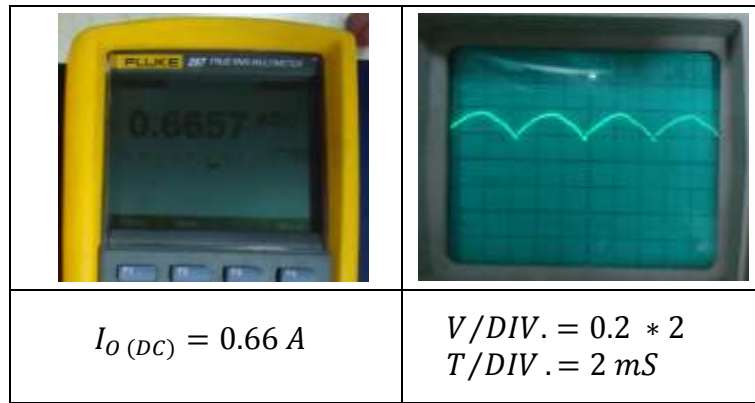
$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2}$$

Valores medidos con $\alpha = 0^\circ$:

	
$V_{O(DC)} = 57 V$	$V/DIV. = 20 * 2$ $T/DIV. = 0.2 mS$



Cálculos:

$$V_{O(DC)} = 0.477 * V_P * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 0.477 * \sqrt{2} * 50 V * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + 0^\circ\right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 62.93 V$$

$$V_{O (RMS)} = V_P * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3\alpha}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha\right) \right]}$$

$$V_{O (RMS)} = \sqrt{2} * 50 V * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3*0^\circ}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + (2 * 0^\circ)\right) \right]}$$

$$V_{O (RMS)} = 60.34 V$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$R = 43 \Omega + 43 \Omega$$

$$R = 86 \Omega$$

$$I_{O (DC)} = \frac{V_{O (DC)}}{R}$$

$$I_{O (DC)} = \frac{62.93}{86 \Omega}$$

$$I_{O (DC)} = 0.73 A$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{V_{O (RMS)}}{R}$$

$$I_{O (RMS)} = \frac{60.34}{86 \Omega}$$

$$I_{O (RMS)} = 0.70 A$$

$$I_D = \frac{I_{O (DC)}}{3}$$

$$I_{D (5)} = \frac{0.73 A}{3}$$

$$I_{D (5)} = 0.24 A$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{R}$$

$$P_{O (DC)} = \frac{(62.93 V)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O (DC)} = 46.04 W$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(V_{O (RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O (RMS)} = \frac{(60.34 V)^2}{86 \Omega}$$

$$P_{O (RMS)} = 42.33 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O (DC)}}{P_{O (RMS)}} = \frac{(V_{O (DC)})^2}{(V_{O (RMS)})^2}$$

$$\eta_R = \frac{46.04 W}{42.33 W}$$

$$\eta_R = 1.08$$

$$\eta_R = 108 \%$$

Tabla:

	Valores teóricos	Valores <i>prácticos</i>
$V_{O (DC)}$	62.93 V	57.23 V
$V_{O (RMS)}$	60.34 V	
$I_{O (DC)}$	0.73 A	0.66 A
$I_{O (RMS)}$	0.70 A	
$I_D (5)$	0.24 A	0.22 A
$V_{AK (D5)}$		-57.33 V
$P_{O (DC)}$	46.04 W	
$P_{O (RMS)}$	42.33 W	

Tabla 5.5 Valores medidos del rectificador trifásico de media onda con SCR y carga R. Fuente: (Instruments)

5.2.8 Práctica 7: Rectificador trifásico de media onda controlado con carga inductiva.

OBJETIVO:

Determinar los valores de tensión, corriente y potencia de un rectificador trifásico de media onda controlado y carga inductiva.

ELEMENTO UTILIZADOS:

Bloque de alimentación trifásica.

Bloque scr's.

Bloque de carga R.

