

Diseño e implementación de dispositivo prototipo monitor de rectificadores con salida a sistema SCADA para aplicaciones en la industria

Helmut Alexis Rodriguez Torres

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico.

Director

Jose Alejandro Amaya Palacio

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedicado a mis padres Alvaro Rodriguez y Jackeline Torres, quienes desde muy pequeño me enseñaron el valor del trabajo duro. A mi bella madre, que con sus consejos no permitió que nunca me rindiera por más que se colocara difícil el camino. A mi querido padre que desde las carreteras de Colombia me apoyo económica y moralmente, de no ser por él éste logro no hubiese sido posible.

A mi hermana Ana Maria, quien siempre me animo con sus consejos y me recibió en su casa con todo el cariño del mundo. A mi sobrino Juan Daniel quien llegó como un angelito a mi vida al inicio del pregrado contagiándome de su alegría.

A mis amigos Rafael, Danilo, Marly, Duvan y Sebastian que me apoyaron y me acompañaron académica y emocionalmente. Con su bellísima amistad se convirtieron en miembros de mi familia acá en Bucaramanga. Finalmente a Javier Enrique y Astrid Juliana quienes han estado conmigo incondicionalmente desde mi paso por la sede Barbosa.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente al profesor Jose Alejandro Amaya Palacio quién me apoyo y me aconsejó durante todo el desarrollo de mi tesis. Al profesor Luis Eduardo Rueda que con sus consejos y su gran paciencia y su forma de motivar brindo un gran aporte a mi vida personal y profesional.

A mis compañeros de carrera, con su gran compañerismo y amistad logre culminar éste proceso académico de la mejor manera.

A mi escuela E3T donde conocí las mejores personas que han pasado por mi vida. El lugar donde viví experiencias inolvidables y gracias a ese lugar me convertí en la persona que soy hoy en día.

A mi hermosa alma máter Universidad Industrial de Santander, que me estiró el brazo cuando veía lejos la posibilidad de realizar un pregrado. El lugar que prácticamente se convirtió en mi hogar, con su excelente academia logré desarrollarme profesional y personalmente, y viví las mejores experiencias de mi vida.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 Análisis y Discusión	18
2.1 Análisis Del Origen Del Problema	18
2.1.1 Sistemas De Protección Catódica	18
2.2 Rectificadores	20
2.2.1 Rectificador de Media Onda	20
2.2.2 Rectificadores de Onda Completa	21
2.2.3 Rectificadores Trifásicos	22
2.2.4 Condiciones de Falla en Rectificadores	22
3 Métodos y Materiales	26
3.1 Propuesta General	26
3.2 Propuesta Analógica	27
3.2.1 Circuito de Protección Sobre Voltaje	28

3.2.2	Circuito Para la Adecuación De La Señal	30
3.2.3	Convertidor Tensión - corriente	30
3.3	Propuesta Digital	31
3.3.1	Propuesta microcontrolador	31
3.3.2	Propuesta Algoritmo	32
3.3.3	Descripción General de Algoritmo	33
3.3.4	Inicialización de Tareas	35
3.3.5	Toma Señal Analógica ADC	35
3.3.6	Almacenamiento De Datos	36
3.3.7	FFT <i>Fast Fourier Transform</i>	36
3.3.8	Extracción De Frecuencia Armónico Fundamental	37
3.3.9	Obtención De Voltajes En El DAC A Partir De La Frecuencia	37
3.3.10	Imprimir Todas Las Variables Como Amplitud de Rizado, Frecuencia y Corriente En Función De Frecuencia en Display LCD 16x2	38
3.3.11	Muestra De Datos En Tiempo Real	38
3.4	Simulación y Diseño de PCB	39
4	Resultados y Análisis	39
4.1	Simulaciones	40
4.1.1	Simulaciones para el Plateamiento del Problema	40
4.1.2	Simulación de Propuesta Analógica	42

4.1.2.1	Simulación Protección Sobre Tensión	42
4.1.2.2	Simulación Circuito Adecuación de la señal	44
4.1.2.3	Simulación Circuito Conversor Corriente Tensión	45
4.2	Primeras Pruebas en Software y Hardware	47
4.2.1	Prueba Etapa Analógica	47
4.2.1.1	Prueba Circuito Protección Sobre tensión	47
4.2.1.2	Prueba Circuito De Adecuación De La Señal	48
4.2.1.3	Prueba Convertidor Tensión Corriente	49
4.2.1.4	Prueba Algoritmo FFT	49
4.2.2	Diseño de PCB y Ensamblaje	51
4.2.3	Pruebas con Dispositivo Final	52
4.2.3.1	Pruebas Iniciales De Funcionamiento	52
4.2.3.2	Pruebas de Robustez	55
4.2.3.3	Pruebas de Salida De Corriente dc de 4 a 20mA	57
4.2.3.4	Caracterización de Corriente vs Frecuencia	59
4.2.3.5	Caracterización Variación De Corriente Con Respecto A la Frecuencia	62
5	Conclusiones	64
6	Recomendaciones	65
	Referencias Bibliográficas	66

Lista de Figuras

Figura 1	Esquema general de sistema de protección catódica	15
Figura 2	Comportamiento del Tubo sin Protección	19
Figura 3	Comportamiento del Tubo con Protección	19
Figura 4	Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Monofásico	21
Figura 5	Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Monofásico Onda Completa	22
Figura 6	Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Trifásico	23
Figura 7	Rectificador monofásico de onda completa con carga capacitiva	23
Figura 8	Gráfica Entrada y Salida de Tensión	24
Figura 9	Rectificador monofásico de onda completa con diodo dañado	24
Figura 10	Gráfica de Tensión de Salida del Rectificador con Fallas	25
Figura 11	Diagrama de bloques general	26
Figura 12	Diagrama de Bloques General	28
Figura 13	Circuito de Protección	29
Figura 14	Circuito de Adecuación de la Señal	31
Figura 15	Circuito de Fuente de Corriente 4 a 20mA	32
Figura 16	Gráfica Entrada y Salida de Tensión	33
Figura 17	Propuesta Algoritmo General	34

Figura 18	Esquemáticos de rectificadores planteados en herramienta de simulación	40
Figura 19	Gráficas de tensión de salida de rectificadores	41
Figura 20	Simulación Circuito Sobre tensión	42
Figura 21	Entrada y Salida en tensión circuito de protección sobre tensión	43
Figura 22	Circuito Para la Adecuación de señal	43
Figura 23	Entrada y Salida en tensión circuito de protección sobre tensión	44
Figura 24	Esquemático circuito conversor tensión-corriente	45
Figura 25	Gráficas de entrada en tensión y salida de corriente	46
Figura 26	Prueba circuito protección sobre tensión	47
Figura 27	Captura entrada y salida circuito de adecuación de la señal	48
Figura 28	Prueba circuito protección sobre tensión	49
Figura 29	Prueba Algoritmo FFT	50
Figura 30	Diseño de PCB	52
Figura 31	PCB Ensamblada	52
Figura 32	Empaque fabricado para el dispositivo	53
Figura 33	Setup de prueba de funcionamiento	53
Figura 34	Variables En Display 16x2	55
Figura 35	Resultados De Robustez con dos armónicos	56
Figura 36	Resultados De salida de corriente	58
Figura 37	Gráficas modelos matemáticos	61
Figura 38	Variación de corriente con respecto a la frecuencia	63

Lista de Tablas

Tabla 1	Tabla de porcentaje de error de la frecuencia obtenida del dispositivo comparada con la obtenida en osciloscopio.	57
Tabla 2	Tabla de porcentaje de error del valor de corriente máximo y mínimo obtenido con respecto al valor esperado.	59
Tabla 3	Valores de corriente en funcion de la frecuencia	60
Tabla 4	Valores de frecuencia para modelos polinómicos y lineales	62

Lista de Apéndices

Anexo A. Tabla de variación de corriente respecto a la frecuencia.

Resumen

Título: Diseño e implementación de dispositivo prototipo monitor de rectificadores con salida a sistema SCADA para aplicaciones a la industria.

*

Autor: Helmut Alexis Rodriguez Torres. **

Palabras Claves: Rectificador, tubos de proteccion catodica, FFT, SCADA.

Descripción: en distintos sectores de la industria se necesitan rectificadores de alta eficiencia. Ejemplo de ello, son los sistemas de protección catódica donde el funcionamiento correcto del rectificador es de vital importancia para evitar la corrosión en el tubo (Loachamin Nasimba, 2019). Por consiguiente, es necesario que los rectificadores se encuentren en óptimas condiciones. Para dar solución a esta problemática se debe garantizar un monitoreo permanente al rectificador y así actuar ante cualquier eventualidad evitar daños mayores como la corrosión de la tubería.

Dicho lo anterior el presente proyecto en modalidad de practica empresarial, propone el diseño e implementación de un dispositivo que se conecta a la salida del rectificador, toma la señal de rizado y extrae parámetros de frecuencia y amplitud con una salida en corriente continua en función de la frecuencia, con destino a un sistema SCADA. Para llevar a cabo se siguieron las siguientes pautas. Realizar simulaciones de rectificadores con daños y así tener una idea mas clara del problema. Diseñar las etapas analógicas para adaptar la señal con destino a un microcontrolador. Implementar un algoritmo para el procesamiento digital de la señal, con procedimientos matemáticos para encontrar las diferentes variables de rizado. Dentro esos procedimientos matemáticos, se encuentra la FFT la cual es usada para encontrar la frecuencia de rizado de una manera robusta. Generar una corriente analógica de 4 a 20 mA en función de la frecuencia, dicha actividad se ejecuto con una salida en tensión por el DAC del microcontrolador en función de la frecuencia esa tensión pasa por un circuito transductor de tensión-corriente. Posteriormente, a la etapa de diseño se ensambla en una PCB y en un empaque con el propósito de implementar la solución en la industria. Con el dispositivo completamente ensamblado se procede a hacer pruebas de desempeño donde se obtienen una ecuación de frecuencia en función de la corriente para ingresar al sistema SCADA adicionalmente a partir de la caracterización, se obtiene la variación de corriente en función de la frecuencia.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Jose Alejandro Amaya Palacio

Abstract

Title: Design and implementation of a prototype device to monitor rectifiers with output to SCADA system for industrial applications. *

Authors: Helmut Alexis Rodriguez Torres. **

Keywords: Rectifier's, Catodic Protection, Fast Fourier Transform, SCADA System.

