

DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE
DATOS EN APLICACIONES NILM, PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN
ENERGÉTICA EN EL PARQUE TECNOLÓGICO GUATIGUARÁ

EDWIN PAEZ GUERRERO
JOHAN NICOLAS RIAÑO TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2021

DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE
DATOS EN APLICACIONES NILM, PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN
ENERGÉTICA EN EL PARQUE TECNOLÓGICO GUATIGUARÁ

EDWIN PAEZ GUERRERO
JOHAN NICOLAS RIAÑO TORRES

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director

Yulieth Jiménez Manjarrés

Phd. Ingeniería Electrónica

Codirector

César Antonio Duarte Gualdrón

Phd. Electrical and Computer Engineering

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

Mi padre por enseñarme el valor que tiene la familia, por sostenernos a mis hermanos y a mi durante tanto tiempo, manteniéndonos unidos a pesar de las circunstancias y por no haberse rendido nunca en la difícil tarea que decidió tomar. Por apoyar este sueño de familia.

A mi madre por darme el apoyo necesario durante difíciles épocas, por su amor y comprensión en cada una de las etapas que viví a su lado durante la vida universitaria.

A mis hermanos por ayudarme de una u otra forma en cada uno de mis procesos, incluso siendo proveedores en ocasiones de lo básico. A Norely Paez por la paciencia, el amor que me ha demostrado con sus acciones, por ser la compañera de infancia y con quién pude superar los momentos más difíciles. A David Paez por su generosidad, desapego de lo material y por ese par de zapatos que llegaron en el momento que más los necesitaba. A Jenifer Paez por ser ese pedacito de amor que en muchas ocasiones me dio fuerzas para continuar con sus palabras.

A mis sobrinas bellas, Valeria y Valentina Calderón Paez, por demostrarme que la vida puede tener un nuevo respiro lleno de sonrisas y amor para dar.

A mi compañero de tesis Nicolás Riaño, por su comprensión y duro trabajo durante el desarrollo del proyecto y por quién a través de sus padres pude continuar para poder llegar a finalizar juntos este trabajo de grado.

A mis amigos y compañeros de universidad, por compartir durante este tiempo de su vida cada una de las cosas bonitas de las cuales pude aprender mucho y formarme profesional y personalmente.

A la empresa de transporte público de Lebrija TransLebrija y a sus conductores, por apoyar a través de su subsidio de transporte este sueño y el de muchos otros jóvenes lebrijenses.

Edwin Paez Guerrero

A mi hija por darme a conocer otra cara de la vida llena de felicidad y amor. Ese amor de hija que me da la fuerza para cada día salir adelante con mis sueños y ser un orgullo para ella.

Stephanie, mi compañera incondicional, quien ha sido un pilar importante para lograr todo lo que me propongo, por la paciencia, amor y cariño que me ha permitido crecer y avanzar hasta lograr mi mejor versión.

mis padres, Mamá (Gladys Torres), Papá (Rigoberto Riaño), por darme ese apoyo incondicional durante toda mi vida, por recalcar siempre que no hay nada más importante que la familia y el conocimiento. Este último por medio de la frase: "Lo único que le podemos dejar de herencia es el conocimiento gracias al estudio". Por otro lado, el tesoro que me dejaron para toda la vida son todos y cada uno de los valores que me inculcaron.

mis hermanos Oscar y Alejandra, quienes son una parte fundamental en mi vida y que en su momento me ayudaron con algunas palabras de apoyo.

mi compañero de proyecto de grado Edwin Paez, por tener siempre una mentalidad positiva y siempre luchar por salir adelante. Además, por tener la paciencia y las ganas de aprender.

mis amigos y compañeros de la universidad, quienes han hecho mi estadía en la universidad una de las mejores experiencias.

Johan Nicolas Riaño Torres

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN	19
2. OBJETIVOS	20
3. METODOLOGÍA	21
4. MARCO TEÓRICO	24
4.1. MONITORIZACIÓN DE CARGA	24
4.1.1. Intrusive Load Monitoring (ILM)	26
4.1.2. Non-Intrusive Load Monitoring (NILM)	27
4.1.3. Sistema de Adquisición de Datos NILM en Laboratorio de Integración de Energética del Parque Tecnológico Guatiguará	29
4.2. MÓDULO ESP32-WROOM-32	32
4.3. RELÉ	34
4.3.1. Relés Electromecánicos	35
4.3.2. Relés de Estado Sólido	35
4.3.3. Comparación entre relés electromecánicos y de estado sólido	40
5. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE CONTROL CON EL MÓDULO ESP32-WROOM-32	43
5.1. ETAPAS DEL DISEÑO ELÉCTRICO	43
5.1.1. Etapa de alimentación	44
5.1.2. Etapa de regulación de tensión	45
5.1.3. Etapa de procesamiento	46
5.1.4. Etapa de conexión USB	50
5.1.5. Etapa de conexiones para actuadores	55

5.2.	ESQUEMÁTICO Y LAYOUT DEL CIRCUITO IMPRESO	58
5.3.	DISEÑO 3D DEL DISPOSITIVO DE CONTROL	62
5.4.	ESPECIFICACIONES DEL DISPOSITIVO	62
5.5.	COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL	64
6.	DISEÑO PARA LA CONEXIÓN DE LA ETAPA DE ACTUADORES (SSR)	66
6.1.	TIPOS DE RELÉS DE ESTADO SÓLIDO DE ACUERDO A SU FUNCIONAMIENTO	66
6.2.	SSR DISPONIBLES EN EL LABORATORIO	68
6.3.	CONEXIONES PARA LA ETAPA DE CONTROL Y PARA LA ETAPA DE POTENCIA DE UN SSR	69
7.	DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE CONTROL	72
7.1.	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL CON LabVIEW	72
7.1.1.	Pestaña Principal	72
7.1.2.	Pestaña Chroma 61511 (Tarjetas NI)	77
7.1.3.	Pestaña Chroma virtual (Generador de señales interno)	79
7.2.	PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE CONTROL	81
7.3.	PROGRAMACIÓN MÓDULO DE CONTROL ESP32	94
8.	SIMULACIONES	100
8.1.	SIMULACIONES DE LA PLATAFORMA DE CONTROL Y EL SISTEMA EMBEBIDO DEL MÓDULO ESP32-WROOM-32	100
8.1.1.	Configuración del panel de control y del circuito con el módulo de procesamiento ESP32-WROOM-32	100
8.2.	SIMULACIONES DE UN SSR SINCRÓNICO	104
8.2.1.	Modelo de simulación SSR TD48A75	104
8.2.2.	Tipos de cargas	106
8.2.3.	Simulaciones con cargas resistivas	107
8.2.4.	Simulaciones con cargas RL en serie	111

8.2.5. Simulaciones con cargas RC en paralelo	120
8.2.6. Simulaciones con rectificador de onda completa	126
9. CONCLUSIONES	130
10. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	133
BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1.	Diagrama del sistema de automatización para la adquisición de datos. 22
Figura 2.	Esquema básico de monitorización no intrusiva de carga NILM. 27
Figura 3.	Proceso básico adquisición de datos NILM. 28
Figura 4.	Esquema del sistema actual de adquisición de datos. 30
Figura 5.	Imagen ilustrativa fuente Chroma 61511. 31
Figura 6.	Diagrama de bloques funcional ESP32-WROOM-32. 33
Figura 7.	Esquemático general de los pines asociados al módulo ESP32-WROOM32. 34
Figura 8.	Estructura interna de un relé de estado sólido. 36
Figura 9.	Ejemplo de conexión de un varistor como protección del SSR. 40
Figura 10.	Ejemplo de conexión de un varistor como protección del SSR. 41
Figura 11.	Esquemático de la etapa de alimentación. 45
Figura 12.	Esquemático de la etapa de regulación de tensión 3.3[V]. 46
Figura 13.	Esquemático de la etapa de procesamiento con el microcontrolador. 47
Figura 14.	Esquemático de conexión de LED de verificación. 48
Figura 15.	Esquemático de la etapa de lógica de activación. 49
Figura 16.	Esquemático conexiones para el convertor CP2102. 52
Figura 17.	Esquemático de la etapa de conexión USB. 54
Figura 18.	Esquemático de la etapa de conexión del ventilador de refrigeración. 55
Figura 19.	Esquemático de la etapa de amplificación con INA821ID. 56
Figura 20.	Esquemático de la conexión hacia los SSR. 58
Figura 21.	Esquemático del circuito impreso. 59
Figura 22.	Layout del circuito impreso. 61
Figura 23.	Modelo 3D de la carcasa del dispositivo de control (Vista Dimétrica). 63
Figura 24.	Modelo 3D de la carcasa del dispositivo de control (Vista Isométrica). 63

Figura 25.	Cotización para la construcción del dispositivo propuesto, octubre 2020.	65
Figura 26.	Funcionamiento SSR no sincrónico (Izquierda), SSR sincrónico (Derecha).	67
Figura 27.	Foto del SSR TD48A75.	68
Figura 28.	Montaje sugerido por el fabricante.	70
Figura 29.	Diagrama de conexión SSR.	71
Figura 30.	Interfaz para el almacenamiento de los parámetros de simulación.	73
Figura 31.	Configuración para los SSR que no usados.	75
Figura 32.	Panel virtual para la configuración y control de la Chroma 61511.	78
Figura 33.	Interfaz de usuario para los datos de las tarjetas NI.	79
Figura 34.	Diferentes señales disponibles provenientes de las tarjetas NI.	79
Figura 35.	Interfaz para la Chroma virtual (generador de señales de interno).	80
Figura 36.	Diagrama de bloques para la Chroma virtual.	82
Figura 37.	Diagrama de bloques para la lectura de los datos de las tarjetas NI.	83
Figura 38.	Diagrama de bloques para el almacenamiento de la señal captada.	83
Figura 39.	Diagrama para el almacenamiento de todas las señales captadas.	84
Figura 40.	Diagrama para el almacenamiento de los datos guardados en excel.	85
Figura 41.	Ejemplo de una secuencia de 5 ejecuciones.	85
Figura 42.	Datos almacenados en un archivo de texto.	86
Figura 43.	Diagrama para el almacenamiento de los datos en el archivo .txt.	86
Figura 44.	Diagrama de estados para la secuencia de LabView.	87
Figura 45.	Diagrama de bloques para el estado 1 en LabVIEW.	88
Figura 46.	Diagrama de bloques para el estado 2 en LabVIEW.	89
Figura 47.	Estado 3 en LabVIEW. Condiciones de trabajo	89
Figura 48.	Estado 3, almacenamiento de las secuencias en un array de datos.	90
Figura 49.	Diagrama de bloques para el estado 4 de ejecución en LabVIEW.	91
Figura 50.	Diagrama de bloques para el estado 5 de ejecución en LabVIEW.	92
Figura 51.	Diagrama de bloques para el estado 6 de ejecución en LabView.	92
Figura 52.	Diagrama de bloques para el estado 7 de ejecución en LabVIEW.	93

Figura 53.	Diagrama de bloques para el estado 8 de ejecución en LabVIEW.	94
Figura 54.	Diagrama de bloques para el estado 9 de ejecución en LabVIEW.	94
Figura 55.	Diagrama de estados el módulo ESP32-WROOM-32.	95
Figura 56.	Código referente al estado 1 del módulo ESP32-WROOM-32.	96
Figura 57.	Código referente al estado 2 de la ESP32-WROOM-32.	97
Figura 58.	Código referente al estado 3 de la ESP32-WROOM-32.	98
Figura 59.	Fragmentos de código referente al estado 4 de la ESP32-WROOM-32.	99
Figura 60.	Fragmentos de código referente al estado 5 de la ESP32-WROOM-32.	99
Figura 61.	Elección del puerto USB usado por el ESP32-WROOM-32	100
Figura 62.	Configuración de las secuencias de ejecución.	101
Figura 63.	configuración de las diferentes variables en los relés.	101
Figura 64.	Elección de las señales de trabajo, de guardado y el archivo de destino.	102
Figura 65.	Configuración de circuito usada para representar la prueba.	103
Figura 66.	Datos almacenados en un archivo de Excel.	103
Figura 67.	Datos almacenados en un archivo de texto.	104
Figura 68.	Diagrama del circuito interno del SSR TD48A75.	105
Figura 69.	Circuito equivalente del SSR TD48A75.	106
Figura 70.	Esquemático de conexión carga resistiva.	107
Figura 71.	Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$.	108
Figura 72.	Simulación para un valor de $R_L=10[\Omega]$.	109
Figura 73.	Simulación para un valor de $R_L=15[\Omega]$.	109
Figura 74.	Simulación para un valor de $R_L=20[\Omega]$.	110
Figura 75.	Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$.	110
Figura 76.	Esquemático de conexión de un circuito RL en serie.	111
Figura 77.	Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.	112
Figura 78.	Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.	113
Figura 79.	Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.	113
Figura 80.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.	114
Figura 81.	Simulación para un valor de $R_L=100[\Omega]$ y $L = 100[\mu\text{H}]$.	114

Figura 82.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{k}\Omega]$ y $L =100[\mu\text{H}]$.	115
Figura 83.	Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =500[\mu\text{H}]$.	115
Figura 84.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{k}\Omega]$ y $L =500[\mu\text{H}]$.	116
Figura 85.	Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$ y $L =10[\text{mH}]$.	116
Figura 86.	Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =10[\text{mH}]$.	117
Figura 87.	Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =100[\text{mH}]$.	117
Figura 88.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =100[\text{mH}]$.	118
Figura 89.	Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$ y $L =500[\text{mH}]$.	118
Figura 90.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =500[\text{mH}]$.	119
Figura 91.	Simulación para un valor de $R_L=10[\Omega]$ y $L =1[\text{H}]$.	119
Figura 92.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =1[\text{H}]$.	120
Figura 93.	Esquemático de conexión de un circuito RC en paralelo.	121
Figura 94.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C =10[\text{nF}]$.	122
Figura 95.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C =100[\text{nF}]$.	122
Figura 96.	Simulación para un valor de $R_L=2[\text{K}\Omega]$ y $C =100[\text{nF}]$.	123
Figura 97.	Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C =500[\text{nF}]$.	123
Figura 98.	Simulación para un valor de $R_L=1.2[\text{K}\Omega]$ y $C =500[\text{nF}]$.	124
Figura 99.	Simulación para un valor de $R_L=10[\text{K}\Omega]$ y $C =10[\mu\text{F}]$.	124
Figura 100.	Simulación para un valor de $R_L=10[\text{K}\Omega]$ y $C =100[\mu\text{F}]$.	125
Figura 101.	Simulación para un valor de $R_L=10[\text{K}\Omega]$ y $C =100[\mu\text{F}]$.	125
Figura 102.	Esquemático del modelo del rectificador monofásico.	126
Figura 103.	Simulación del rectificador monofásico.	127
Figura 104.	Esquemático conexión SSR y rectificador monofásico.	128
Figura 105.	Esquemático conexión SSR y rectificador monofásico .	128

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Ventajas y desventajas al utilizar relés electromagnéticos y de estado sólido.	41
Tabla 2. Ganancias y valores de resistencia de uso común para el INA821.	57
Tabla 3. Especificaciones módulo de control.	64
Tabla 4. Especificaciones SSR TD48A75.	69

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la Base de datos de la Biblioteca UIS)

- Anexo A. Manual de operación de la interfaz de control junto con la instalación y operación del sistema embebido y el banco de relés
- Anexo B. Archivos de la plataforma de control en LabView en versiones 2020 y 2017
- Anexo C. Archivo del softpanel de la fuente Chroma 61511
- Anexo D. Archivos de las librerías de los elementos de la PCB diseñada en EAGLE
- Anexo E. Diseños 3D de la carcasa en Solidworks

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN APLICACIONES NILM, PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA EN EL PARQUE TECNOLÓGICO GUATIGUARÁ *

AUTOR: EDWIN PAEZ GUERRERO, JOHAN NICOLAS RIAÑO TORRES **

PALABRAS CLAVE: ADQUISICIÓN DE DATOS, AUTOMATIZACIÓN, CARGA, NILM, SISTEMA, PLATAFORMA DE CONTROL.

DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de monitorización no intrusiva de carga (NILM) proveen información sobre la operación o el consumo de energía eléctrica de cada uno de los dispositivos que se encuentran en una residencia a partir de medidas eléctricas agregadas. Por lo tanto, la construcción y puesta en marcha de estos sistemas requieren mediciones en un punto de la red y algoritmos matemáticos de desagregación de cargas. El gran reto que tiene un sistema NILM es identificar cada dispositivo conectado a la red por medio de algoritmos que se pueden basar en la extracción de características y clasificación utilizando técnicas de aprendizaje automático, esto quiere decir, que es necesario tener una base de datos como referencia. Por consiguiente, el tener una base de datos como referencia en este tipo de sistemas hace posible un análisis y una identificación de cargas. Este trabajo de grado propone diseñar un sistema de automatización para la adquisición de datos en las mediciones del laboratorio. Tomando como base el sistema manual de la Figura 4, el cual, incluye las tarjetas de adquisición de datos de National Instruments (NI 9225, NI 9227, NI 9239, NI cDAQ-9172), una fuente programable Chroma 61511 (emula la red eléctrica), interruptores manuales y una plataforma semiautomática en LabVIEW. A partir de lo anterior, al diseño del sistema manual se agrega una interfaz con módulos en LabVIEW, relés de estado sólido (SSR) y un sistema embebido, esto permite que el sistema adquiera datos en tiempo real y hace mas eficiente la tarea del investigador en el laboratorio.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Yulieth Jiménez Manjarrés, Doctorado en Ingeniería (Ing.Eléctrica, Electrónica, Gestión y Desarrollo). Codirector: César Antonio Duarte Gualdrón, Phd in Electrical and Computer Engineering.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF AN AUTOMATION SYSTEM FOR DATA ACQUISITION IN NILM APPLICATIONS, FOR THE LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA IN PARQUE TECNOLÓGICO GUATIGUARÁ *

AUTHOR: EDWIN PAEZ GUERRERO, JOHAN NICOLAS RIAÑO TORRES **

KEYWORDS: ACQUISITION DATA, AUTOMATION, LOAD, NILM, SYSTEM, CONTROL PLATFORM.

DESCRIPTION:

Non-intrusive load monitoring systems (NILM) provide information about the operation or electrical energy consumption of each of the devices in a residence from aggregate electrical measurements. Therefore, the construction and commissioning of these systems requires measurements at one point in the network and mathematical load-disaggregation algorithms. The great challenge of a NILM system is to identify each device connected to the network by means of algorithms that can be based on the extraction of characteristics and classification using machine learning techniques, this means that it is necessary to have a database as a reference. Therefore, having a database as a reference in this type of system makes possible an analysis and identification of loads. This degree work proposes to design an automation system for data acquisition in laboratory measurements. Based on the manual system in Figure 4, which includes National Instruments data acquisition cards (NI 9225, NI 9227, NI 9239, NI cDAQ-9172), a programmable source Chroma 61511 (emulates the power grid), manual switches and a semi-automatic platform in LabVIEW. From the above, to the design of the manual system is added an interface with modules in LabVIEW, solid state relays (SSR) and embedded system, this allows the system to acquire data in real time and makes more efficient the task of the investigator in the laboratory.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Advisor: Yulieth Jiménez Manjarrés, Doctorado en Ingeniería (Ing.Eléctrica, Electrónica, Gestión y Desarrollo). Co Advisor: César Antonio Duarte Gualdrón, Phd in Electrical and Computer Engineering.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la demanda de energía eléctrica aumenta más rápido que su producción ¹. Mantener el equilibrio entre demanda y oferta requiere altas inversiones en infraestructura para la generación, diseños nuevos que vayan acorde a los aspectos geográficos de las instalaciones eléctricas, entre otros. Por lo tanto, se ha planteado una solución, la cual, es proporcionar estrategias para conocer con detalle el consumo de energía eléctrica en una casa o edificación residencial. Una de esas estrategias consiste en monitorizar la carga para estimar el estado actual de los dispositivos, y así suministrar información que motive cambios en los hábitos de consumo energético de los usuarios. Existen estudios en donde se muestra una reducción alrededor del 10 % al 15 % en el consumo de energía residencial debido a la aplicación de mejores estrategias de gestión de la energía eléctrica ^{2 3}. Cabe resaltar que el sector residencial contribuye alrededor de un 40 % en el consumo total de energía en Colombia.

La monitorización avanzada de carga es una aplicación de redes inteligentes (Smart Grids) cuyo propósito es obtener automáticamente información detallada sobre los dispositivos en el hogar. Los sistemas que realizan esta tarea consisten en etapas

¹ JIMÉNEZ Yulieth y col. "Characterization of current switching transients for appliance identification". En: *Renewable Energy and Power Quality Journal* 1.13 (2015), págs. 184-189. DOI: 10.24084/repqj13.276.

² CALA H. y col. "Efecto de una distorsión de onda achatada sobre un sistema de identificación de cargas basado en características extraídas a través de la transformada de Fourier fraccionaria". En: *Simposio Internacional Sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL*. 2017, págs. 1-7.

³ JIMÉNEZ Yulieth y col. "Steady state signatures in the time domain for nonintrusive appliance identification". En: *Simposio Internacional Sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL* 35.1 (2015), págs. 58-64. DOI: 10.15446/ing.investig.v35n1Sup.53619.

de detección, procesamiento y visualización ⁴ y se clasifican en dos tipos: **monitorización intrusiva de carga (ILM - Intrusive Load Monitoring)** y **monitorización no intrusiva de carga (NILM - Non-Intrusive Load Monitoring)**. Con un sistema ILM se obtiene el consumo individual de carga mediante múltiples sensores acoplados en los puntos de conexión de los electrodomésticos, teniendo información individual de alta precisión, con la desventaja de tener costos altos de instalación y mantenimiento. Por otro lado, con un sistema NILM se requiere un sensor conectado a la red eléctrica en el circuito principal y a través de algoritmos se busca identificar los consumos individuales de los electrodomésticos, por consiguiente, posee un menor costo pero se tiene una mayor complejidad computacional ⁵. Gracias al progreso en el procesamiento de señales y a la visión de una red inteligente con una alta penetración de aplicaciones informáticas, NILM se ha convertido en un gran campo de investigación.

Un sistema NILM se basa en información conocida de las cargas y en las mediciones en un punto de la red para proceder con el proceso de identificación de cargas. Por lo tanto, se hace necesario contar con una base de conocimiento a partir de mediciones. En el Laboratorio de Integración Energética de la Universidad Industrial de Santander se realizan mediciones para el área de NILM con un sistema de adquisición de datos no automatizado, esto hace que el tiempo de toma de datos se extienda demasiado, retrasando a los investigadores para obtener información de utilidad. Por esto resulta pertinente formular la pregunta, ¿Es posible disminuir el

⁴ JIMÉNEZ Yulieth y col. "Nonintrusive load monitoring for awareness of residential electricity consumption". En: *Cuartas Jornadas de la Red Iberoamericana de Generación Distribuida y Microredes Eléctricas Inteligentes - RIGMEI*. Bucaramanga, Colombia, 2016, págs. 1-4.

⁵ ZOHA Ahmed y col. "Non-intrusive Load Monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey". En: *Sensors (Switzerland)* 12.12 (2012), págs. 16838-16866. DOI: 10.3390/s121216838.

tiempo en el proceso de la adquisición de datos y discriminar de manera eficiente la información de utilidad?. Así, en el presente trabajo se diseña un sistema automatizado que permite resolver el problema que tienen los investigadores al momento de adquirir los datos necesarios para realizar los análisis de su investigación.

El diseño de dicho sistema se realiza bajo las directrices o requerimientos presentados por los investigadores del Laboratorio de Integración Energética del Parque Tecnológico Guatiguará, integrando herramientas importantes del laboratorio como lo son, la Chroma 61511 y las tarjetas de adquisición de datos NI 9225, NI 9227, NI9239, NI cDAQ-9172, por medio del software LabVIEW, sobre el cual se desarrolla una interfaz gráfica con la que el usuario interactúa, de tal manera que pueda programar en el tiempo las diferentes pruebas y registrar los datos para su investigación. Adicionalmente, se incorpora un subsistema con el módulo ESP32-WROOM32, para realizar la manipulación de las señales digitales generadas por el software LabVIEW como señales eléctricas y de esta forma controlar los accionamientos o relés de estado sólido para abrir o cerrar los caminos de corriente a través del circuito.

1. JUSTIFICACIÓN

La investigación es una tarea que permite el desarrollo de nuevas tecnologías y es indispensable para el avance de la civilización en futuros cercanos y lejanos ⁶. Adicionalmente, la investigación es uno de los pilares mas importantes para un país y se hace necesario implementar estrategias para impulsarla y en especial, reducir el tiempo en el que se obtienen resultados, permitiendo el ahorro de recursos.

En el Laboratorio de Integración Energética en el Parque Tecnológico de Guatiguará se realizan mediciones de calidad de la energía, de conexión y desconexión de diferentes cargas utilizadas en las redes eléctricas domésticas. Actualmente, estas mediciones requieren centenas de repeticiones para conformar bases de datos que permitan a los investigadores del área NILM construir y validar sus algoritmos. Además, la configuración y ejecución de estas mediciones se hacen en forma manual. Por lo tanto, existe la necesidad de reducir los tiempos de toma de datos, mejorar la precisión de las mediciones y eliminar el tedio asociado al trabajo manual, facilitando las labores de investigación. En este proyecto se propone el diseño de un sistema que provea una solución a esta necesidad. El diseño se valida por medio de simulación, el cual presenta un reto al integrar cada una de las etapas que conforman el sistema, como lo son la Chroma 61511 (etapa de potencia), las tarjetas NI (etapa de medición), el sistema embebido y plataforma de control (etapa de control) y el relé de estado solido (accionamiento), ya que cada etapa posee parámetros que se deben tomar en consideración al momento de ser integrados.

⁶ NOGUERA Jose Angel. "Sistema de diálogo basado en mensajería instantánea para el control de dispositivos en el Internet de las cosas". Tesis doct. Departamento de Informática y Sistemas. Universidad de Murcia, 2016.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar un sistema de automatización para la adquisición de datos del Laboratorio de Integración Energética del Parque Tecnológico Guatiguará, para aplicaciones de monitorización no intrusiva de carga (NILM).

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema embebido que permita mejorar la precisión en el proceso de adquisición de datos de las curvas de tensión y corriente con diferentes cargas en términos de tiempo, automatizando las rutinas de conexión y desconexión entre fuente y carga;
- Diseñar una interfaz de LabVIEW para la adquisición de datos dedicada al estudio de monitorización no intrusiva de carga, compatible con la Chroma 61511 y con las tarjetas NI 9225, NI 9227, NI 9239, NI cDAQ-9172;
- Simular la integración del relé de estado sólido, el sistema embebido y la interfaz de LabVIEW, para que operen de forma conjunta.

3. METODOLOGÍA

Con este trabajo se busca diseñar un sistema de automatización para la adquisición de datos en mediciones de tensión y corriente, de modo que con una herramienta sencilla, modular y escalable el usuario adquiera de una manera rápida, efectiva y confiable los datos necesarios para su investigación. La metodología para lograrlo consta de las siguientes etapas las cuales se representan gráficamente en la Figura 1.

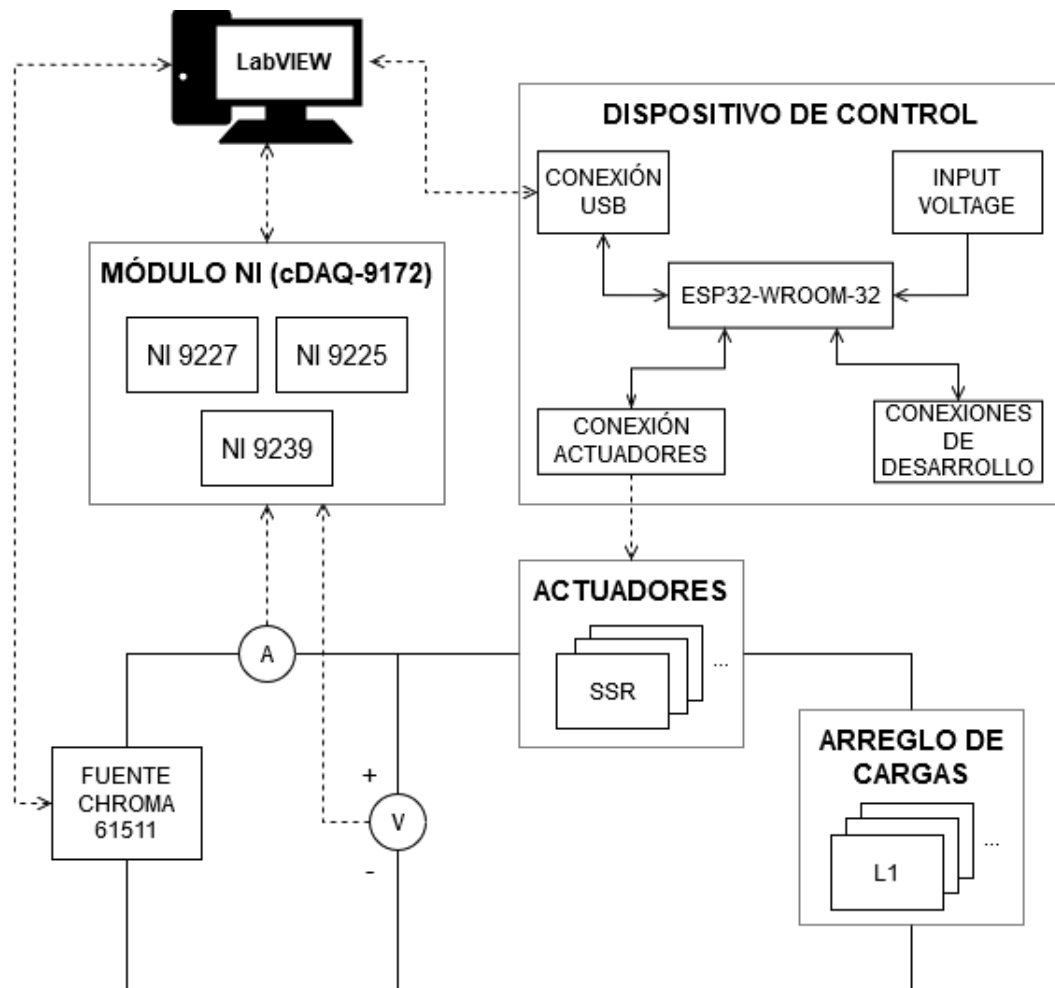
Diseño de los Actuadores: Teniendo como primer requerimiento la precisión en cuanto a intervalos de tiempo de entrada y salida de operación de las cargas para la toma de datos, se integran al sistema relés de estado sólido (SSR) debido a sus óptimas características de funcionamiento.

Diseño del Dispositivo de Control con ESP32-WROOM-32: Para un buen funcionamiento del SSR es necesario un dispositivo que genere las señales de activación para el cierre o apertura de este. Además, se deja abierta la opción de incorporar más sensores para la adquisición de datos, los cuales se pueden agregar por medio de las conexiones de desarrollo y sus datos pueden ser enviados a la plataforma de control para visualizarlos y/o almacenarlos.

Diseño de la plataforma de control: La sincronización de los diferentes subsistemas que operan en la adquisición de los datos es de vital importancia. Para esto se diseña sobre el software LabVIEW, una interfaz que controle los subsistemas e integre la fuente Chroma 61511 y las tarjetas de adquisición de datos NI 9225, NI 9227, NI 9239 y NI cDAQ-9172.

Simulación del funcionamiento de los subsistemas: Los diferentes subsistemas, como el sistema embebido y la plataforma de control, poseen una serie de pará-

Figura 1. Diagrama del sistema de automatización para la adquisición de datos.



Fuente: Imagen generada por los autores.

metros de entrada y salida que pueden ser conocidos. Por lo tanto, la simulación permite comprobar que el diseño obtiene buenos resultados antes de una posterior implementación. En primer lugar, la simulación de los subsistemas de la plataforma de control y el sistema embebido, se simulan con la ayuda de LabVIEW teniendo en funcionamiento una ESP32 (sistema embebido) conectada al computador. En segundo lugar, el SSR se simula con ayuda del software Cadence Orcad Capture/PSpice. Cabe resaltar y aclarar que no es posible hacer la simulación simultánea-

mente debido a que son software distintos.

Se aclara que el proyecto se basa en la mejora de un proceso de medición en un ambiente de laboratorio. Por lo tanto, se diseñará un prototipo funcional que cumpla principalmente con las características anteriormente nombradas. Sin embargo, el sistema se deja abierto a actualizaciones o a posibles adiciones de módulos de medición, los cuales no hacen parte del objetivo principal de este proyecto.

4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos y las características de los dispositivos que se utilizan en el desarrollo del proyecto. Al inicio, se parte con la definición del término monitorización de carga junto con el contexto histórico. Además se describe el funcionamiento de los sistemas de monitorización intrusivo y no intrusivo de carga. Por otro lado, se expone el sistema actual que se utiliza en el Laboratorio de Integración de Energética del Parque Tecnológico Guatiguará junto con las características de los instrumentos que se encuentran allí. Por último, se presentan los dispositivos con las características principales para el diseño del sistema que se propone en este trabajo.

4.1. MONITORIZACIÓN DE CARGA

La monitorización de carga es un proceso de adquisición de las mediciones de cargas en un sistema de potencia. Este concepto se ha utilizado en diversas aplicaciones tales como en seguridad, detección de fallas y caracterización de la demanda ⁷.

Para algunos países el crecimiento en el consumo de energía eléctrica ha llegado a ser un asunto muy delicado ⁸, debido a que ese aumento en la demanda abre la posibilidad de un desabastecimiento, por lo tanto, impulsa la búsqueda de alternativas de suministro e incluso obliga a reducir la demanda ¹. La opción más económica y

⁷ MARCHESONI Franco, MARIÑO Camilo y MASQUIL Elías. "Monitoreo no intrusivo de cargas eléctricas (NILM) Memoria". Tesis doct. 2020.

⁸ DUARTE Cesar A., PETIT Johann y CARRILLO Gilberto. "Residential appliance identification through discriminant analysis classifiers". En: *UIS Ingenierías, Revista de la Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas* (2015), págs. 1-9.

amigable con el medio ambiente además de los avances en las fuentes de energía renovables, es la gestión o control del uso de la energía por parte del usuario final para lograr una reducción en la demanda. Algunos estudios muestran que es posible una disminución entre un 10 % a un 15 % en el consumo de energía residencial aplicando mejores estrategias de gestión de la energía eléctrica ².

Desde hace más de dos décadas, ya se planteaba la idea de desarrollar métodos para un dispositivo de monitorización de carga que en el idioma inglés se denomina **Appliance Load Monitoring (ALM)** ⁹. El objetivo de ALM es realizar la detección y proporcionar la información detallada de la energía consumida, lo cual permitiría que los sistemas automatizados de gestión energética perfilen los dispositivos que consumen más energía, por medio del diseño de estrategias de conservación de energía, como la reprogramación de las operaciones que demandan mucha potencia para las horas de menor actividad. Adicionalmente, las empresas podrían desarrollar una mejor comprensión de la relación entre los electrodomésticos y sus patrones de uso. Por otro lado, ALM es un requisito previo esencial para proporcionar retroalimentación energética a los consumidores residenciales, pero es igualmente beneficioso para el sector industrial debido a su aplicabilidad en la detección de fallas y los servicios de monitoreo de carga remota ⁵.

Aunque el concepto de ALM tiene décadas de antigüedad, últimamente se ha visto un creciente interés en esta área de investigación inspirada en avances paralelos en tecnología de detección, comunicación de datos y redes, inteligencia artificial y métodos de aprendizaje automático. Para las tecnologías de detección e identificación del consumo individual de los dispositivos conectados a la red eléctrica existen dos

⁹ HART George W. "Nonintrusive Appliance Load Monitoring". En: *Proceedings of the IEEE* 80.12 (1992), págs. 1870-1891. DOI: 10.1109/5.192069.

enfoques principales:

- **Intrusivo:** Se conoce como el sistema de monitoreo de carga tradicional y de enfoque multisensor, debido a que se requiere instalar sensores dedicados a cada carga de interés de tal forma que supervisa el consumo de energía y otras actividades. Luego los datos se recopilan a través del sistema central utilizando plataformas de comunicación ^{4 10}.
- **No Intrusivo:** Es el sistema de monitoreo de carga en el que se toman las mediciones en un solo punto de la instalación eléctrica para registrar el funcionamiento de un grupo de cargas ⁴.