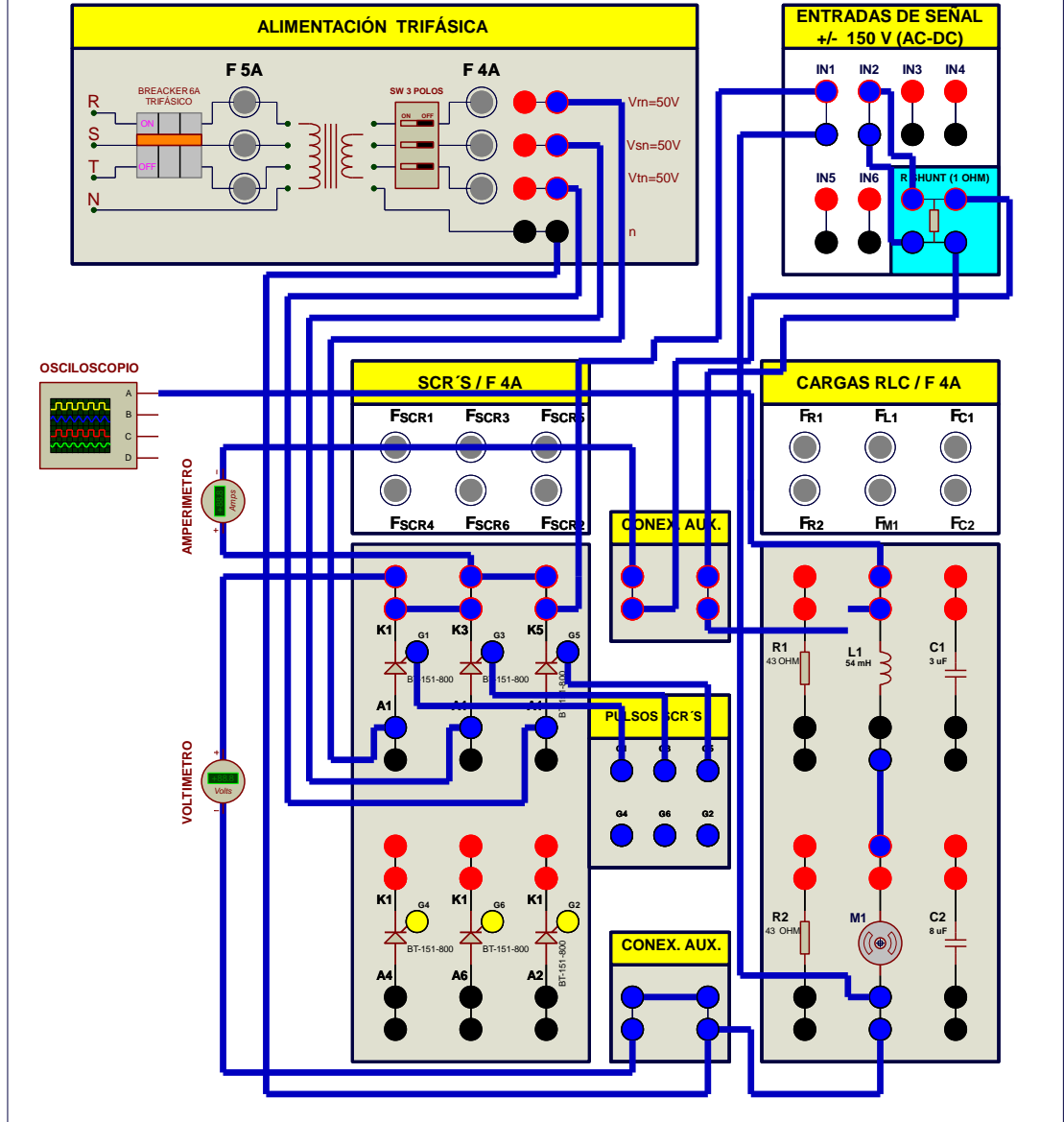
Bloque de entradas de señal.

Juego de cables conectores.