Description: multiple industry sectors require high efficiency rectifiers. For instance, cathodic protection against corrosion in pipelines by supervising the rectifier's operative state, which allows to avoid damage on this important piece of infrastructure (Loachamin Nasimba, 2019). Therefore, there is a need to keep these rectifiers in an optimal working condition. In order to solve the previously mentioned concern, a solution must maintain a constant supervision of the rectifier's output signal bringing the capability to take action on any event, thus avoiding further damage to the pipeline.

Having said the above, this project in business practice mode, proposes the design and implementation of a device that connects to the rectifier output, takes the ripple signal and extracts frequency and amplitude parameters with a DC output level as a function of frequency, for an SCADA system. To achieve this, the following procedure was adopted. To carry out simulations of rectifiers emulating damage condition to consolidate the problem, the following step consists of the design of the analog stages for adapting the signal according to the input of a microcontroller. Next step deals with the development of an algorithm for digital signal processing, including the mathematical procedures needed to extract different characteristics from the signal ripple. Within these mathematical procedures, the FFT is one of them and it is used to find the frequency of the ripple component of the signal in a robust way. The following step, takes care of the design of an analog current source with an output range of 4 to 20 mA as a function of frequency, this functionality was implemented by making use of the digital to analog converter (DAC) present in the microcontroller, the DAC outputs a voltage corresponding to a linear function depending on the frequency determined on the previous stage. In order to generate the desired current range, that voltage passes through a voltage-current transducer circuit. Subsequently, the design stage is assembled on a PCB and packaging for the purpose of implementing the solution in the industry. With the device completely assembled, performance tests are performed to obtain a frequency equation as a function of the current to enter the SCADA system. Additionally, from the characterization, the variation of current as a function of frequency is obtained.

* Undergraduate Work

** Faculty of Engineering Physicomechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.
Advisor: Jose Alejandro Amaya Palacio

Introducción

En múltiples aplicaciones de la industria es necesario tener sistemas de rectificación de voltaje de alta eficiencia (Espinosa Jarrín, 2011). Una de estas aplicaciones son los sistemas de protección catódica. El proceso consiste en tomar la tensión de la línea eléctrica alterna (AC) y rectificarla, la corriente rectificada (DC) se inyecta a través de unos dispositivos llamados ánodos de sacrificio donde la corriente circula hasta la tubería como se observa en la Figura 1 y se inhibe la corrosión en el tubo. Normalmente, éstas aplicaciones se ven en la industria de gas y petróleo (Loachamin Nasimba, 2019) .

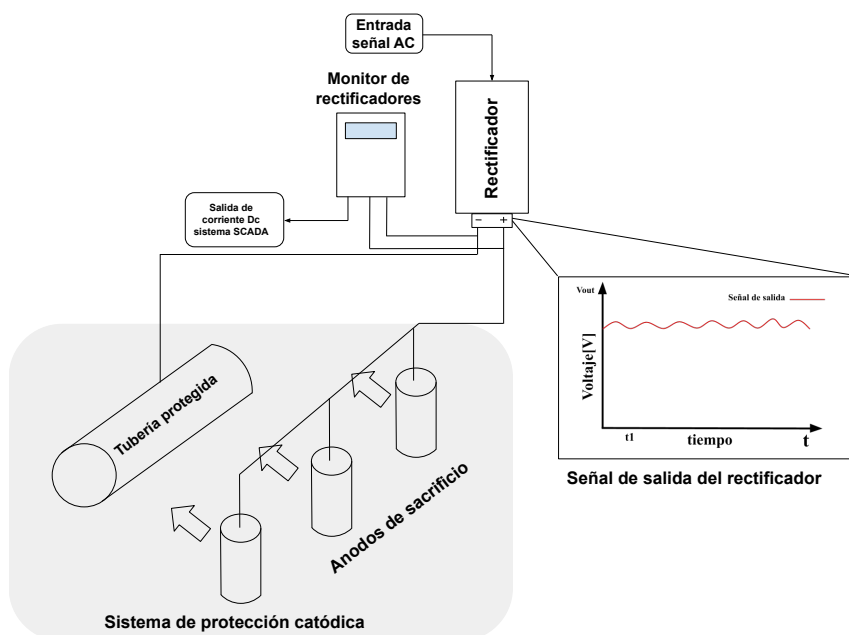
Sin embargo, en éstos procesos se busca evitar la corrosión, debido a que se pueden alterar las rectificaciones; es decir, ya sea por daños causados por el medio o falta de mantenimiento, la rectificación no se logra de forma eficiente (Iorgulescu, 2013).

Una solución a la problemática mencionada es un monitor de rectificadores. El monitor se encarga de tomar la señal de salida para evaluar variables de la señal de rizado como por ejemplo, frecuencia y amplitud. Cuando el rectificador se encuentra en mal estado, la señal puede verse alterada en las variables mencionadas anteriormente (Hart y Bautista, 2001).

Se propone una solución mediante un prototipo de monitor de rectificación, donde se toma la señal salida y se filtra la componente en continua, para posteriormente enfocarse en el rizado

Figura 1.

Esquema general de sistema de protección catódica



Nota. Sistema de protección catódica. Se ilustra el monitor de rectificadores conectado al rectificador.

de la señal. La señal de rizado pasa por un procesamiento digital a través de un microcontrolador, luego se obtienen el valor de la frecuencia y amplitud. Además, se debe garantizar un sistema robusto, ya que los rectificadores se encuentran al intemperie, donde la señal de salida es alterada por componentes no deseadas y se generan armónicos no deseados dentro de la señal de rizado. Dicho lo anterior, la solución propuesta consta de un algoritmo con la capacidad de eliminar armónicos no deseados. Para eliminar los armónicos no deseados se implementa el algoritmo transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) (Oppenheim *et al.*, 1997), la FFT permite identificar el armónico fundamental y los no deseados. Una vez identificados los armónicos, el algoritmo se encarga de pasar la frecuencia deseada. El prototipo tiene como propósito ser aplicado a la in-

dustria. Es importante mencionar que, el dispositivo al estar ubicado en campo, no es viable dar información de las variables localmente.

En la industria, las variables registradas por los instrumentos son convertidas a señales de corrientes analógicas y se encuentran en el rango de 4 a 20 [mA] (Cho *et al.*, 2014), que posteriormente pasan a ser visualizadas en un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés) (Penin, 2011). Para este proyecto, uno de los objetivos es obtener una ecuación de frecuencia en función de la corriente, que luego pasa por al sistema SCADA. El sistema SCADA permitirá la visualización de la frecuencia. En este orden de ideas, el proyecto se encuentra estructurado en 4 secciones de la siguiente manera: en la primera sección se establece el análisis y discusión, es decir, los fundamentos teóricos y como se planteó la solución del problema; en la segunda sección se plantean los métodos y materiales, es decir, el cómo se realizó el proyecto y qué se utilizó para el desarrollo del mismo; en la tercera sección se muestran los análisis y resultados, como las simulaciones del sistema analógico, las primeras pruebas del algoritmo, el diseño de la PCB y algunos resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio. Finalmente, en la sección 4 se puntúan las conclusiones y sugerencias para complementos del proyecto. Este dispositivo fue desarrollado como un primer prototipo en modalidad de practica empresarial, para la empresa SWITCHING SAS, y tiene como propósito el desarrollo de dispositivos electrónicos para la industria en Colombia.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un dispositivo prototipo monitor de rectificadores con salida a sistema SCADA para aplicaciones en la industria.

1.2. Objetivos Específicos

Plantear arquitectura analógica que acondicione la señal de salida de un rectificador para su debido procesamiento digital en un microcontrolador

Desarrollar algoritmo de software robusto para la adquisición y procesamiento digital de la señal de rizado de la salida de tensión de rectificador..

Implementar software para calcular parámetros como la la FFT *Fast Fourier Transform*, Frecuencia y amplitud.

Elaborar un circuito transductor de frecuencia a corriente de 4 a 20 mA , con salida hacia un sistema SCADA.

Validar el desempeño del dispositivo por medio de pruebas y caracterización de los parámetros.

2. Análisis y Discusión

2.1. Análisis Del Origen Del Problema

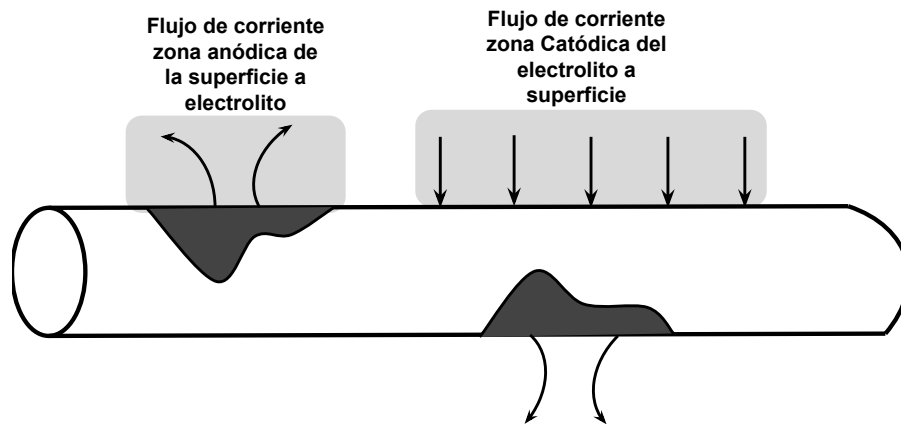
Inicialmente, para abordar este proyecto se procede a hacer un análisis general del problema. En este caso, son los rectificadores que se ubican en los sistemas de protección catódica. A continuación se hablara de tubos de protección catódica y porque es necesario un sistema óptimo de rectificación de corriente.