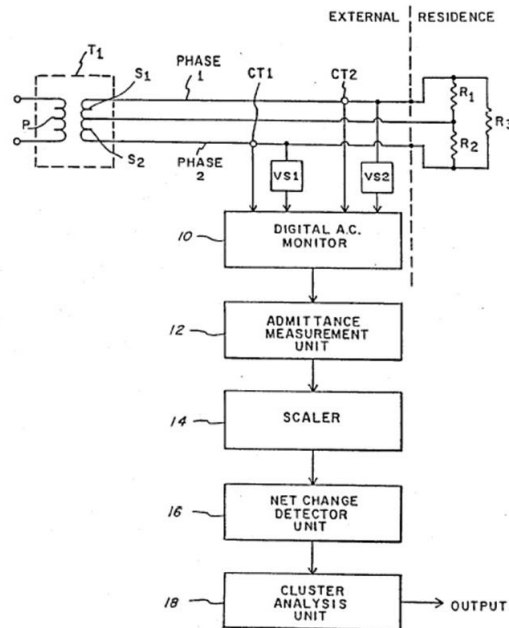
A continuación, se hace una profundización en cada uno de los sistemas anteriormente nombrados, en donde se confirmara que el mejor sistema por facilidad de mantenimiento, bajos costos y simplicidad de instalación sera el sistema no intrusivo de carga.

4.1.1. Intrusive Load Monitoring (ILM) La monitorización intrusiva de carga ILM, es el proceso por el cual se analiza la componente de una señal correspondiente, según las cargas que se encuentren conectadas al punto de potencia. Para este proceso se integran uno o mas sensores para cada una de las cargas que desean ser analizadas. Este proceso individual de análisis de cargas es de alta precisión, pero conlleva consigo altos costos de instalación, infraestructura y mantenimiento, haciendo que a pesar de ser preciso sea ineficiente para realizar una monitorización constante en el sistema y en ocasiones insostenible para sistemas a gran escala ^{4 10}.

¹⁰ ISİYAKU Abubakar y col. "An overview of Non-intrusive load monitoring methodologies". En: *Energy Conversion (CENCON)*. Johor Bahru, Malaysia, 2015, págs. 54-59. DOI: 10.1109/CENCON.2015.7409513.

4.1.2. Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) La monitorización no intrusiva de carga NILM, es un proceso para analizar las señales correspondientes de tensión y corriente de una línea de potencia asociado con cada una de las cargas conectadas a ella, ya que estas generan una componente de onda específica que puede ser desagregada de la forma de onda inicial, sea de la onda de tensión o de corriente, suministrando con esto una parte importante de información acerca del consumo de cada equipo. Uno de los primeros trabajos que hablaron a cerca de NILM fue Hart, G. W. en su trabajo Nonintrusive Appliance Load Monitoring. Proceedings en 1992⁹, en donde además de presentar la teoría y las características del sistema, también da a conocer las diferentes aplicaciones que se le pueden dar. Por otro lado, como una de las referencias del trabajo, se tiene la primer patente del esquema básico de NILM, este esquema se presenta en la Figura 2.

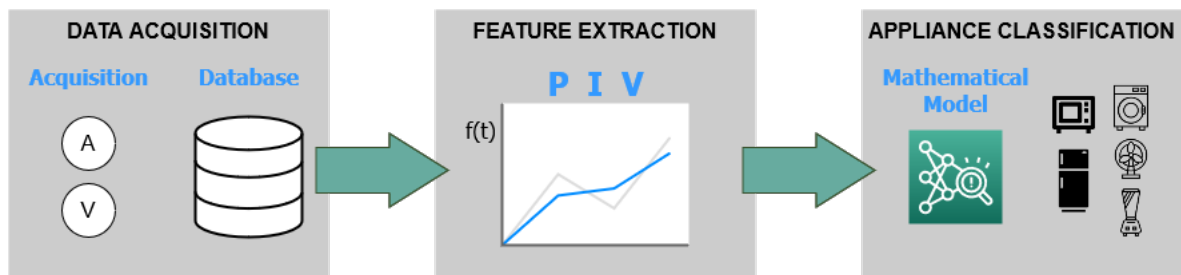
Figura 2. Esquema básico de monitorización no intrusiva de carga NILM.



Fuente: Tomado de HART George W. "Nonintrusive Appliance Load Monitoring". En: *Proceedings of the IEEE* 80.12 (1992), págs. 1870-1891. DOI: 10.1109/5.192069

Actualmente, un sistema NILM involucra básicamente tres etapas, la primera etapa corresponde a la adquisición de datos y construcción de bases de datos (*Data Acquisition*), en la segunda etapa se encuentra la extracción de características para calcular firmas de carga (*Feature Extraction*) y por último en la tercera etapa se aplica la clasificación de dispositivos por medio de modelos matemáticos (*Appliance Classification*) ¹¹. En la Figura 3 se puede ver una representación gráfica del orden de este proceso.

Figura 3. Proceso básico adquisición de datos NILM.



Fuente: Imagen generada por los autores basada en CORTES Jose D., JIMÉNEZ Yulieth y DUARTE Cesar A. "Reasoner design based on HYPO for classification of lighting loads". En: *2016 21st Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision, STSIVA 2016*. Bucaramanga, 2016. DOI: 10.1109/STSIVA.2016.7743336

Los sistemas NILM se han convertido en un gran campo de investigación en los últimos años, debido a los grandes avances en el procesamiento de señales y a la visión de red inteligente con una alta penetración de aplicaciones informáticas. Por otro lado, el requerimiento de procesos computacionales de alta complejidad ha facilitado a que cada día se busquen mejores soluciones para la etapa de procesamiento, soluciones como machine learning y deep learning.

¹¹ CORTES Jose D., JIMÉNEZ Yulieth y DUARTE Cesar A. "Reasoner design based on HYPO for classification of lighting loads". En: *2016 21st Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision, STSIVA 2016*. Bucaramanga, 2016. DOI: 10.1109/STSIVA.2016.7743336.

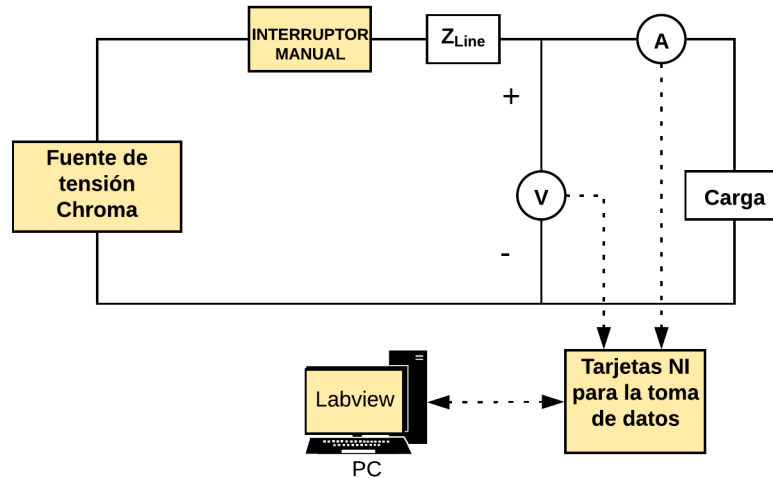
4.1.3. Sistema de Adquisición de Datos NILM en Laboratorio de Integración de Energética del Parque Tecnológico Guatiguará

Actualmente en este laboratorio se cuenta con un sistema de adquisición de datos enteramente manual, en donde el usuario necesariamente tiene que intervenir en cada una de las etapas del proceso. Esto hace que el tiempo para adquirir los datos necesarios y llevar a cabo las investigaciones sea innecesariamente extenso.

Como se aprecia en la Figura 4, el esquema consta de la Chroma 61511, un interruptor que tiene que ser accionado por el usuario manualmente, un código LabVIEW generado por el usuario para la toma de datos a través de las tarjetas de National Instruments (NI 9225, NI 9227, NI 9239 y NI cDAQ-9172). Lo anterior, conlleva a que el investigador al tomar datos de forma repetitiva tenga que intervenir de forma directa en cada una de las iteraciones, haciendo el trabajo extenso, tedioso e incluso impreciso, ya que no se tiene control del punto específico en el que se acciona el interruptor y no se puede controlar el punto en el que se inicia a registrar los datos en memoria. Por tanto, este proceso hace que se acumulen datos innecesarios para la investigación o se pierdan datos importantes al no tener control del momento idóneo del registro de los mismos.

Fuente Chroma 61511 La Chroma 61511 es la fuente industrial programable usada para simular la red eléctrica, con la ventaja de que es posible manipular múltiples parámetros de la señal, con salida de potencia de hasta 12KVA, un intervalo de tensión comprendido entre 0-150V/0-300V/Auto, frecuencia DC, y frecuencias desde 15Hz hasta 1500Hz, monofásica o trifásica, ajuste de la velocidad de respuesta programable para cambiar el nivel de tensión y la frecuencia. Cuenta con Tensión programable y límite de corriente, alta producción de factor de cresta de la corriente, ideal para pruebas de corriente de entrada, control de ángulo de fa-

Figura 4. Esquema del sistema actual de adquisición de datos.



Fuente: Imagen generada por los autores

se, señal TTL que indica transitoria de salida, funciones de lista, pulso, modo de paso para probar la línea eléctrica de perturbaciones (PLD) de simulación, caídas de tensión, interrupciones cortas y simulación de la variación de voltaje, armónicos, inter-armónicos de onda sintetizador, y amplia capacidad de medida, incluyendo los armónicos de corriente, interfaces programables analógicas, interfaz remota GPIB, RS-232, USB y Ethernet, con capacidad para suministrar potencia de salida de hasta 90KVA mediante la implementación de la operación en paralelo maestro-esclavo con otras fuentes Chroma asociadas.

Tarjetas de adquisición de datos National Instruments

En el laboratorio se cuentan con tarjetas especializadas para la adquisición de datos de National Instruments:

- La NI 9225 contiene un módulo de entrada de tensión de 3 canales que realiza una entrada analógica diferencial, cuenta con un amplio rango de medición ideal para aplicaciones con valores de tensión residenciales, monitoreo de calidad de energía, prueba de motores, pruebas a pilas de batería y pruebas a

Figura 5. Imagen ilustrativa fuente Chroma 61511.



Fuente: Tomado de CHROMAUSA. *High power programmable AC source 61510*. Datasheet. 2020

celdas de combustible, además, puede evitar bucles de tierra y agregar seguridad a un sistema con aislamiento de canal a canal de 600 Vrms ¹².

- La tarjeta NI 9227 es un módulo de Entrada de Corriente de la Serie C, con una frecuencia de muestreo de 50 kS/s por canal, con una corriente 5Arms, con un ADC de 24 Bits de 4 Canales. Ésta proporciona medidas de alta precisión para cumplir con las demandas de las aplicaciones de adquisición de datos y de control, incluye filtros anti-aliasing integrados, tiene la capacidad de medir el consumo de potencia y energía para pruebas en dispositivos electrónicos, además de esto permite medir factores importantes de calidad como ruido, frecuencia y armónicos ¹³.
- La tarjeta NI 9239 es un módulo de Entrada de tensión de la Serie C, con un rango de tensión de ± 10 V, una velocidad de muestreo de 50 kS/s por canal, un ADC de 24 Bits de 4 Canales de entrada Simultánea. La tarjeta realiza una entrada analógica diferencial, con aislamiento entre canales y contiene una protección contra picos de voltaje perjudiciales dentro de un rango de

¹² NATIONAL INSTRUMENTS. *Model NI-9225-R*. Datasheet. 2020.

¹³ NATIONAL INSTRUMENTS. *Model NI-9227-R*. Datasheet. 2020.

aislamiento ¹⁴.

- NI cDAQ-9172 es un chasis CompactDAQ USB, de 8 Ranuras, este chasis proporciona conectividad USB para sistemas de medidas de sensores pequeños y portátiles, cuenta con la funcionalidad plug-and-play de USB para conectar medidas eléctricas y de sensores, ayuda a controlar la temporización, la sincronización y la transferencia de datos entre módulos de E/S de la Serie C y un servidor externo. Este chasis se usa con una combinación de módulos de E/S de la Serie C para poder realizar diversas medidas analógicas y digitales. Cuenta con cuatro contadores y temporizadores de uso general de 32 bits, con varios motores de temporización, permite ejecutar cuatro operaciones simultáneamente y temporizadas por hardware con tres velocidades independientes para entrada analógica ¹⁵.

Conforme a el diagrama que se presenta en la Figura 1 se utilizan determinados dispositivos, los cuales cumplen una tarea en específico de acuerdo con las características que presentan. Por lo tanto, en las siguientes secciones se hace una descripción de cada uno.

4.2. MÓDULO ESP32-WROOM-32

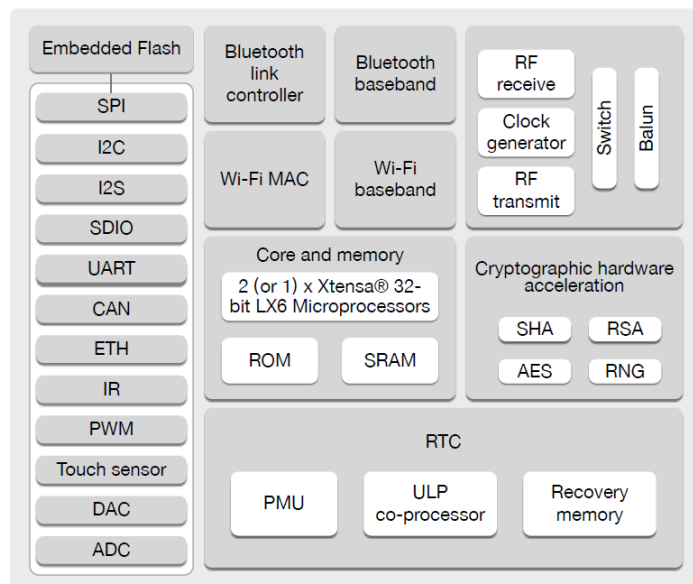
El ESP32-WROOM-32 es un módulo que cuenta con el SoC (System On a Chip) ESP32 que integra un potente microcontrolador con una arquitectura de 32 bits (Xtensa 32-bit LX6). Por otro lado, es un modulo de bajo costo que permite ser usado en multitud de aplicaciones que requieren conectividad Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth

¹⁴ NATIONAL INSTRUMENTS. *Model NI-9239-R*. Datasheet. 2020.

¹⁵ NATIONAL INSTRUMENTS. *Model CDAQ-9172-R*. Datasheet. 2020.

LE y comunicación serial. El uso de Wi-Fi garantiza la conectividad dentro de un amplio radio, mientras que el uso de Bluetooth permite al usuario detectar fácilmente un módulo y conectarlo a un teléfono inteligente. En la Figura 6 se presenta todas las funcionalidades que puede tener este módulo ¹⁶.

Figura 6. Diagrama de bloques funcional ESP32-WROOM-32.



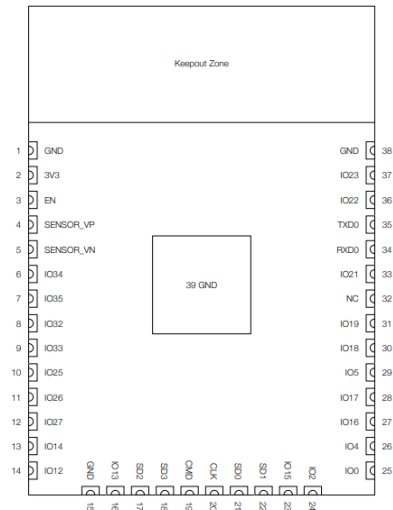
Fuente: Tomado de ESPRESSIF SYSTEMS. *Datasheet: ESP32 Series*. Datasheet. 2019

Cuenta con 38 pines como se muestra en la Figura 7. Adicionalmente, cuenta con interruptores de antena integrados, balun de RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de administración de energía, que agregan funcionalidad y versatilidad a aplicaciones con unos requisitos mínimos de PCB, así como un amplio rango de temperatura de funcionamiento comprendido entre -40°C a 105°C, y son adecuados para el desarrollo de aplicaciones comerciales con un diseño robusto de 4 capas que cumple totalmente con FCC, CE-RED, SRRC,

¹⁶ ESPRESSIF SYSTEMS. *Datasheet: ESP32 Series*. Datasheet. 2019.

IC, Estándares KCC y TELEC.

Figura 7. Esquemático general de los pines asociados al módulo ESP32-WROOM32.



Fuente: Tomado de ESPRESSIF SYSTEMS. *Datasheet: ESP32 Series*. Datasheet. 2019

4.3. RELÉ

Relé se define como un dispositivo de conmutación que se activa por medio de señales eléctricas de baja potencia: voltaje, corriente o ambas ¹⁷. Está formado por tres etapas, la primera etapa corresponde al circuito de control, la segunda etapa es el circuito de acoplamiento y la tercera etapa es el circuito de salida para conectar la carga. El funcionamiento es análogo al de un interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando una pequeña corriente es aplicada en los terminales del circuito de control.

¹⁷ CHISAGUANO ÁVILA Mónica Janeth. "Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Relé De Estado Sólido Microcontrolado Supervisor De Voltaje Trifásico Para Protección De Cargas Eléctricas De Baja Potencia". 2005, pág. 244.

Los relés se clasifican de acuerdo a su construcción y principio de operación, existen de dos tipos, los relés electromecánicos y relés de estado sólido. En las siguientes secciones se hace una descripción más a fondo de cada uno.

4.3.1. Relés Electromecánicos Están formados por una bobina y contactos. Este tipo de relés se utilizan en los dominios de la corriente alterna y corriente continua. Su funcionamiento básicamente se debe a un campo magnético que se produce en la bobina al aplicarle un voltaje como señal de control, lo que produce que los contactos se cierren o se separen. En promedio el tiempo de apertura y cierre de los contactos está en el orden de los 15 a 20 milisegundos (ms) ¹⁷.

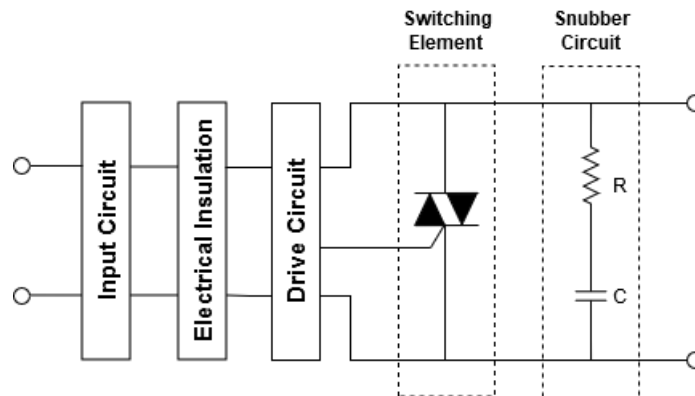
4.3.2. Relés de Estado Sólido Conocidos también como SSR gracias a sus siglas en inglés Solid State Relay ¹⁸ aunque posee varios nombres, esto depende de la empresa que los fabrica o de los proveedores. Están contruidos por un sensor que responde a una entrada apropiada (señal de control), un interruptor electrónico de estado sólido (TRIAC, MOSFET de potencia, tiristores o SCR), por último, se encuentra generalmente un optoacoplador que permite el aislamiento entre la etapa de control y la etapa de alta potencia. Este tipo de relé puede ser diseñado para conmutar corriente alterna o continua en dependencia de la aplicación para su uso. Su funcionamiento parte del circuito de control encendiendo un LED interno que activa un diodo fotosensible que a su vez activa el interruptor de estado sólido en el circuito de carga o de salida.

Los SSR poseen unas etapas predefinidas para su diseño, tal cual como se dijo

¹⁸ SOTO Carlos y MONTAÑA Gilbert. "Diseño de un dispositivo de estado sólido para la desconexión y reconexión remota del servicio eléctrico de los usuarios de corpoelec". 2015, pág. 126.

anteriormente. A continuación, se hace una corta visualización (Figura 8) y descripción.

Figura 8. Estructura interna de un relé de estado sólido.



Fuente: Tomado de SCHWEBER Bill. *Aspectos básicos de los relés de estado sólido DigiKey*. [Sitio Web]. 2019. Disponible en: <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-safely-and-efficiently-switch-current-or-voltage-using-ssrs>

- **Circuito de Entrada (Input Circuit):** Corresponde con el circuito de baja potencia que controla el accionamiento del circuito de salida o de alta potencia.
- **Aislamiento eléctrico/galvánico (Electrical Insulation):** Generalmente se encuentra un acoplamiento óptico con semiconductor también llamado optoacoplador. Su funcionamiento es el siguiente, hay un LED en la entrada y un foto-transistor en el parte de la salida, separados por un camino óptico del orden de milímetros. Cuando el LED está energizado, los fotones que éste genera dan energía al foto-transistor, el cual, después toma el modo conductor, esto permite que la corriente fluya a través de la carga, lo anterior corresponde al estado de encendido. Por otro lado, cuando el LED está apagado, el foto-transistor está en el modo apagado o no conductor, por lo tanto, aparece un

circuito abierto el cual no es perfecto ¹⁹.

Dependiendo del nivel de tensión y de corrientes que se manejara en la salida del SSR se puede optar por el uso de un SCR o Triodo, o en su defecto para corriente AC un TRIAC del tipo fotosensible, reemplazando el foto-transistor por uno de ellos.

- **Detector paso por cero (Drive Circuit):** Este se encuentra en algunos modelos de SSR, y su función es hacer que el SSR opere cuando la tensión de la carga (AC) se acerque o alcance el nivel cero.
- **Circuito de salida (Switching Element):** Cuando se tiene una salida del tipo AC se puede utilizar tiristores anti-paralelos o TRIACS. Por otro lado, al tener una salida del tipo DC se puede hacer uso de transistores bipolares o MOSFET.
- **Protección frente a transitorios (Snubber Circuit):** Es un circuito que posee como función principal suprimir los picos de voltaje y amortiguar la oscilación transitoria provocada por la inductancia del circuito cuando se abre un interruptor. El circuito más utilizado y popular es el snubber del resistor-capacitor (RC). El diseño adecuado de este circuito aporta mayor fiabilidad, mayor eficiencia y menor interferencia electromagnética (EMI) ^{20 21}.

Al momento de tomar la decisión de elegir un SSR, es importante tener en cuenta varios aspectos, tales como: las especificaciones de tensión y corriente de la en-

¹⁹ SCHWEBER Bill. *Aspectos básicos de los relés de estado sólido DigiKey*. [Sitio Web]. 2019.

²⁰ FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *Resistor-Capacitor (RC) Snubber Design for Power Switches*. [Sitio Web]. 2014.

²¹ CARRIÓN P. Pedro y MORALES G. Pedro. "Diseño de redes snubbers mediante técnicas de optimización, para la protección de tiristores contra sobretensiones". En: *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería* 10.2 (1994), págs. 111-124.

trada, el tipo de carga a conectar del mismo modo que la corriente y tensión en ella, la temperatura ambiente de funcionamiento, el encapsulado y el tipo de conexión ²². Por otro lado, los SSR son muy sensibles a las perturbaciones y transitorios eléctricos, así como a las sobrecargas en tensión y en corriente. Los fenómenos transitorios puede ser originados por ruido electromagnético o eléctrico conducido por los hilos de la red de alimentación. Para prevenir estos fenómenos es primordial dimensionar correctamente el SSR con relación a su aplicación, para explotar así el conjunto de las características del SSR con un margen de seguridad suficiente.

Protecciones para el SSR a la entrada Como se dijo al inicio de la sección, un SSR puede trabajar en los dos dominios de corriente, de modo que las protecciones se diseñan para cada uno:

- **Relés con entrada DC:** Para estos relés se utiliza un diodo en anti-paralelo para prevenir una inversión accidental de la polaridad, y una resistencia en serie para limitar la corriente que fluya por el opto-acoplador y mantener las condiciones óptimas de funcionamiento. Para el caso de las sobre-tensiones eventuales se conecta un diodo zener en paralelo con la entrada. Generalmente, estos dos elementos vienen integrados dentro del SSR.
- **Relés con entrada AC:** En este tipo de relés principalmente se diseña una protección para las sobre-tensiones eventuales, el procedimiento es conectar una red RC o en su defecto un varistor.

Adicionalmente, en algunas ocasiones un ruido aplicado en la entrada del SSR puede provocar un mal funcionamiento y la solución que dan algunos fabricantes es colocar una red RC que se puede determinar de acuerdo al ruido que se tenga;

²² OMRON ELECTRONICS SA. *Relés de Estado Sólido SSRs*. Guía Rápida, corporativo. 2001.

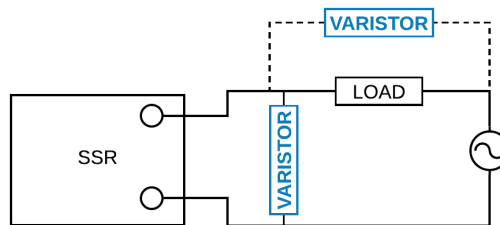
puede ser pulso de ruido o ruido inductivo que es generado por equipos de alta frecuencia ²².

Protecciones para el SSR a la salida En este caso las protecciones dependen del tipo de carga que se conecte, debido a factores que se presentan como sobre-temperatura, sobre-intensidad, cortocircuito y de variaciones bruscas en la tensión. Por lo tanto, de acuerdo con la literatura se utilizan los siguientes elementos como soluciones de protección del SSR.

- **Disipador de calor:** El SSR al tener una resistencia de salida que depende directamente del semiconductor utilizado, produce un calentamiento que hay que disipar y limitar de manera que el valor total de la temperatura no debe sobrepasar la temperatura máxima de la unión del semiconductor, ya que esto podría causar su destrucción.
- **Fusibles:** Para sobrecargas y cortocircuitos es recomendable utilizar fusibles en serie con la carga. En el caso de corrientes de cortocircuito se recomienda utilizar un fusible ultra-rápido de un valor I^2t (corriente máxima soportada por el semiconductor) inferior al del relé, y en el caso de sobrecarga un fusible de $1,1I_n$ (Corriente nominal de carga).
- **Red Snubber:** Esta protección se encarga de suprimir los picos de voltaje y amortiguar la oscilación transitoria provocada por la inductancia del circuito cuando se abre el interruptor. Al colocar una red RC en la salida se limita el gradiente del voltaje respecto al tiempo y se limita la amplitud de este impulso parásito. Por otro lado, se genera un gran inconveniente debido a que la corriente de fuga del relé aumenta.
- **Varistor:** Un varistor varia su impedancia dependiendo de la tensión que tenga entre sus bornes. Se presentan dos situaciones, la primera sucede cuando la

tensión entre sus bornes es inferior a su valor nominal por consiguiente su impedancia es muy elevada; y la segunda situación se presenta cuando la tensión es superior a la tensión nominal, su impedancia se hace rápidamente inferior a $1[\Omega]$. La ubicación del varistor es normalmente en paralelo con el elemento que se quiere proteger. (Figura 9)

Figura 9. Ejemplo de conexión de un varistor como protección del SSR.



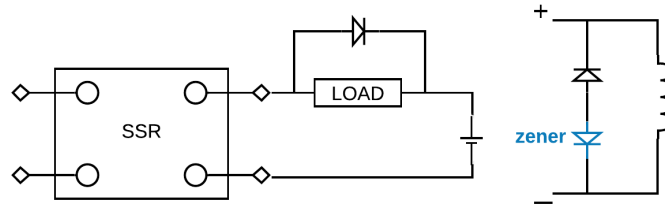
Fuente: Tomado de OMRON ELECTRONICS SA. *Relés de Estado Sólido SSRs*. Guía Rápida, corporativo. 2001

Al igual que para las protecciones a la entrada, los SSR dependiendo de su diseño o aplicación pueden trabajar con cargas en DC. Por lo tanto, cuando la carga es una inductancia se utiliza un diodo en paralelo con la carga, eliminando las sobretensiones y absorbiendo la fuerza electromotriz. Al utilizar este método surge un retardo en la desconexión, el cual se puede solucionar al conectar un diodo seguido de un diodo zener juntos en paralelo con la carga esta conexión se muestra en la Figura 10.

4.3.3. Comparación entre relés electromecánicos y de estado sólido Es importante conocer las características en las que se impone un tipo de relé sobre el otro, y tener conocimiento de las deficiencias que posee cada uno de los relés, en la Tabla 1 se presentan las ventajas y desventajas de los dos tipos de relés.

En base con las características que se exponen en la Tabla 1 y en los requerimien-

Figura 10. Ejemplo de conexión de un varistor como protección del SSR.



Fuente: Tomado de OMRON ELECTRONICS SA. *Relés de Estado Sólido SSRs*. Guía Rápida, corporativo. 2001

Tabla 1. Ventajas y desventajas al utilizar relés electromagnéticos y de estado sólido.

Relé electromagnético	
Ventajas	Desventajas
Económicos en consumo	Baja resistencia a choques y vibraciones
Control indistinto AC y DC	Arcos eléctricos
Gran número de contactos	Baja vida útil
Inmunidad a transitorios	Baja frecuencia de conmutación
-	Ruido acústico
-	Grandes dimensiones para altas potencias
Relé de estado sólido	
Ventajas	Desventajas
Alta frecuencia de conmutación	Entrada muy sensible a perturbaciones
Gran resistencia a choques y vibraciones	Necesidad de protección externa
Funcionamiento silencioso	Sensible a altas temperaturas
Conexión con/sin función de cruce por cero	Sensible a sobre-tensiones
Facilidad de mantenimiento	AC y DC con distintos contactos
Alta vida útil de trabajo	No hay un circuito abierto perfecto
No produce arcos ni rebotes	-

Fuente: Tabla generada por los autores

tos de diseño de los actuadores del sistema de adquisición de datos, se toma la decisión de elegir el relé de estado sólido gracias a su alta frecuencia de conmutación, característica indispensable para esta aplicación. Además, su alta vida útil

de trabajo favorece a que se realice una sola inversión por mucho tiempo. Por otro lado, la no producción de arcos ni rebotes hace que el comportamiento de las curvas en proceso de medición no sufran una afectación considerable, logrando que las mediciones sean en lo posible lo más precisas.

5. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE CONTROL CON EL MÓDULO ESP32-WROOM-32

En este capítulo se presenta el desarrollo del diseño de cada uno de los bloques o etapas que conforman el dispositivo de control. Se parte de la explicación del diseño eléctrico del dispositivo embebido. Del mismo modo, se describe el funcionamiento y las características particulares de cada uno de los elementos que se utilizan. Posteriormente, se muestra el layout para la generación del circuito impreso (PCB - Printed circuit board). Por último, se presenta un modelo de la carcasa donde internamente se ubica la PCB del dispositivo embebido.

5.1. ETAPAS DEL DISEÑO ELÉCTRICO

Como primer requisito, el sistema debe estar monitorizando señales de 60[Hz], es decir que son señales con un periodo de 16.66[ms]. Por lo tanto, el sistema debe procesar datos en un tiempo menor a 15.63[μ s] para garantizar una resolución de 1[V] en términos de amplitud y al mismo tiempo tomar decisiones. Todo esto con el objetivo de que durante las mediciones el investigador pueda tener una buena precisión del instante de tiempo en el que desee iniciar la medición y la adquisición de datos. El segundo requisito es que el sistema se comporte de la misma forma durante largas jornadas de funcionamiento, que pueden ser de horas o días. Entonces, la temperatura del dispositivo se debe mantener por debajo de los 60°C o lo más cercano a este valor, para que el funcionamiento del módulo ESP32-WROOM-32 sea óptimo. Por otra parte, es fundamental mantener una conexión con la plataforma de control (Interfaz de LabVIEW) en el PC, para que haya intercambio de información. Por lo tanto, esta conexión se debe mantener por medio de comunicación USB con el PC para garantizar el envío de las señales de cierre o apertura a cada uno de los

diez relés de estado sólido.

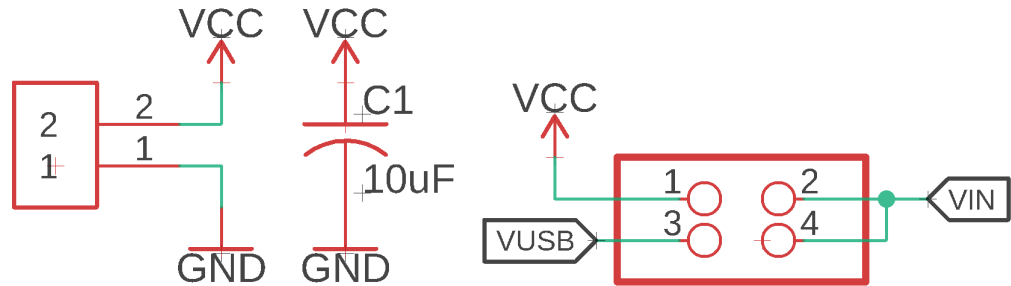
A continuación, se describe el proceso del diseño de cada una de las etapas que compone el esquemático del dispositivo de control.

5.1.1. Etapa de alimentación Como se anuncia en el título de esta sección, el módulo con el que se diseña el dispositivo es el ESP32-WROOM-32. Este módulo opera con una tensión de 3.3[V]. Para este caso, en el diseño se tiene dos opciones de alimentación. En la primera opción, se abre la posibilidad de conectar el dispositivo directamente a la red eléctrica para que por medio de un conversor AC-DC se puedan obtener 5[V] DC. El conversor AC-DC que se utiliza para este proceso, es producido por la empresa CUI INC y su referencia es VSK-S25-5UT ²³. En la Figura 11 la etiqueta *VCC* representa la tensión de salida del conversor AC-DC. Además, hay un capacitor cerámico *C1* de 10[μ F] cuya función es la protección a perturbaciones o a picos de corriente que se puedan presentar.

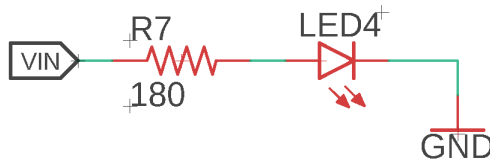
Por otro lado, la segunda opción permite alimentar el dispositivo a través de la conexión USB (etiqueta *VUSB*) que del mismo modo que la primera opción, se pueden obtener los 5[V] DC. Adicionalmente, en esta etapa se encuentra un indicador de conexión o de encendido del dispositivo, que se representa por el nombre *LED4* como se presenta en la Figura 11. En serie se encuentra una resistencia (*R7*) cuya función es limitar la corriente para el buen funcionamiento del LED, esta puede variar entre los valores de 180[Ω] y 250[Ω]. El LED se enciende cuando el usuario por medio de un conector jumper, conecta uno de los pines etiquetados como *VCC* y *VUSB* con los pines de la etiqueta *VIN*.

²³ CUI INC. *Series : VSK-S25-T AC-DC Power Supply VSK-S25 - XXU - T*. Datasheet. 2015.

Figura 11. Esquemático de la etapa de alimentación.



(a) Esquemático alimentación mediante la red. (b) Esquemático alimentación mediante puerto USB.



(c) Esquemático LED indicador.