PROCEDIMIENTO:

1. Arme un circuito rectificador trifásico controlado de media onda con carga $L_1 = 54\text{mH}$ y M_2 conectadas en serie, tal como lo indica la figura, y realice lo sig.:
2. Mida el voltaje de salida, V_O .
3. Mida la corriente de salida, I_O .
4. Mida el voltaje del diodo D_5 , V_{AK}
5. Mida la corriente del diodo D_5 , I_{D5}
6. Obtenga la forma de onda del V_O .
7. Obtenga la forma de onda de I_O .
8. Obtenga la forma de onda del diodo D_5 , V_{AK}
9. Calcule la potencia que recibe la carga.
10. Calcule la potencia, que entrega éste tipo de rectificador.
11. Calcule la eficiencia del rectificador.
12. Compare los valores prácticos con los teóricos.
13. Escriba sus conclusiones.

DAIGRAMA DE CABLEADO DE RECTIFICADOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE MEDIA ONDA CON CARGA L



Datos:

$$V_{rn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{sn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$V_{tn(sec)} = 50 V_{rms}$$

$$L_1 = 54 mH$$

$$M_2 = 1 MOTOR \frac{1}{8} hp$$

Fórmulas:

$$V_{O(DC)} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi - \frac{\pi}{6}} V_P \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{O(DC)} = \frac{3 V_P}{2\pi} \cos \left[0.866 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 0.477 * V_P * \cos \left[0.866 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$V_{O(RMS)} = V_P * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3\alpha}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]}$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R} m$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$

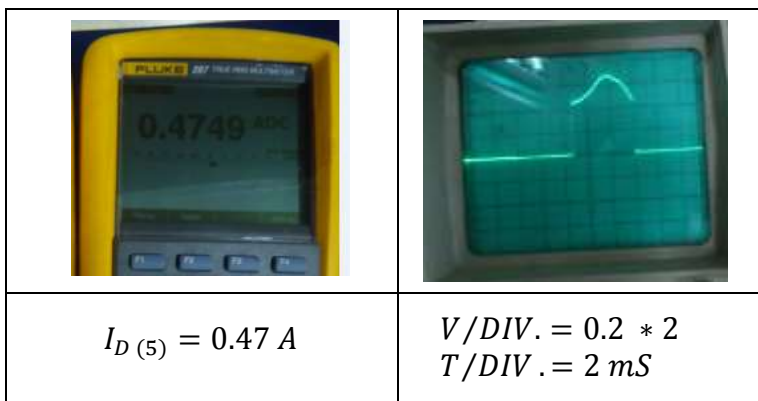
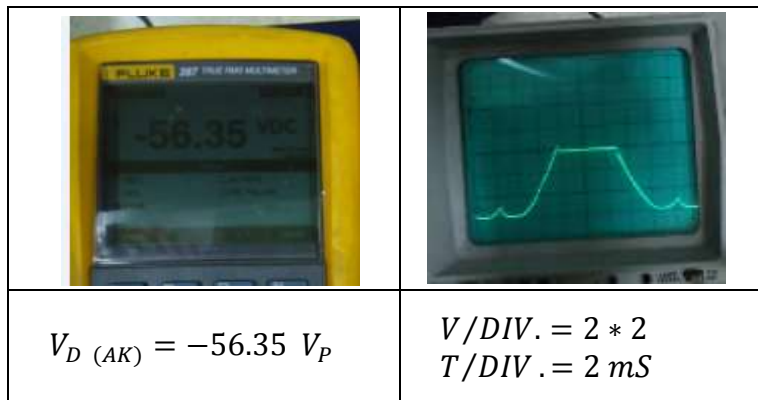
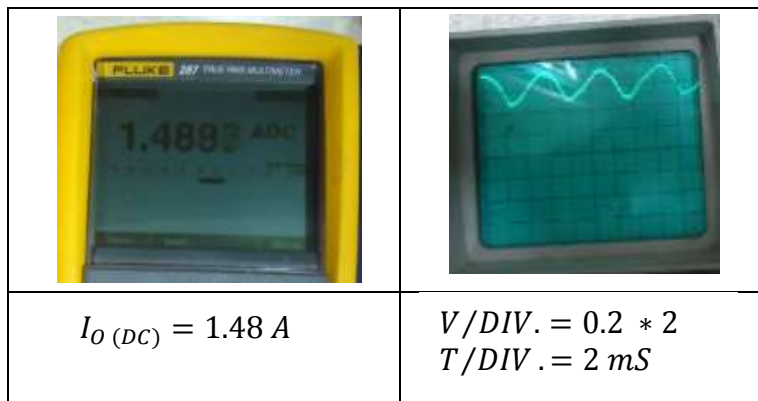
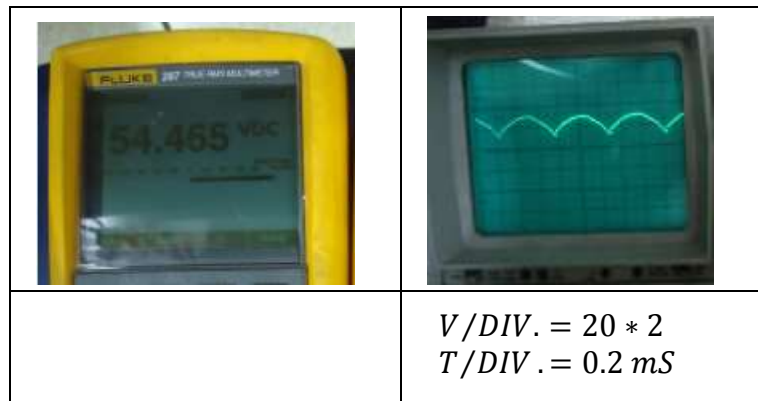
$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R} = V_{O(DC)} * I_{O(DC)}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R} = V_{O(RMS)} * I_{O(RMS)}$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2}$$