2.1.1. Sistemas De Protección Catódica

Uno de los métodos para la protección de tuberías es la protección catódica. Aquella técnica es usada para disminuir el proceso de corrosión en superficies metálicas. Normalmente las tuberías con superficie metálicas poseen áreas anódicas y áreas catódicas (Espinosa Jarrín, 2011). En la Figura 2, el fenómeno de corrosión sucede en las áreas anódicas donde la corriente fluye desde el metal, hasta el electrolito (suelo o agua) permitiendo la corrosión en la tubería. En la parte catódica de la superficie la corriente, suele fluir desde el electrolito hasta la superficie del tubo, disminuyendo el proceso de corrosión (Espinosa Jarrín, 2011; Loachamin Nasimba, 2019).

La corrosión puede disminuir siempre y cuando se somete el metal, a una corriente que fluye desde una fuente a la superficie. Es decir, forzar la corriente provocando que la tubería se comporte mayormente catódicamente. Esta técnica es llamada Protección catódica (Espinosa Jarrín, 2011).

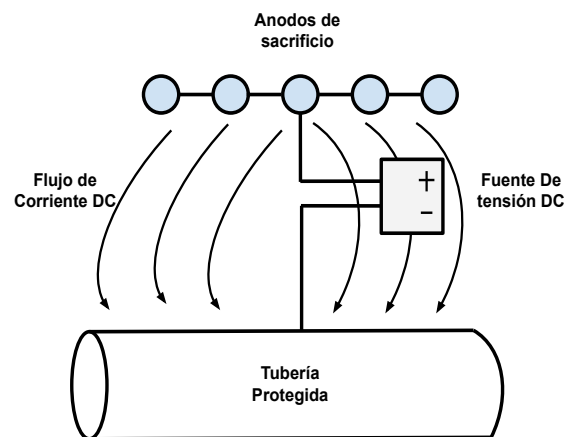
Figura 2.
Comportamiento del Tubo sin Protección



En la Figura 1 y 3, se puede apreciar un sistema de protección catódica donde se muestra el flujo de la corriente, sometiendo a la tubería a un proceso en su gran mayoría catódico.

A pesar de que en este proyecto de hablan de tubos de protección catódica, este no es el

Figura 3.
Comportamiento del Tubo con Protección



Nota. Sistema de protección catódica, donde se muestra el sistema de protección funcionando.

enfoque real del proyecto. Este proyecto va dirigido hacia los rectificadores usados para este tipo de aplicación a la industria.

Ahora bien, se hablara un poco de la parte teórica de los rectificadores. Donde inicialmente se hablaran de conceptos básicos y finalmente el tipo de problemas dan origen al enfoque de este proyecto.

2.2. Rectificadores

En la industria, los rectificadores cumplen un papel muy importante dentro de los dispositivos electrónicos. Su función consiste en convertir una señal AC (corriente alterna) a DC (corriente continua), los componentes que se encargan principalmente de modificar la señal son principalmente diodos semiconductores y demás componentes que se encargan de eliminar el componente AC como mejor sea posible. Existen varios tipos de rectificadores entre ellos, rectificadores monofásicos y rectificadores trifásicos, su uso depende la aplicación. Entre ellos dos se encuentran subtipos que son rectificadores monofásicos de media onda, onda completa y trifásicos de media y onda completa (Hart y Bautista, 2001; Rashid, 2004).

2.2.1. Rectificador de Media Onda

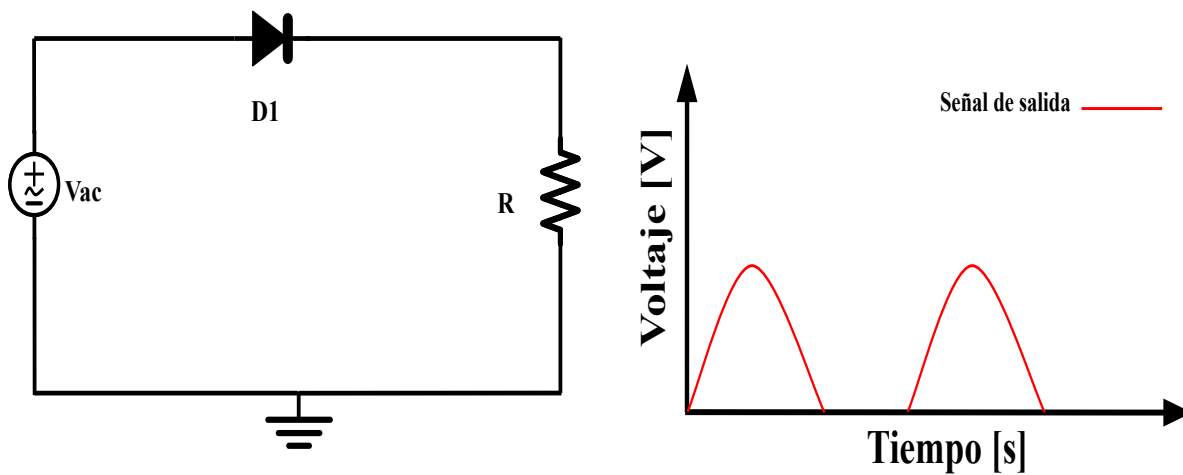
Los rectificadores de media onda tiene como propósito de generar una salida en continua sea de tensión o de corriente. En la practica este tipo de rectificadores se una para aplicaciones de baja potencia, debido a que el valor medio de la señal no será cero. Por lo tanto, este tipo de circuitos tiene bastantes limitaciones. En la Figura 4. Se puede apreciar la arquitectura del circuito

y la señal de salida del rectificador (Hart y Bautista, 2001).

2.2.2. Rectificadores de Onda Completa

Al igual que los rectificadores de media onda su propósito, es purificar la señal dejándola completamente continuo. Sin embargo, el rectificador de onda completa, el valor medio de la corriente es completamente nulo. Por lo tanto, los circuitos de onda completa suelen tener menos rizado que los de media onda. La arquitectura del circuito y su salida de tensión se pueden observar en la Figura 5 (Hart y Bautista, 2001).

Figura 4.
Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Monofásico

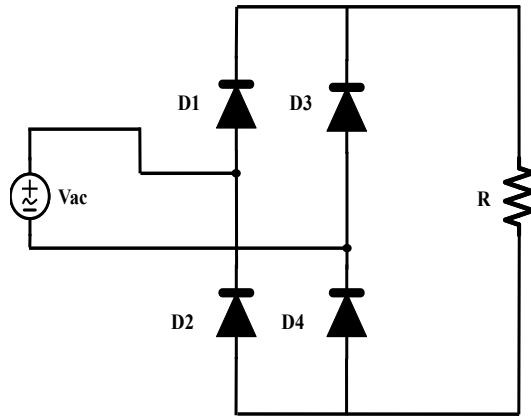


(a) Circuito monofásico media onda

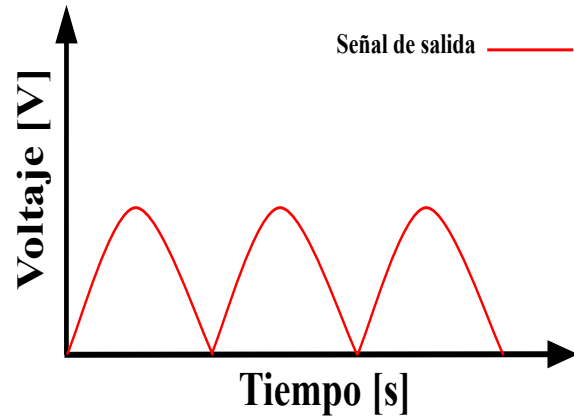
(b) Señal de tensión de salida del rectificador

Figura 5.

Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Monofásico Onda Completa



(a) Circuito monofásico onda completa



(b) Señal de tensión de salida del rectificador

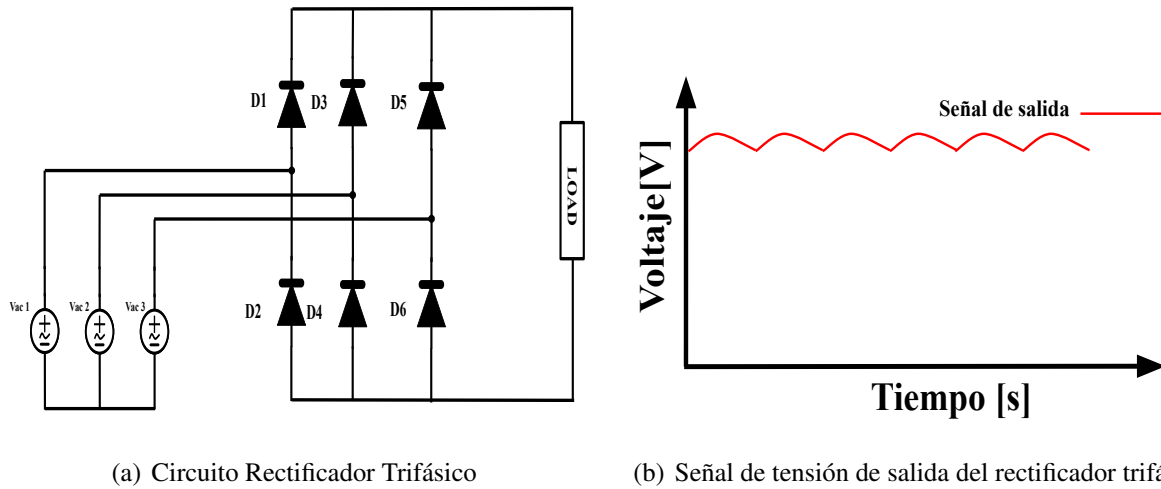
2.2.3. Rectificadores Trifásicos

Los rectificadores trifásicos como bien lo dice su nombre, toma las tres fases de la red eléctrica. La configuración trifásica se suele usar en aplicaciones de alta potencia, es decir, cuando se necesita producir señales de corriente y tensión continua para grandes cargas. La arquitectura del circuito y la señal de salida se pueden observar en la Figura 3.2.2 (Hart y Bautista, 2001).