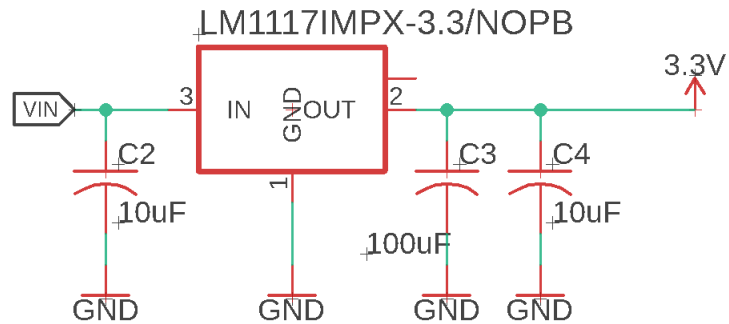
Fuente: Imagen generada por los autores

5.1.2. Etapa de regulación de tensión En esta etapa, se procede a regular la tensión a un nivel de 3.3[V]. Para esto se utiliza un regulador de tensión LM1117 cuyo proveedor es Texas Instruments. De acuerdo con la hoja de datos, el proveedor aconseja que para este tipo de arreglo se debe agregar dos capacitores de tantalio con una capacitancia de 10[μ F], uno en la entrada (*Input Bypass Capacitor*) y el otro a la salida del regulador (*Output Capacitor*)²⁴. En la Figura 12 estos capacitores corresponden a C2 y C4. Por otro lado, en la misma imagen se presenta un capacitor C3 con una capacitancia de 100[μ F], del tipo cerámico y se agrega en esta parte debido a que se utiliza como protección a perturbaciones en la alimentación del

²⁴ TEXAS INSTRUMENTS. *LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator*. Datasheet. 2016.

módulo ESP32-WROOM-32 ²⁵.

Figura 12. Esquemático de la etapa de regulación de tensión 3.3[V].



Fuente: Imagen generada por los autores

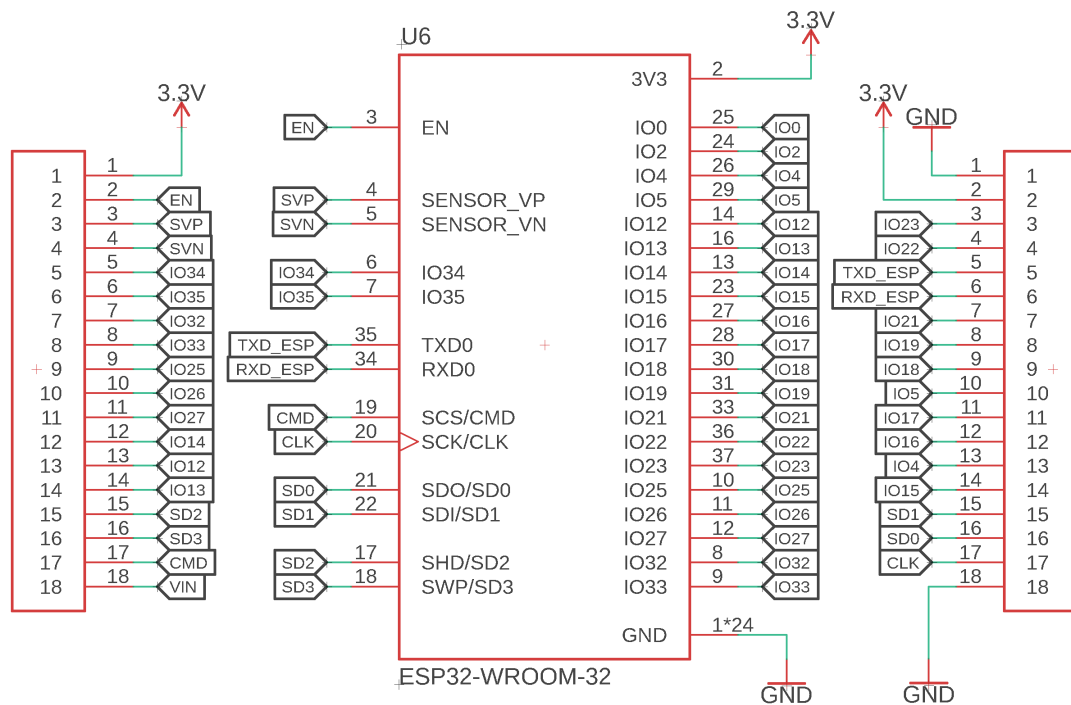
5.1.3. Etapa de procesamiento En esta etapa hay dos puntos importantes para describir. El primer punto, hace referencia a las conexiones de desarrollo. El segundo punto, se refiere a la lógica de activación para poder programar el microcontrolador que se encuentra en el interior del módulo. De esta manera, se diseña una tarjeta de desarrollo basada en el kit de desarrollo NODEMCU ESP-32S ²⁵, teniendo claros los requisitos de diseño ya nombrados al inicio del capítulo.

Conexiones de desarrollo El módulo ESP32-WROOM-32 posee 38 pines en total (Figura 13). Un pin corresponde a una entrada de alimentación de 3.3[V], tres pines son de potencia para el nivel de referencia o GND, seguidos de veintiocho pines los cuales son para entradas o salidas digitales, y cinco pines únicamente para entradas, y por último un pin el cual no posee ninguna función. En el esquemático presentado en la Figura 13 correspondiente a la tarjeta de desarrollo, se tienen 36 pines de desarrollo, de los cuales, difieren con los anteriormente descritos debido

²⁵ SHENZHEN AI-THINKER TECHNOLOGY. *Nodemcu - 32s Datasheet*. Datasheet. 2019.

a que algunos se utilizan para conexiones únicas. Por lo tanto, no se pueden dejar habilitados para otra conexión. De acuerdo con lo anterior, en primer lugar se encuentran habilitados 5 pines de potencia que se encuentran distribuidos de la siguiente manera: dos pines para conexiones de 3.3[V], dos pines para la conexión de referencia GND, y un pin para una conexión de 5[V]. En segundo lugar, se habilitan 18 pines de desarrollo para entradas o salidas digitales. En tercer lugar, se tienen los mismos cinco pines destinados por el fabricante del microcontrolador como únicamente entradas (EN, IO34, IO35, SVN, SVP). En cuarto y último lugar se encuentran ocho pines cuyo propósito es la comunicación (I2S, I2C, UART).

Figura 13. Esquemático de la etapa de procesamiento con el microcontrolador.



Fuente: Imagen generada por los autores

Ahora, como se dijo anteriormente hacen falta 2 conexiones del módulo hacia los pines de desarrollo. Una de estas conexiones se utiliza para verificar el funciona-

miento del dispositivo después de haber sido programado, esto se demuestra en la Figura 14. La explicación de funcionamiento es similar a la del *LED4*, la diferencia es que en vez de tener una fuente de 5[V] ahora se tiene una conexión digital etiquetada como *IO2* con dos posibles niveles de tensión 0[V] (LOW) o 3.3[V] (HIGH). Estos dos niveles se configuran por medio de programación y cambian el estado de apagado a encendido del LED respectivamente. La resistencia *R2* cumple su función de limitadora de corriente para un óptimo funcionamiento del LED.

Figura 14. Esquemático de conexión de LED de verificación.



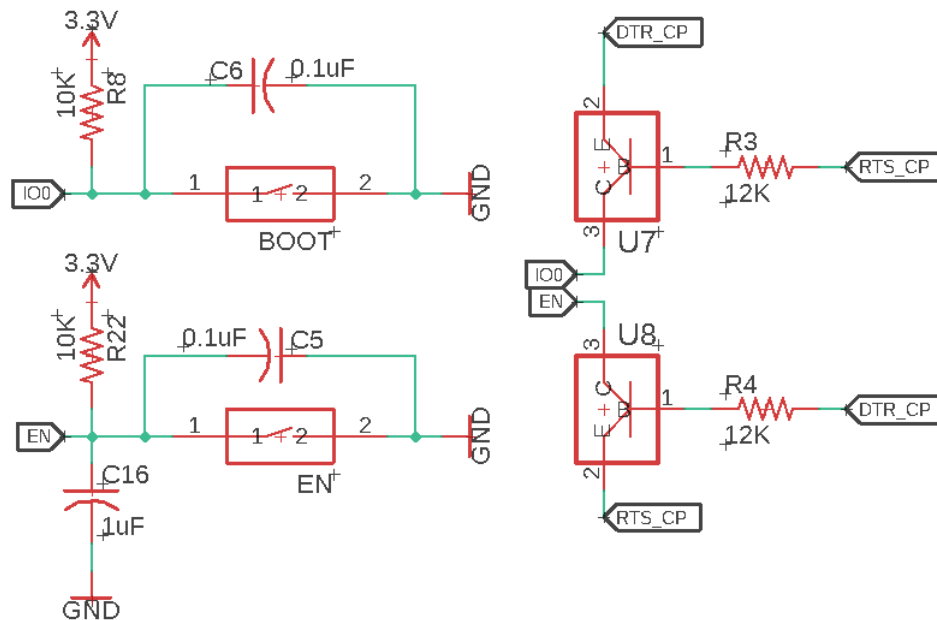
Fuente: Imagen generada por los autores

Por otra parte, la conexión restante se explica en la siguiente sección, debido a que es una de las conexiones de entrada para la etapa de la lógica de activación.

Lógica de activación En esta parte del diseño, se pretende facilitar el proceso de la programación del módulo y a su vez del microcontrolador. Por lo tanto, se agregan dos botones o switches, estos son *EN* y *BOOT*. El primer botón (*EN*) tiene la función de reiniciar la ejecución del código desde el punto de inicio. Por otro lado, el botón *BOOT* permite cargar un programa o firmware. En la Figura 15 se puede observar el esquemático de las diferentes conexiones para estos dos botones.

Ahora bien, la conexión para el botón *BOOT* tiene como entrada el pin etiquetado como *IO0* que es una conexión de entrada o salida digital del módulo ESP32. Por lo tanto, posee los dos posibles niveles de tensión LOW y HIGH. Entonces, observando la Figura 15 hay una resistencia de pull-up *R8*, esto hace que en estado de

Figura 15. Esquemático de la etapa de lógica de activación.



Fuente: Imagen generada por los autores

reposito la conexión *IO0* este en un nivel HIGH y que al presionar el botón el nivel quede en LOW. Por otro lado, el pin *IO0* está conectado al colector de un transistor del tipo NPN, el cual, posee dos conexiones en el emisor y base que van directamente al convertor USB a UART CP2102 etiquetadas como *DTR_CP* y *RTS_CP* respectivamente.

Para la conexión del botón *EN* se tiene como entrada la conexión *EN* que es un pin del tipo entrada digital del módulo ESP32, el cual, siempre está en el nivel HIGH. Este nivel cambia cuando se presiona el botón *EN* y queda en un nivel LOW. Por otro lado, el pin *EN* está conectado con el colector de un transistor NPN del mismo modo que en el anterior caso, la diferencia se observa en que las conexiones *DTR_CP* y *RTS_CP* cambian de posición, es decir, se conectan a la base y emisor respectivamente. La función de estas conexiones se explica en la sección de la conexión

USB. Además, en la Figura 15 se observa también una conexión en paralelo de un capacitor (*C5*, *C6* y *C16*) con el pulsador, cuya tarea es suplir los ruidos del contacto o rebotes que se puedan producir al accionarlo. Se debe agregar que los tipos de pulsadores o botones que se utilizan son los B3U-1000P del fabricante OMRON²⁶ y los transistores son del tipo NPN como ya se mencionó, pero su referencia es MMSS8050-L del fabricante M.C.C.²⁷. Por último, el tipo de capacitor que se utiliza en estas aplicaciones son los capacitores cerámicos.

5.1.4. Etapa de conexión USB Uno de los requisitos es que el dispositivo esté conectado a una plataforma de control, la cual se encuentra como un software en el PC. Esta conexión es necesaria debido al intercambio de información que debe hacerse entre el dispositivo de control y la plataforma de control. Por lo tanto, la conexión USB es una gran solución a esta necesidad. Otro inconveniente que se presenta es la comunicación entre el módulo ESP32 y el puerto USB, es decir, en la Figura 6 se presenta todas las posibilidades de comunicación que posee el módulo ESP32 y la comunicación USB no se encuentra allí. Por consiguiente, para solucionar este problema se utilizan los puertos de comunicación UART y de esta manera se abre la posibilidad de realizar un proceso de conversión a la comunicación USB. Entonces, en esta etapa hay dos puntos a tener en cuenta: el proceso de conversión USB a UART, por medio del dispositivo CP2102 y la protección a descargas electrostáticas (ESD) junto con el puerto USB, que se explicarán a continuación.

Conversor UART a USB CP2102 Es un controlador que se utiliza como puente de una conexión USB a UART. Es un dispositivo altamente integrado que proporcio-

²⁶ OMRON. *Ultra-small Tactile Switch (SMT) - B3U*. Datasheet. 2007-2008.

²⁷ MICRO COMMERCIAL COMPONENTS. *MMSS8050 Datasheet*. Datasheet. 2014.

na una solución simple para actualizar los diseños de conexiones RS-232 a conexiones USB, y su característica particular es que utiliza el mínimo de componentes y espacio en la PCB²⁸.

En la Figura 16 se puede observar el esquemático correspondiente a las diferentes conexiones que tiene el CP2102. Como en todos los dispositivos, este posee pines de entrada, salida o mixtos (In/Out). Los pines de entrada que se utilizan son los siguientes:

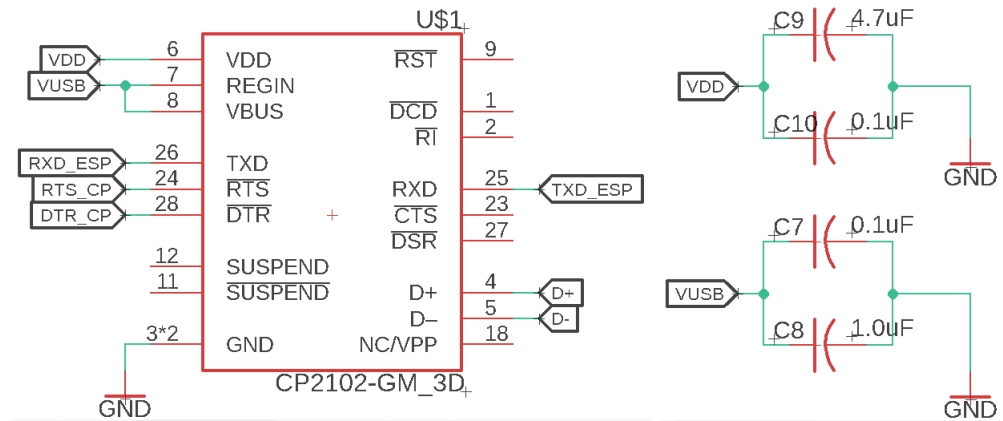
- El pin *VBUS* el cual tiene una conexión al pin de potencia del puerto USB con una tensión 5[V] (*VUSB*).
- El pin *REGIN* posee la misma conexión al del pin *VBUS*. Por lo tanto, al estar conectados poseen conjuntamente la conexión a los capacitores *C7* y *C8* que cumplen la tarea de disminución de ruido en la alimentación del CP2102.
- El pin denominado *RXD* es el receptor de la conexión UART y es considerado como la entrada de datos asíncrona. Este pin tiene una conexión con el pin de salida de datos UART del módulo ESP32 (*TXD_ESP*), que dicho de otra manera es el transmisor de este módulo.

Los pines del tipo salida del CP2102 que se utilizan para que sea posible la conexión USB son los siguientes:

- El pin *TXD* es el transmisor de la conexión UART y se considera como la salida de datos asíncrona. Este pin se conecta con el pin de recepción de datos del módulo ESP32 etiquetado como *RXD_ESP*.

²⁸ SILICON LABS. *CP2102 USB To UART Bridge Datasheet*. Datasheet. 2017.

Figura 16. Esquemático conexiones para el convertor CP2102.



(a) Esquemático convertor CP2102.

(b) Esquemático conexiones de capacitores de bypass.

Fuente: Imagen generada por los autores

- El pin *RTS* es el encargado de enviar una señal de preparación para la señal de salida de control de datos. En estado de reposo, este pin se encuentra en un nivel o estado LOW.
- El pin *DTR* es el encargado de la señal de salida de control del terminal de datos. Este pin se encuentra en estado LOW de la misma forma que el anterior pin.

Por último, los pines mixtos corresponden a los pines *D+* y *D-*, están conectados a sus respectivos pines en el puerto USB y son los encargados de llevar la información ya sea que se transmita hacia la plataforma de control (PC) o que se reciba de esta.

Protección ESD y puerto USB La descarga electrostática (ESD, por sus siglas en inglés) es un fenómeno electrostático en donde se produce una descarga transitoria de carga estática entre dos objetos con un potencial eléctrico distinto. En el caso de los dispositivos electrónicos, puede surgir a partir de la manipulación hu-

mana o por el contacto de otro dispositivo o máquina ²⁹. Las ESD ocasionan un mal funcionamiento o en su defecto la destrucción de los circuitos integrados ³⁰. Por lo tanto, para confiabilidad y seguridad es necesario tener una protección para este tipo de fenómeno.

Así, en este diseño se utiliza una protección fabricada por Texas Instruments cuya referencia es TPD2S017, que es un dispositivo de protección contra descargas electrostáticas de dos canales, esto quiere decir que el dispositivo ofrece dos etapas idénticas donde se encuentra un arreglo de diodos de supresión de voltaje transitorio en serie con una resistencia ³¹. La Figura 17 presenta las conexiones que tiene la protección TPD2S017, cuyas entradas son los canales $D+_OUT$ y $D-_OUT$ que son las conexiones que van directamente al puerto USB. Mientras tanto, los pines de salida que son $D+$ y $D-$, son las conexiones correspondientes al conversor CP2102.

Adicionalmente, en la Figura 17 se tiene la representación esquemática del puerto USB, cuya referencia es el puerto micro USB-B 10118192-0001LF del fabricante Amphenol ICC. Este puerto micro USB posee una cantidad de cinco pines, de los cuales dos son conexiones de potencia ($VUSB$ y GND), dos conexiones de datos ($D+$ y $D-$) y por último un pin de identificación que no se utiliza porque es un USB estándar o considerado como OTG. Por otro lado, se encuentran los contactos de cuerpo del puerto USB ($SHIELD$) que están conectados a un paralelo entre un capa-

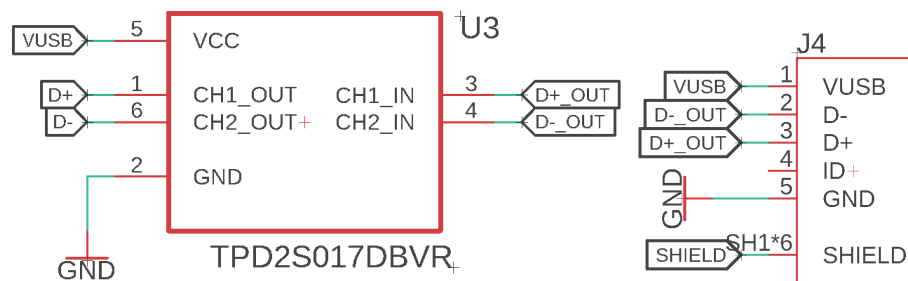
²⁹ AMERASEKERA Ajith y Charvaka DUVVURY. *ESD in Silicon ESD in Silicon Second Edition*. Second. Vol. 8. 2002, pág. 421.

³⁰ SONG Bo Bae, DO Kyoung Il y KOO Yong Seo. "SCR-Based ESD Protection Using a Penta-Well for 5 v Applications". En: *IEEE Journal of the Electron Devices Society* 6.March (2018), págs. 691-695. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2817636.

³¹ TEXAS INSTRUMENTS. *TPD2S017 2-Channel Ultra-Low Clamp Voltage ESD Solution With Series-Resistor Isolation*. Datasheet. 2015.

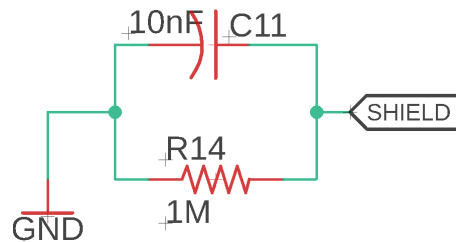
ceptor (*C11*) y una resistencia (*R14*) aterrizados a *GND*. Cabe aclarar que la etiqueta *SHIELD* en realidad debería tener el nombre *SHELL* ya que la traducción al español es cáscara o carcasa. Adicionalmente, es necesario explicar que los pines de información están conectados a los pines de entrada de la protección ESD TPD2S017 debido a que los dispositivos sensibles a ESD son el conversor CP2102 y el módulo ESP32.

Figura 17. Esquemático de la etapa de conexión USB.



(a) Esquemático protección ESD USB.

(b) Esquemático puerto micro USB tipo B.

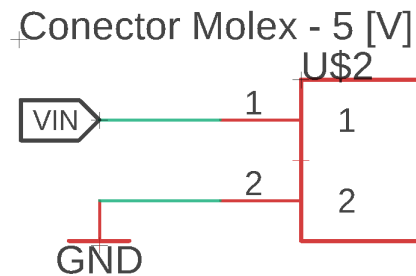


(c) Esquemático conexión de la carcasa del puerto USB.

Fuente: Imagen generada por los autores

En este diseño, se integra un ventilador para que ayude con la refrigeración en caso de presentar aumentos en la temperatura. El ventilador es fabricado por Adafruit Industries y trabaja a una tensión de 5[V]. Las conexiones que tiene este dispositivo son solo de potencia, las cuales corresponden a la alimentación de 5[V] y la conexión a referencia *GND*.

Figura 18. Esquemático de la etapa de conexión del ventilador de refrigeración.



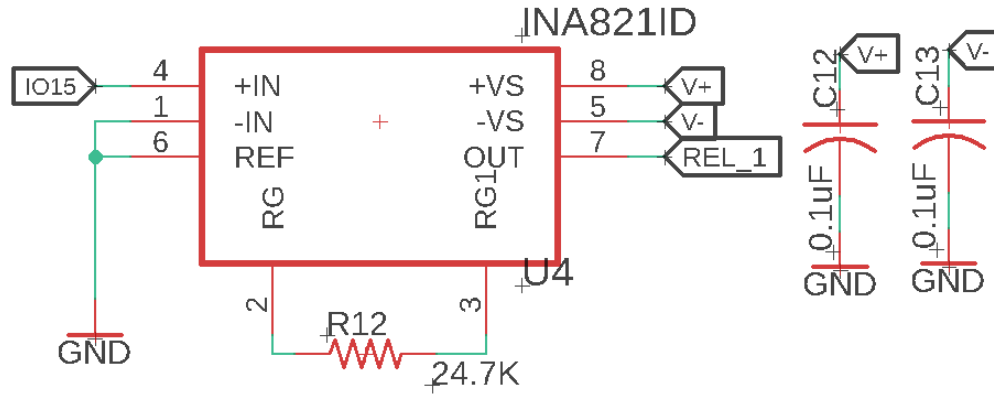
Fuente: Imagen generada por los autores

5.1.5. Etapa de conexiones para actuadores El objetivo de diseño en esta etapa se basa en que sea posible accionar diez SSR. Entonces, como se sabe de las secciones anteriores acerca de las conexiones del módulo ESP32 (ver secciones 4.2 y 5.1.3) de los 38 pines de conexión disponibles, 18 pines corresponden a salidas/entradas digitales. Por lo tanto, los pines que se dejan habilitados para la señal de control de cada uno de los SSR son los siguientes: *IO23*, *IO22*, *IO21*, *IO19*, *IO18*, *IO5*, *IO17*, *IO16*, *IO4*, *IO15*. Cabe aclarar, que en dado caso de no utilizar estas conexiones para los relés se deja habilitada la posibilidad de conectar otros dispositivos por medio de las conexiones de desarrollo. Por otro lado, quedan libres ocho pines para posibles conexiones de sensores o en su defecto para señales de control de relés adicionales que se necesiten agregar.

Ahora, la señal de control obtenida por parte de los pines digitales ya nombrados anteriormente tiene dos estados que son LOW y HIGH (0[V] y 3.3[V] respectivamente). Los SSR en su mayoría poseen en su etapa de control un rango de alimentación entre 4[V] y 32[V], esto hace que sea necesario hacer una etapa de amplificación para la señal de control y así permitir la activación del SSR en cuestión. En la Figura 19 se presenta la etapa de amplificación, en la cual, se utiliza un amplificador de instrumentación (INA) fabricado por Texas Instruments. El amplificador es el INA821ID,

el cual posee ocho pines cada uno con una función en específico ³².

Figura 19. Esquemático de la etapa de amplificación con INA821ID.



Fuente: Imagen generada por los autores

De acuerdo con el datasheet de este INA, dos pines pertenecen a la polarización (V_+ y V_-), dos son para entradas diferenciales (V_{IN+} y V_{IN-}), un pin para la referencia GND , dos pines para la resistencia de configuración de ganancia (R_G y R_{G1}), y por último, está el pin de salida el cual es el pin en donde se obtiene la señal amplificada (OUT). Adicionalmente, en la Figura 19 se observa la conexión de dos capacitores ($C12$ y $C13$) a los pines de polarización, esto con el objetivo de utilizarlos como capacitores de bypass cuya función ya se ha explicado en una de las etapas anteriores (ver sección 5.1.2).

La ganancia que ofrece el INA es uno de los aspectos a tener en cuenta en esta etapa. El datasheet presenta la ecuación 1, en donde es posible elegir una ganancia ideal G y encontrar la resistencia R_G que permite obtenerla. En la Tabla 2 se puede

³² TEXAS INSTRUMENTS. *INA821 Precision Instrumentation Amplifier*. Datasheet. 2019.

encontrar los valores más comunes de R_G que corresponde a un valor de G .

$$G = 1 + \frac{49.4[K\Omega]}{R_G} \quad (1)$$

Tabla 2. Ganancias y valores de resistencia de uso común para el INA821.

Ganancia Deseada	R_G (Ω)	1 % R_G (Ω)
1	NC	NC
2	49.4 k	49.9 K
5	12.35 K	12.4 K
10	5.489 K	5.49 K
20	2.600 K	2.61 K
50	1.008 K	1 K
100	499	499

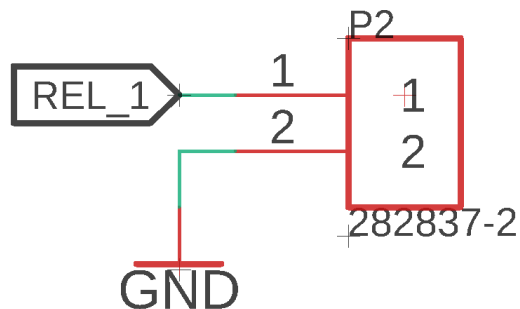
Fuente: Basada en TEXAS INSTRUMENTS. *INA821 Precision Instrumentation Amplifier*. Datasheet. 2019

Tomando el rango de niveles de tensión de la etapa de control de los SRR (4[V] - 32 [V]) y el nivel HIGH (3.3 [V]), los valores posibles de ganancia que se pueden configurar son 2, 3 o 4 debido a que el rango máximo de la señal de salida es desde -15[V] a 15[V]. Esto sucede gracias a los niveles de tensión de la polarización del INA, los cuales están en ese mismo rango. Estas conexiones de polarización provienen de un conversor AC/DC con referencia VSK-S25-15U-T del fabricante CUI INC²³. Por consiguiente, los valores de R_G correspondientes a las ganancias anteriormente nombradas son 49.4[K Ω], 24.7[K Ω] y 16.46[K Ω] respectivamente. De modo que la decisión de seleccionar un único valor de resistencia R_G , queda abierta a tres posibilidades válidas y cuyo funcionamiento es óptimo. Pero, comercialmente estos valores de resistencias son muy difíciles de conseguir. Por lo tanto, se toma la decisión de aproximar al valor más cercano, es decir, que los nuevos valores son 50[K Ω], 25[K Ω] y 17[K Ω], y se descarta el último valor que sigue siendo un valor comercialmente difícil de conseguir. A causa de lo anterior, restan dos valores, los

cuales son válidos para utilizar. Sin embargo, para este diseño se utiliza la resistencia de 25[KΩ] debido a que ofrece aproximadamente una ganancia de 3, el cual asegura un valor de tensión que no es muy cercano al mínimo permitido por los SSR.

Con respecto a las conexiones directas hacia la entrada de los SSR se utilizan diez terminales o borneras de dos posiciones cuya referencia es 282837-2 del fabricante TE Connectivity³³. Cabe resaltar que se pueden utilizar de otro fabricante si es el caso, teniendo claras el espacio entre los pines de soldadura y de conexión, que aparecen en el datasheet de este elemento. En la Figura 20 se presenta una representación esquemática de la conexión que tienen estos terminales que son las conexiones directas entre el SSR y el dispositivo de control.

Figura 20. Esquemático de la conexión hacia los SSR.



Fuente: Imagen generada por los autores

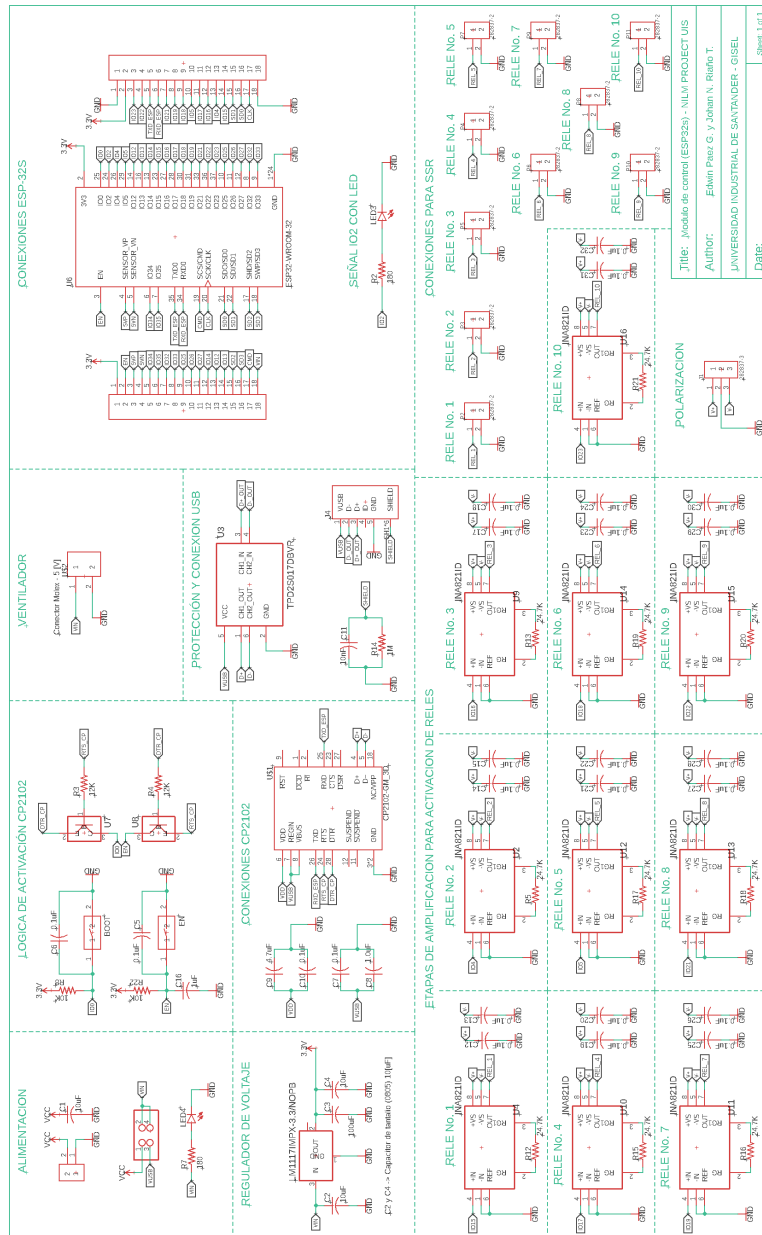
5.2. ESQUEMÁTICO Y LAYOUT DEL CIRCUITO IMPRESO

Ahora se procede a presentar el esquemático en su totalidad (ver Figura 21) que corresponde a un paso necesario para el diseño de un circuito impreso. Cabe resaltar, que se toma como base la tarjeta de desarrollo NODEMCU ESP-32S, las

³³ TE CONNECTIVITY. *Terminal Block 282837*. Datasheet. 2003.

recomendaciones del fabricante del módulo ESP32 y los requisitos de diseño ya mencionados.

Figura 21. Esquemático del circuito impreso.



TITLE: Módulo de control (ESP32s) - NLM PROJECT UIS
 AUTOR: Edwin Pez G., Johan N. Roldán T.
 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER - GISEL
 DATE: _____
 Sheet 1 of 1

Fuente: Imagen generada por los autores

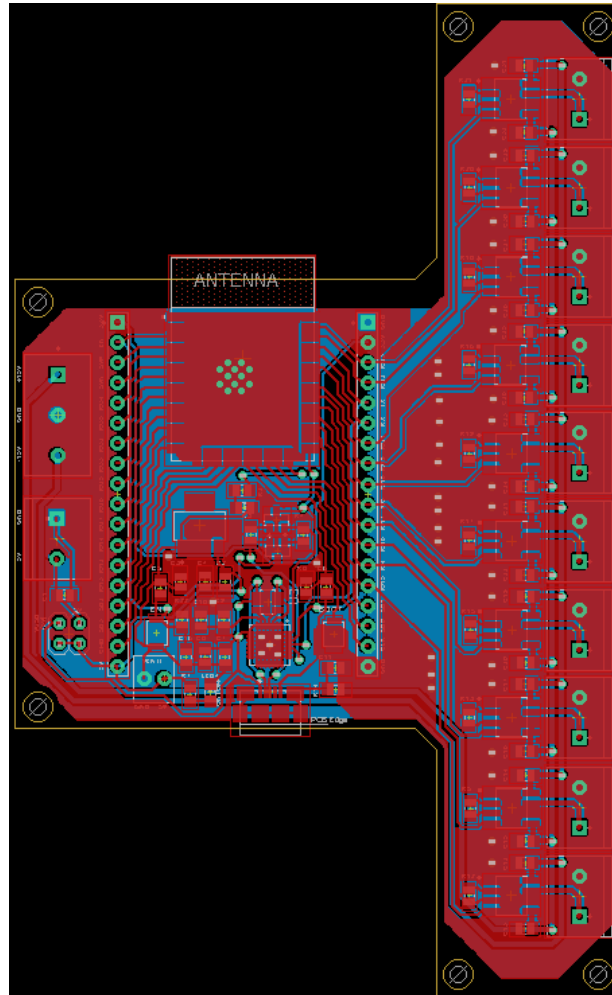
Avanzando en el desarrollo del diseño del circuito impreso, se llega al punto en donde se define la forma y distribución final de los elementos electrónicos que se utilizan como se observa en la Figura 22. El primer aspecto a tener en cuenta son los empaquetados y los tamaños de los elementos. El segundo aspecto es saber la mejor ubicación para el funcionamiento óptimo de los elementos más importantes en el circuito a partir de la información que se encuentre en la respectiva hoja de datos. Para este caso, el elemento más importante y eje central es el módulo ESP32. Por lo tanto, los demás elementos se ubican respetando la prioridad de ubicación del módulo. Por último, el tercer aspecto hace referencia a la accesibilidad de las conexiones para dispositivos externos al circuito impreso, entre estas conexiones están, la conexión de alimentación ($\pm 5[V]$), la conexión de polarización ($\pm 15[V]$), los puertos de conexión que están destinados para los SSR, el puerto USB y los pines o conexiones de desarrollo.

Cabe resaltar que este proceso de diseño del circuito impreso se realizó con el software de diseño de circuitos impresos denominado Eagle en su versión 9.6.2 premium cuya la licencia se obtiene por medio del correo electrónico institucional. Adicionalmente, durante el desarrollo del diseño el tamaño de las pistas, la separación entre planos de tierra y el ancho de las pistas se escogieron según las limitaciones que manifiesta el fabricante del circuito impreso y respetando las normas IPC-2221A ³⁴.

Teniendo en cuenta las normas IPC-2221A, al manejarse una tensión entre los 0[V] y 15[V] el espacio entre cada conductor o pista debe ser mínimo de 0.05[mm]. Por otro lado, el ancho de la pista varía de acuerdo a la corriente que maneja el circui-

³⁴ ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. "Generic Standard on Printed Board Desing". En: *ipc-2221a* February 1998 (2003), pág. 124.

Figura 22. Layout del circuito impreso.