Valores medidos con $\alpha = 0^\circ$



Cálculos:

$$V_{O(DC)} = 0.477 * V_P * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 0.477 * \sqrt{2} * 50 V * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + 0^\circ\right) \right]$$

$$V_{O(DC)} = 62.93 V$$

$$V_{O(RMS)} = V_P * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3\alpha}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha\right) \right]}$$

$$V_{O(RMS)} = \sqrt{2} * 50 V * \sqrt{\left[\frac{5}{8} - \frac{3*0^\circ}{4\pi} + \frac{3}{8\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + (2 * 0^\circ)\right) \right]}$$

$$V_{O(RMS)} = 60.34 V$$

$$I_{O(DC)} = 1.5 A \text{ (VALOR MEDIDO)}$$

$$I_{O(DC)} = \frac{V_{O(DC)}}{R}$$

$$R = \frac{V_{O(DC)}}{I_{O(DC)}}$$

$$R = \frac{62.93 V}{1.5 A}$$

$$R = 41.95 \Omega$$

$$I_{O(DC)} = 0.73 A$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{V_{O(RMS)}}{R}$$

$$I_{O(RMS)} = \frac{60.34}{41.95 \Omega}$$

$$I_{O(RMS)} = 1.43 A$$

$$I_D = \frac{I_{O(DC)}}{3}$$

$$I_{D(5)} = \frac{1.5 A}{3}$$

$$I_{D(5)} = 0.5 A$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{R}$$

$$P_{O(DC)} = \frac{(62.93 V)^2}{41.95 \Omega}$$

$$P_{O(DC)} = 94.40 W$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(V_{O(RMS)})^2}{R}$$

$$P_{O(RMS)} = \frac{(60.34 V)^2}{41.95 \Omega}$$

$$P_{O(RMS)} = 86.79 W$$

$$\eta_R = \frac{P_{O(DC)}}{P_{O(RMS)}} = \frac{(V_{O(DC)})^2}{(V_{O(RMS)})^2}$$

$$\eta_R = \frac{94.40 W}{86.79 W}$$

$$\eta_R = 1.08$$

$$\eta_R = 108 \%$$

	Valores teóricos	Valores <i>prácticos</i>
$V_O (DC)$	62.93 V	54.45 V
$V_O (RMS)$	60.34 V	
$I_O (DC)$	1.5 A	1.5 A
$I_O (RMS)$	1.43 A	
$I_D (5)$	0.5 A	0.48 A
$V_{AK} (D5)$		-56.38 V
$P_O (DC)$	94.40 W	
$P_O (RMS)$	86.79 W	
η_R	108 %	