2.2.4. Condiciones de Falla en Rectificadores

Considerando ahora una posible falla en los rectificadores, sucede cuando uno de los componentes, sean semiconductores o elementos pasivos presenta falla. En este caso se presentará el caso cuando uno de los diodos dentro del rectificador se descompone. Para presentar este caso pri-

Figura 6.
Arquitectura y Señal de Salida Rectificador Trifásico



meramente, se mostrará un rectificador monofásico de onda completa con carga capacitiva que se observa en la Figura 7. funcionando de forma correcta. En las Figuras 8a y 8b se aprecia la señal de entrada del rectificador y su salida en tensión. Tanto con la carga capacitiva, sin la carga capacitiva (Iorgulescu, 2013).

Figura 7.
Rectificador monofásico de onda completa con carga capacitiva

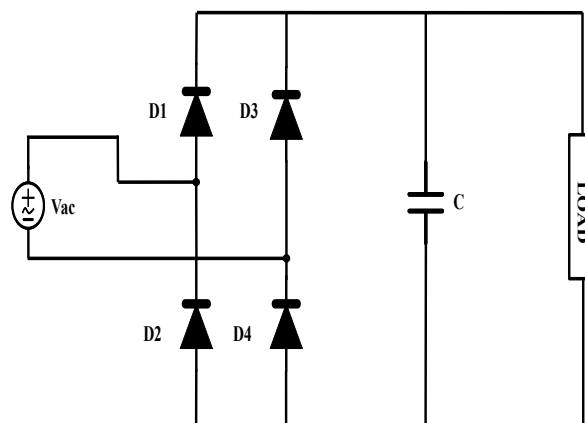
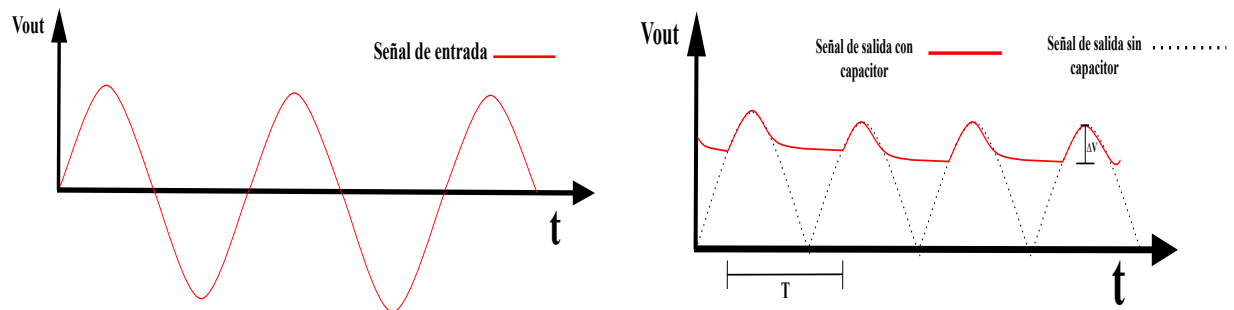


Figura 8.

Gráfica Entrada y Salida de Tensión



(a) Circuito Rectificador Trifásico

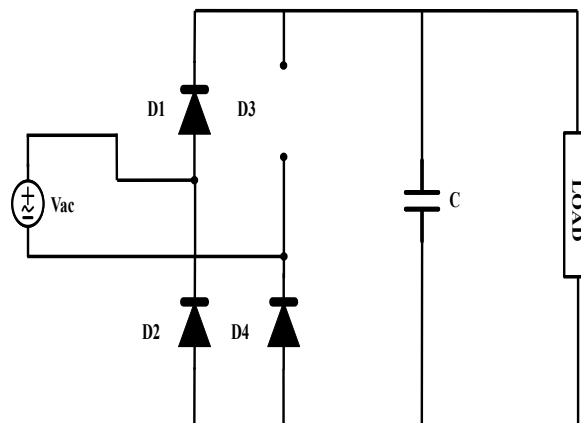
(b) Señal de tensión de salida del rectificador trifásico

Ahora bien, mostrando el correcto funcionamiento del rectificador monofásico de onda completa se presenta el caso en que uno de los diodos presenta fallas, la representación es un circuito abierto como se ilustra en la Figura 9

En consecuencia a la falla de del diodo como se observa en la Figura 9, la señal de salida del rectificador se ve bastante alterada. Donde su amplitud aumenta y la frecuencia disminuye. La

Figura 9.

Rectificador monofásico de onda completa con diodo dañado

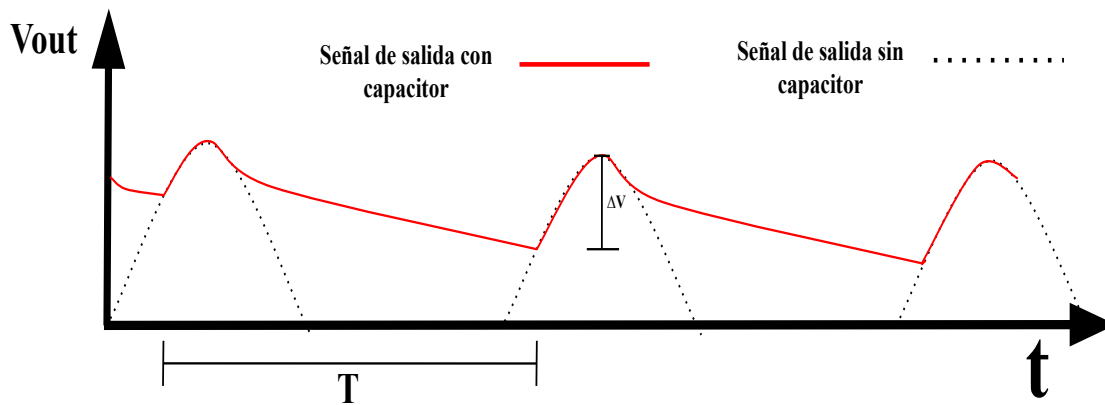


razón de este fenómeno se debe a que la corriente ya no transita por el diodo D3 cuando la señal AC se encuentra en el semiciclo negativo (Iorgulescu, 2013; Hart y Bautista, 2001).

En la Figura 10 se puede observar cuando el diodo del rectificador falla. En consecuencia, el periodo T aumenta el doble de tal forma la frecuencia f disminuye a la mitad. También se puede ver el aumento en la amplitud del rizado ΔV (Hart y Bautista, 2001).

Entendiendo el problema y las posibles fallas en un rectificador, se procede de plantear una solución. Para este caso, la solución es un circuito que pueda tomar la señal de rizado y determinar parámetros de frecuencia de rizado. si la frecuencia, varia de su valor nominal o su amplitud, se

Figura 10.
Gráfica de Tensión de Salida del Rectificador con Fallas



determinara que se debe hacer una intervención al rectificador.

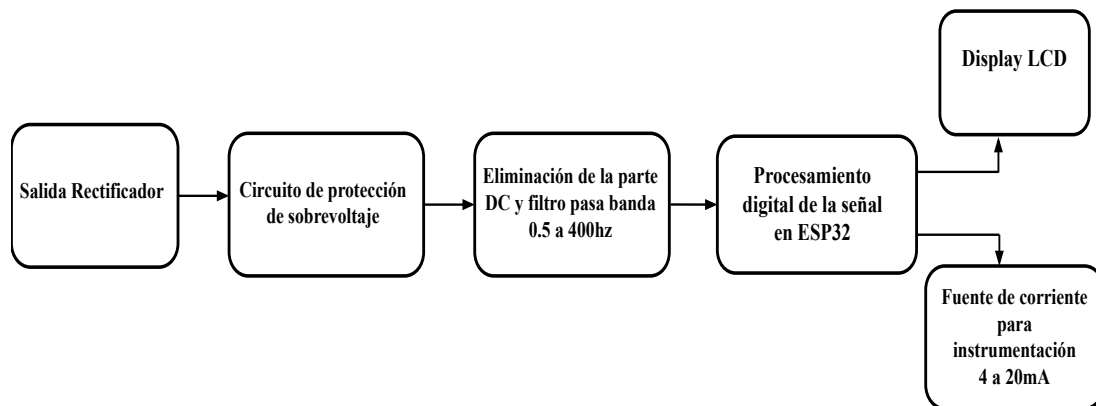
3. Métodos y Materiales

Después de realizar un análisis del origen del problema, conociendo el funcionamiento de los tubos de protección catódica y de los rectificadores que alimentan este sistema, además de la importancia y necesidad de mantener en óptimo funcionamiento y constante monitoreo de aquellos rectificadores. Se realiza un estudio de la solución general a partir de los estudios teóricos mencionados en el capítulo 2.

3.1. Propuesta General

Sin entrar en detalle con la parte de diseño se realiza, una propuesta general de la solución donde se incluye la parte analógica y digital. El proyecto se propone bajo las etapas mostradas en la Figura 11.