Fuente: Imagen generada por los autores

to la cual, si se toma el caso extremo en donde el consumo por parte del módulo ESP32 corresponde a 1.1[A] a una temperatura de 25°C corresponde a un ancho de pista de 10[mils] que equivale a 0.254[mm]. Del mismo modo, el máximo valor de corriente que suministra la fuente de 15[V] es de 1.6[A], por consiguiente, el ancho de la pista en las mismas condiciones de temperatura debe ser de 15[mils] o 0.381[mm].

Ahora bien, teniendo como referencia los valores anteriores se presentan las medidas que hay en la Figura 22. En primer lugar, el ancho de pista que se maneja en el diseño de layout para las conexiones del módulo ESP32 es de 0.3048 y para las pistas de la fuente de polarización junto con las conexiones de los relés poseen un ancho de 0.6096, lo cual evidencia un cumplimiento en la norma. En segundo lugar, el espacio entre dos conductores es de 0.3048[mm] cumpliendo del mismo modo con la norma.

5.3. DISEÑO 3D DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

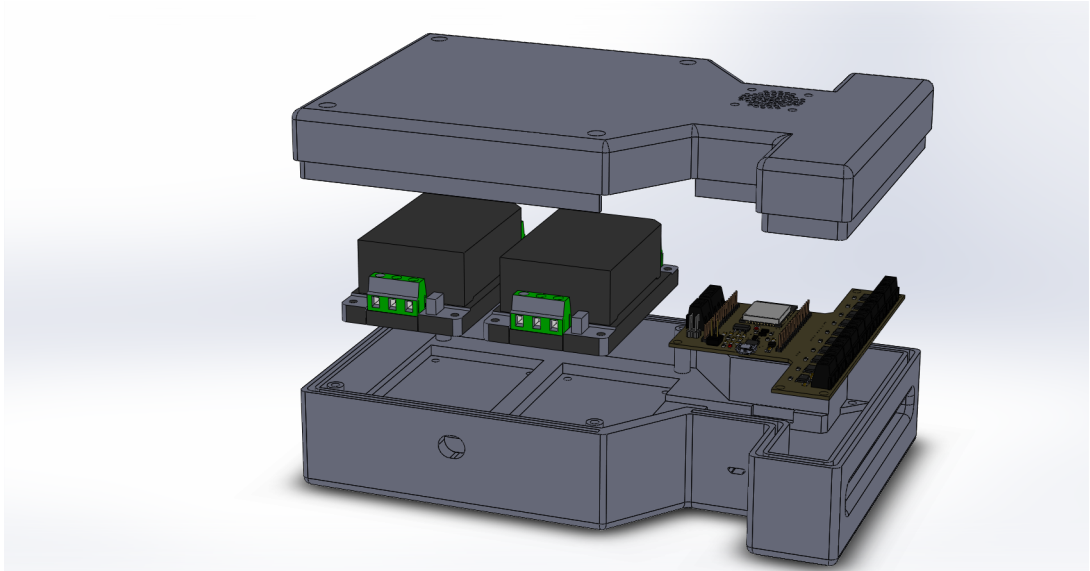
En esta etapa del diseño del dispositivo de control, se hace uso del software de modelado 3D Solidworks 2019. En este diseño, se tiene como prioridades las conexiones de los SSR, la conexión de alimentación para los convertidores AC/DC, el puerto de comunicación USB y una ventana de ventilación.

En las Figuras 23 y 24 se presenta el modelo 3D del dispositivo de control. El cual, consta del circuito impreso, los dos convertidores AC/DC, un ventilador o cooler, y por último una carcasa (base y una tapa). El dispositivo posee una altura de 6.4[cm], un largo de 23.12[cm] y un ancho de 13.88[cm]. Como resultado, se presenta un dispositivo capaz de permitir el control a diez SSR y de mantener una comunicación con un computador. Además tiene pines de conexión para posibles desarrollos, actualizaciones o implementación de nuevos módulos que requieran algún tipo de control por medio del módulo ESP32.

5.4. ESPECIFICACIONES DEL DISPOSITIVO

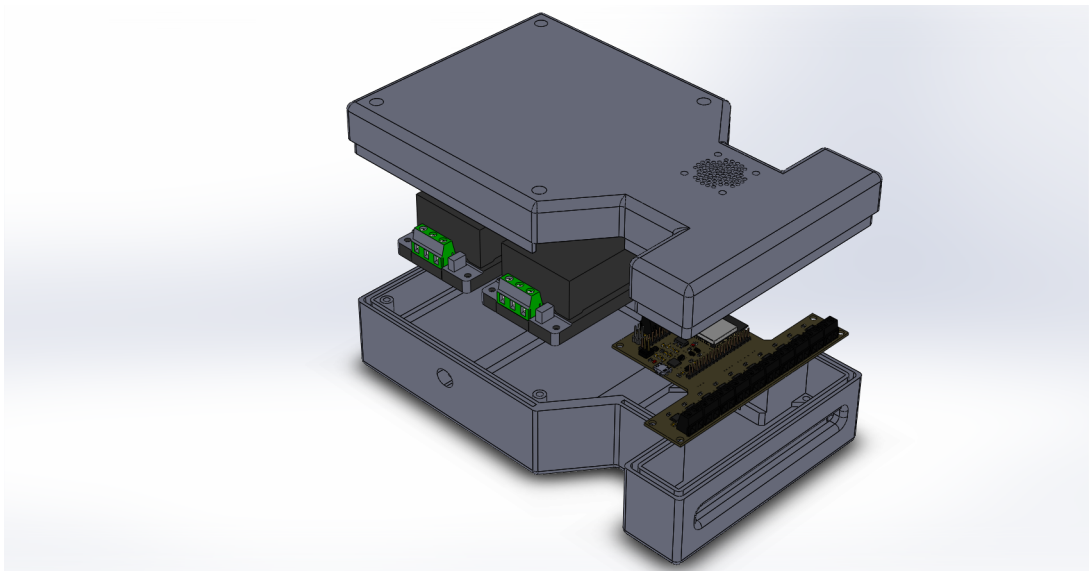
En la tabla 3 se encuentra un resumen de las especificaciones que posee el dispositivo de control.

Figura 23. Modelo 3D de la carcasa del dispositivo de control (Vista Dimétrica).



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 24. Modelo 3D de la carcasa del dispositivo de control (Vista Isométrica).



Fuente: Imagen generada por los autores

Tabla 3. Especificaciones módulo de control.

Item	Especificación
Modelo	V1.0
Dimensiones	6.4[cm] x 23.12[cm] x 13.88 [cm]
Voltaje de alimentación AC	110[V]
Voltaje de alimentación DC (USB)	5[V]
No. Puertos de desarrollo	36
No. Conexiones SSR (9.9[V])	10
Puerto de comunicación	Micro USB Tipo B USB 2.0

Fuente: Tabla generada por los autores

5.5. COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

Como presupuesto y costos finales, se presenta el valor aproximado de costo para construir el dispositivo de control. Cabe aclarar que el costo de los elementos electrónicos se tomaron de la plataforma internacional llamada Digikey, por consiguiente los precios están dados en la moneda del dólar y corresponden a los valores del mes de octubre de 2020. Estos precios pueden variar con el paso del tiempo debido al valor de la tasa de cambio a la moneda local.

En la Figura 25 se muestra la lista de elementos junto con los costos de cada uno de ellos, del mismo modo se incluye el valor del envío y el valor de la cotización de la producción de la carcasa en la empresa Khimaira Studio. La suma de todo da un total de 778.191 pesos colombianos aproximadamente, con una tasa de cambio de 3.800 pesos por 1 dólar.

Figura 25. Cotización para la construcción del dispositivo propuesto, octubre 2020.

COTIZACIÓN ELEMENTOS PROJECT NILM-UIS EN DIGIKEY					
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PACKAGE	PART NUMBER	P / UNIDAD	P / TOTAL
1	ESP32-WROOM-32	SMD	1904-1010-1-ND	3.8	3.8
1	REG 3.3V - LM1117	SOT-223	LM1117MPX-3.3/NOPBCT-ND	1.1	1.1
2	SWITCH TACTILE B3U-1000P	SMD	SW1020CT-ND	0.92	1.84
10	INA821ID	8 - SOIC	296-53404-ND	5.555	55.55
1	CP2102-GM	QFN - 28	336-5890-1-ND	1.4	1.4
1	TPD2S017DBVR	SOT - 23	296-25216-6-ND	0.61	0.61
2	TRANS NPN - MMSS8050-L-TP	SOT - 23	MMSS8050-L-TPMSDKR-ND	0.18	0.36
1	MICRO USB B - 10118192-001LF	SMD	609-4613-6-ND	0.45	0.45
1	LED GREEN	SMD - 0805	475-1410-6-ND	0.25	0.25
1	LED RED	SMD - 0805	475-1415-6-ND	0.25	0.25
1	CAPACITOR 100 UF CERAMICO	SMD - 0805	490-13982-1-ND	0.73	0.73
24	CAPACITOR 0.1 UF CERAMICO	SMD - 0805	399-1171-1-ND	1.25	30
2	CAPACITOR 1 UF CERAMICO	SMD - 0805	311-3498-1-ND	0.38	0.76
1	CAPACITOR 4.7 UF CERAMICO	SMD - 0805	399-15708-1-ND	0.61	0.61
1	CAPACITOR 10 UF CERAMICO	SMD - 0805	399-15693-1-ND	0.83	0.83
1	CAPACITOR 10 uF TANTALIO	SMD - 0805	511-1683-1-ND	0.72	0.72
1	CAPACITOR 10 nF CERAMICO	SMD - 0805	478-FS051C103K4Z2ADKR-ND	0.35	0.35
2	RESISTENCIA 10K	SMD - 0805	A129761CT-ND	0.1	0.2
2	RESISTENCIA 12K	SMD - 0805	A126337CT-ND	0.1	0.2
1	RESISTENCIA 1M	SMD - 0805	P20936CT-ND	0.35	0.35
10	RESISTENCIA 25K (24,7K)	SMD - 0805	A121556CT-ND	0.446	4.46
2	RESISTENCIAS 180	SMD - 0805	RNCP0805FTD180RCT-ND	0.1	0.2
1	BORNERA 3 POS (282837-3)	Through Hole	A113321-ND	1.18	1.18
11	BORNERA 2 POS (282837-2)	Through Hole	A113320-ND	0.647	7.117
2	PIN HEADER 18 POS	Through Hole	732-5328-ND	0.48	0.96
2	PIN HEADER 2 POS	Through Hole	732-5315-ND	0.13	0.26
1	CONECTOR MOLEX 2 POS	Through Hole	900-0022232021-ND	0.17	0.17
1	JUMPER CONECTOR	BULK	S9337-ND	0.1	0.1
1	VENTILADOR 30 X 30 mm 5V		1528-1904-ND	3.5	3.5
				TOTAL	118.307
				ENVIO USA	18
				ENVIO USA - COL	16
				TOTAL USD	152.307
				TOTAL COP	\$578,766.60

CARCASA CONTENEDORA COTIZACIÓN Khimaira Studio					
1	TAPA SUPERIOR		353.23 gramos	200 COP / gramo	\$70,643.00
1	TAPA INFERIOR		643.91 gramos	200 COP / gramo	\$128,782.00
				TOTAL COP	\$199,425.00

TOTAL NETO	\$778,191.60
-------------------	---------------------

Fuente: Tabla de costos generada por los autores

6. DISEÑO PARA LA CONEXIÓN DE LA ETAPA DE ACTUADORES (SSR)

En este capítulo se presenta la modalidad de conexión y funcionamiento de los relés de estado sólido (SSR). Adicionalmente, se proponen protecciones eléctricas basadas en lo presentado en la sección de marco teórico (ver sección 4.3.2), en donde depende de las cargas a conectar y el tipo de SSR a utilizar. Por otro lado, se presenta las características y los alcances que se pueden obtener de los SSR con los que se cuenta actualmente en el laboratorio para el desarrollo del proyecto.

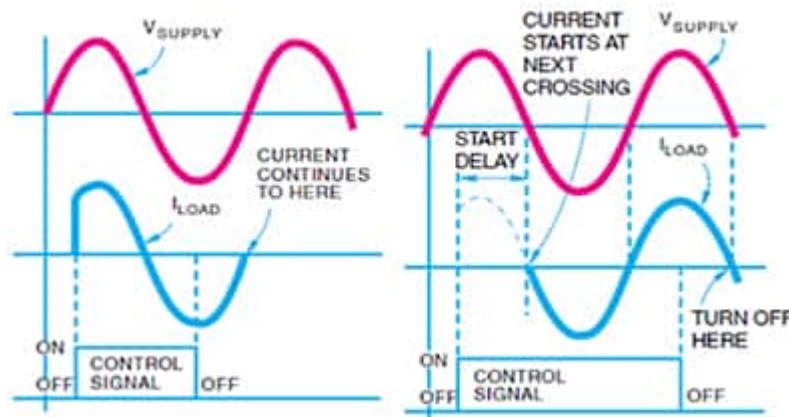
6.1. TIPOS DE RELÉS DE ESTADO SÓLIDO DE ACUERDO A SU FUNCIONAMIENTO

Partiendo de la Tabla 1, los relés de estados sólido pueden tener dos tipos de funcionamiento, es decir, pueden ser del tipo sincrónico o del tipo no sincrónico. Por un lado, el SSR sincrónico también conocido como SSR con cruce por cero es capaz de regular su salida solamente en cruces cero de la línea de AC o en puntos muy cercanos a la tensión cero, a pesar de que el pulso de control este activado desde varios milisegundos antes de llegar a ese nivel de tensión. Por otro lado, el SSR no sincrónico o también llamado SSR de conmutación aleatoria posee la habilidad de activarse o desactivarse en el instante en el que el pulso de control lo permita. En la Figura 26 se presenta gráficamente el comportamiento de los dos tipos de SSR cuando entran en operación (conducción de corriente) y cuando salen de operación. Como explicación la primera curva (V_{supply}) hace referencia a la tensión de la línea de AC, la segunda curva (I_{load}) es la corriente en la carga y por último la tercera curva (*CONTROL SIGNAL*) es la señal de control para el SSR.

El SSR sincrónico presenta la ventaja de minimizar la generación de EMI debido

a que regular las tensiones en los cruces por cero minimiza o elimina la línea y el ruido que resulta de iniciar o terminar la forma de onda de salida AC a mitad de ciclo³⁵. Mientras tanto, tienen como desventaja una muy baja probabilidad de que no se apaguen o no se desactiven cuando están conectadas cargas altamente inductivas. Es por esto que los fabricantes dan la posibilidad al diseñador de obtener SSR del tipo no sincrónico, el cual no presenta este tipo de fallas con este tipo de cargas. Cabe resaltar, que para los SSR por seguridad de operación y de fiabilidad se les debe conectar cierto tipo de protecciones a partir del tipo de carga y otros parámetros a tener en cuenta. Todo esto se presenta en la sección 4.3.2.

Figura 26. Funcionamiento SSR no sincrónico (Izquierda), SSR sincrónico (Derecha).



Fuente: Tomado de SCHWEBER Bill. *Aspectos básicos de los relés de estado sólido DigiKey*. [Sitio Web]. 2019. Disponible en <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-safely-and-efficiently-switch-current-or-voltage-using-ssrs>

³⁵ SCHWEBER Bill. *Aspectos básicos de los relés de estado sólido DigiKey*. [Sitio Web]. 2019.

6.2. SSR DISPONIBLES EN EL LABORATORIO

En el Laboratorio de Integración Energética del Parque Tecnológico de Guatiguará se cuenta con dos SSR del tipo sincrónico, fabricados por la empresa colombiana OPTEC POWER ELECTRONICS y cuya referencia es TD48A75. En la Figura 27 se presenta una foto del dispositivo, en donde se observa que posee 4 terminales. Los terminales 1 y 2 corresponden a los terminales de salida, es decir, a los terminales donde se conecta la carga junto con la línea de AC. Por otro lado, los terminales 3 y 4 corresponden a los terminales para la tensión de entrada o de control que para este caso posee un rango entre 4[V] y 32[V]. En la Tabla 4 se encuentra las características y especificaciones que posee el SSR, las cuales se extraen de la hoja de datos que dispone el fabricante ³⁶.

Figura 27. Foto del SSR TD48A75.



Fuente: Obtenida por parte de los autores

³⁶ OPTEC POWER ELECTRONICS. *Dispositivos de estado sólido*. Catalogo de Productos.

Tabla 4. Especificaciones SSR TD48A75.

Item	Especificación
Modelo	TD48A75
Dimensiones	4.45[cm] x 5.72[cm] x 2.85[cm]
Tensión de aislamiento	4000[V]
Temperatura de operación	20°C - 60°C
Especificaciones de entrada	
Rango de tensión de control	4-32[VDC]
Tiempo de conmutación	1/2 ciclo
Especificaciones de salida	
Rango de corriente de carga	0.10-75[Arms]
Tensión de línea	24-575[VAC]
I^2t para fusibles	5400[A ² s]
dV/dt	600[V/ μ s]

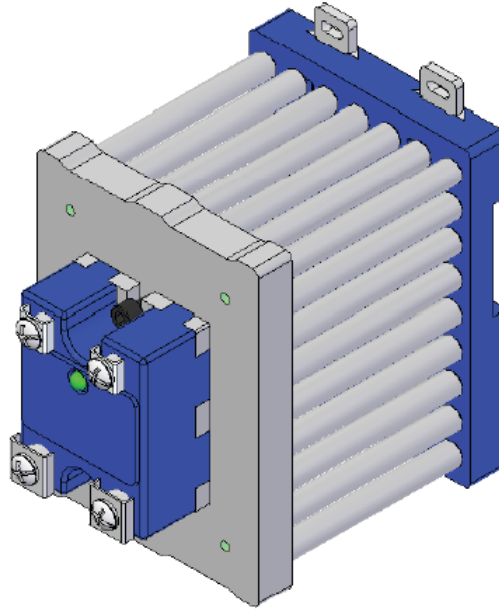
Fuente: Tomado de OPTEC POWER ELECTRONICS. *Dispositivos de estado sólido*. Catalogo de Productos.

Ahora, en el mismo datasheet se encuentra un montaje sugerido en donde el SSR está montado sobre un disipador de calor y a su vez, este se monta sobre un riel y de esta manera se fija en un panel. En la Figura 28 se encuentra una representación para el montaje que se describió.

6.3. CONEXIONES PARA LA ETAPA DE CONTROL Y PARA LA ETAPA DE POTENCIA DE UN SSR

Los SSR poseen una etapa de control que puede ser en DC o AC. Para este caso, el diseño está pensado para los SSR con una etapa de control del tipo DC. Como se dijo en la sección 5.1.5, se cuenta con una señal de control con un nivel de tensión de 9.9[V] después de la etapa de amplificación al interior del dispositivo de control. Por lo tanto, se hace una conexión directa con las conexiones de entrada del SSR por medio de cables de un calibre entre 16 y 28 AWG. En el otro extremo del dispositivo se encuentra la etapa de potencia, en la cual se conecta la tensión de tipo AC

Figura 28. Montaje sugerido por el fabricante.



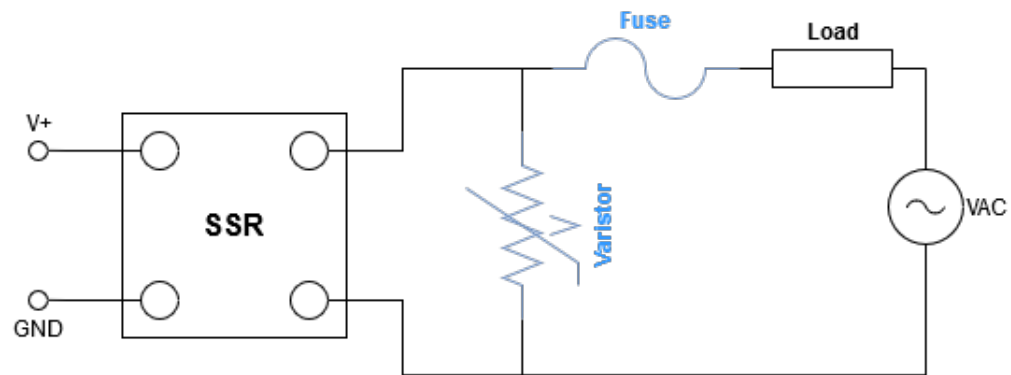
Fuente: Tomado de <http://www.optecpower.com/Download/ManualOPTEC.pdf> ³⁷.

y la carga correspondiente. En esta etapa hay que tener en cuenta varios factores como sobre-tensiones, cortocircuitos, sobre-intensidades y el tipo de carga. En la sección 4.3.2 se habla específicamente de este tema de protecciones para la etapa de potencia de un SSR.

En este caso, el diseño del circuito de potencia cumple con los requisitos de los niveles de tensión en la red eléctrica domiciliaria Colombiana, en donde se maneja una tensión nominal de 120[V]. Adicionalmente, el SRR maneja un rango de corriente de carga bastante amplio como se observa en la Tabla 4. De esta manera, el promedio de cargas que se manejan en una residencia poseen un consumo de corriente cerca a los 35[A] quedando un amplio margen para la corriente máxima que permite el SSR. La información de la tensión y del promedio de corriente está soportado en la

regulación de las normas NTC 2050 ³⁸. Aclarando los márgenes de operación para el sistema, no sobra incluir en el diseño unas protecciones para la fiabilidad del SSR, entonces en el diseño se agrega un fusible con un valor de I^2t que se encuentra en en la Tabla 4 y corresponde a $5400[A^2s]$. Por otro lado, el fabricante aconseja conectar un varistor en los terminales del SSR, el cual fue enviado dentro del empaque cuando fueron adquiridos los SSR y cuya referencia es 14D911K ³⁹. Por lo tanto, el diagrama de conexión para un SSR es el que se presenta en la Figura 29.

Figura 29. Diagrama de conexión SSR.



Fuente: Imagen generada por los autores

Como aclaración, las conexiones presentadas en la Figura 29 son totalmente reproducibles para un relé de estado sólido del tipo no sincrónico, teniendo en cuenta sus parámetros como la corriente máxima de carga y el parámetro I^2t para escoger el fusible, y en cuanto a la selección del varistor se tienen en cuenta la tensión máxima de carga.

³⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Código eléctrico colombiano NTC2050*. 1998.

³⁹ BOURNS. *MOV-14DxxxK Series - Metal Oxide Varistor*. Datasheet. 2011.

7. DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE CONTROL

En este capítulo se presenta el proceso de diseño de la plataforma de control, el cual se desarrolla en dos módulos. El primer módulo corresponde al diseño de la interfaz de usuario en LabVIEW dedicado a la captación, adecuación y almacenamiento de los parámetros para llevar a cabo las secuencias de los SSR que afectarán el circuito establecido por el usuario, y al que se le hará la toma de datos. Por otro lado, el segundo módulo está compuesto físicamente por el dispositivo de control ESP32-WROOM-32, que es el encargado de generar las señales de control para cada uno de los SSR asociados al sistema.

A continuación se explica el funcionamiento de cada uno de los módulos de forma más detallada y posteriormente la programación que posee la interfaz.

7.1. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL CON LabVIEW

Se desarrolla una interfaz de usuario junto con el control asociado a la misma en el software LabVIEW. Este software ofrece herramientas con las que se puede crear una interfaz simple y sencilla, además de que permite integrar los sistemas que el usuario requiere para realizar su trabajo de investigación.

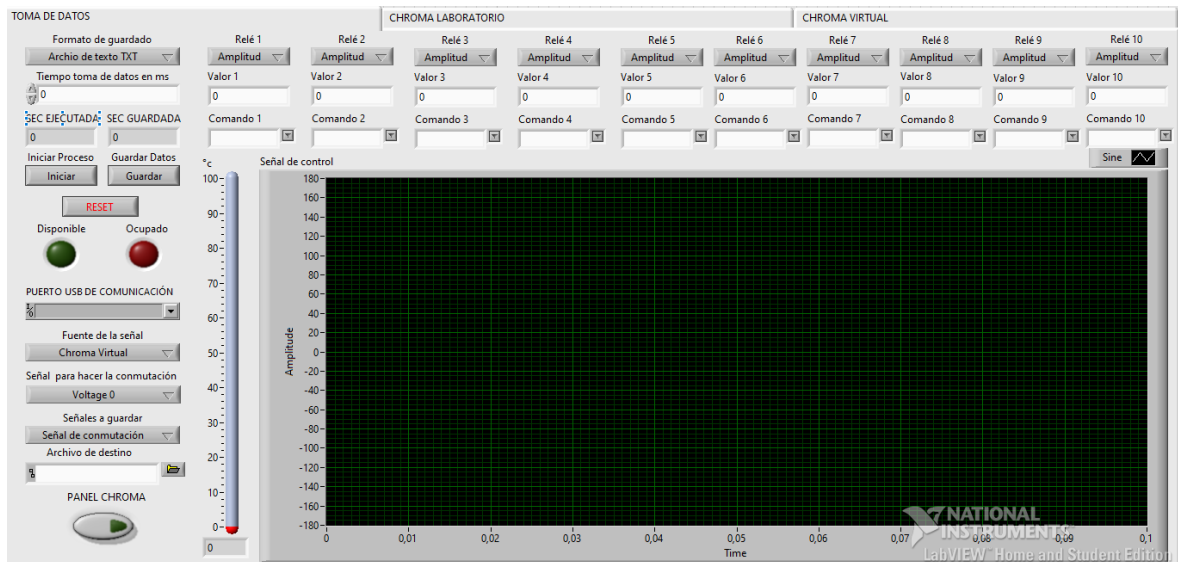
La interfaz de control se divide en tres partes importantes: la pestaña principal, una pestaña para la fuente Chroma 61511 y por último, la pestaña para la fuente Chroma virtual.

7.1.1. Pestaña Principal En la Figura 30 se presenta la interfaz que conforma la pestaña principal. La función principal de esta pestaña es que el usuario ingrese los

parámetros necesarios para la toma de los datos, logrando una interacción directa y sencilla entre interfaz y usuario. De acuerdo con lo anterior, la interfaz permite:

- Configurar el puerto serie COM que se usa para la comunicación.
- Seleccionar la fuente de la señal con la cual se desea trabajar, es decir si se trabajara con la fuente Chroma 61511 (cuyas señales se obtienen a través de las tarjeta NI antes descritas), o con un generador de señales interno que simulará las condiciones de trabajo de la fuente Chroma 61511 (ver Figura 33 y Figura 35).

Figura 30. Interfaz para el almacenamiento de los parámetros de simulación.



Fuente: Imagen generada por los autores

- Elegir la señal con la cual desea hacer la conmutación. Esto quiere decir que cuando se selecciona como fuente de señal la fuente Chroma 61511 es posible elegir una de las señales provenientes de las tarjetas de adquisición de datos (NI 9225, NI9227, NI 9239, NI cDAQ-9172). Cabe aclarar que las señales estarán distribuidas de acuerdo con la configuración establecida por el

usuario en el circuito de trabajo.

- Determinar el tiempo en milisegundos en que se desean guardar los datos. Es importante tener en cuenta que el tiempo mínimo para guardar datos es de 100[ms].
- Seleccionar el tipo de archivo en el que desea guardar los datos. En esta parte hay dos opciones, la primera opción es un archivo .txt y la segunda opción es un archivo del tipo .xlsx que corresponde a un libro de Excel. El archivo de Excel es creado como elemento vacío y seleccionado como destino para el almacenamiento de los datos. Es importante que este archivo de Excel esté completamente vacío y que no haya sido usado anteriormente por el sistema, ya que no se almacenaran los datos correspondientes a las nuevas secuencias.
- El indicador del termómetro muestra el nivel de temperatura que se tiene en el procesador del módulo ESP32-WROOM-32, utilizando el sensor de temperatura interno del módulo.

Ahora bien, el proceso que se debe seguir para poder ejecutar el sistema inicia con la configuración de cada uno de los SSR disponibles físicamente para su operación. Cabe aclarar que si no se tienen los diez relés físicos para ser accionados o se desea trabajar solo con uno o un par de ellos, los demás puertos se deben configurar como se muestra en la Figura 31.

De acuerdo con lo anterior, se puede trabajar hasta con 10 SSR al mismo tiempo en la misma ejecución, cada SSR tiene tres parámetros importantes que se pueden configurar de la siguiente manera:

- Elección de la variable a ser tomada en cuenta para cerrar o abrir el relé. El usuario puede elegir una entre tres opciones, la primera opción es la *amplitud*

Figura 31. Configuración para los SSR que no usados.

Relé 6	Relé 7	Relé 8	Relé 9	Relé 10
Amplitud ▾	Amplitud ▾	Amplitud ▾	Amplitud ▾	Amplitud ▾
Valor 6	Valor 7	Valor 8	Valor 9	Valor 10
0	0	0	0	0
Comando 6	Comando 7	Comando 8	Comando 9	Comando 10
C ▾	C ▾	C ▾	C ▾	C ▾

Fuente: Imagen generada por los autores

de la onda de la señal que ha sido elegida para trabajar. La segunda opción es el *tiempo* expresado en milisegundos indicado por el usuario. La tercera opción es un *ángulo fase* expresado en grados, como aclaración esta tercera opción puede ser indicado desde un grado en adelante.

- Ingreso de un valor asociado al primer parámetro expresado en sus respectivas unidades (amplitud, tiempo o ángulo fase). Es importante resaltar la restricción que se tiene por las limitaciones de tiempo, esta restricción es que no se pueden accionar varios relés al mismo tiempo, ni con un valor cero en el parámetro. Es decir, no puede haber dos o más relés con el mismo punto de acción (en amplitud, tiempo o ángulo fase). Del mismo modo, no se puede accionar un relé en el punto cero inicial de la onda (salvo en los puntos múltiplos de 360 grados en desfase).

Por otro lado, es necesario explicar que la secuencia de relés puede ser accionada en cualquier orden deseado y con cualquier parámetro de accionamiento en cada uno de ellos, teniendo en cuenta la restricción expuesta anteriormente.

- Selección de la acción que se ejecute en el relé, es decir, si el usuario requiere que el relé se cierre permitiendo el paso de la corriente, o que el relé se abra

impidiendo el paso de la misma. O en su defecto, que el usuario desee no tener en cuenta un relé en específico para la ejecución del sistema. Lo anterior da tres opciones para el usuario que en la interfaz se expresan como *cerrar*, *abrir* y *C* respectivamente.

La Figura 31 presenta la configuración que debe tener en los parámetros cuando no se quiere utilizar uno o mas relés. Como aclaración para esta situación, se puede elegir indistintamente entre amplitud, tiempo o ángulo fase, pero al ingresar el valor correspondiente al primer parámetro se debe colocar el número cero, y en el tercer parámetro colocar la opción denominada *C*. Con esta configuración, el sistema entenderá que no debe tener en cuenta dicho relé para la ejecución de la secuencia.

Siguiendo con el proceso para la correcta ejecución del sistema, en la interfaz se encuentra un botón denominado *Guardar*. La función de este botón es almacenar cada uno de los parámetros configurados en el punto anterior, y una vez almacenados estos valores, se pueden cambiar y almacenar nuevamente. Este proceso se puede repetir la cantidad de veces que se desee guardar una rutina de accionamiento para los relés. Adicionalmente, en el campo de visualización llamado *SEC GUARDADA*, se pueden ver la cantidad de rutinas almacenadas.

Por otro lado, en el diseño se encuentra un botón denominado *Iniciar*, el cual inicia con cada una de las secuencias almacenadas que no hayan sido ya ejecutadas. Este proceso se observa en el campo de visualización con el nombre *SEC EJECUTADA*, el cual almacena cada uno de las secuencias que han sido realizadas por el sistema. Por consiguiente, para que una secuencia pueda ser llevada a cabo, es necesario que antes haya sido guardada y que de esta forma la cantidad expresada en *SEC EJECUTADA* sea menor a la cantidad del campo de visualización de *SEC*

GUARDADA.

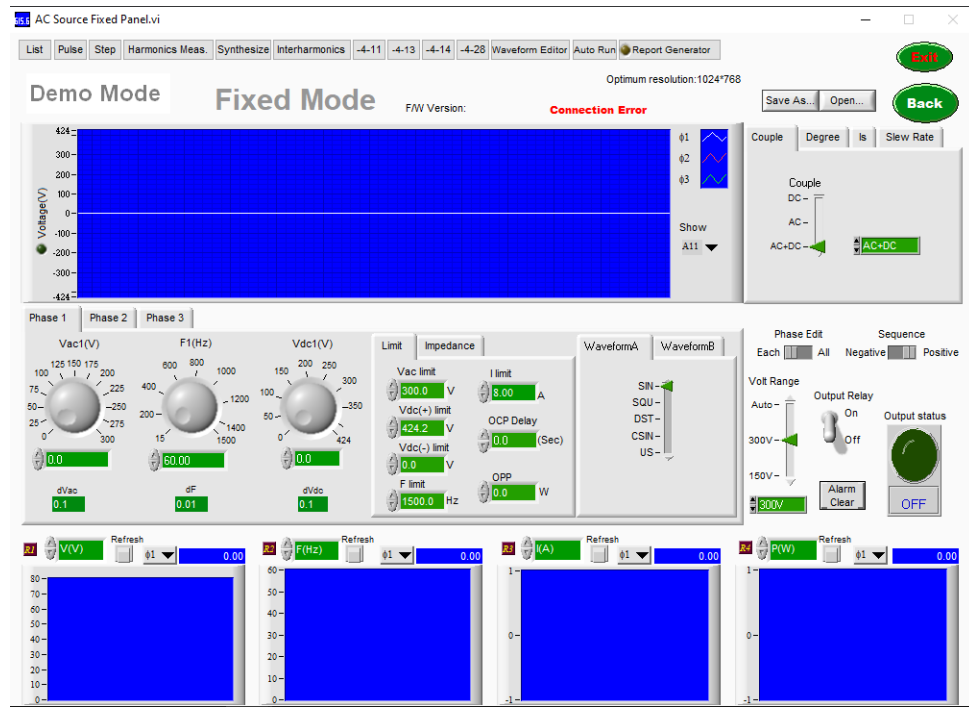
Otra característica que posee la interfaz es la ubicación de un botón de *Reset*, cuya función es dejar el sistema en sus condiciones iniciales de uso y limpia los estados de los relés, dejándolos abiertos y volviendo todo a las condiciones iniciales establecidas de operación para el módulo de control de la ESP32-WROOM-32. Una vez presionado este botón, es necesario proporcionar un nuevo documento de Excel en caso de elegir este tipo de archivo para el guardado de los datos.

Luego de tener clara la configuración de los parámetros para una ejecución del sistema, se procede a explicar la función del LED indicador *Disponible*, como su nombre lo dice su función es indicar cuando el sistema está esperando a que sea ingresado a memoria una nueva secuencia o que sean ejecutadas las secuencias que se encuentran ya almacenadas y que no han sido realizadas antes. Por otro lado, en la interfaz se encuentra un switch con el nombre de *PANEL CHROMA*, su función es que al hacer click en él se ejecute el panel de configuración de la fuente Chroma 61511. Este switch sólo está habilitado cuando se elige como fuente de señal la fuente Chroma 61511. En la Figura 32 se presenta el panel virtual de configuración de la fuente Chroma 61511 desde el cual se puede configurar cada uno de los parámetros de la señal que se desea obtener, ya sea emulando la red eléctrica u obteniendo otro tipo de señal de interés.

Como aclaración importante, el panel presentado en la Figura 32, no es creado ni editado por los autores del presente proyecto, si no que es suministrado por la empresa que manufactura la fuente Chroma 61511.

7.1.2. Pestaña Chroma 61511 (Tarjetas NI) En la Figura 33 se presenta la interfaz correspondiente a la segunda pestaña en donde se tiene la posibilidad de

Figura 32. Panel virtual para la configuración y control de la Chroma 61511.