Tabla 5.6 Valores medidos del rectificador trifásico de media onda con SCR y carga L. Fuente: (Instruments)

CONCLUSIONES

- Se concluye que toda la información obtenida en las prácticas son comparables a los valores tomadas con los instrumentos de medición. Además se puede mencionar que los rectificadores trifásicos cumplen una función muy importante en el sector industrial, a tal punto que la mayoría de maquinarias demandan siempre de sistemas rectificadores de energía eléctrica capaces de soportar las sendas cargas utilizadas en los procesos de fabricación.
- Por medio de las prácticas podemos deducir que los rectificadores trifásicos de onda completa controlados proveen una mayor eficiencia que los rectificadores trifásicos no controlados.
- Cabe mencionar que los rectificadores trifásicos de onda completa entregan mayor potencia que los mismos rectificadores pero de media onda.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda leer el manual de usuario, antes de iniciar con la manipulación del módulo didáctico para rectificadores trifásicos. En el mismo constan todos los bloques o etapas que conforman este proyecto.
- Se recomienda no hacer reemplazo de fusibles de diferentes características, que las mencionada y especificadas en el manual de usuario. Esto con la finalidad de mantener siempre protegido el modulo didáctico.
- Al empezar con las prácticas de laboratorio se recomienda bajar los breaker de protección y armar el circuito que corresponda con toda la seguridad posible. También se recomienda no conectar ninguna carga adicional a las que ya incluye el modulo didáctico.

CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

El cronograma diseñado para la implementación del módulo didáctico para el laboratorio de electrónica de potencia es el siguiente:

CRONOGRAMA DE EJECUCION DEL PROYECTO DE TESIS																								
DETALLE	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
DENUNCIA DE LA TESIS	■	■	■	■																				
INVESTIGACION PRELIMINAR			■	■	■	■																		
DISEÑO DEL SISTEMA					■	■	■	■	■	■	■	■												
COMPRA DE LA TARJETA USB NI 6008							■	■	■	■	■													
COMPRA DE SOFTWARE LAB-VIEW							■	■	■	■	■													
COMPRA DE MATERIALES Y DISPOSITIVOS							■	■	■	■	■													
IMPLEMENTACION DEL SISTEMA												■	■	■	■	■	■							
CONFIGURACION DE LA RED																		■	■					
PRUEBAS FINALES																			■	■				
PRESENTACION DEL TRABAJO ESCRITO																					■			
DECLARATORIA DE APTITUD DE SUSTENTACION																						■		
SUSTENTACION																							■	
DECLARATORIA DE APTITUD PARA TITULACION																								■

PRESUPUESTO

El presupuesto de este proyecto está basado en los costos de materiales, dispositivos, accesorios, equipos, software y elementos utilizados en la materialización del módulo didáctico para rectificadores trifásicos:

ITEM	DETALLE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Banco de prueba	1	700.00	700.00
2	Elemento de potencia	1	350.00	350.00
3	Accesorios de montaje	1	180.00	180.00
4	Software de LabVIEW	1	825.00	850.00
5	Tarjeta USB-NI 6008	1	305.00	305.00
6	Elementos para la red	1	150.00	150.00
7	Sistema de cargas	1	300.00	300.00
Total (USD)				2,835.00

Los costos y financiamiento del trabajo de tesis, es asumido exclusivamente por los autores.

BIBLIOGRAFÍA

- Autores. (s.f.).
- Boylestad, N. (1997). *Electrónica: Teoría de Circuitos*. Pearson Educacion.
- Electronics, L. (s.f.). Proteus 6.
- GIMENO, F. J., SEGUI, S., ORTS, S., & SANCHEZ, C. (2004). *Electrónica de potencia - fundamentos básicos*. Alfaomega.
- Hart, D. W. (2001). *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall.
- Instruments, N. (s.f.). Labview.
- Ned Mohan, T. M. (1995). *Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*. McGraw Hill.
- Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Mc Graw Hill.