Figura 11.
Diagrama de bloques general

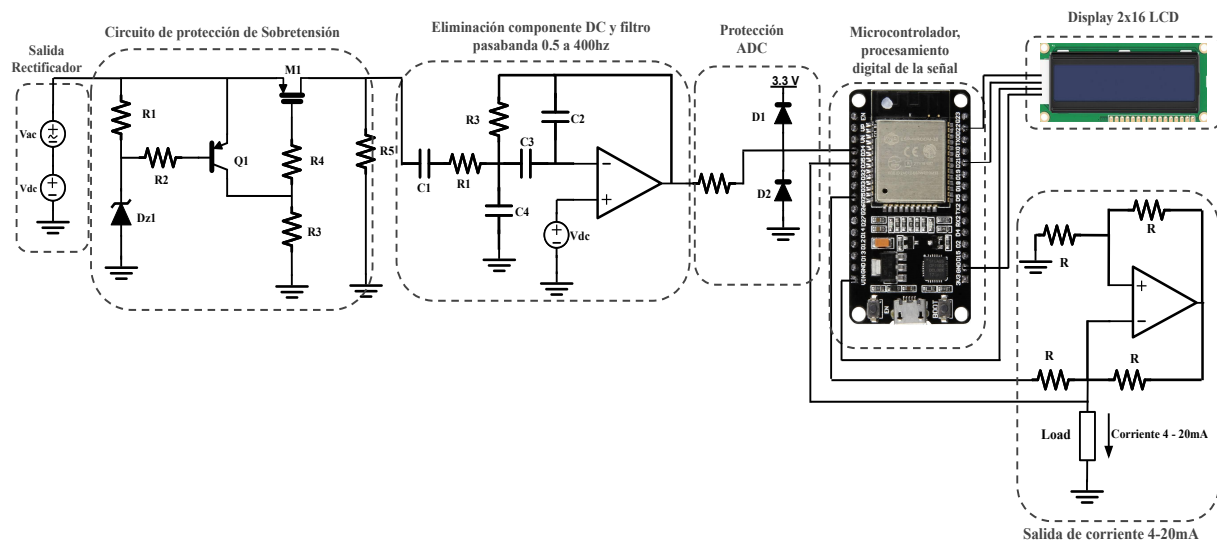


La propuesta general contiene dos partes a partir de la salida del rectificador, una de ellas una parte analógica que contempla las dos primeras etapas. Donde primero debe pasar por una etapa de protección de sobre voltaje con la intención de proteger el circuito tanto analógico como la parte digital posteriormente, como lo que se va a monitorear es el rizado se realiza una etapa de filtrado para adecuar la señal. De tal manera que la pueda procesar la siguiente etapa que es la digital. La etapa digital, es donde se realiza el debido procesamiento de la señal en un microcontrolador para encontrar los parámetros deseados, como lo son amplitud y frecuencia. Adicionalmente, estos parámetros se deben poder ver en una pantalla localmente. Sin embargo, como ya se había mencionado es necesario ver las variables remotamente desde un sistema SCADA. Para este proyecto la variable que se monitoreara remotamente es la frecuencia, donde una vez obtenido el valor se procede a una conversión a un valor analógico en tensión continua para que finalmente llegue a una etapa analógica de conversión de voltaje a corriente de 4 a 20 mA dirigidas hacia el sistema SCADA.

3.2. Propuesta Analógica

Ahora bien, se propone una arquitectura analógica donde se contempla cada una de las etapas del circuito, como se observa en la Figura 12. Antes de realizar cualquier tipo de prueba, se hacen las respectivas simulaciones con la herramienta de Cadence ORCAD. El resultado de las simulaciones se mostraran en la sección 4.

Figura 12.
Diagrama de Bloques General



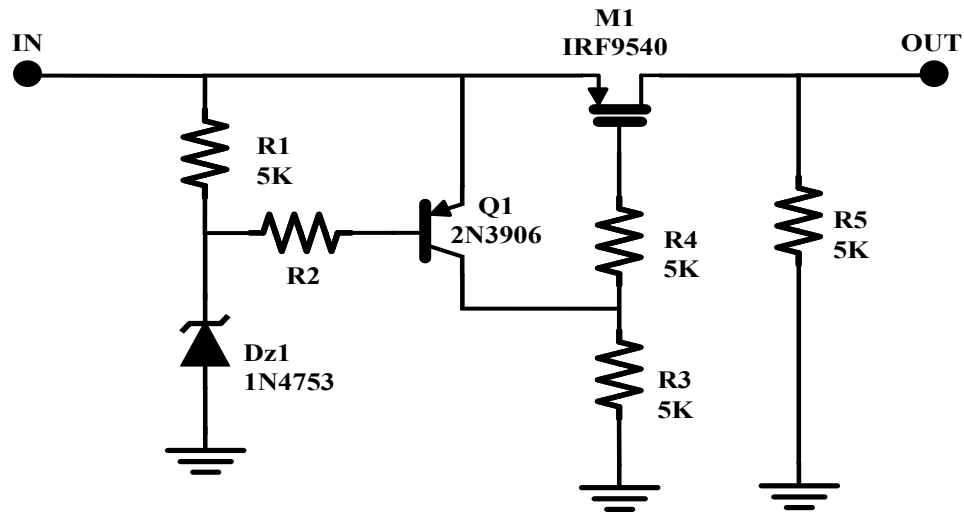
3.2.1. Circuito de Protección Sobre Voltaje

La propuesta para el circuito de protección sobre voltaje se puede apreciar en la Figura 13. La entidad interesada en el proyecto da como limite de tensión de salida del rectificador 30 Vdc. Por esta razón, el circuito de protección se diseña de tal manera que cuando la tensión en dc sobrepase los 36V la salida del circuito sea 0.

Los elementos propuestos en la arquitectura de la Figura 13, se eligieron de tal manera que soportaran mas de 30V. En este circuito se usaron los siguientes elementos con sus respectivas referencias.

1. Diodo Zener (1N4753).

Figura 13.
Circuito de Protección



2. Transistor BJT PNP (2N3906).
3. Transistor MOSFET P (IRF9540).
4. Resistencias y capacitores.

El funcionamiento del circuito, consiste en mientras el voltaje del diodo zener se encuentre debajo del umbral el transistor MOSFET tipo P, tendrá un voltaje en su puerta de 0 por lo tanto el transistor permanecerá cerrado permitiendo el paso de voltaje. Cuando el voltaje supere el umbral, en este caso 36V el diodo Dz1 (SEMTECH, 2021) se comporta como una fuente de 36V. Permitiendo el paso de corriente entre base y colector del transistor BJT por lo tanto, en el divisor resistivo comienza a tener un voltaje de tal manera que la puerta del transistor MOSFET tiene una tensión. En consecuencia se abre interrumpiendo el paso de corriente y voltaje hacia la salida

del circuito OUT

3.2.2. Circuito Para la Adecuación De La Señal

Con el propósito de adecuar la señal de rizado, antes de su ingreso al procesamiento digital en el microcontrolador, primeramente la señal se pasa por un capacitor en serie perdiendo completamente el componente en DC. Posteriormente se pasa por un filtro pasa banda con de 0.5 a 400 hZ con el objetivo de eliminar ruidos en alta frecuencia. Finalmente en el OPAM se le inyecta un offset en la terminal no inversora para elevar el nivel de DC que el microcontrolador lo pueda leer sin ningún inconveniente. Cabe resaltar que el microcontrolador para este proyecto solo lee tensiones positivas.

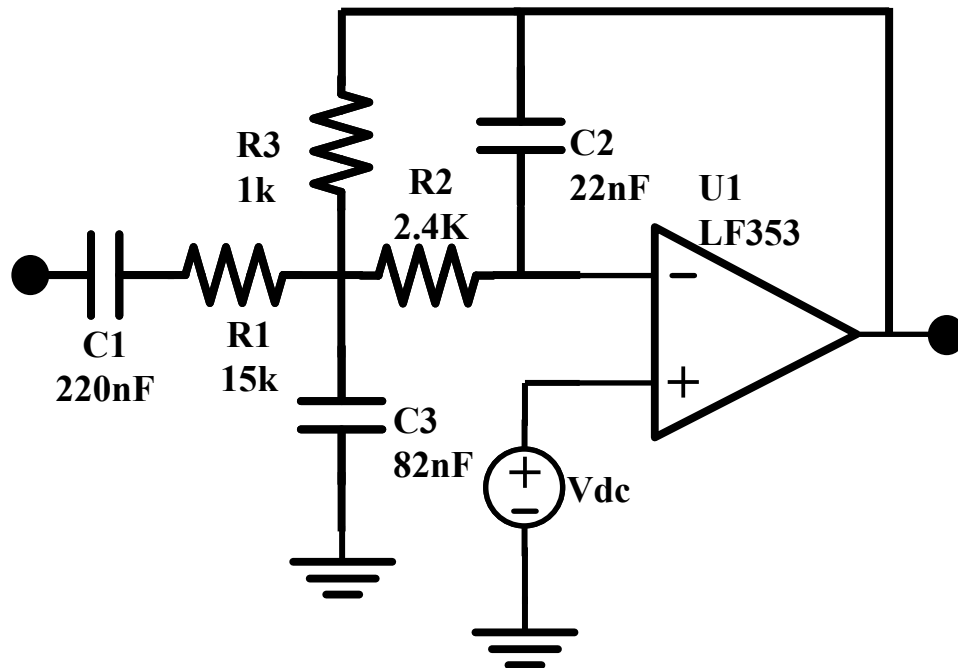
Es importante mencionar que para todos los circuitos analógicos, se usaron elementos discretos y *Through Hole*, debido a que se trata de un primer prototipo y se busca la mayor economía posible.

3.2.3. Convertidor Tensión - corriente

Como ya se ha mencionado, parte de los alcances de este proyecto es una salida de corriente continua de 4 a 20mA en función de la frecuencia, con el objetivo de dirigirla a un sistema SCADA y lograrla ver remotamente.

El circuito de la Figura15 básicamente cumple la función de conversor de voltaje corriente. El valor de las resistencias se escoge dependiendo del rango de voltaje de entrada "VIN". Para este

Figura 14.
Circuito de Adecuación de la Señal



caso ese valor de entrada es la salida del DAC del microcontrolador que se hablara mas adelante.

Ese valor es de 0.6V a 3.0V su equivalencia debe ser de 4 a 20 mA.

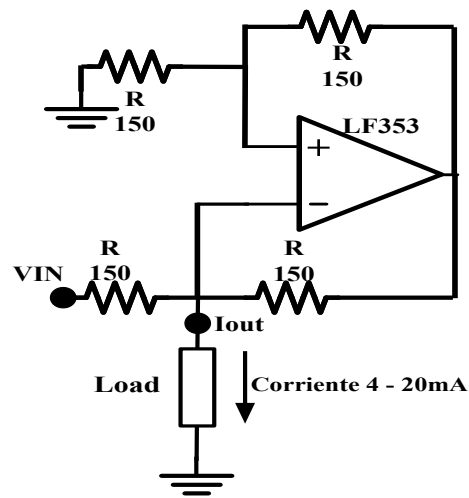
3.3. Propuesta Digital

3.3.1. Propuesta microcontrolador

Uno de los enfoque mas importantes en este proyecto, es la parte del procesamiento digital de la señal. El microcontrolador encargado de esta tarea es el ESP32 que se puede apreciar en la Figura16 junto con su arquitectura (Espressif, 2021) .

Figura 15.