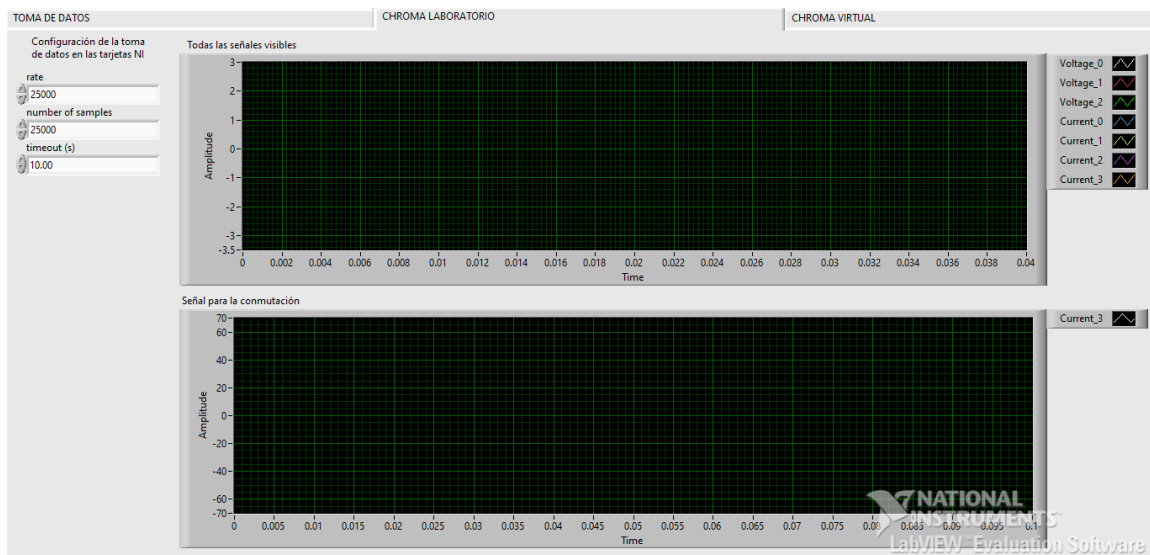


Fuente: Tomado de Chroma Systems Solutions. *Chroma SoftPanel*.

configurar parámetros como la tasa de muestreo con la que las tarjetas NI capturan las señales en cada uno de los canales, el número de muestras por tarea de ciclo y el tiempo de espera máximo para leer y escribir los datos. En el gráfico superior se muestra todas las señales obtenidas de las tarjetas NI (ver Figura 34). Por otra parte, en el gráfico inferior se muestra la señal seleccionada para realizar la conmutación de los SSR.

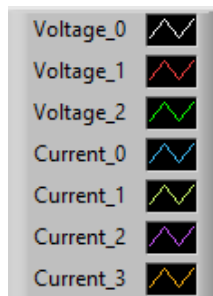
Una vez configurada la forma en que se va a recibir la señal por parte de las tarjetas de adquisición de datos, hay que tener claro que el usuario puede modificar la señal de la fuente Chroma desde el panel virtual de la Chroma 61511 (Figura 32), si se está trabajando con ella.

Figura 33. Interfaz de usuario para los datos de las tarjetas NI.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 34. Diferentes señales disponibles provenientes de las tarjetas NI.



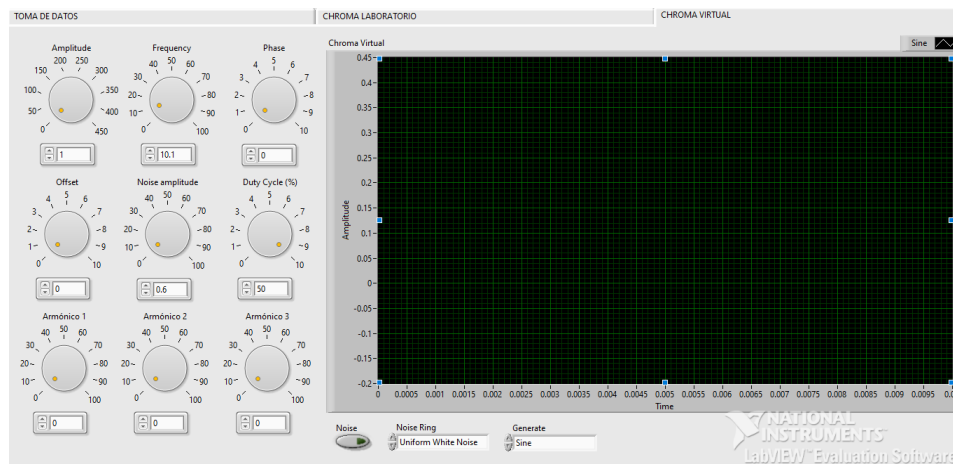
Fuente: Imagen generada por los autores

7.1.3. Pestaña Chroma virtual (Generador de señales interno) Para la tercera pestaña se le asigna el nombre de Chroma Virtual, la función principal es simular el comportamiento de señales que la Chroma 61511 existente en el laboratorio pueda generar. Este simulador es utilizado para evaluar el comportamiento del sistema sin necesidad de tener la Chroma 61551 físicamente, permitiendo hacer pruebas de comunicación y calibración en el accionamiento de los relés. En la Figura 35 se

presenta la interfaz que se encuentra en esta pestaña. Dentro de las configuraciones de este simulador, se encuentran las siguientes:

- El ajuste de la amplitud de la señal desde 0[V] hasta 450[V].
- La posibilidad de cambiar la frecuencia principal de la señal entre 0[Hz] y 100[Hz].
- Ajustar el ángulo fase de 0° a 360° ,
- Ajustar el offset de la señal entre 0[V] y 10[V].
- Adicionar ruido a la señal del tipo Uniform White Noise, Gaussian White Noise, Periodic Random Noise, Gamma Noise, Poisson Noise, Binomial Noise, Bernoulli Noise, MLS Sequence, con una amplitud desde 0[V] hasta 100[V].
- El ajuste del tercer, quinto y séptimo armónico de la señal principal.

Figura 35. Interfaz para la Chroma virtual (generador de señales de interno).



Fuente: Imagen generada por los autores

Por lo tanto, se procede a la explicación de la programación que hay detrás de la interfaz gráfica y que permite realizar el proceso de control, adquisición y guardado de datos.

7.2. PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE CONTROL

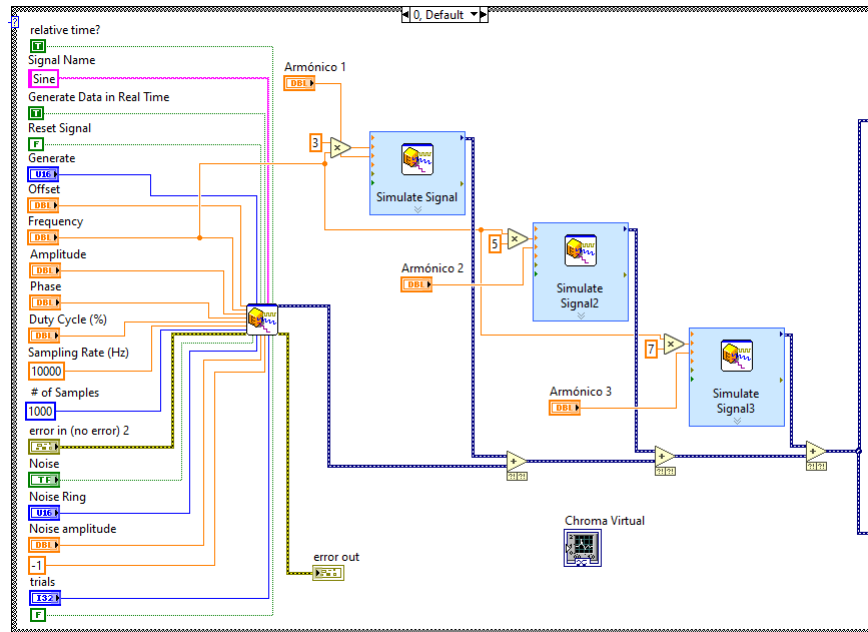
La programación de la plataforma de control está dividida en dos partes importantes, la primera esta asociada a la interfaz en LabVIEW presentada en la sección anterior y la segunda al módulo de control ESP32-WROOM-32.

En primer lugar, se presenta la programación de la interfaz de control en LabVIEW debido a que estos algoritmos son los encargados de tomar los parámetros ingresados por el usuario para poder llevar a cabo la ejecución de las secuencias y enviar estos parámetros al microcontrolador. En segundo lugar, se expone la programación del módulo de control ESP32-WROOM-32, el cual es el encargado de generar las señales de control para el accionamiento de los SSR en el momento indicado por el usuario en la interfaz de control. Entonces, para entrar en detalle con la programación de la interfaz de control esta se divide en tres secciones independientes, las cuales, intercambian datos entre ellas y se describen de la siguiente forma:

1. La primera sección se presenta en la Figura 36, allí se muestra los bloques pertenecientes al ciclo que provee las señales al sistema, el cual es el encargado de seleccionar y de suministrar cada una de las señales con las cuales se realizan las simulaciones.

La segunda secuencia de bloques se puede apreciar en la Figura 37, en la cual se inicializa un módulo DAQ que corresponde a la lectura de los datos tomados por las tarjetas de adquisición de datos NI. Posteriormente, se selecciona la señal de preferencia para trabajar con el bloque *Case Structure*, en donde el parámetro de selección depende de la decisión tomada por el usuario en la interfaz de control en la opción de la señal para realizar la conmutación observado en la Figura 30. Adicionalmente, al tener esta opción elegida, el sistema permite abrir el panel para controlar la Chroma 61511 (ver Figura 32).

Figura 36. Diagrama de bloques para la Chroma virtual.

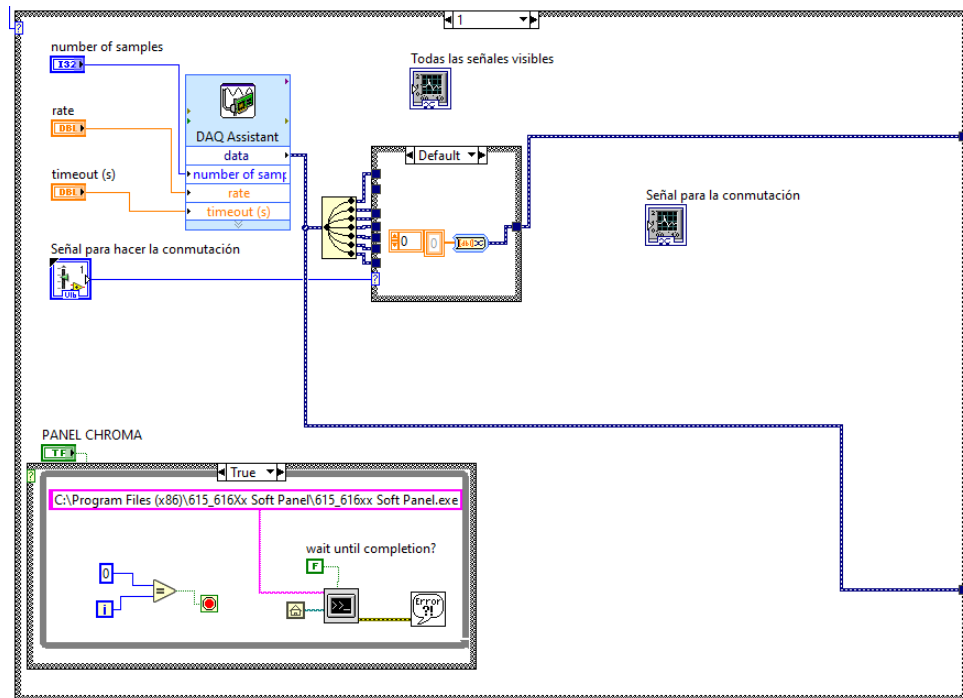


Fuente: Imagen generada por los autores

2. La segunda sección es el almacenamiento de las señales, y ésta a su vez se divide en dos partes.

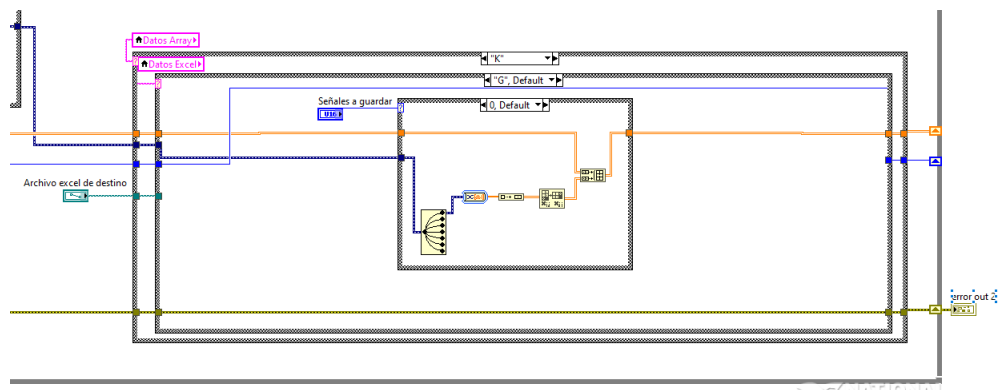
En la primera parte se realiza la acción de guardar los datos de la señal de interés por medio de un array dentro de la memoria del programa. En las Figuras 38 y 39 se puede observar la estructura de almacenamiento en un array generado para guardar los datos de interés, en el cual, los datos se almacenan a partir de que la orden de iniciar la secuencia en los SSR como ha sido configurada es enviada al módulo ESP32-WROOM-32. Los datos se almacenan hasta que el tiempo determinado por el usuario determinó se cumpla. Es importante resaltar que la orden de inicio se produce cuando se encuentra un cruce por cero con pendiente positiva en la señal de interés.

Figura 37. Diagrama de bloques para la lectura de los datos de las tarjetas NI.



Fuente: Imagen generada por los autores

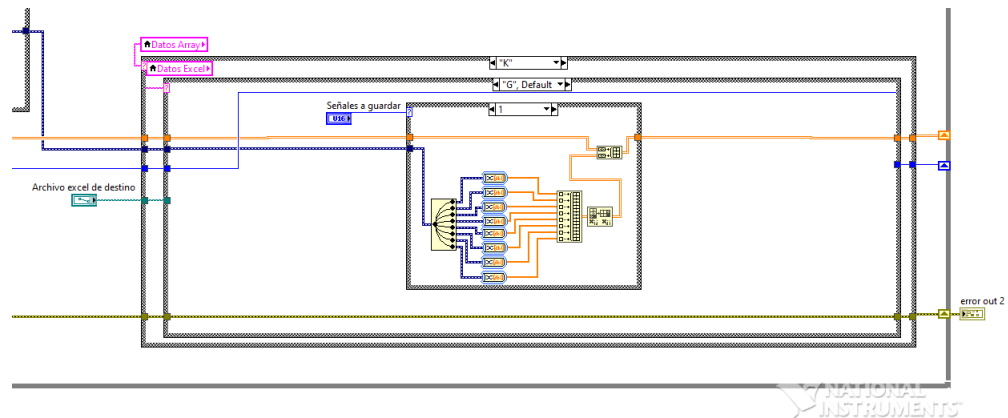
Figura 38. Diagrama de bloques para el almacenamiento de la señal captada.



Fuente: Imagen generada por los autores.

En la segunda parte de la sección de almacenamiento, se procede a guardar todos los datos existentes dentro del array generado en la memoria del progra-

Figura 39. Diagrama para el almacenamiento de todas las señales captadas.

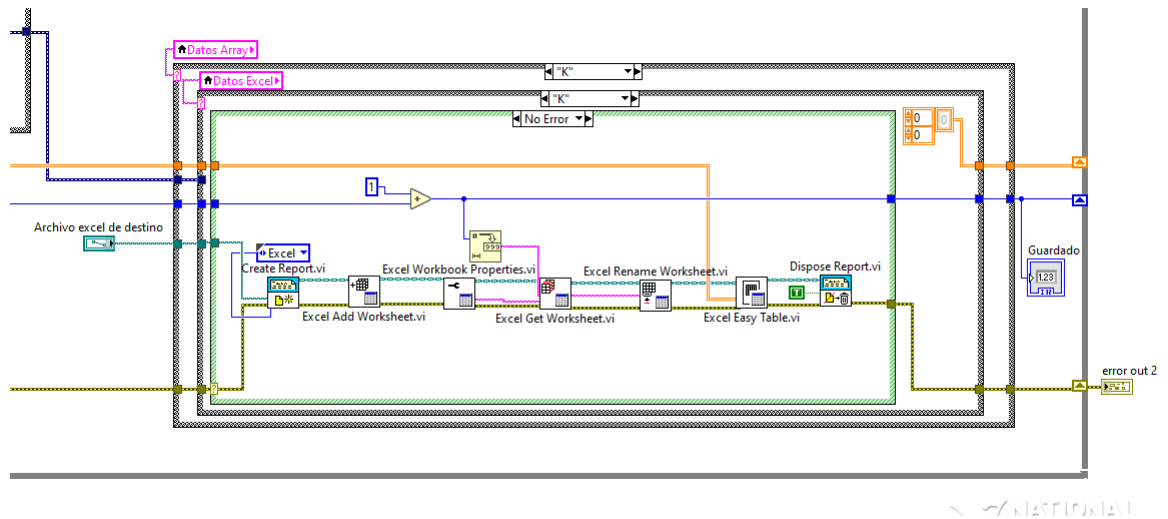


Fuente: Imagen generada por los autores

ma a un archivo de Excel (Figura 40) o a un archivo de texto .txt (Figura 42). El traslado de todos estos datos al libro de Excel o al archivo .txt se realiza una vez el tiempo indicado por el usuario haya terminado, y de esta manera poder guardar el archivo automáticamente. Los datos almacenados dentro del libro de Excel o el .txt se organizan de forma que cada columna corresponde a una señal en específica y cada hoja dentro del libro corresponde a los datos de una secuencia programada por el usuario. Esto quiere decir, que si el usuario programa N secuencias, se crean N hojas dentro del archivo de Excel, como se puede observar en la Figura 41. En la primera columna del archivo de Excel se encuentra la señal que ha sido seleccionada para ser la base de la conmutación, y enseguida se presenta cada una de las señales asociadas que vienen siendo capturadas por el dispositivo de medición.

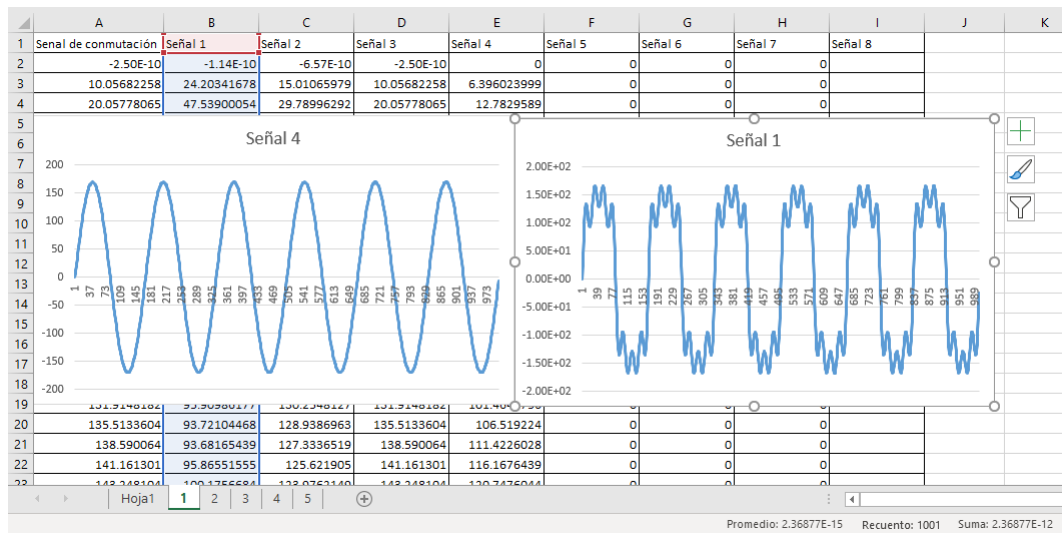
En la Figura 42, se muestran los datos almacenados en un archivo de texto, en formato de filas y columnas al igual que en el archivo de Excel, en donde la primer columna corresponde a la señal de conmutación y las demás a cada una de las siguientes señales captadas, en orden como han sido recibidas.

Figura 40. Diagrama para el almacenamiento de los datos guardados en excel.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 41. Ejemplo de una secuencia de 5 ejecuciones.



Fuente: Imagen generada por los autores

Por otro lado, en la Figura 43 se observa el diagrama de bloques que describe el proceso de almacenamiento de los datos en el archivo de tipo .txt.

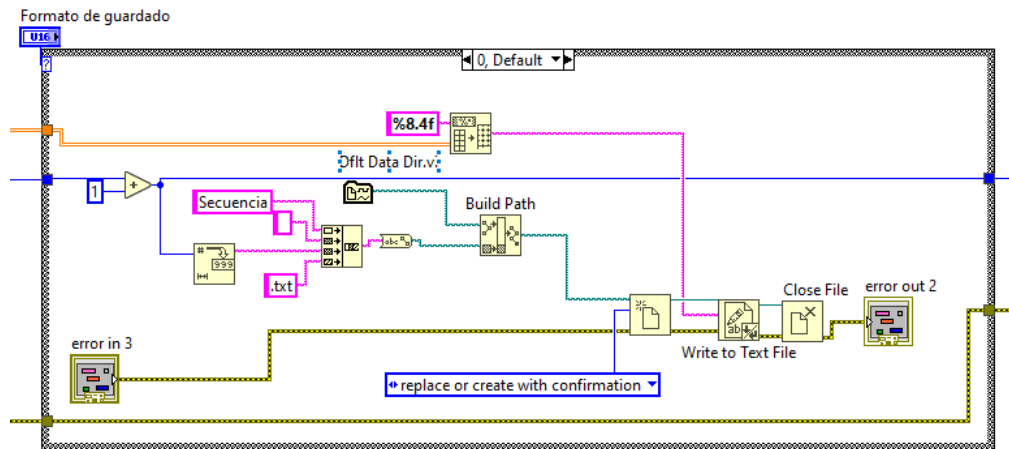
3. En la tercera sección se encuentra el envío de los datos de cada una de las

Figura 42. Datos almacenados en un archivo de texto.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23.6110	23.6110	15.6584	9.9444	6.5026	0.0000	
46.3888	46.3888	31.0527	19.8339	12.9956	0.0000	
67.5491	67.5491	45.9267	29.6139	19.4695	0.0000	
86.4025	86.4025	60.0410	39.2314	25.9149	0.0000	
102.3940	102.3940	73.1794	48.6350	32.3221	0.0000	
115.1336	115.1336	85.1563	57.7756	38.6819	0.0000	
124.4169	124.4169	95.8218	66.6073	44.9849	0.0000	
130.2329	130.2329	105.0660	75.0873	51.2218	0.0000	
133.7603	133.7603	113.8223	82.4760	57.3825	0.0000	

Fuente: Imagen generada por los autores

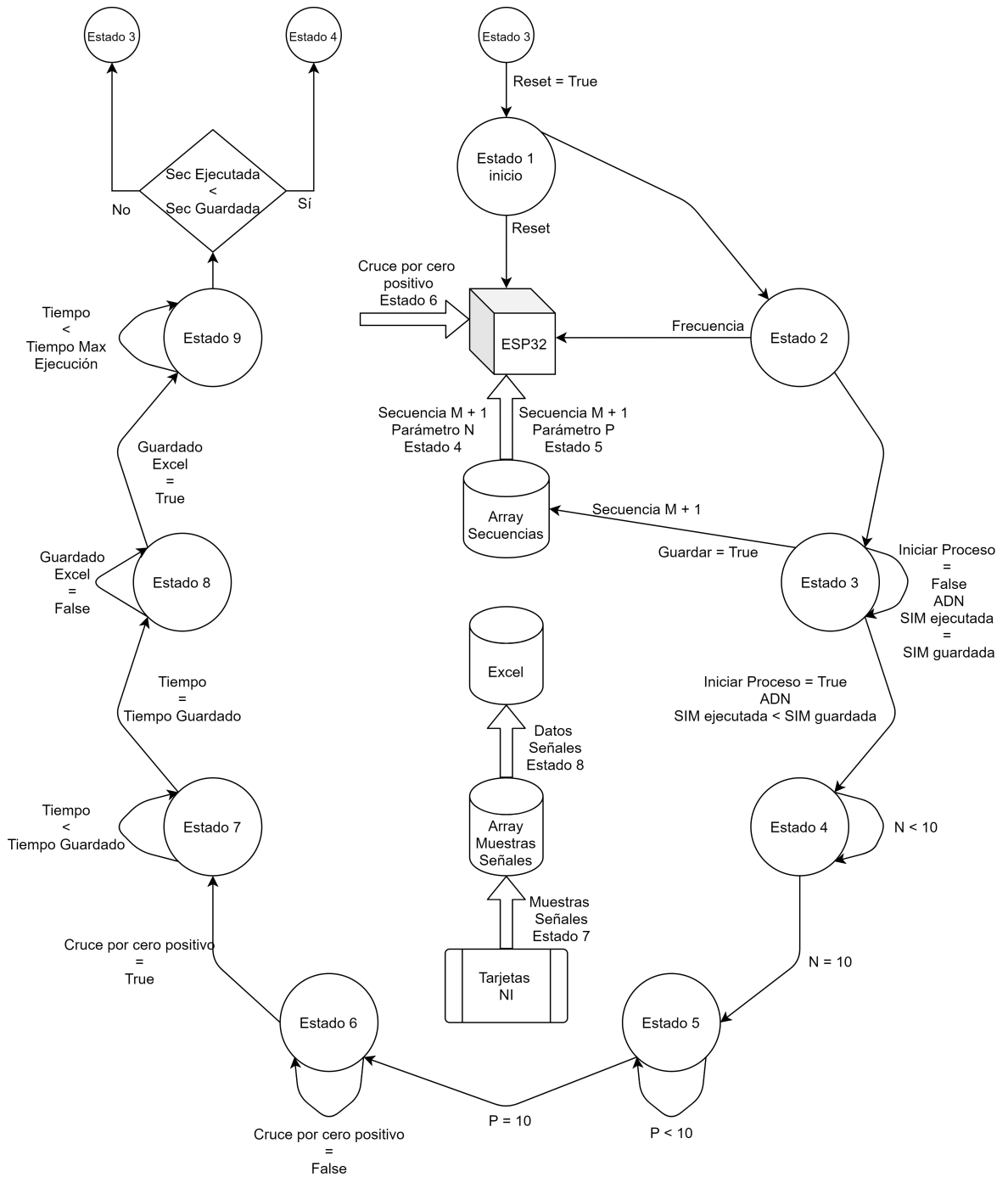
Figura 43. Diagrama para el almacenamiento de los datos en el archivo .txt.



Fuente: Imagen generada por los autores

secuencias. Este envío se hace por medio de estados de ejecución, en donde cada estado cumple una función específica dentro del ciclo que se repite cada vez que se envía una orden al módulo de control ESP32-WROOM-32.

Figura 44. Diagrama de estados para la secuencia de LabView.

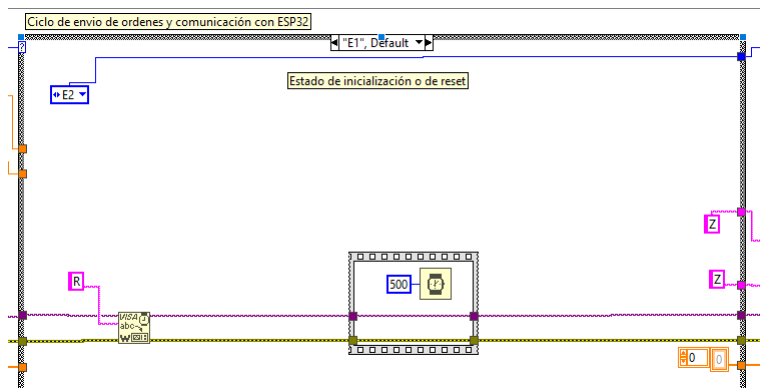


Fuente: Imagen generada por los autores

En la Figura 44, se puede apreciar el diagrama de estados correspondiente para la rutina creada en LabVIEW. A continuación se explica cada uno de los estados.

- **Estado 1** (Figura 45), es el encargado de establecer las condiciones iniciales del sistema, es decir, retorna la secuencia de relés a su estado inicial (relés abiertos), y establece las condiciones de la interfaz de control para iniciar con un nuevo bloque de ejecuciones. Como se observa en la Figura 44. La ejecución en este estado es de un solo ciclo.

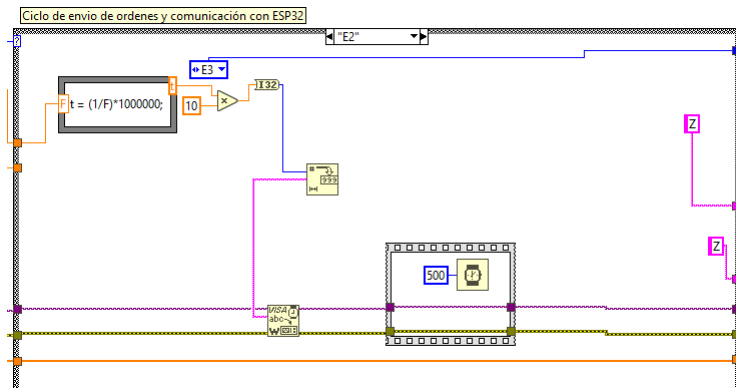
Figura 45. Diagrama de bloques para el estado 1 en LabVIEW.



Fuente: Imagen generada por los autores

- **Estado 2** (Figura 46), es el encargado de enviar al modulo de control ESP32-WROOM-32 el tiempo correspondiente a un ciclo de la onda seleccionada para la conmutación. En la Figura 44 se indica que este estado es de una sola ejecución y pasa al estado 3 en el siguiente ciclo.
- **Estado 3** (Figura 47), es el estado estacionario y de recepción de la información suministrada por el usuario para las secuencias de ejecución en los relés. En él se genera el array de datos que contiene cada una de las secuencias ingresadas (Figura 48). Adicionalmente, como se explicó para la pestaña principal de la interfaz, cada vez que se almacena un una

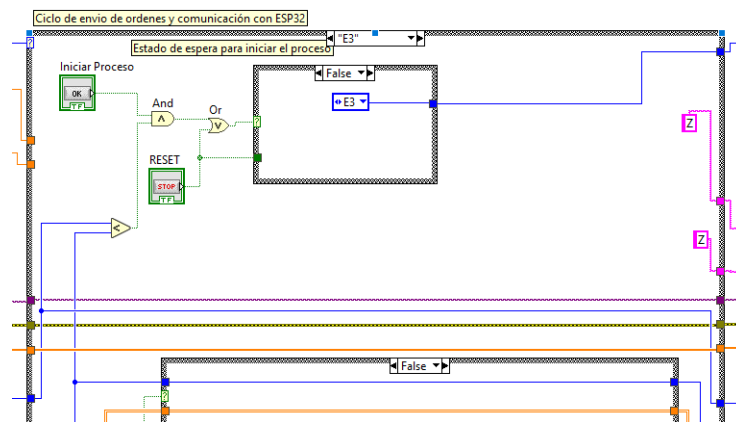
Figura 46. Diagrama de bloques para el estado 2 en LabVIEW.



Fuente: Imagen generada por los autores

secuencia en memoria se aumenta en uno el valor de la variable *SEC GUARDADA*, con la cual se controla el flujo de ejecuciones en los estados siguientes. En el diagrama de estados (Figura 44) se observa que la permanencia en este estado, es hasta que sea dada la orden de inicio para el envío de las secuencias al módulo de control ESP32-WROOM-32.

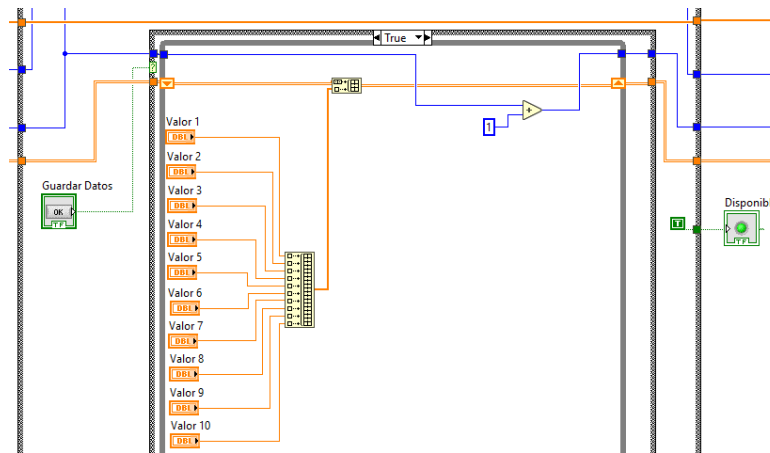
Figura 47. Estado 3 en LabVIEW. Condiciones de trabajo



Fuente: Imagen generada por los autores

- **Estado 4** (Figura 49), se encarga de enviar al módulo de control ESP32-WROOM-32 mediante comunicación por puerto serie los parámetros N

Figura 48. Estado 3, almacenamiento de las secuencias en un array de datos.

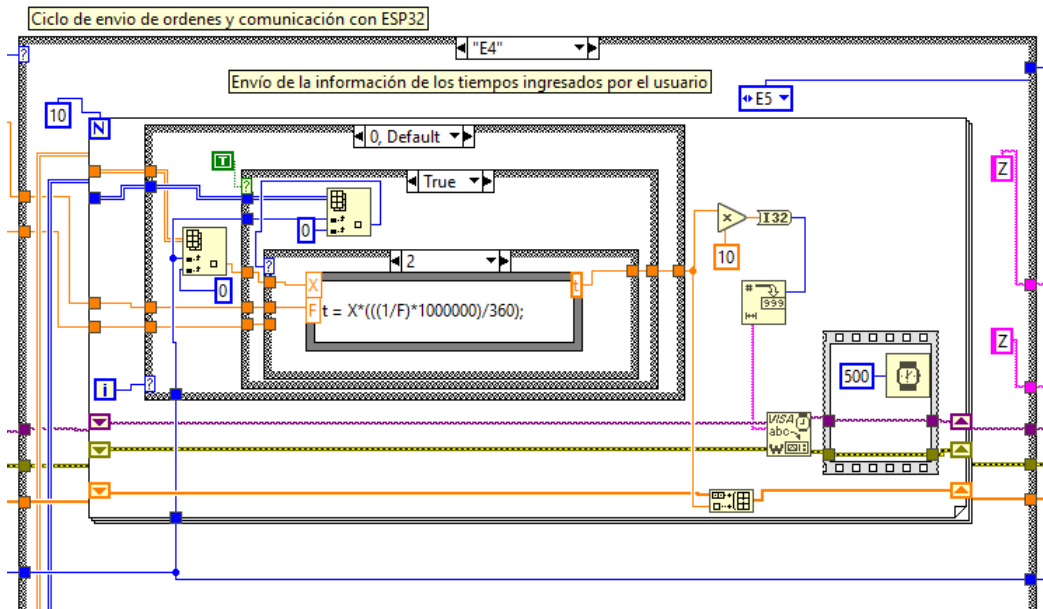


Fuente: Imagen generada por los autores

que corresponden a los tiempos indicados en la secuencia para el accionamiento de cada uno de los relés, estos tiempos se envían en la unidad de microsegundos. En el diagrama de estados (Figura 44) se especifica que el sistema se mantiene en este estado por 10 ciclos, de los cuales cada uno tiene un retardo de 500[ms], garantizando que los datos sean enviados de forma correcta. Una vez enviados todos los datos correspondientes a los tiempos de la secuencia $M + 1$, se pasa al siguiente estado de ejecución.

- **Estado 5** (Figura 50), al igual que el estado anterior, este estado se encarga de enviar datos al módulo de control, pero en este caso los datos a enviar son los valores correspondientes al parámetro P , el cual contiene las órdenes de encendido (cerrar) o apagado (abrir) para cada uno de los relés. Del mismo modo que en el estado 4, la secuencia se mantiene en esta posición por 10 ciclos con un retardo de 500[ms] para cada ciclo.
- **Estado 6** (Figura 51), es el encargado de hallar un cruce por cero con

Figura 49. Diagrama de bloques para el estado 4 de ejecución en LabVIEW.