Circuito de Fuente de Corriente 4 a 20mA



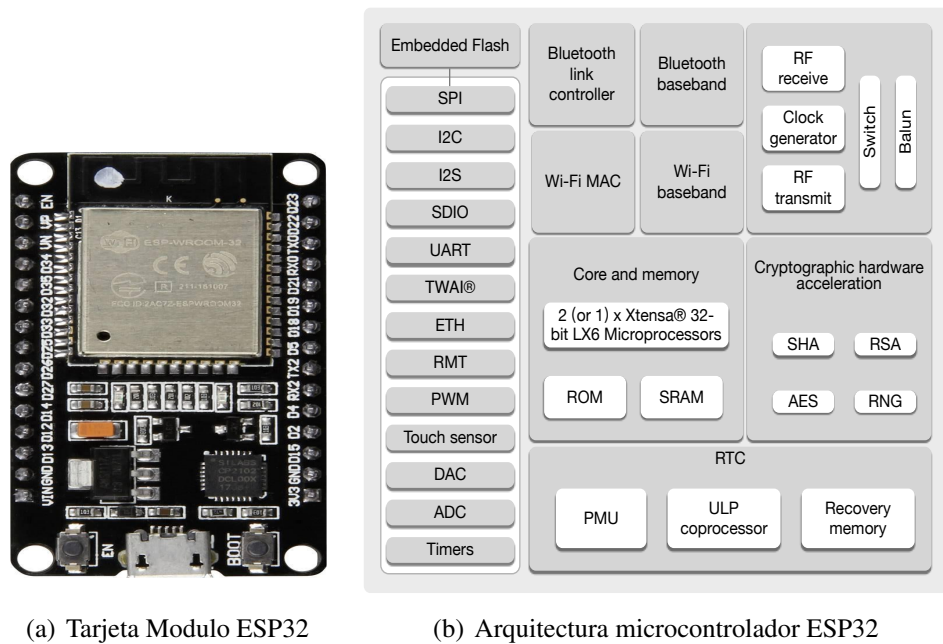
El ESP32 es un microcontrolador bastante eficiente, además de ser económico, cuenta con los periféricos necesarios para la aplicación en este proyecto. Es decir, por ejemplo cuenta con un ADC de 12bits de 18 canales y un DAC de 8 bits de dos canales. Suficiente para la toma de la señal analógica y la generación de tensión a partir de la frecuencia. Adicionalmente, los rangos del ADC cumplen con una de las especificaciones requeridas en los alcances que son señales AC de 1Vpp, el ADC del ESP32 puede tomar señales hasta de 3.3V. El DAC genera tensiones hasta 3.3V. De tal forma que la fuente de corriente mencionada en la sección 3.2.3 se diseña de acuerdo a los rangos del DAC.

3.3.2. Propuesta Algoritmo

Para la etapa de software, se propone un algoritmo general que se presentara en la Figura 17.

Figura 16.

Gráfica Entrada y Salida de Tensión



(a) Tarjeta Modulo ESP32

(b) Arquitectura microcontrolador ESP32

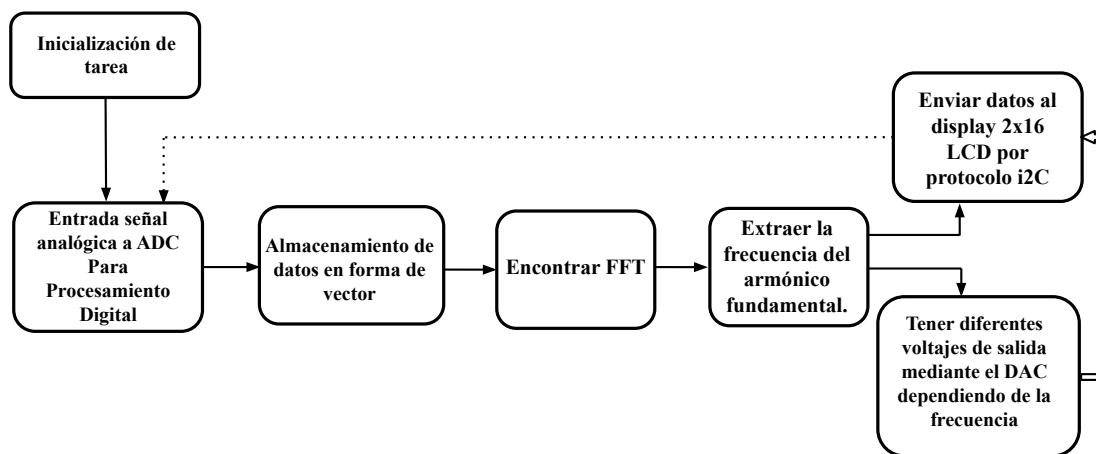
Nota. Tomadas de *ESP32 Series Datasheet*, de Espressif, 2021, https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

3.3.3. Descripción General de Algoritmo

Como se observa en la Figura 17 el algoritmo propuesto se divide en varias tareas. Inicialmente se toma la señal analógica que entra por uno de los canales del ADC del ESP32, se realiza la respectiva digitalización de la señal. Posteriormente se almacenan los datos en forma de vector con 1024 muestras, la siguiente tarea toma ese vector y le encuentra la *FFT Fast Fourier Transform*. Con la FFT se extrae la frecuencia del armónico fundamental. Finalmente ocurren dos tareas al tiempo, la primera es generar un voltaje en el DAC del microcontrolador en función de la frecuen-

Figura 17.

Propuesta Algoritmo General



Nota. La doble línea indica que esa etapa pasa primero por una parte analógica de conversión de tensión corriente. La línea punteada indica que la ultima tarea finalizo y da aviso a la primera para que repita el ciclo.

cia, con destino a un conversor tensión-corriente de 4 a 20 mA. La segunda, es mostrar todos los valores como lo son amplitud, frecuencia y la corriente de 4 a 20 mA en un display LCD ubicado localmente en el dispositivo.

El orden secuencia del algoritmo se manejo de la siguiente manera. Primero se manejo un sistema de comunicación entre tareas de banderas. Es decir, cuando una tarea depende de otra, esa tarea debe indicar que ya finalizo mediante una bandera de aviso y así la otra tarea iniciara.

Teniendo en cuenta la Figura 17 el algoritmo se dividió de la siguiente manera.

1. inicialización de tareas.
2. Toma de señal analógica ADC.

3. Almacenamiento de datos.
4. FFT *Fast Fourier Transform*
5. Extracción de frecuencia armónico fundamental.
6. Obtención de voltajes en el DAC a partir de la frecuencia.
7. Imprimir todas las variables como amplitud de rizado, frecuencia y corriente en función de frecuencia en display LCD 16x2.

3.3.4. Inicialización de Tareas

Inicialmente se tiene una tarea que se encarga de administrar las demás, esta tarea es llamada también como main o orquestador. Primeramente se encarga de inicializar todas las tareas y marcar la bandera de inicio de la primera tarea que es tomar la señal analógica con el ADC. Adicionalmente, si hay un reinicio o algun problema en el microcontrolador esta tarea se encarga de mantener el algoritmo en un estado conocido.

3.3.5. Toma Señal Analógica ADC

Cuando se adapte la señal de rizado, se procede a inyectar la señal al ADC del ESP32. Una de las razones por la cual, se escogió el ESP32 como microcontrolador encargado de la parte digital, es por que el ADC se adapta a las necesidades del proyecto. El ESP32 consta de 2 ADC's de 12 bits con una resolución de alrededor de $800\mu V$. El ADC1 contiene 8 canales, el ADC2 contiene 10 canales. De tal forma que brinda la posibilidad de testear mas de una señal analógica (Espressif,

2021).

El ADC del ESP32 permite rangos de 150mV a 3.3V. Sin embargo, es importante tener cuidado con la calibración, el ADC internamente tiene un valor de tensión referencia de 1.1V. De esta forma se puede medir valores de 150mV al valor de referencia. No obstante, cuando el valor de entrada es mayor a de referencia el ADC tiene 4 opciones de atenuación. Cuanto mayor sea la atenuación mayor es la posibilidad de medir el voltaje de entrada (Espressif, 2022).

Dicho lo anterior, el ADC del ESP32 fue suficiente para las necesidades del proyecto debido, a que la señal de rizado puede tomar valores de amplitud hasta de 1Vpp. De igual manera la frecuencia de rizado se estipulo con un máximo de 200Hz por esa razón, se estipula la frecuencia de muestreo por defecto de 1 KHz.

3.3.6. Almacenamiento De Datos

Una vez tomada la señal analógica y la correcta verificación de los valores de tensión, se procede a tomar ventanas de datos de 1024 muestras. Con el objetivo de organizar los datos para la siguiente etapa, donde se realizara el procesamiento matemático. En este caso, se le encontrara la FFT *Fast Fourier Transform*.

3.3.7. FFT Fast Fourier Transform

Como se ha mencionado anteriormente, una de las necesidades para este proyecto es que sea lo suficientemente robusto es decir, que sea capaz de identificar la frecuencia de rizado aun

existiendo armónicos de frecuencia no deseados. Como solución a este problema se propone que la forma de encontrar la frecuencia es encontrar la FFT a la señal de rizado y así, lograr observar la señal en función de la frecuencia se puede identificar fácilmente el armónico fundamental, con la frecuencia deseada y ignorar las componentes no deseadas.

3.3.8. Extracción De Frecuencia Armónico Fundamental

Después de encontrar la FFT a la señal de rizado se procede a identificar el armónico fundamental es decir, el armónico que pertenece a la frecuencia de la señal de rizado. Una vez identificado, se toma ese armónico y se ignora el resto se encuentra en valor de la frecuencia se guarda para ser enviada a la siguiente tarea que se explicara en la sección 3.3.9.

3.3.9. Obtención De Voltajes En El DAC A Partir De La Frecuencia

Dentro de los alcances del proyecto se debe tener la salida en corriente analógica de 4 a 20mA en función de la frecuencia dirigida a un sistema SCADA. Para dar solución primero se obtiene el valor de la frecuencia desde la tarea de la FFT se obtienen, valores de voltaje en el DAC del ESP32 a partir de la frecuencia. Posteriormente, esos valores de tensión salen a un circuito analógico conversor tensión corriente mencionado en la sección 3.2.3. De acuerdo a los valores de tensión que se necesitan para convertir a corriente de 4 a 20 mA y a las especificaciones del DAC se plantea la ecuación de valores de salida del DAC en función de la frecuencia.

El DAC del ESP32 posee dos canales, cada uno de 8bits. Con valores de salida de 0 a 255, con un rango de voltaje de 0 a 3.3 V. Dicho lo anterior la ecuación de frecuencia de plantea

de acuerdo a los valores de salida del DAC. Teniendo en cuenta que el circuito de conversión de tensión corriente se diseño con una entrada de 0.6V a 3.0V con una salida de 4 a 20mA.

3.3.10. Imprimir Todas Las Variables Como Amplitud de Rizado, Frecuencia y Corriente En

Función De Frecuencia en Display LCD 16x2

Finalmente, una vez obtenidas todas las variables como la amplitud de rizado, frecuencia y la corriente generada a partir de la frecuencia se procede a imprimirlas localmente en un display LCD 16x2. Con el fin, de lograr un monitoreo de forma local.

Es importante mencionar que para imprimir la variable de la corriente en función de la frecuencia, primero pasa por un conversor tensión-corriente como ya se había mencionado en secciones anteriores. Se toma el valor de tensión de salida del conversor y por ley de ohm se imprime la corriente en el display.

3.3.11. Muestra De Datos En Tiempo Real

Otra necesidad en este proyecto, es que los datos se puedan observar en tiempo real. Por ese motivo es importante que se tenga un sistema de comunicación entre tareas bastante óptimo. Para el proyecto se implemento de la siguiente manera. Después de tomar los datos con el ADC y almacenarlos en un vector se le encuentra la FFT. Sin embargo, debido a que al ADC nunca le dejan de llegar datos se debe hacer una evacuación y actualización de datos.

Para ejecutar la evacuación y actualización de datos, la tarea de almacenamiento de datos

y la obtención de la FFT se deben comunicar de la siguiente manera. Cuando ya se tiene el vector de datos la FFT ya lo esta esperando, una vez enviados los datos a la FFT y mientras se encuentra la frecuencia y se imprime en el display 16x2 el vector ya se encuentra actualizado, esperando la indicación por parte de la FFT para enviar el nuevo vector.

3.4. Simulación y Diseño de PCB

Para la implementación del proyecto, aparte del desarrollo de software que se explico en la sección 3.3 se debe realizar simulaciones de la parte analógica explicadas en la sección 3.2 que se mostraran en el Capitulo 4. Adicionalmente se debe realizar, un diseño de PCB para mandar a fabricar.

La herramienta usada para ejecución de la actividad mencionada es el paquete de Cadence. Para la parte de simulación se uso la herramienta CAPTURE CIS, para el diseño de la PCB se uso la herramienta ALLEGRO PCB EDITOR.

Los resultados de esta actividad se mostraran en el capitulo 4.

4. Resultados y Análisis

En esta sección se mostraran los resultados del desarrollo del proyecto. Inicialmente se plantea simulaciones de funcionamiento básico de rectificadores y del posible daño para tener mas claro el problema a solucionar. Después, se plantean las respectivas simulaciones de las etapas analógicas propuestas en la sección 3.2 y así verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente

se expondrán algunas, primeras pruebas analógicas y de software realizadas durante el desarrollo del proyecto. Finalmente se presentara la PCB diseñada y las respectivas pruebas finales, con su caracterización de resultados.

4.1. Simulaciones

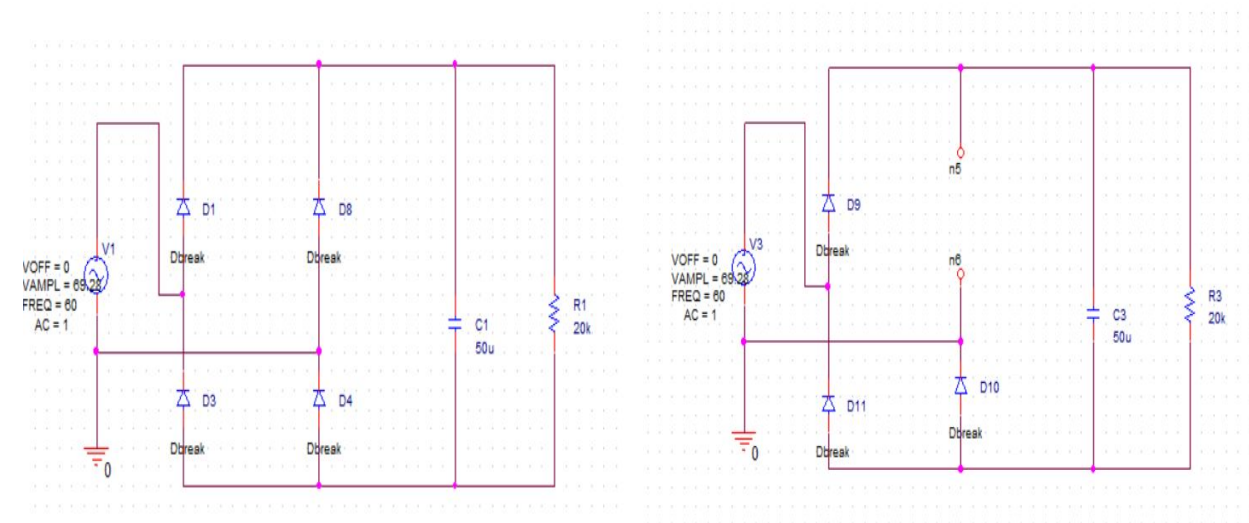
4.1.1. Simulaciones para el Plateamiento del Problema

Para tener una idea mas clara del problema, se procede a simular el funcionamiento básico del rectificador y uno de los problemas que se pueden presentar tal como se propone en la sección 2.2.4.

Las simulaciones, son realizadas con la herramienta cadence ORCAD.

Figura 18.

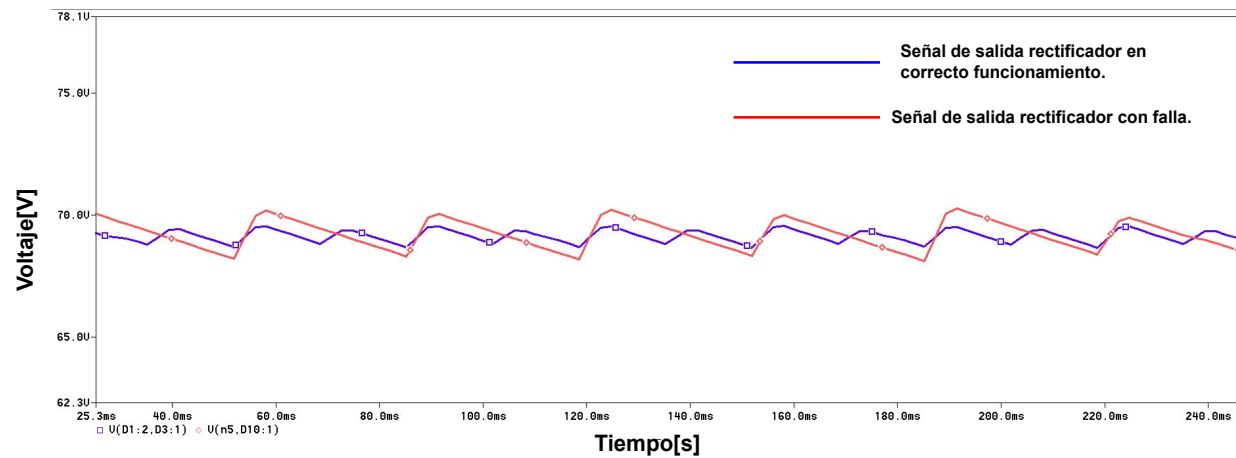
Esquemáticos de rectificadores planteados en herramienta de simulación



(a) Esquemático rectificador monofásico de onda completa con diodo
(b) Esquemático rectificador monofásico de onda completa con diodo dañado

Figura 19.

Gráficas de tensión de salida de rectificadores



Nota. La señal azul representa La salida en tensión de la Figura 18a y la señal roja representa la salida del rectificador de la Figura 18b.

En la Figura 18 se plantea la prueba en simulación del funcionamiento básico de un rectificador monofásico de onda completa. La Figura 18 b se plantea la situación del daño de uno de los diodos del rectificador.

La Figura 19 Representa la salida de un rectificador en buen estado, y otro con un diodo dañado. Como se menciona en la sección 2.2.4 cuando uno de los diodos presenta falla, la amplitud aumenta y la frecuencia se disminuye a la mitad.

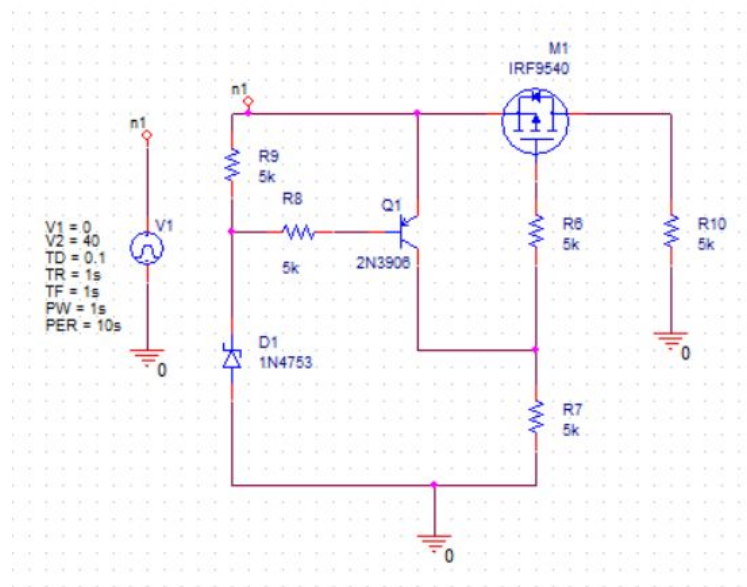
El propósito de la simulación anteriormente mencionada, consiste en entender el problema en un escenario distinto a lo teórico, en este caso se maneja bajo un escenario de simulación.