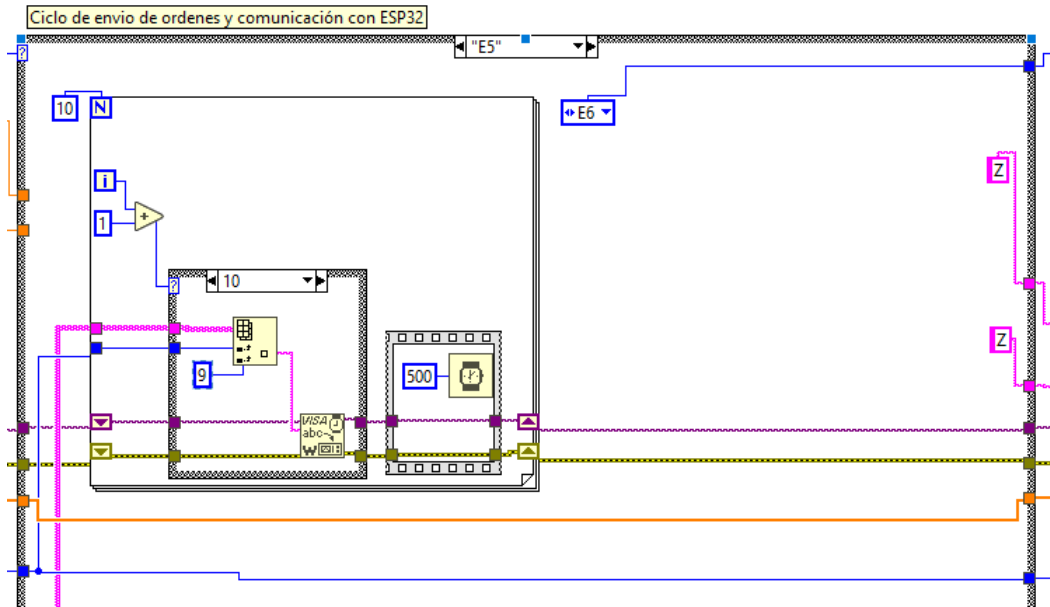


Fuente: Imagen generada por los autores

pendiente positiva y con una exactitud aproximada igual a $\pm 0.1[V]$. Este punto se halla para enviarle la señal o una bandera al módulo de control ESP32-WROOM-32 para que opere con los datos que ya le han sido enviados en los estados anteriores.

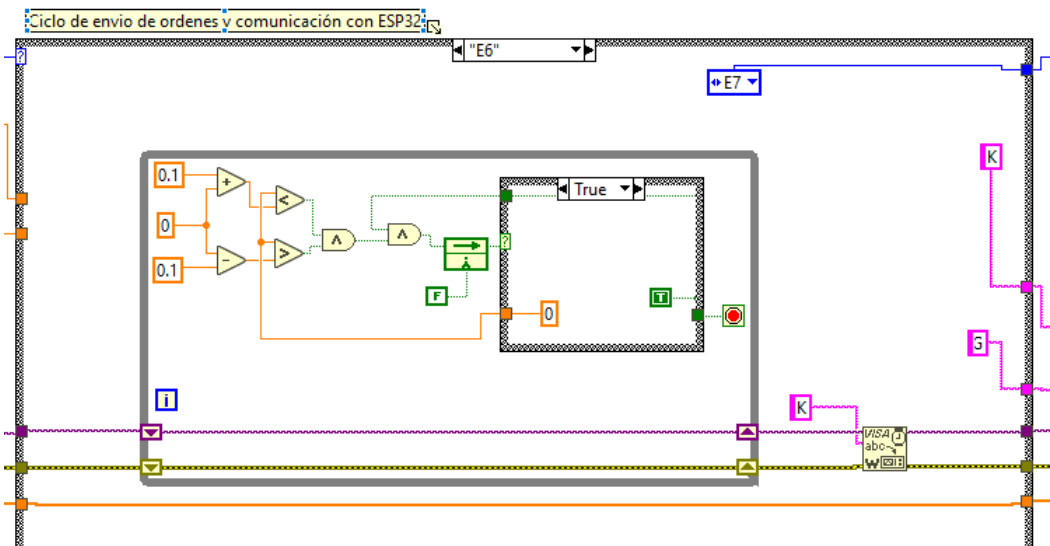
- **Estado 7** (Figura 52), se encarga de dar la pausa de espera para que sean guardados los datos en un array de la memoria interna a partir del punto de cruce por cero hallado anteriormente. El sistema se mantiene en esta posición durante el tiempo que haya sido indicado por el usuario para el almacenamiento de los datos.
- **Estado 8** (Figura 53), se encarga de dar la pausa de espera para que sean almacenados los datos en el archivo de Excel o el archivo de TXT seleccionado por el usuario. La pausa se hace con el objetivo de evitar que una nueva secuencia sea llevada a cabo antes de que este proceso

Figura 50. Diagrama de bloques para el estado 5 de ejecución en LabVIEW.



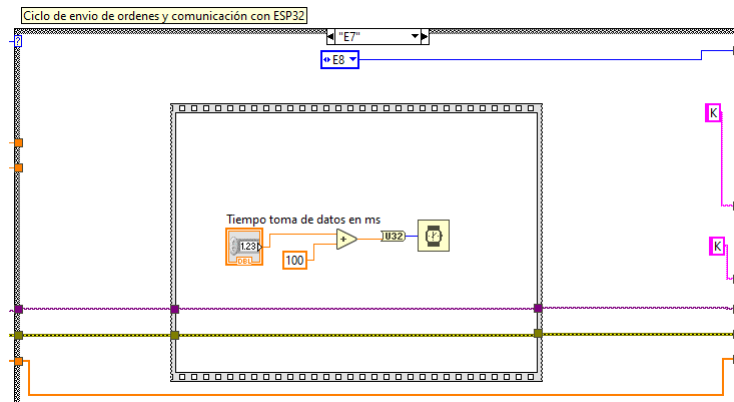
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 51. Diagrama de bloques para el estado 6 de ejecución en LabVIEW.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 52. Diagrama de bloques para el estado 7 de ejecución en LabVIEW.

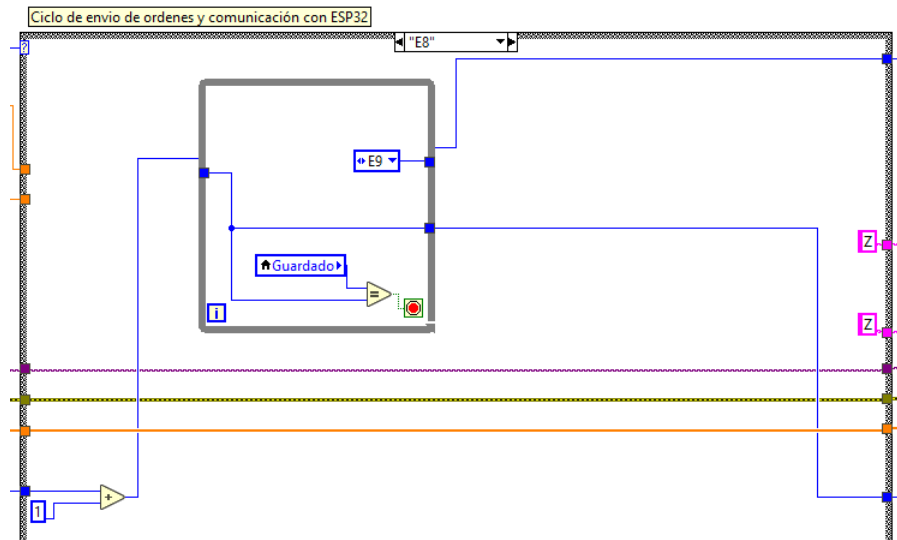


Fuente: Imagen generada por los autores

termine y así impedir la generación de errores de ejecución inesperados.

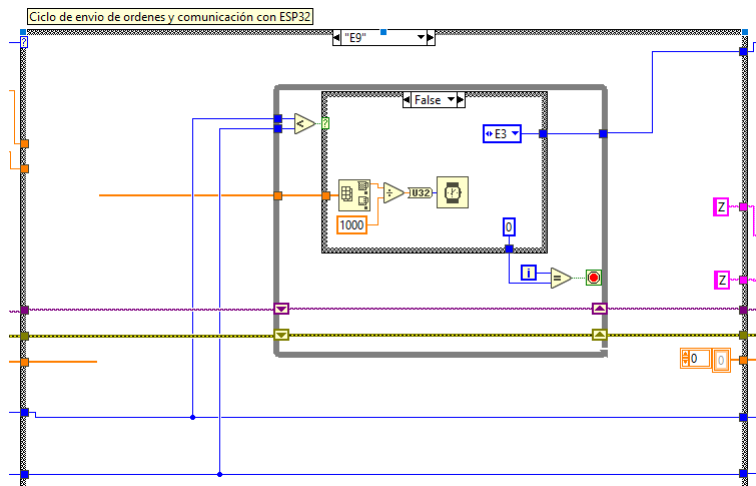
- **Estado 9** (Figura 54), es el encargado de seleccionar la siguiente secuencia de ejecución. Si el sistema pasa a el estado 3 de espera a nuevas ordenes del usuario, o continua con la ejecución de la siguiente operación que fue almacenada previamente por el usuario. Este proceso se lleva a cabo por medio de las variables *SEC EJECUTADA* y *SEC GUARDADA*, como se observa en el diagrama de estados de la Figura 44. Cuando el valor de la *SEC EJECUTADA* es menor al valor de la *SEC GUARDADA*, se hace un salto al estado 4 para continuar con la ejecución de la siguiente orden almacenada en memoria. Adicionalmente, el tiempo de espera o de permanencia de este estado depende del tiempo máximo ingresado por el usuario para los relés, garantizando de esta forma que solo se le enviaran nuevas ordenes al módulo de control ESP32-WROOM-32 cuando se encuentre a la espera de las mismas.

Figura 53. Diagrama de bloques para el estado 8 de ejecución en LabVIEW.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 54. Diagrama de bloques para el estado 9 de ejecución en LabVIEW.



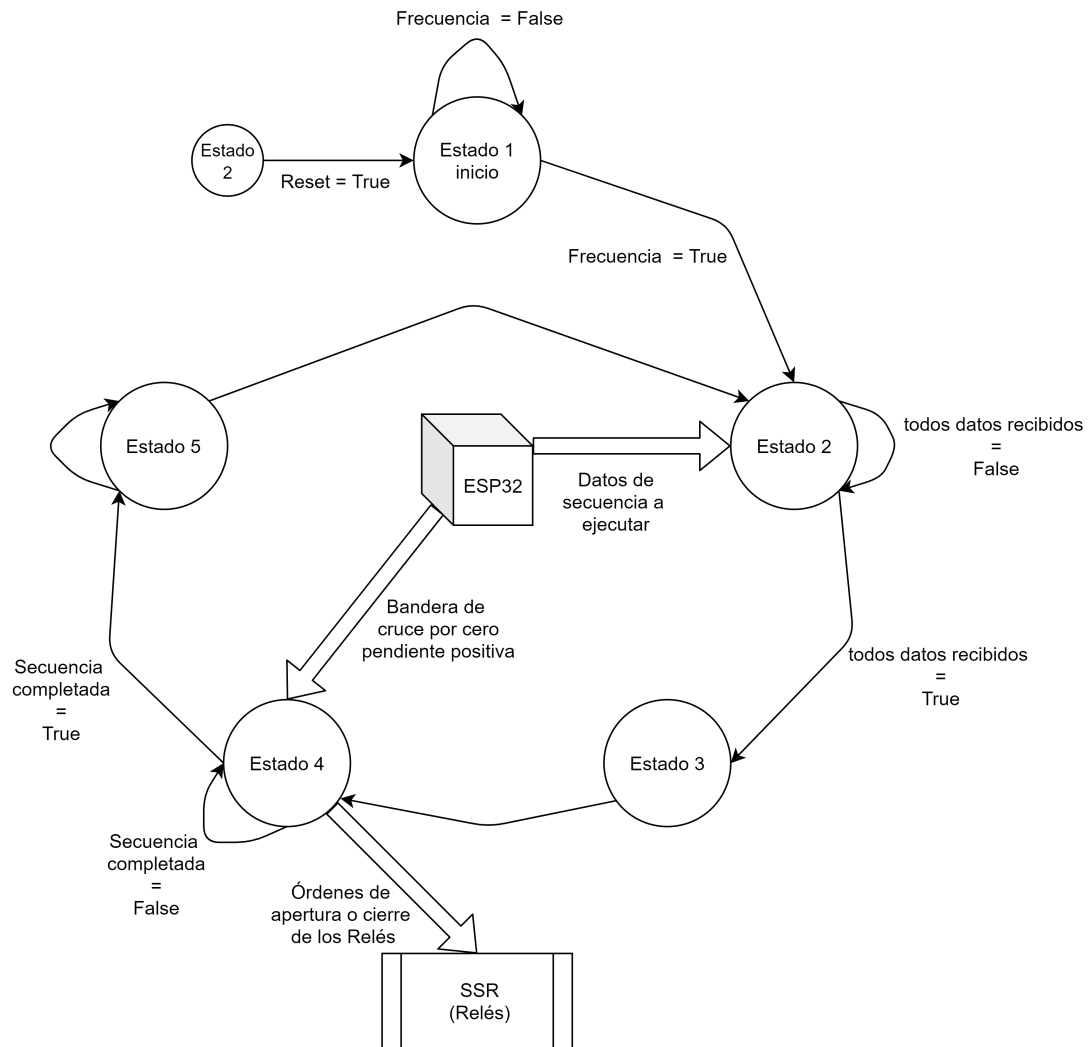
Fuente: Imagen generada por los autores

7.3. PROGRAMACIÓN MÓDULO DE CONTROL ESP32

La estructura de la programación en el módulo de control ESP32-WROOM-32 está compuesta por estados de ejecución como se presenta en la Figura 55 que se des-

criben a continuación.

Figura 55. Diagrama de estados el módulo ESP32-WROOM-32.



Fuente: Imagen generada por los autores

Todo se basa en la comunicación por puerto serial, la cual se realiza a 9600[Bauds] y se trabaja con una escala de tiempo en microsegundos. Esto se hace para garantizar la mayor exactitud posible en cada uno de los tiempos asignados en las órdenes del usuario.

- **Estado 1** (Figura 56), es el estado de inicio. Se encarga de dar las condiciones iniciales a cada uno de los relés (abiertos) que posteriormente serán accionados. Además de ello, recibe la información proveniente de LabVIEW referente a la frecuencia de la señal que ha sido seleccionada para realizar la conmutación. La permanencia en este estado depende de la entrada de dicha frecuencia (Figura 55).

Figura 56. Código referente al estado 1 del módulo ESP32-WROOM-32.

```

case 0:
    digitalWrite(rele_1 , LOW);
    digitalWrite(rele_2 , LOW);
    digitalWrite(rele_3 , LOW);
    digitalWrite(rele_4 , LOW);
    digitalWrite(rele_5 , LOW);
    digitalWrite(rele_6 , LOW);
    digitalWrite(rele_7 , LOW);
    digitalWrite(rele_8 , LOW);
    digitalWrite(rele_9 , LOW);
    digitalWrite(rele_10, LOW);

    //Serial.println("estado 0");
    delay(100);
    for (int i = 0; i < 10; i++)
    {
        //
    }
    posicion_tiempos = 0;
    posicion_ordenes = 0;

    if(Serial.available() > 0)
    {
        orden_recibida = Serial.read();
        if(orden_recibida >= '0' && orden_recibida <= '9' && posicion_tiempos < 10)
        {
            //
        }
    }
    else
    {
        estado = 0;
    }
    delay(100);

```

Fuente: Imagen generada por los autores

- **Estado 2** (Figura 57), este es el estado de espera para la recepción de las ordenes provenientes de la interfaz de control, y lo que se hace es almacenar una secuencia de comandos para ser ejecutada. Una vez se ha recibido dicha secuencia se pasa al siguiente estado.
- **Estado 3** (Figura 58), se encarga de realizar el ordenado del vector de tiem-

Figura 57. Código referente al estado 2 de la ESP32-WROOM-32.

```
case 1:
  //Serial.println("estado 1");
  delay(100);
  //Serial.println(posicion_ordenes);
  //Serial.println(posicion_tiempos);
  if(posicion_tiempos == 10 && posicion_ordenes == 10)
  {
    posicion_tiempos = 0;
    posicion_ordenes = 0;
    estado = 2;
    break;
  }
  else
  {
    estado = 1;
  }

  if(Serial.available() > 0)
  {
    //
  }
  //delay(100);
  break;
```

Fuente: Imagen generada por los autores

pos de menor a mayor, dejando el tiempo más pequeño al inicio del vector y el más grande al final. De modo que el paso a seguir sea hallar la diferencia aritmética, empezando por el valor más grande, hasta llegar al más pequeño. De esta manera se garantiza que los tiempos de accionamiento para cada relé será el adecuado y no un acumulado de los tiempos de ejecución anteriores.

El método usado para organizar el vector es el *Quick Sort*.

- **Estado 4** (Figura 59), se encarga de entregar las señales de control a cada uno de los relés. Su operación comienza cuando se recibe la bandera de entrada del detector de cruce por cero. Luego de esto, se tienen en cuenta los tiempos de retardo en la ejecución y en la comunicación, de tal forma que la secuencia inicia en el siguiente ciclo de la onda.
- **Estado 5** (Figura 60), este estado reinicia los vectores usados en la secuencia,

Figura 58. Código referente al estado 3 de la ESP32-WROOM-32.

```
case 2:
  ///Serial.println("estado 2");
  delay(100);
  //Serial.println(periodo);
  QuickSortAsc(tiempos, ordenes, gemelos, 0, 9);

  for(int i=1; i < 10; i++)
  {
    ///Serial.println("ESTOY METIDO ACA");
    tiempos[10-i] -= tiempos[9-i];
  }
}
```

Fuente: Imagen generada por los autores

preparando cada uno para recibir nuevas instrucciones a ejecutar. De este estado se pasa al estado 2, en el cual se esperan nuevas secuencias para ser ejecutadas.

Luego de hacer la descripción del funcionamiento general de la plataforma de control junto con la programación y el diseño, se muestran los resultados obtenidos al hacer uso de esta junto con el módulo ESP32-WROOM-32 en el siguiente capítulo.

Figura 59. Fragmentos de código referente al estado 4 de la ESP32-WROOM-32.

```
for(int i=0; i < 10; i++)
{
  ///Serial.println("accionando reles");
  rele = gemelos[i];
  accion = ordenes[i];
  retardo = tiempos[i];
  //Serial.println("rele: " + String(rele));
  if(rele == 1)
  {
    if(accion == 'A')
    {
      T_2 = micros();
      //Serial.println("RELE_1");
      //Serial.println(String(T_2 - T_1));
      delayMicroseconds(retardo - (T_2 - T_1) - 4);
      T_1 = micros();
      //REG_WRITE(GPIO_OUT_W1TS_REG, BIT23);//GPIO2 HIGH (set) R1
      digitalWrite(rele_1 , HIGH);
    }
    else if(accion == 'B')
    {
      T_2 = micros();
      //Serial.println("RELE_1");
      //Serial.println(String(T_2 - T_1));
      delayMicroseconds(retardo - (T_2 - T_1) - 4);
      T_1 = micros();
      //REG_WRITE(GPIO_OUT_W1TC_REG, BIT23);//GPIO2 LOW (clear) R1
      digitalWrite(rele_1 , LOW);
    }
  }
}
```

Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 60. Fragmentos de código referente al estado 5 de la ESP32-WROOM-32.

```
case 4:
  for (int i = 0; i < 10; i++)
  {
    tiempos[i] = 0;
    ordenes[i] = 'C';
    gemelos[i] = i + 1;
  }
  estado = 1;
  break;
```

Fuente: Imagen generada por los autores

8. SIMULACIONES

En este capítulo se describe las simulaciones obtenidas a partir de los resultados ya expuestos en los capítulos anteriores.

8.1. SIMULACIONES DE LA PLATAFORMA DE CONTROL Y EL SISTEMA EMBEBIDO DEL MÓDULO ESP32-WROOM-32

Se anexa como soporte audiovisual un vídeo que es complementario a la simulación que se describe a continuación en sus diferentes pasos.

8.1.1. Configuración del panel de control y del circuito con el módulo de procesamiento ESP32-WROOM-32 Como primer paso, se elige el puerto COM de comunicación que está siendo usado por el módulo de control ESP32-WROOM-32 (Figura 61). Para iniciar la prueba, es necesario que antes de correr

Figura 61. Elección del puerto USB usado por el ESP32-WROOM-32

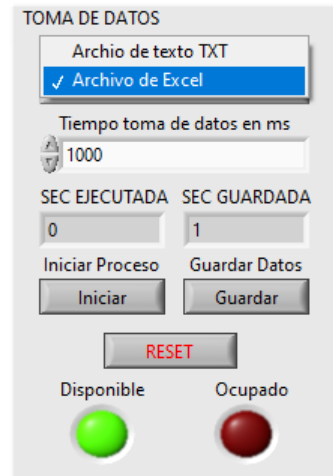


Fuente: Imagen generada por los autores

Seguidamente se ejecuta el programa, el cual se entregará en anexos con una versión compatible con LabVIEW 2020. Cuando el programa se esté ejecutando, se

elige el formato del archivo en el que se desea guardar los datos (Figura 62).

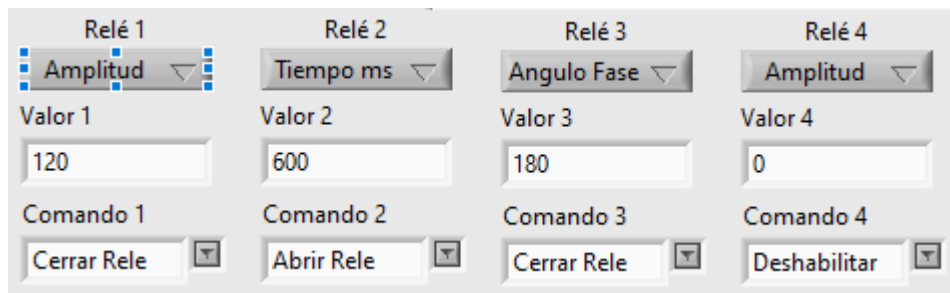
Figura 62. Configuración de las secuencias de ejecución.



Fuente: Imagen generada por los autores

Una vez elegido el tipo de archivo, se puede elegir la cantidad de tiempo en milisegundos en la cual se almacenan los datos y se configura la acción que se requiere en cada uno de los relés conectados al sistema (Figura 63).

Figura 63. configuración de las diferentes variables en los relés.

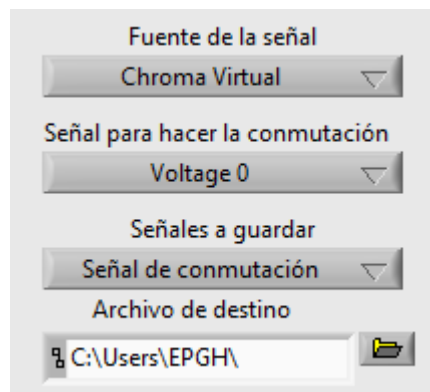


Fuente: Imagen generada por los autores

Después, se guarda la secuencia y se configura una nueva para cada relé, según sea la necesidad y es importante guardarla nuevamente.

Luego se elige la señal con la cual se desea que el sistema opere, cuantas de ellas almacenar y en qué ubicación y archivo hacerlo (Figura 64).

Figura 64. Elección de las señales de trabajo, de guardado y el archivo de destino.



Fuente: Imagen generada por los autores

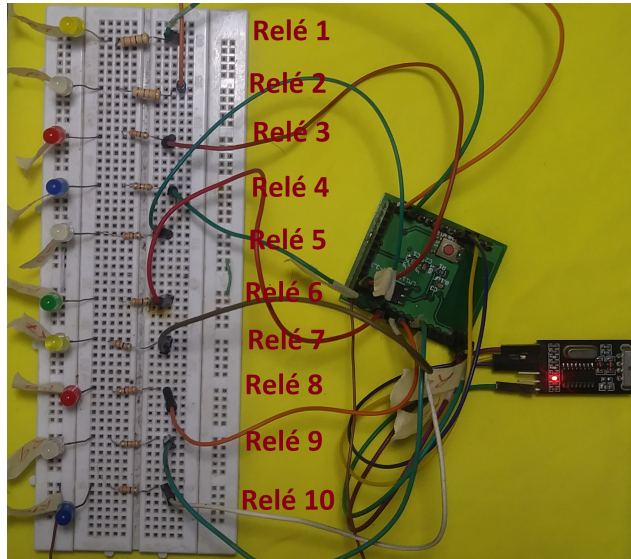
Con estos parámetros configurados en la interfaz de LabVIEW, se pasa a la configuración del circuito generado para realizar la prueba (Figura 65), en el cual cada uno de los LEDs representa las señales que recibe cada etapa de amplificación para cada uno de los relés correspondientes.

La tarjeta usada es un módulo ESP32-WROOM-32 integrado en una PCB diseñada para pruebas, en conjunto con un driver USB CH340.

Los resultados obtenidos de las pruebas, se muestran a través de los datos tomados y guardados en los diferentes formatos. En la Figura 66 se observa un ejemplo de los datos almacenados en un archivo de formato Excel.

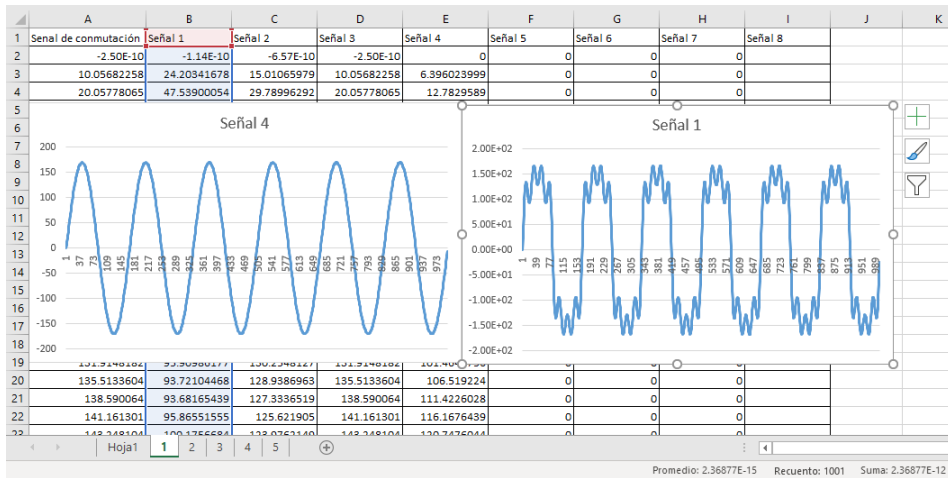
Seguidamente en la Figura 67, se muestran los datos almacenados en un archivo de texto, en formato de filas y columnas al igual que en el archivo de Excel, en donde la primer columna corresponde a la señal de conmutación y las demás a cada una

Figura 65. Configuración de circuito usada para representar la prueba.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 66. Datos almacenados en un archivo de Excel.



Fuente: Imagen generada por los autores

de las siguientes señales captadas, en orden como han sido recibidas.

Figura 67. Datos almacenados en un archivo de texto.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23.6110	23.6110	15.6584	9.9444	6.5026	0.0000	
46.3888	46.3888	31.0527	19.8339	12.9956	0.0000	
67.5491	67.5491	45.9267	29.6139	19.4695	0.0000	
86.4025	86.4025	60.0410	39.2314	25.9149	0.0000	
102.3940	102.3940	73.1794	48.6350	32.3221	0.0000	
115.1336	115.1336	85.1563	57.7756	38.6819	0.0000	
124.4169	124.4169	95.8218	66.6073	44.9849	0.0000	
130.2329	130.2329	105.0660	75.0873	51.2218	0.0000	
133.7603	133.7603	113.8223	83.1760	57.3835	0.0000	

Fuente: Imagen generada por los autores

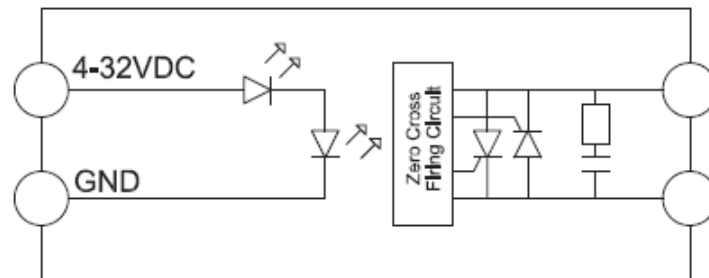
8.2. SIMULACIONES DE UN SSR SINCRÓNICO

Antes de presentar las simulaciones del comportamiento y funcionamiento del SSR, es necesario resaltar que las simulaciones se obtienen por medio del uso de Pspice y Orcad Capture, software que hacen parte de la suite de Cadence. Se inicia con la descripción del modelo equivalente del SSR, para luego proceder con las respectivas simulaciones de cada tipo de carga y terminar con una corta descripción de los resultados obtenidos.

8.2.1. Modelo de simulación SSR TD48A75 El proceso inicia con la investigación y búsqueda del modelo de simulación del dispositivo, lo cual no conlleva a algún resultado o información precisa acerca de dicho modelo. Por lo tanto, se decide contactar al fabricante solicitando amablemente el envío del modelo de simulación o de información mas detallada del dispositivo. Como respuesta a dicha solicitud, el fabricante comenta no tener ningún modelo de simulación y comparte información básica del SSR. Por esta razón, se opta por identificar los parámetros de entrada y

salida del dispositivo. En ese sentido, los únicos parámetros con los que se cuenta son el rango de tensión de control, el rango de tensión de carga y el rango de la corriente de carga, los cuales se encuentran en la Tabla 4 y están basados en la hoja de datos. Por otro lado, en la hoja de datos hay un diagrama que representa los elementos que contiene internamente el SSR (Figura 68), permitiendo de esta manera obtener un circuito que cumple con los parámetros ya nombrados anteriormente y que emula de manera similar el funcionamiento del SSR TD48A75.

Figura 68. Diagrama del circuito interno del SSR TD48A75.



Fuente: Tomado de OPTEC POWER ELECTRONICS. *Dispositivos de estado sólido*. Catalogo de Productos

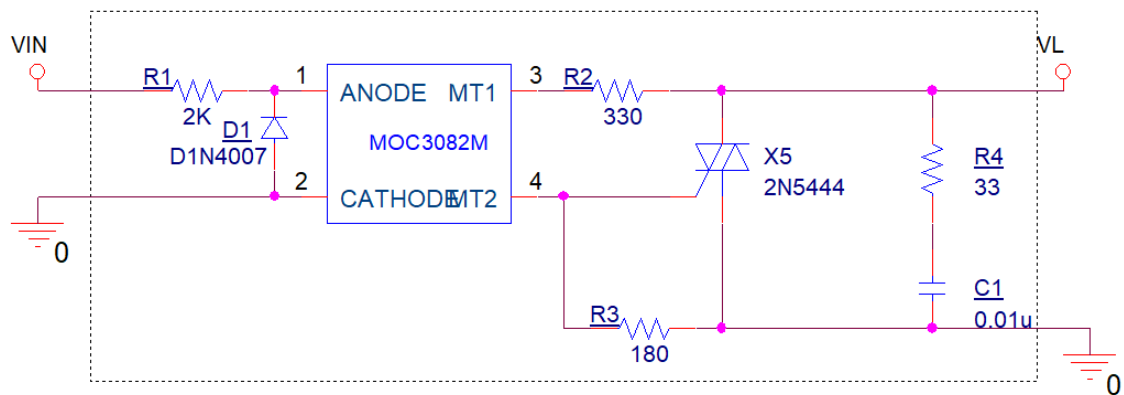
Al observar la Figura 68, el dispositivo cuenta internamente con leds, un optoacoplador, seguido de un TRIAC y por último una red snubber del tipo RC. Lo anterior cumple con la estructura básica de un SSR que se describe en la sección 4.3.2. Tomando como referencia este diagrama y documentación adicional^{40 41} se obtiene un circuito equivalente que se divide en las cuatro etapas características de la estructura básica de un SSR. En este caso, la etapa de control se compone de una resistencia y un diodo. La etapa de aislamiento eléctrico esta compuesta por

⁴⁰ SOLO ELECTRÓNICA. *Relé de Estado Sólido*. [Sitio Web]. 2020.

⁴¹ TUTORIALES DE ELECTRÓNICA BÁSICA. *Relé de estado sólido (SSR) - Tipos de relés SSR - Construcción y operación*. [Sitio Web]. 2020.

un opto-acoplador del tipo opto-TRIAC con detector de cruce por cero. La etapa de potencia es una unión entre un TRIAC y dos resistencias, y por último una etapa de protección con una red de snubber del tipo RC. En la Figura 69 se observa el resultado descrito anteriormente junto con valores de resistencias soportados en las limitaciones de los elementos que se manejan y de la teoría consultada en ²². Cabe resaltar, que este modelo posee una limitante en el rango de corriente de carga con un máximo de 40[A] que viene por el uso del TRIAC 2N5444.

Figura 69. Circuito equivalente del SSR TD48A75.



Fuente: Imagen generada por los autores

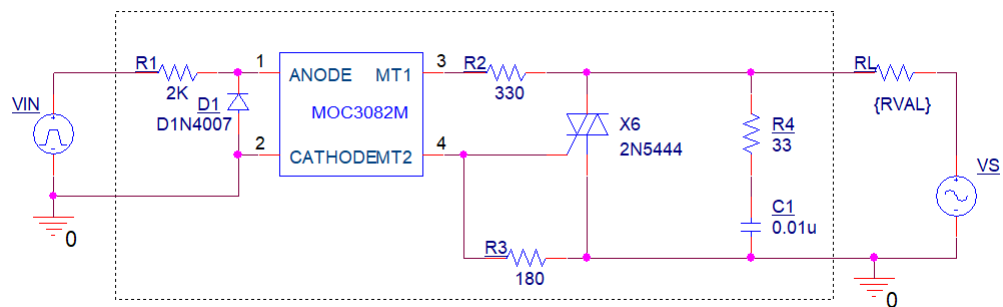
8.2.2. Tipos de cargas Es importante conocer el tipo de cargas que se manejan en el laboratorio. Éstas son los típicos electrodomésticos que se utilizan en los hogares colombianos como la plancha, el televisor, la nevera, la sandwichera, el computador de escritorio o laptop y los bombillos (fluorescentes y LED). Cada una de estas cargas posee una característica básica, es decir, se puede obtener un circuito equivalente. Por ejemplo, el circuito equivalente de la plancha y la sandwichera se representa mediante una resistencia o un arreglo de resistencias en paralelo, pero por simplicidad y por medio de las operaciones matemáticas se puede representar mediante una única resistencia que comprende el comportamiento general

de dichos electrodoméstico. Esta resistencia debe ser mínima para que el paso de corriente sea el mayor posible, y así la resistencia se caliente.

A continuación, se presentan las simulaciones del funcionamiento aproximado del SSR al conectarle las cargas más básicas como lo son las cargas resistivas, las cargas RC y RL en serie y paralelo respectivamente. Por último, se presenta una simulación cuya carga es un rectificador de onda completa con carga RC.

8.2.3. Simulaciones con cargas resistivas Los electrodomésticos que se consideran como cargas resistivas son la plancha, la sandwichera y los calentadores, como ya se dijo anteriormente. A continuación, se observa el comportamiento del modelo de simulación del SSR al conectarle este tipo de cargas, utilizando el esquemático de la Figura 70. La dinámica que se maneja en esta simulación es la variación de la resistencia R_L (Load Resistance), la cual, se toma como un parámetro global.

Figura 70. Esquemático de conexión carga resistiva.



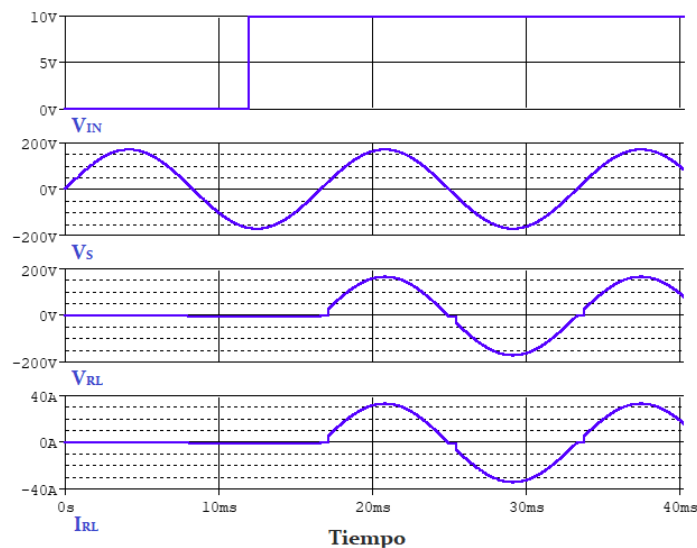
Fuente: Imagen generada por los autores

Adicionalmente, la característica principal para esta simulación es tener en cuenta que los dispositivos que entran en este tipo de cargas poseen una resistencia muy baja. Por lo tanto, los valores a manejar de resistencia están en el rango entre los $5[\Omega]$ hasta los $25[\Omega]$, esto soportado en los valores del consumo medio por par-

te de los electrodomésticos. Por ejemplo, las planchas consumen entre 2200[W] y 3100[W] y las sandwicheras poseen un consumo promedio de 760[W].

En las Figuras 71, 72, 73, 74 y 75 se presentan las simulaciones obtenidas para las cargas anteriormente descritas. En estas simulaciones se utiliza el valor nominal de la red eléctrica de 120[V.r.m.s.] y un pulso de activación de una amplitud de 9.9[V], lo cual concuerda con los parámetros de diseño del dispositivo. Lo que se observa en las gráficas es el típico comportamiento de una carga resistiva en donde la curva de tensión y de corriente tienen la misma forma que la fuente, es decir, siguen el mismo movimiento sinusoidal en el momento en el que el SSR se cierra y entra en etapa de conducción.

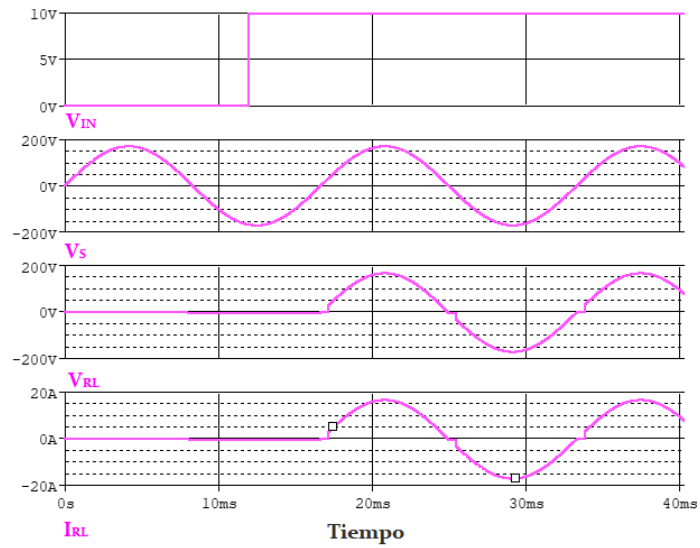
Figura 71. Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$.



Fuente: Imagen generada por los autores

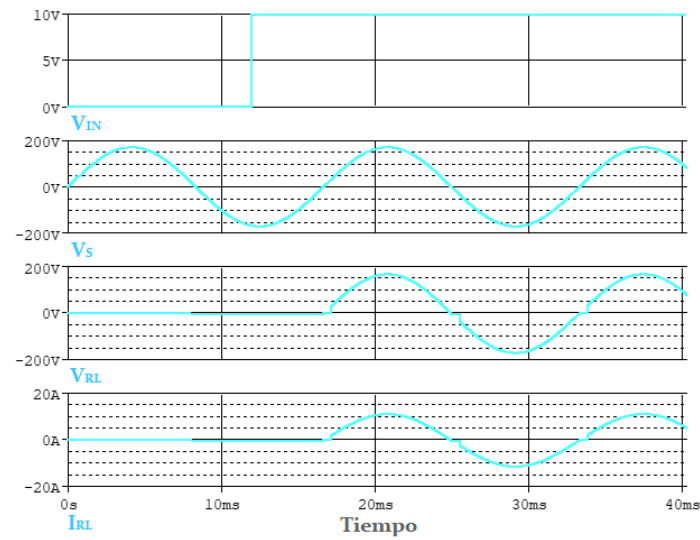
Como característica común de las curvas de tensión y de corriente de las cargas resistivas (R_L) se tiene un tipo de corte cerca al nivel de tensión y corriente cero, esto sucede tanto en el instante de cierre del SSR como durante toda la etapa de

Figura 72. Simulación para un valor de $R_L=10[\Omega]$.



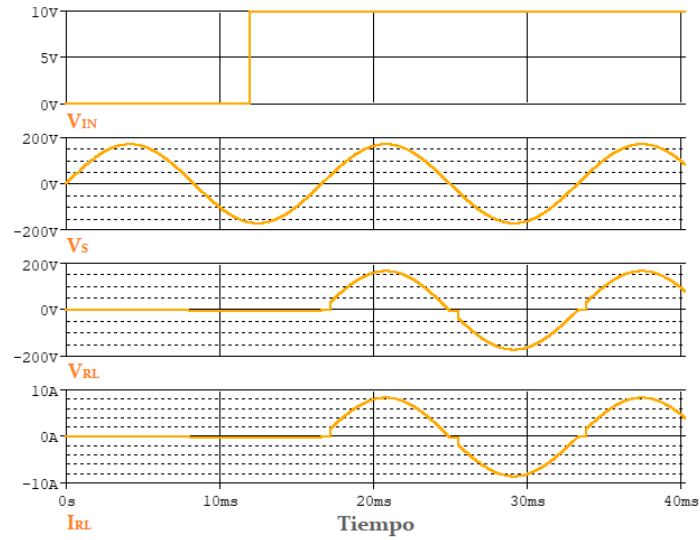
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 73. Simulación para un valor de $R_L=15[\Omega]$.



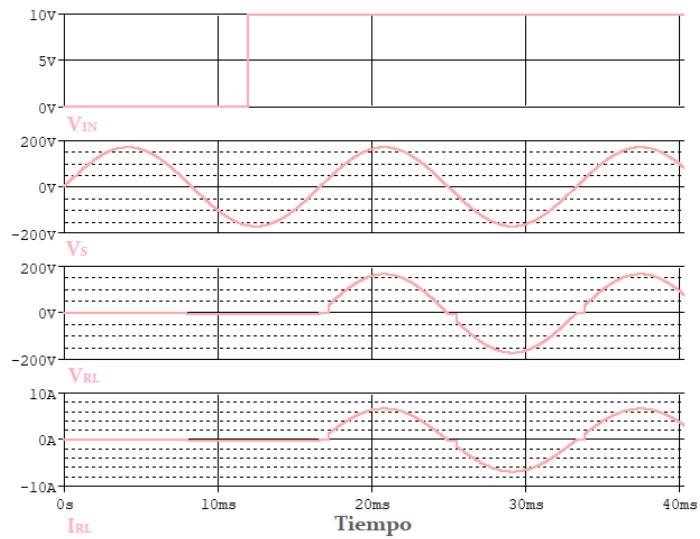
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 74. Simulación para un valor de $R_L=20[\Omega]$.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 75. Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$.

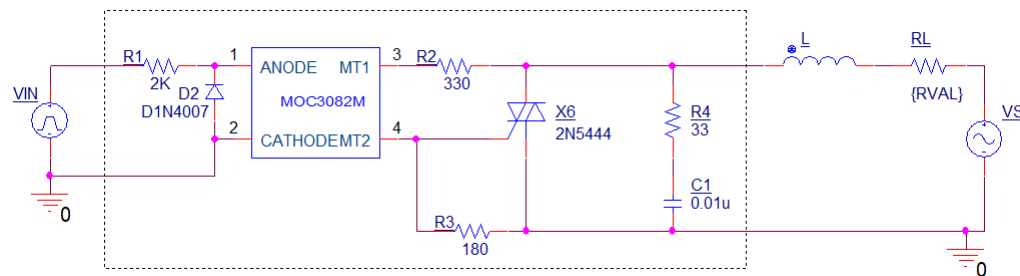


Fuente: Imagen generada por los autores

conducción. Este fenómeno se presenta por el tipo de TRIAC y de opto-acoplador que se utiliza en el modelo de simulación, presentando una demora en el tiempo de respuesta de conducción en un intervalo de aproximadamente de un milisegundo, y puede conllevar a que en la practica estas curvas de interés sufran deformaciones mayores debido al tipo de SSR que se utilice.

8.2.4. Simulaciones con cargas RL en serie Para esta simulación se utiliza el esquemático que se presenta en la Figura 76 y del mismo modo que en la simulación anterior, se hace una variación en el valor de la resistencia R_L y adicionalmente en el valor de la inductancia L , pero teniendo claro que el único parámetro global para la simulación es el valor de R_L debido a que el valor de la inductancia no depende del valor de la resistencia. Otra característica a tener en cuenta es que el circuito RL puede representar el funcionamiento de un motor eléctrico de inducción, de una bombilla fluorescente y de un transformador. Por lo tanto, se considera como una aproximación del comportamiento el SSR en la práctica.

Figura 76. Esquemático de conexión de un circuito RL en serie.



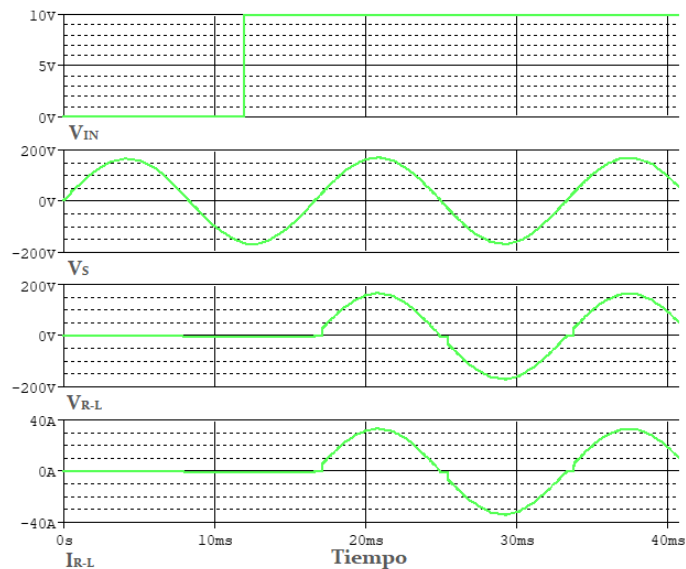
Fuente: Imagen generada por los autores

Entonces, los valores que se toman en cuenta para el parámetro global R_L están entre $5[\Omega]$ y $1[K\Omega]$. En cuanto a los valores para la inductancia L son de $10[\mu H]$ hasta $1[H]$, todo esto teniendo en cuenta los limites de operación del SSR y del modelo de simulación. Como característica adicional, se utiliza el valor nominal de la red

eléctrica de 120[V.r.m.s.] y un pulso de activación de 9.9[V] de amplitud.

En las Figuras desde la 77 hasta la 92 se presentan algunos de los resultados más relevantes de las curvas de tensión y corriente del circuito ya presentado (ver Figura 76). Es importante señalar que se consideran los intervalos de corriente superiores a 0.1[A] porque este nivel de corriente es el límite entre el estado de conducción y el estado de no conducción en el SSR. Por otro lado, el nivel máximo que se debe presentar en la curva de corriente es de 40[A].

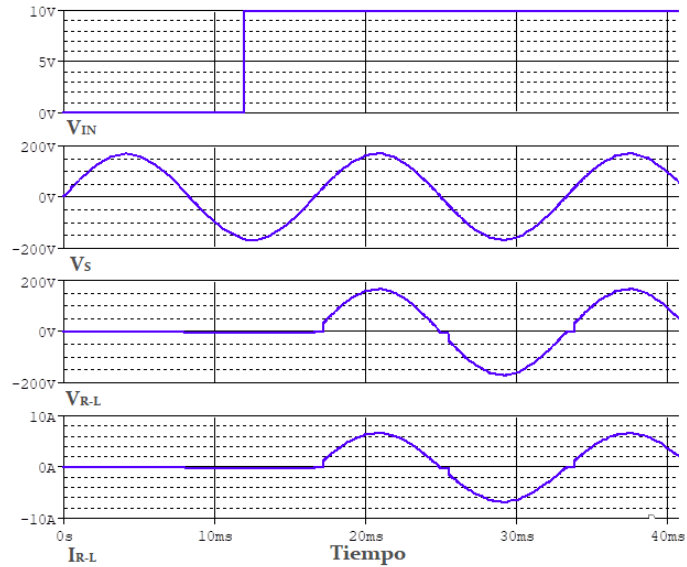
Figura 77. Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$ y $L=10[\mu\text{H}]$.



Fuente: Imagen generada por los autores

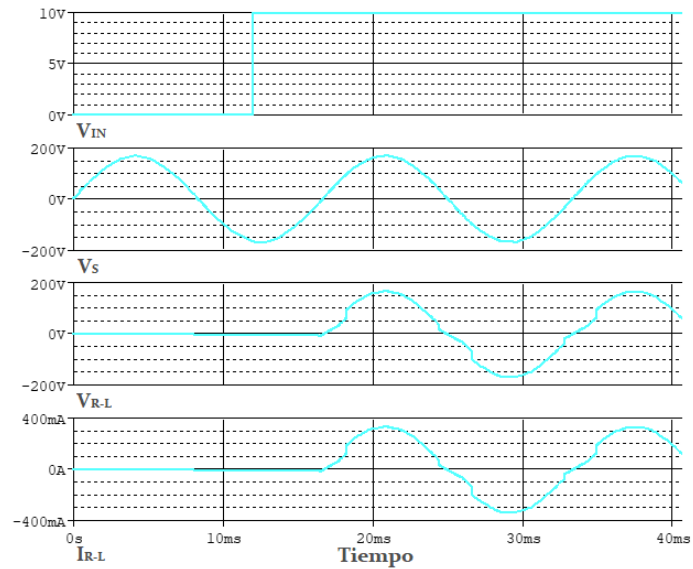
A partir de la observación y análisis de las gráficas se puede afirmar que al aumentar el valor de la resistencia la forma de onda de la señal de tensión y de corriente pierden su forma sinusoidal. Adicionalmente, se logra detectar que la distorsión armónica es notoria para valores altos de resistencia, afectando el comportamiento natural del circuito RL serie.

Figura 78. Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.



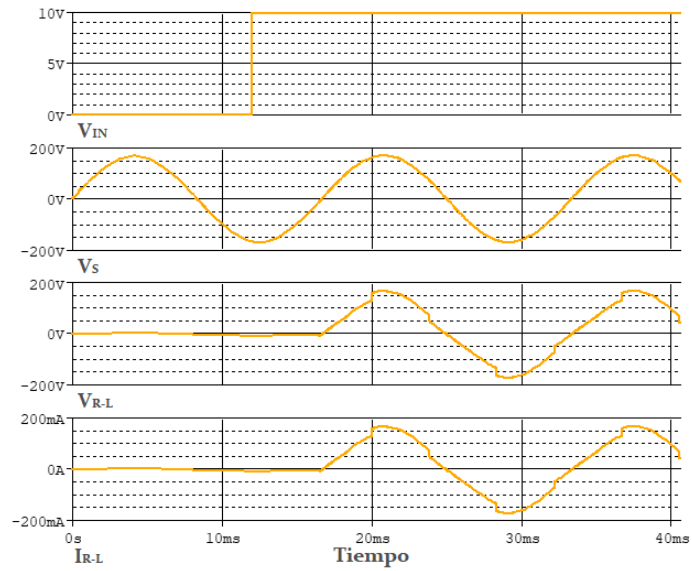
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 79. Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L = 10[\mu\text{H}]$.



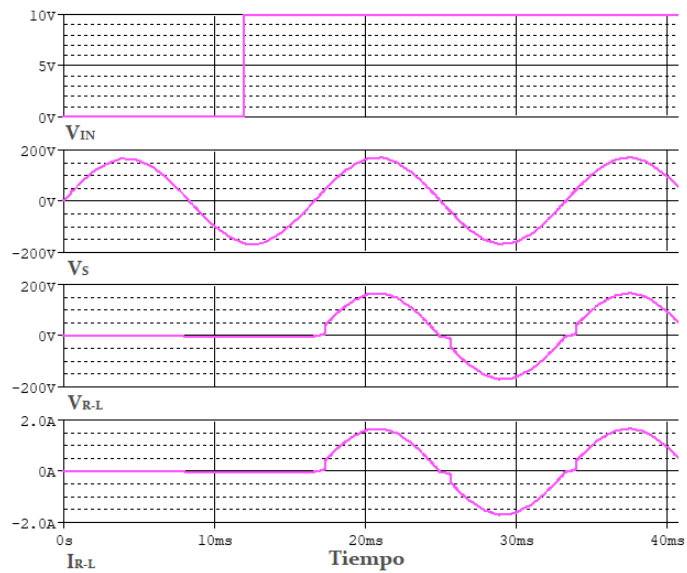
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 80. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =10[\mu\text{H}]$.



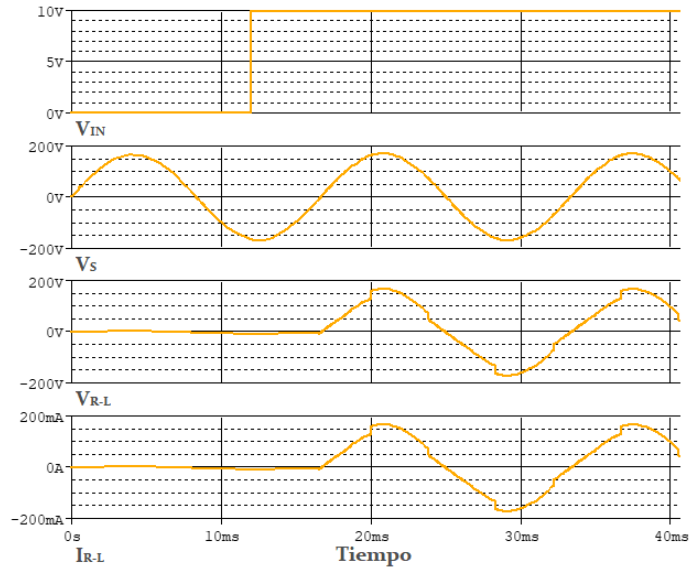
Fuente: Imagen generada por los autores.

Figura 81. Simulación para un valor de $R_L=100[\Omega]$ y $L =100[\mu\text{H}]$.



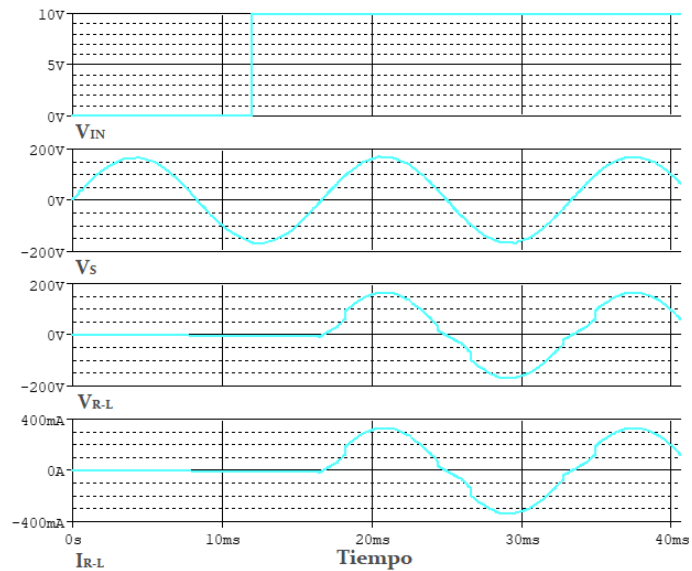
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 82. Simulación para un valor de $R_L=1[k\Omega]$ y $L =100[\mu H]$.



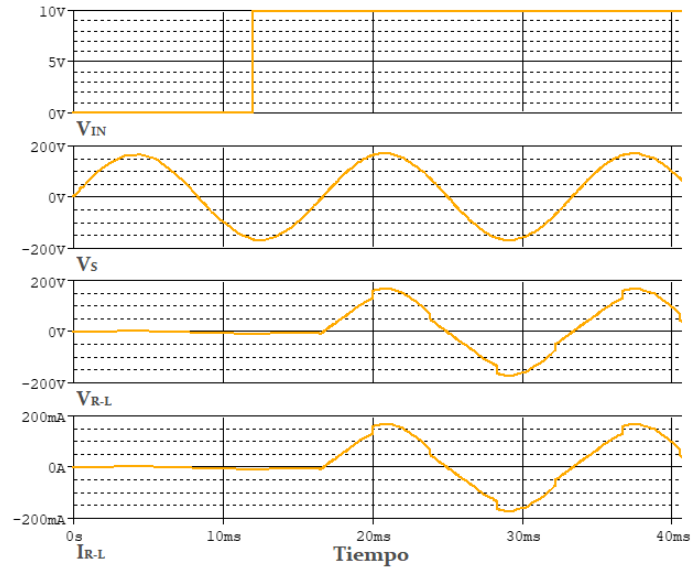
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 83. Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =500[\mu H]$.



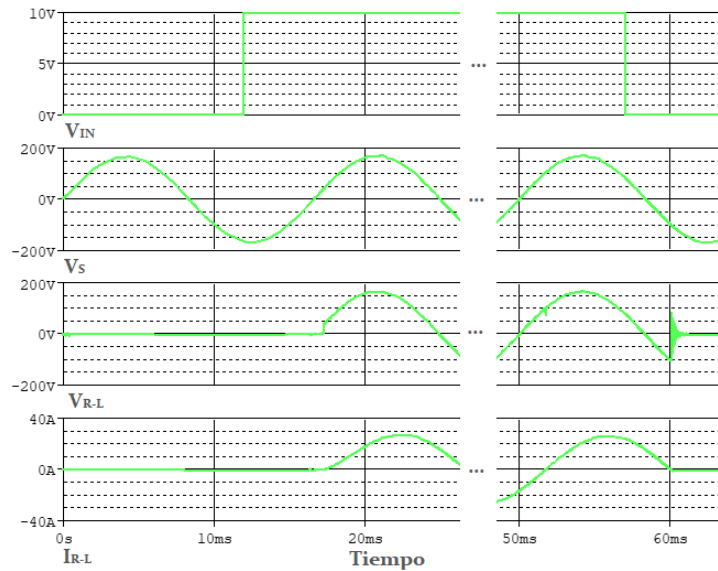
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 84. Simulación para un valor de $R_L=1[k\Omega]$ y $L=500[\mu H]$.



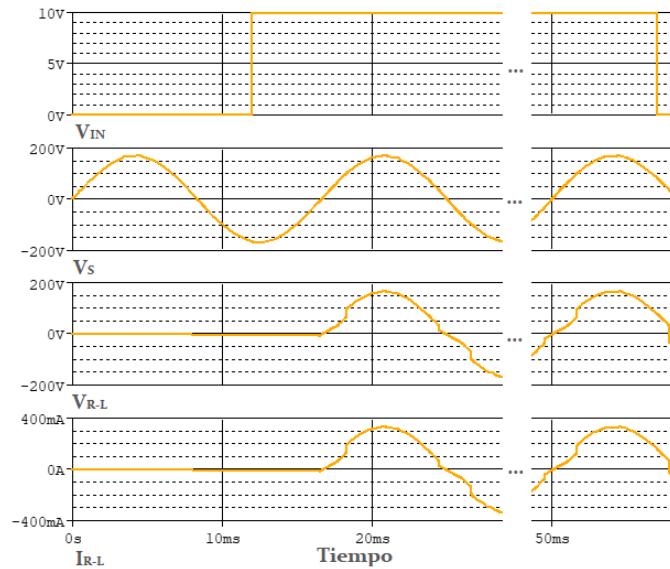
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 85. Simulación para un valor de $R_L=5[\Omega]$ y $L=10[mH]$.



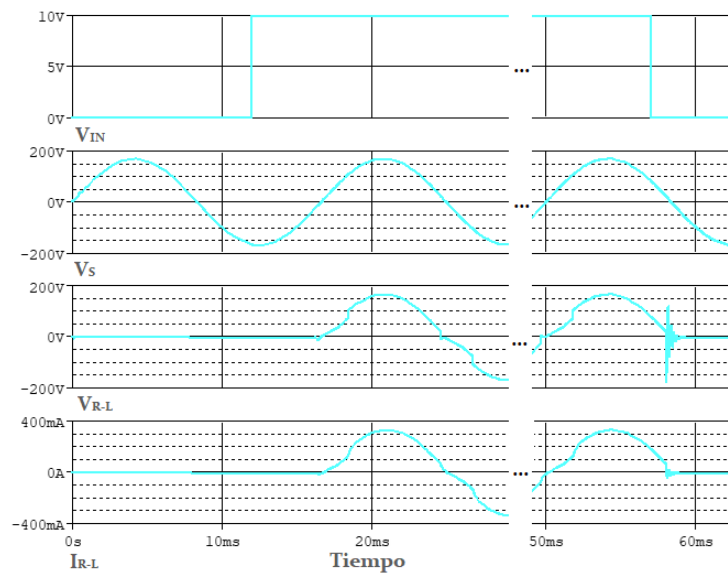
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 86. Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =10[\text{mH}]$.



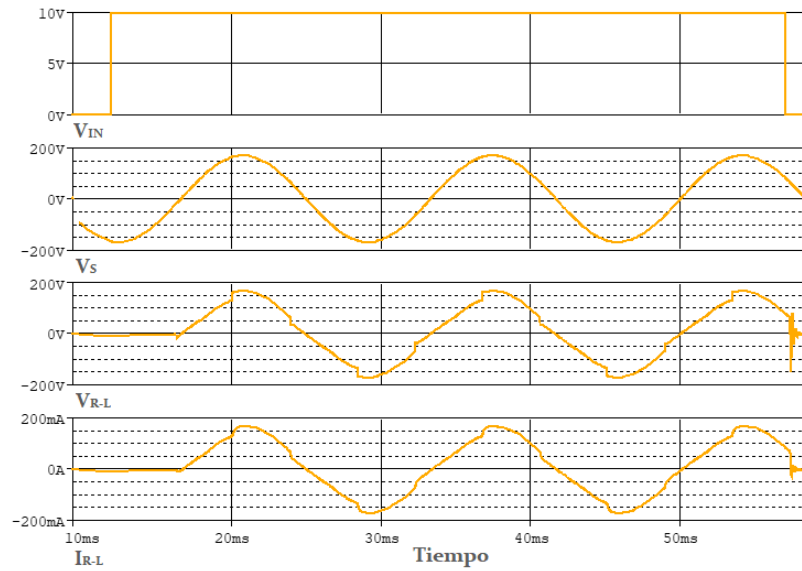
Fuente: Imagen generada por los autores.

Figura 87. Simulación para un valor de $R_L=500[\Omega]$ y $L =100[\text{mH}]$.



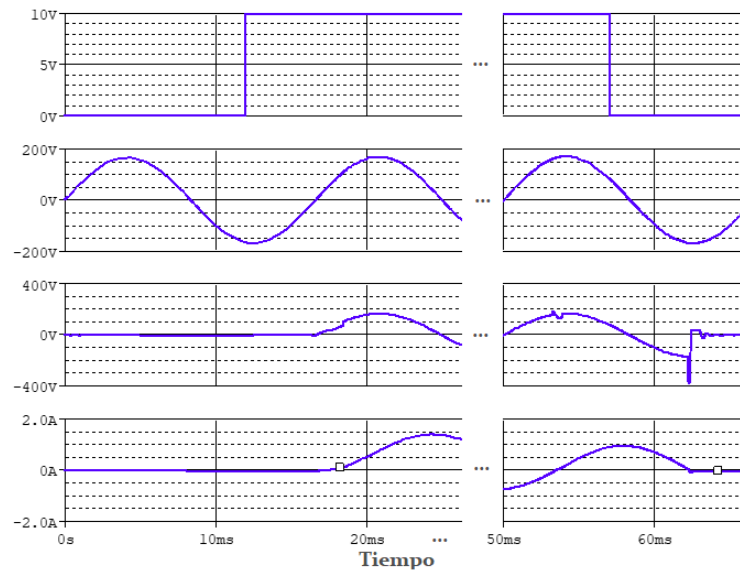
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 88. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =100[\text{mH}]$.



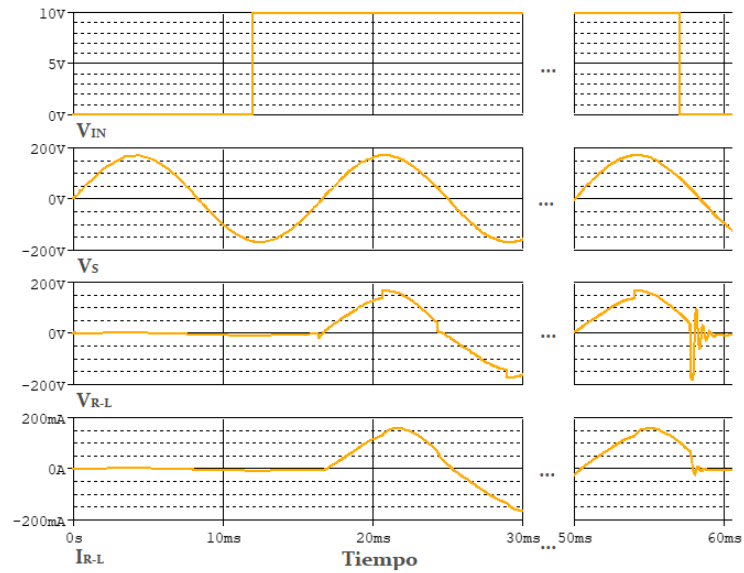
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 89. Simulación para un valor de $R_L=25[\Omega]$ y $L =500[\text{mH}]$.



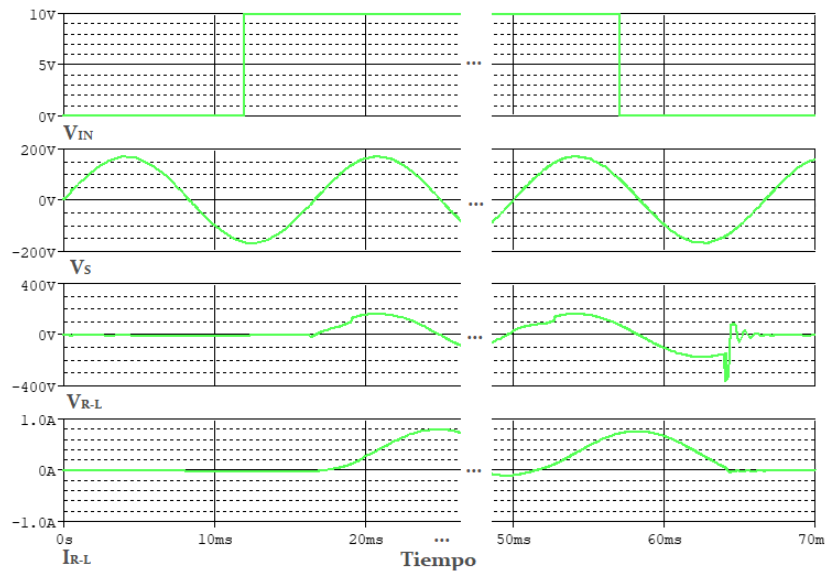
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 90. Simulación para un valor de $R_L=1[K\Omega]$ y $L =500[mH]$.



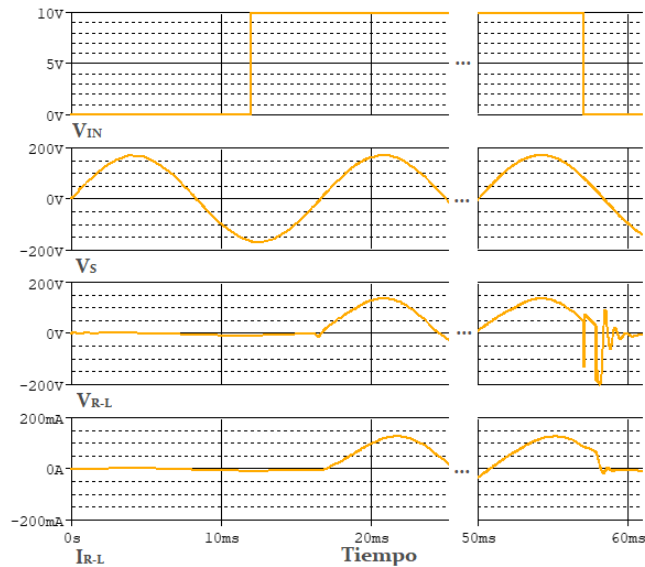
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 91. Simulación para un valor de $R_L=10[\Omega]$ y $L =1[H]$.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 92. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $L =1[\text{H}]$.



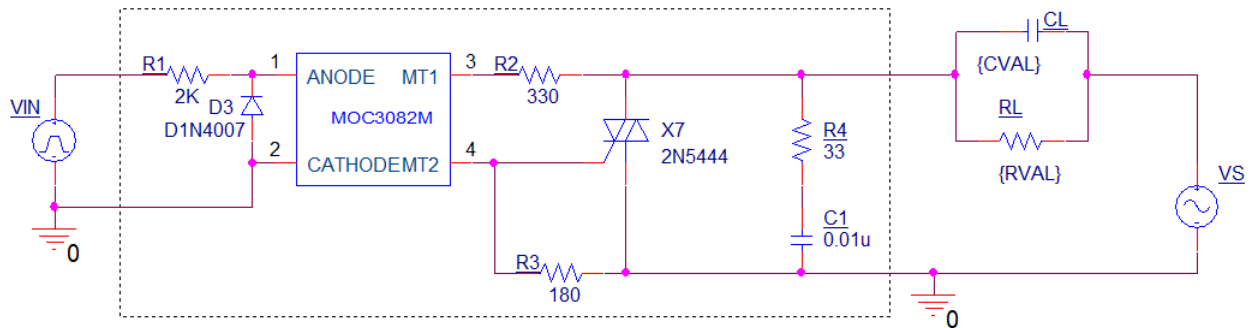
Fuente: Imagen generada por los autores

8.2.5. Simulaciones con cargas RC en paralelo Para esta simulación se utiliza el esquemático que se presenta en la Figura 93, haciendo el mismo procedimiento que en las simulaciones anteriores del circuito RL serie pero en este caso se varía la capacitancia C_L . Una característica de los circuitos RC es que estos pueden representar el funcionamiento de cualquier carga de tipo capacitiva como bancos de capacitores, los motores sincrónicos y dispositivos UPS. Por lo tanto, las simulaciones se deben considerar como una aproximación a como se puede comportar el SSR en la práctica.

Entonces, los valores que se toman en cuenta para el parámetro global R_L están desde $1[\text{K}\Omega]$ hasta $10[\text{K}\Omega]$ y se mantiene el valor de la capacitancia en $10[\text{nF}]$, $100[\text{nF}]$, $500[\text{nF}]$, $10[\mu\text{F}]$, $100[\mu\text{F}]$ y $500[\mu\text{F}]$. Adicionalmente, en el circuito se utiliza el valor nominal de la red eléctrica de $120[\text{V.r.m.s.}]$ y un pulso de activación para

el SSR de 9.9[V] de amplitud.

Figura 93. Esquemático de conexión de un circuito RC en paralelo.

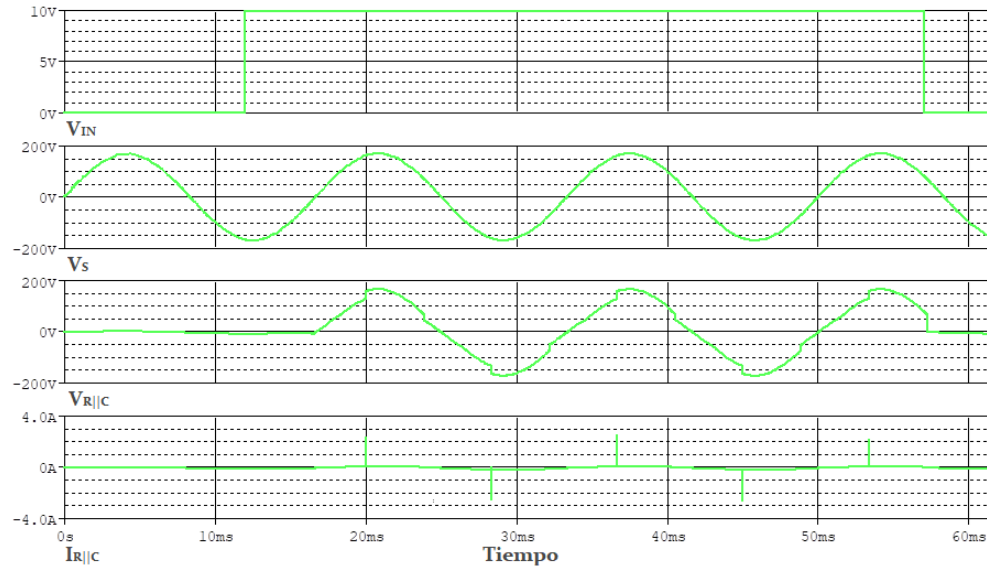


Fuente: Imagen generada por los autores

En las Figuras desde la 94 hasta la 101 se presentan los resultados más relevantes de las simulaciones hechas con el esquemático presentado en la Figura 93. De la misma forma que en la simulación anterior de las cargas RL serie, es importante aclarar que se consideran los intervalos de corriente superiores a 0.1[A] porque este nivel de corriente es el límite entre el estado de conducción y el estado de no conducción en el SSR. Por otro lado, el nivel máximo que se debe presentar en la curva de corriente es de 40[A].

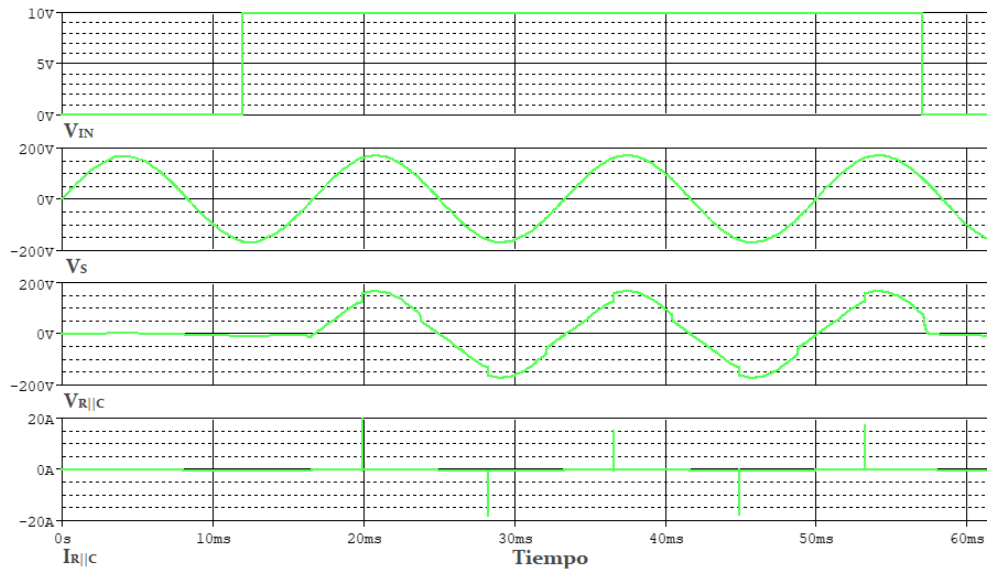
Las anteriores gráficas describen el comportamiento del modelo del SSR frente a cargas RC, en ellas se puede observar que hay una característica en común en las curvas de corriente, en donde se producen unos picos de corriente muy altos pero de corta duración alterando la curva sinusoidal de la corriente. En la Figura 98 se tiene un caso especial en donde la curva de corriente presenta unos picos muy pequeños distorsionando muy poco la curva. Caso contrario al que se presenta en las demás gráficas en donde estos picos son muy grandes en comparación al punto máximo de la curva sinusoidal de la corriente. En la Figura 101 se presenta un acercamiento en la curva de corriente para evidenciar que si existe un seguimiento

Figura 94. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C =10[\text{nF}]$.



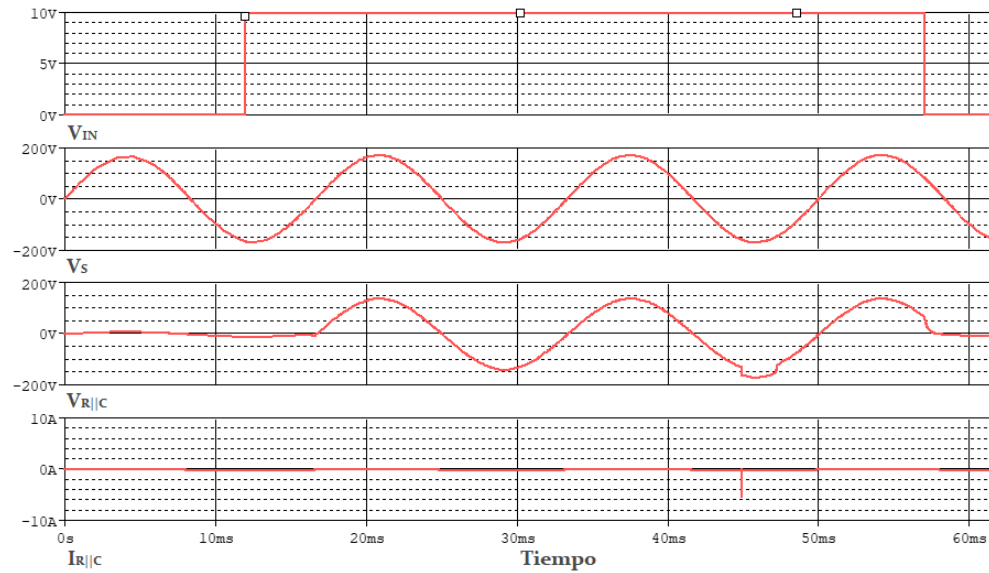
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 95. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C =100[\text{nF}]$.



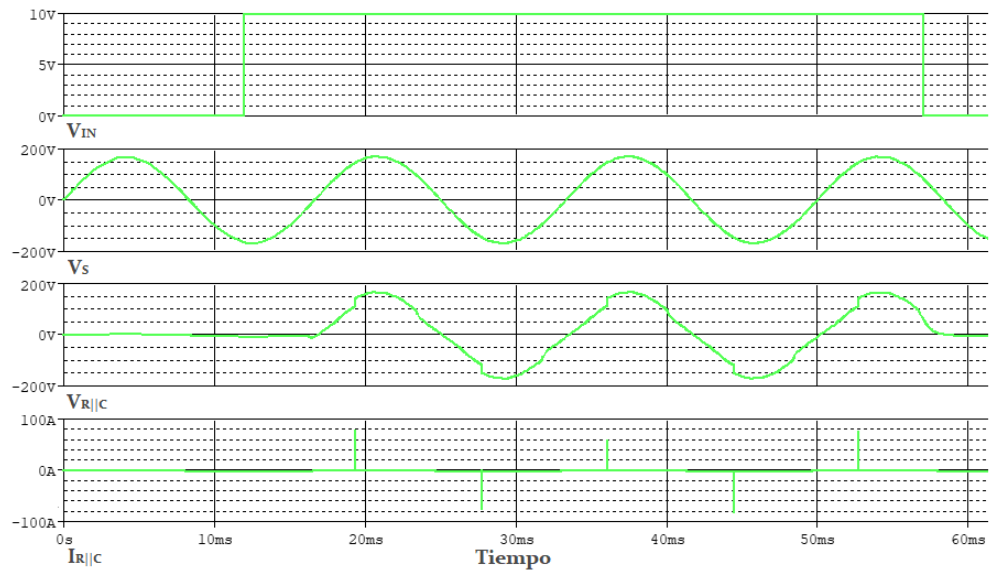
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 96. Simulación para un valor de $R_L=2[\text{K}\Omega]$ y $C = 100[\text{nF}]$.



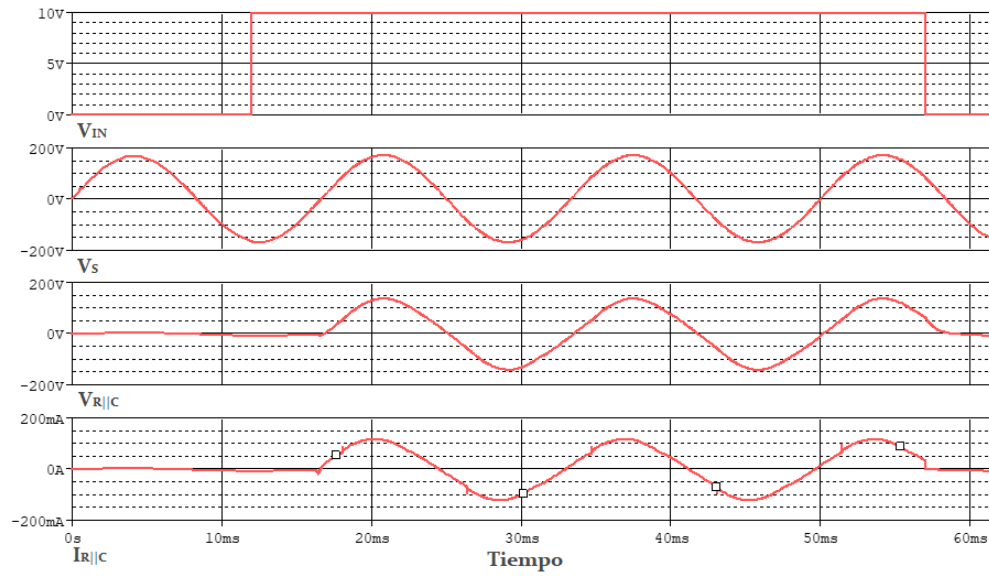
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 97. Simulación para un valor de $R_L=1[\text{K}\Omega]$ y $C = 500[\text{nF}]$.



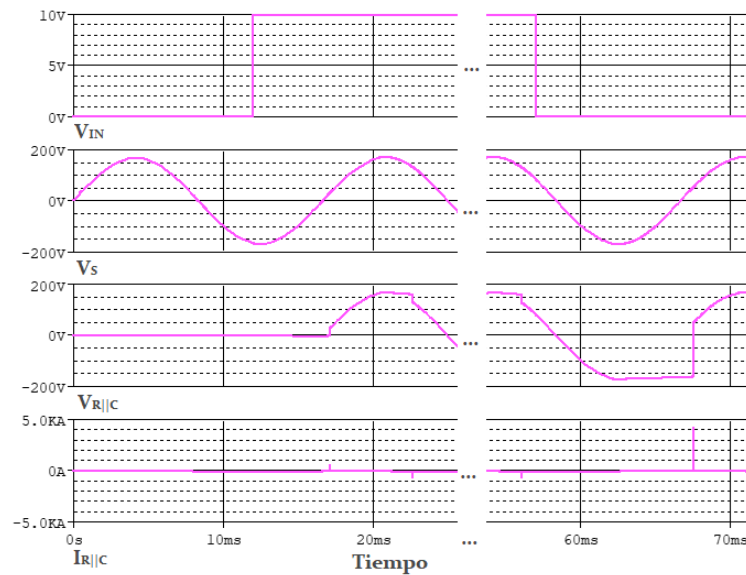
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 98. Simulación para un valor de $R_L=1.2[K\Omega]$ y $C =500[nF]$.



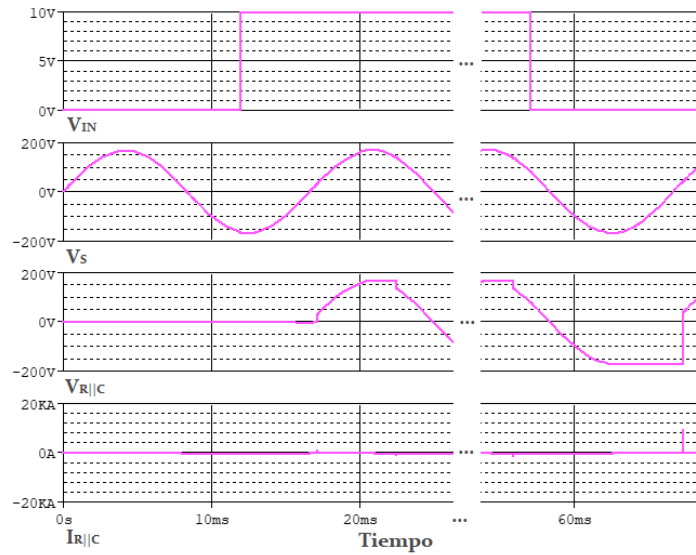
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 99. Simulación para un valor de $R_L=10[K\Omega]$ y $C =10[uF]$.



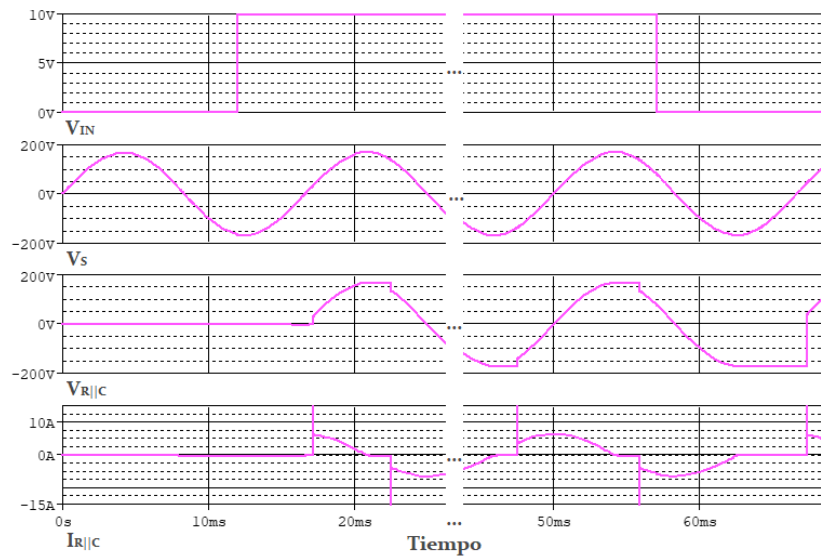
Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 100. Simulación para un valor de $R_L=10[\text{K}\Omega]$ y $C = 100[\mu\text{F}]$.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 101. Simulación para un valor de $R_L=10[\text{K}\Omega]$ y $C = 100[\mu\text{F}]$.

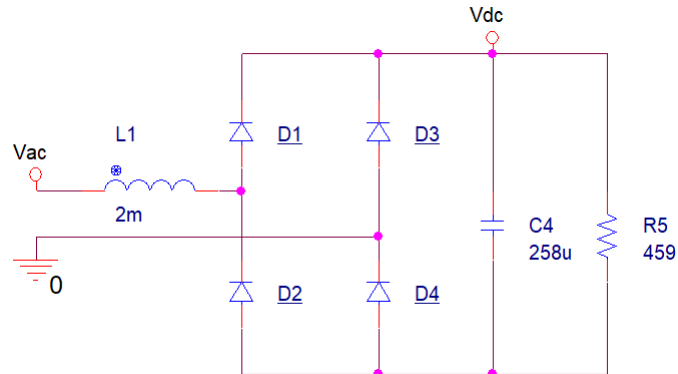


Fuente: Imagen generada por los autores

del comportamiento sinusoidal pero los picos de corriente lo distorsionan en gran medida. A partir de lo anterior, se puede decir que a medida que se aumenta la capacitancia la distorsión y los picos de corriente aumentan su nivel del mismo modo que sucede en la curva de tensión la cual posee cada vez una mayor distorsión armónica.

8.2.6. Simulaciones con rectificador de onda completa Para esta simulación se utiliza el modelo de un rectificador monofásico presentado en ⁴², el cual, se obtiene por medio del análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia. El esquemático del modelo se presenta en la Figura 102, en ella se encuentra los valores correspondientes a cada uno de los elementos pasivos y hay que resaltar que dicho modelo trabaja con una tensión de 220[V.r.m.s.] y a una frecuencia de 50[Hz].

Figura 102. Esquemático del modelo del rectificador monofásico.



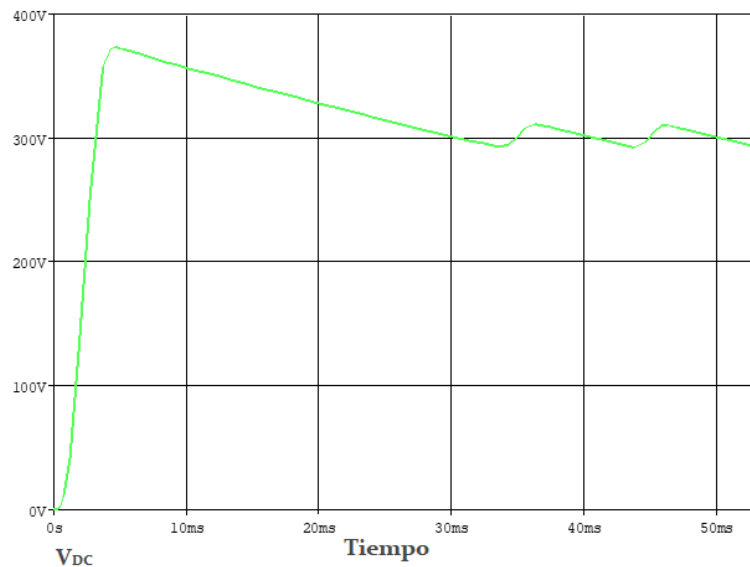
Fuente: Imagen generada por los autores

Cuando se realiza la simulación del rectificador monofásico, se obtiene una gráfica de la tensión de salida que se presenta en la Figura 103. En ella se puede ver el

⁴² CAICEDO J. E., ROMERO A. A. y ZINI H. C. "Frequency domain modeling of nonlinear loads, considering harmonic interaction". En: *2017 3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017 - Proceedings* (2017). DOI: 10.1109/PEPQA.2017.7981641.

funcionamiento óptimo de un rectificador monofásico cumpliendo con el objetivo con el que fue diseñado.

Figura 103. Simulación del rectificador monofásico.

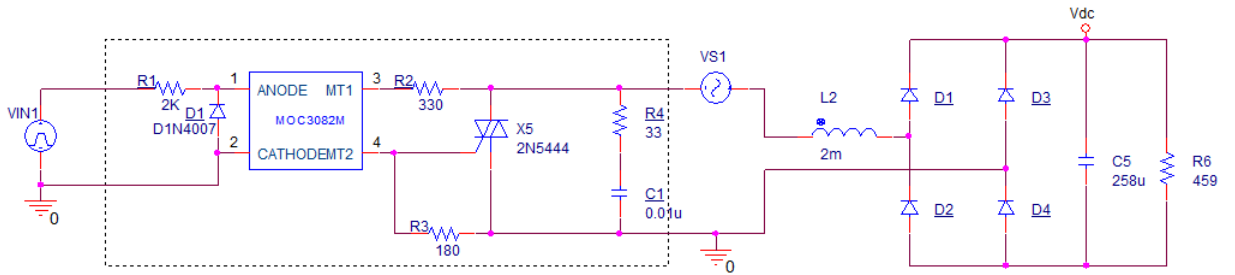


Fuente: Imagen generada por los autores

Ahora bien, cuando se agrega al circuito el dispositivo SSR el esquemático resultante es el que se presenta en la Figura 104. Al realizar la simulación de este circuito, el software no encuentra solución alguna. Por lo tanto, no se puede obtener ninguna curva de tensión ni de corriente de la salida del rectificador monofásico. Pero al realizar una modificación al esquemático, el software arroja una respuesta congruente con la teoría del rectificador monofásico. Entonces, la modificación se trata de retirar el capacitor de $256[\mu\text{F}]$ y los resultados de la tensión de salida se presentan en la Figura 105.

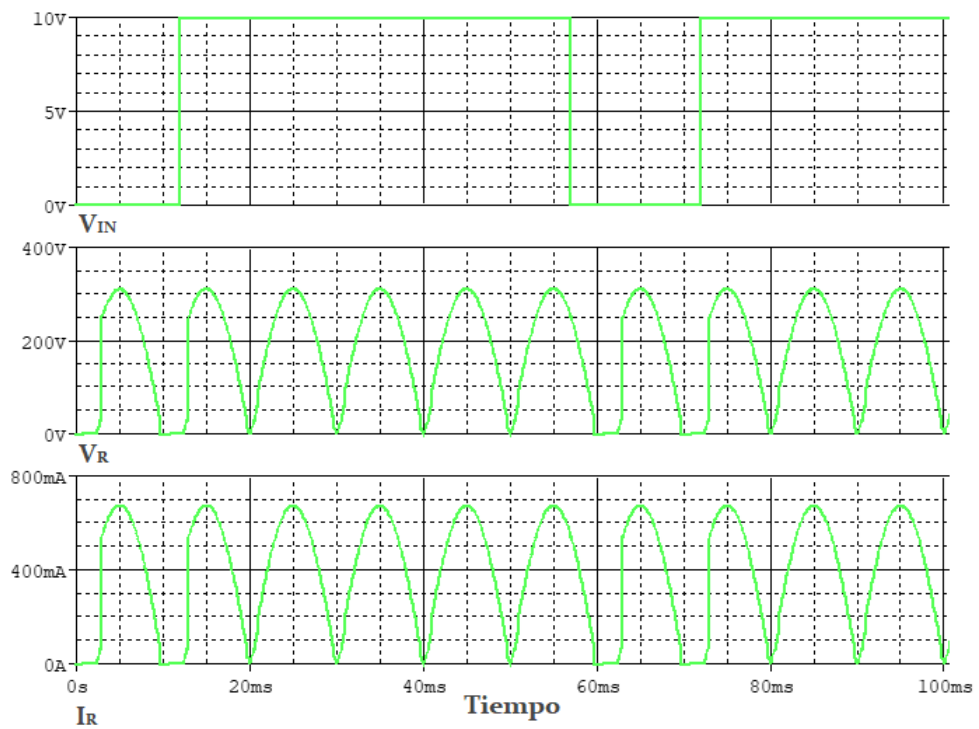
Las curvas de tensión y corriente presentadas en la Figura 105 son el resultado de la modificación que se describió en el párrafo anterior. Estos resultados demuestran que el rectificador funciona pero el SSR no logra un estado de no conducción en el

Figura 104. Esquemático conexión SSR y rectificador monofásico.



Fuente: Imagen generada por los autores

Figura 105. Esquemático conexión SSR y rectificador monofásico .



Fuente: Imagen generada por los autores

intervalo de tiempo en el que el pulso de activación llega al nivel de tensión de 0[V].

Por otro lado, existe una pequeña deformación en las curvas de tensión y corriente;

algo muy similar a lo que sucedía en las simulaciones de las cargas resistivas.

Es importante resaltar la posible causa del fallo en la simulación de este tipo de cargas para el SSR. Considerando que el modelo de simulación del rectificador monofásico está hecho para operar con una frecuencia de 50[Hz] y una tensión de 220[V.r.m.s.]. Caso contrario a los rangos de operación del modelo de simulación del SSR, los cuales son de 120[V.r.m.s.] y 60[Hz]. Esto conlleva a que el SSR no presente el comportamiento típico para que se obtenga una respuesta válida y por consiguiente, el software Pspice no pueda obtener una convergencia en la respuesta.

9. CONCLUSIONES

Del trabajo aquí expuesto podemos concluir de forma general que al diseñar un dispositivo para la adquisición de datos en aplicaciones NILM es necesario garantizar la mayor precisión posible en términos de tiempo, para lo cual se deben integrar subsistemas que cumplan esta condición, de forma que el conjunto de estos tengan la capacidad de operar con una resolución de microsegundos. De manera más específica, es necesario tener pasos de $46.30[\mu\text{s}]$ por grado de desfase deseado en la onda y de $15.63[\mu\text{s}]$ para alcanzar una resolución mínima de $1[\text{V}]$ amplitud con una onda senoidal de $120[\text{V}_{\text{rms}}]$.

Por otra parte, se logró diseñar un sistema automatizado para la adquisición de los datos del Laboratorio de Integración Energética del Parque Tecnológico Guatiguará, para aplicaciones de monitorización no intrusiva de carga (NILM), comprendido por un sistema embebido con núcleo ESP32-WROOM-32 para mejorar la precisión en el proceso de adquisición de datos de las curvas de tensión y corriente con diferentes cargas en términos de tiempo. Logrando automatizar las rutinas de conexión y desconexión entre fuente y carga. Adicionalmente, el diseño de la interfaz de LabVIEW es compatible con la Chroma 61511 y con las tarjetas NI 9225, NI 9227, NI 9239, NI cDAQ-9172. La interfaz permite al usuario tener interacción directa con las cargas conectadas al sistema, es decir, se puede configurar su conexión o desconexión desde la interfaz permitiendo que el sistema embebido realice dicha acción.

Los relés utilizados para realizar la conexión y desconexión son relés de estado sólido. Este tipo de relés presentan menor resistencia al cambio de estado y una mayor velocidad de respuesta en comparación con los relés electromagnéticos. Por otro lado, la ausencia de rebotes en la conmutación hace que la señal de interés no sea

afectada por este fenómeno.

El módulo de control ESP32-WROOM-32 cumple con las características mencionadas de tiempo, su reloj opera a una frecuencia de $240[MHz]$, permitiendo programar el módulo para que opere con tiempos en los microsegundos, ya que la mínima resolución alcanzada en LabVIEW es del orden de los milisegundos por restricciones del sistema operativo Windows, por ende el almacenamiento de los datos se realiza en un formato de texto ligero y que garantice el flujo del programa con un bajo costo de recursos de memoria. Por otro lado, se diseñó una etapa que recibe las señales de activación de los relés provenientes del microcontrolador, para que de esta forma la potencia de accionamiento de los mismos sea extraída de una fuente diferente a la del microcontrolador y así evitar problemas de caídas bruscas de tensión en el circuito de control.

De acuerdo con los resultados, se logró simular la integración del sistema embebido y la interfaz de LabVIEW en operación conjunta. Permitiendo estimar algunos de los resultados que se esperan al momento de hacer el montaje completo del sistema en el laboratorio. Además, se simuló el comportamiento del SSR frente a diferentes cargas en el software PSpice, cuyo comportamiento se vió limitado gracias al modelo de simulación de este dispositivo.

Los productos finales del proyecto de los cuales se puede generar un entregable son:

- La interfaz de LabVIEW diseñada.
- El diseño del dispositivo de control para el accionamiento de los relés.
- Diseño en Solidworks de la cubierta de protección para el dispositivo de con-

trol.

- El manual de usuario que describe el uso de la interfaz y del sistema embebido.
- El presente documento, en el que se describe todo el trabajo realizado.

10. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda comprobar experimentalmente la afirmación hecha en la sección de simulaciones del modelo del SSR (ver 8.2.3), la cual dice que las curvas de tensión y de corriente sufren deformaciones debido al uso del SSR de tipo sincrónico, ya que debido a las limitaciones actuales que no permitieron el uso de un laboratorio y realizar este procedimiento permitiría descartar o mantener el relé de estado sólido como una opción para el sistema de medición en el laboratorio.
- Se recomienda el uso de SSR de tipo no sincrónico debido a que estos relés permiten el paso de corriente en el instante en el que se activa el pulso de control, es decir, que el tiempo de activación o desactivación ronda los $9[\mu\text{s}]$. Por lo tanto, se logra el uso de todas las funcionalidades que ofrece el sistema diseñado.
- Se recomienda realizar la calibración por tiempos en la programación de control del chip ESP32 de acuerdo a los resultados de la implementación en el laboratorio, ya que por condiciones no fue posible hacer uso de los mismos.
- Se sugiere la implementación y posterior adaptación a la programación un circuito detector de cruce por cero de pendiente positiva. Esto para garantizar un correcto funcionamiento del sistema al momento de implementarse.

BIBLIOGRAFÍA

- Abubakar, ISIYAKU y col. "An overview of Non-intrusive load monitoring methodologies". En: *Energy Conversion (CENCON)*. Johor Bahru, Malaysia, 2015, págs. 54-59. DOI: 10.1109/CENCON.2015.7409513 (vid. pág. 26).
- Ahmed, ZOHA y col. "Non-intrusive Load Monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey". En: *Sensors (Switzerland)* 12.12 (2012), págs. 16838-16866. DOI: 10.3390/s121216838 (vid. págs. 17, 25).
- Ajith, AMERASEKERA y Charvaka DUVVURY. *ESD in Silicon ESD in Silicon Second Edition*. Second. Vol. 8. 2002, pág. 421 (vid. pág. 53).
- ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. "Generic Standard on Printed Board Desing". En: *Ipc-2221a* February 1998 (2003), pág. 124 (vid. pág. 60).
- Bill, SCHWEBER. *Aspectos básicos de los relés de estado sólido DigiKey*. [Sitio Web]. 2019 (vid. págs. 36, 37, 67).
- Bo Bae, SONG, DO Kyoung Il y KOO Yong Seo. "SCR-Based ESD Protection Using a Penta-Well for 5 v Applications". En: *IEEE Journal of the Electron Devices Society* 6.March (2018), págs. 691-695. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2817636 (vid. pág. 53).
- BOURNS. *MOV-14DxxxK Series - Metal Oxide Varistor*. Datasheet. 2011 (vid. pág. 71).
- BÁSICA, TUTORIALES DE ELECTRÓNICA. *Relé de estado sólido (SSR) - Tipos de relés SSR - Construcción y operación*. [Sitio Web]. 2020 (vid. pág. 105).

- Carlos, SOTO y MONTAÑA Gilbert. "Diseño de un dispositivo de estado sólido para la desconexión y reconexión remota del servicio eléctrico de los usuarios de corpoelec". 2015, pág. 126 (vid. pág. 35).
- Cesar A., DUARTE, PETIT Johann y CARRILLO Gilberto. "Residential appliance identification through discriminant analysis classifiers". En: *UIS Ingenierías, Revista de la Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas* (2015), págs. 1-9 (vid. pág. 24).
- CHROMAUSA. *High power programmable AC source 61510*. Datasheet. 2020 (vid. pág. 31).
- CUI INC. *Series : VSK-S25-T AC-DC Power Supply VSK-S25 - XXU - T*. Datasheet. 2015 (vid. págs. 44, 57).
- ELECTRÓNICA, SOLO. *Relé de Estado Sólido*. [Sitio Web]. 2020 (vid. pág. 105).
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *Resistor-Capacitor (RC) Snubber Design for Power Switches*. [Sitio Web]. 2014 (vid. pág. 37).
- Franco, MARCHESONI, MARIÑO Camilo y MASQUIL Elías. "Monitoreo no intrusivo de cargas eléctricas (NILM) Memoria". Tesis doct. 2020 (vid. pág. 24).
- George W., HART. "Nonintrusive Appliance Load Monitoring". En: *Proceedings of the IEEE* 80.12 (1992), págs. 1870-1891. DOI: 10.1109/5.192069 (vid. págs. 25, 27).
- H., CALA y col. "Efecto de una distorsión de onda achatada sobre un sistema de identificación de cargas basado en características extraídas a través de la trans-

formada de Fourier fraccionaria”. En: *Simposio Internacional Sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL*. 2017, págs. 1-7 (vid. págs. 16, 25).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Código eléctrico colombiano NTC2050*. 1998 (vid. pág. 71).

INSTRUMENTS, TEXAS. *LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator*. Datasheet. 2016 (vid. pág. 45).

J. E., CAICEDO, ROMERO A. A. y ZINI H. C. “Frequency domain modeling of non-linear loads, considering harmonic interaction”. En: *2017 3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017 - Proceedings* (2017). DOI: 10.1109/PEPQA.2017.7981641 (vid. pág. 126).

Jose Angel, NOGUERA. “Sistema de diálogo basado en mensajería instantánea para el control de dispositivos en el Internet de las cosas”. Tesis doct. Departamento de Informática y Sistemas. Universidad de Murcia, 2016 (vid. pág. 19).

Jose D., CORTES, JIMÉNEZ Yulieth y DUARTE Cesar A. “Reasoner design based on HYPO for classification of lighting loads”. En: *2016 21st Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision, STSIVA 2016*. Bucaramanga, 2016. DOI: 10.1109/STSIVA.2016.7743336 (vid. pág. 28).

MICRO COMMERCIAL COMPONENTS. *MMSS8050 Datasheet*. Datasheet. 2014 (vid. pág. 50).

Mónica Janeth, CHISAGUANO ÁVILA. “Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Relé De Estado Sólido Microcontrolado Supervisor De Voltaje Trifásico Para Protección De Cargas Eléctricas De Baja Potencia”. 2005, pág. 244 (vid. págs. 34, 35).

NATIONAL INSTRUMENTS. *Model CDAQ-9172-R*. Datasheet. 2020 (vid. pág. 32).

— *Model NI-9225-R*. Datasheet. 2020 (vid. pág. 31).

— *Model NI-9227-R*. Datasheet. 2020 (vid. pág. 31).

— *Model NI-9239-R*. Datasheet. 2020 (vid. pág. 32).

OMRON. *Ultra-small Tactile Switch (SMT) - B3U*. Datasheet. 2007-2008 (vid. pág. 50).

OMRON ELECTRONICS SA. *Relés de Estado Sólido SSRs*. Guía Rápida, corporativo. 2001 (vid. págs. 38-41, 106).

OPTEC POWER ELECTRONICS. *Dispositivos de estado sólido*. Catalogo de Productos (vid. págs. 68-70, 105).

Pedro, CARRIÓN P. y MORALES G. Pedro. “Diseño de redes snubbers mediante técnicas de optimización, para la protección de tiristores contra sobretensiones”. En: *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería* 10.2 (1994), págs. 111-124 (vid. pág. 37).

SHENZHEN AI-THINKER TECHNOLOGY. *Nodemcu - 32s Datasheet*. Datasheet. 2019 (vid. pág. 46).

SILICON LABS. *CP2102 USB To UART Bridge Datasheet*. Datasheet. 2017 (vid. pág. 51).

Solutions, Chroma Systems. *Chroma SoftPanel* (vid. pág. 78).

SYSTEMS, ESPRESSIF. *Datasheet: ESP32 Series*. Datasheet. 2019 (vid. págs. 33, 34).

TE CONNECTIVITY. *Terminal Block 282837*. Datasheet. 2003 (vid. pág. 58).

TEXAS INSTRUMENTS. *INA821 Precision Instrumentation Amplifier*. Datasheet. 2019 (vid. págs. 56, 57).

— *TPD2S017 2-Channel Ultra-Low Clamp Voltage ESD Solution With Series-Resistor Isolation*. Datasheet. 2015 (vid. pág. 53).

Yulieth, JIMÉNEZ y col. “Characterization of current switching transients for appliance identification”. En: *Renewable Energy and Power Quality Journal* 1.13 (2015), págs. 184-189. DOI: 10.24084/repqj13.276 (vid. págs. 16, 24).

Yulieth, JIMÉNEZ y col. “Nonintrusive load monitoring for awareness of residential electricity consumption”. En: *Cuartas Jornadas de la Red Iberoamericana de Generación Distribuida y Microredes Eléctricas Inteligentes - RIGMEI*. Bucaramanga, Colombia, 2016, págs. 1-4 (vid. págs. 17, 26).

Yulieth, JIMÉNEZ y col. “Steady state signatures in the time domain for nonintrusive appliance identification”. En: *Simposio Internacional Sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL* 35.1 (2015), págs. 58-64. DOI: 10.15446/ing.investig.v35n1Sup.53619 (vid. pág. 16).

ANEXOS

Anexo A. Manual de operación de la interfaz de control junto con la instalación y operación del sistema embebido y el banco de relés

Anexo B. Archivos de la plataforma de control en LabView en versiones 2020 y 2017

Anexo C. Archivo del softpanel de la fuente Chroma 61511

Anexo D. Archivos de las librerías de los elementos de la PCB diseñada en EAGLE

Anexo E. Diseños 3D de la carcasa en Solidworks