4.1.2. Simulación de Propuesta Analógica

Ahora bien, cuando ya se tiene un panorama del problema mas claro, se procede a realizar las simulaciones de la propuesta analógica del proyecto. Antes de realizar cualquier implementación física, se simulo cada una de las etapas verificando el correcto funcionamiento de la propuesta de la sección 3.2

4.1.2.1. Simulación Protección Sobre Tensión. Según la arquitectura propuesta en la sección 3.2.1 se plantea la prueba de simulación, como se observa en la Figura 20

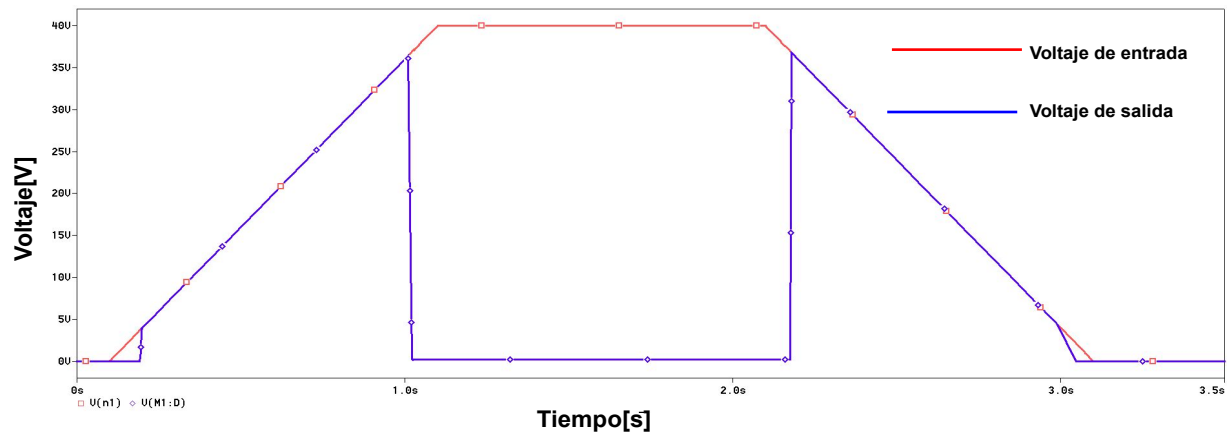
Figura 20.
Simulación Circuito Sobre tensión



Teniendo en cuenta el voltaje de umbral del diodo Zener 1N4753 que es 36V, cuando la tensión de entrada supera ese umbral, la salida se vuelve cero. Este comportamiento, se puede observar en el resultado de simulación observado en la Figura 21

Figura 21.

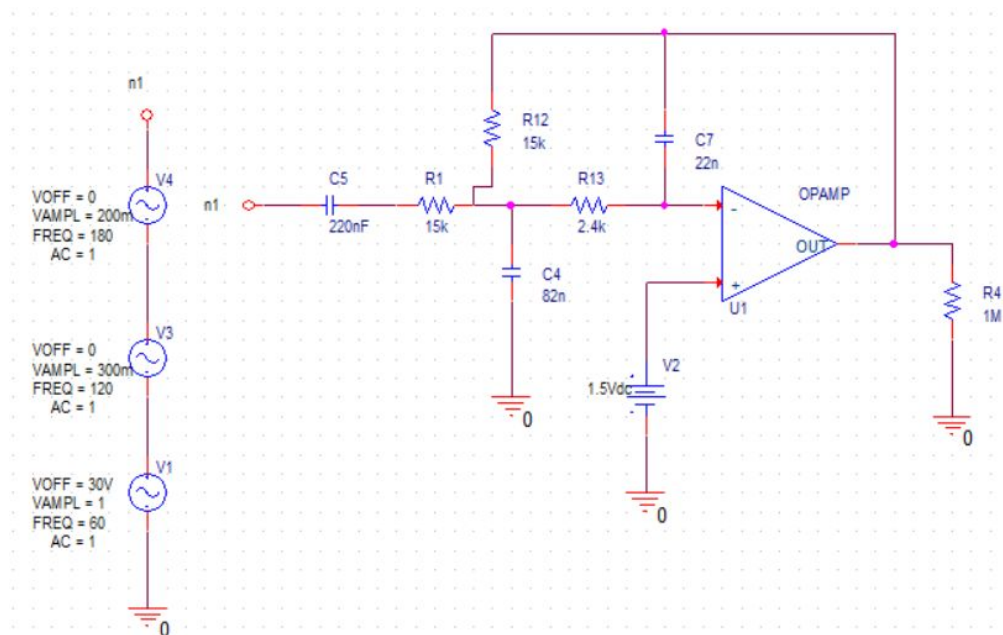
Entrada y Salida en tensión circuito de protección sobre tensión



Nota. La señal roja representa la entrada en tensión a circuito. La señal azul representa la salida en tensión del circuito.

Figura 22.

Circuito Para la Adecuación de señal



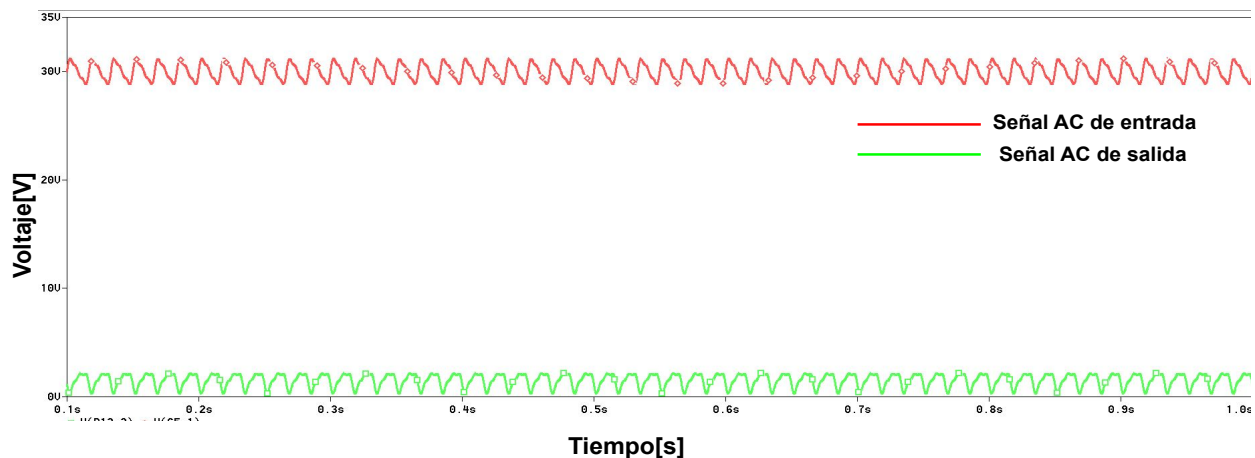
4.1.2.2. Simulación Circuito Adecuación de la señal. Después del circuito de protección sobretension, la señal entra en un proceso de adecuación antes de entrar al procesamiento digital. Como propone en la sección 3.2.2.

En la Figura 22 Se tiene el circuito de prueba, para verificar la etapa de adecuación de la señal. En este caso se propone como entrada una señal sinusoidal con un componente en DC de 30V. Se le suman, diferentes armónicos de baja amplitud.

Como se puede ver en la Figura 23 la entrada del circuito es una señal AC con un offset de 30V que representa la salida de un rectificador, a la señal se le suman demás armónicos para crear un escenario lo mas real posible. La señal verde de la Figura 23 representa la señal ya adaptada para el microcontrolador, tiene un offset de 1.5V para que el ADC del ESP32 pueda detectarla sin

Figura 23.

Entrada y Salida en tensión circuito de protección sobre tensión



Nota. La señal roja representa la entrada ac en tensión a circuito con offset de 30V. La señal azul representa la salida en tensión adecuada para el microcontrolador.

perder información.

4.1.2.3. Simulación Circuito Conversor Corriente Tensión. Finalmente uno de los enfoques del proyecto es generar una corriente analógica de 4 a 20mA con destino a un sistema SCADA en función de la frecuencia. Como el microcontrolador no puede generar corriente, se procede a generar un voltaje con el DAC en función de la frecuencia y finalmente se pasa por un convertidor tensión - corriente. El convertidor se diseña de acuerdo a la capacidad de tensiones del DAC, como se menciona en la sección 3.2.3 y 3.3.9.

Para realizar esta prueba en simulación, se somete el circuito a una tensión de entrada en forma de rampa de acuerdo al rango de tensiones del DAC del ESP32. En la Figura 24 la salida en corriente del circuito es a través de R5 lo cual representa la carga donde se va a enviar esa corriente.

Figura 24.

Esquemático circuito conversor tensión-corriente

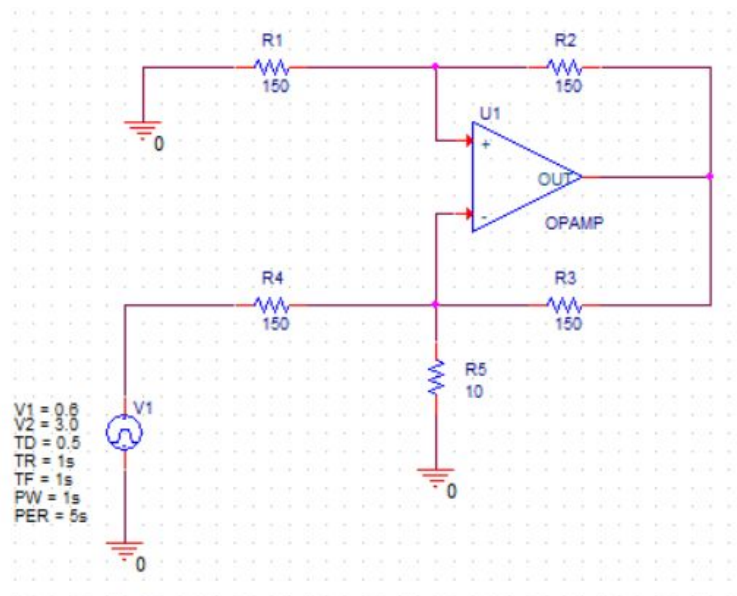
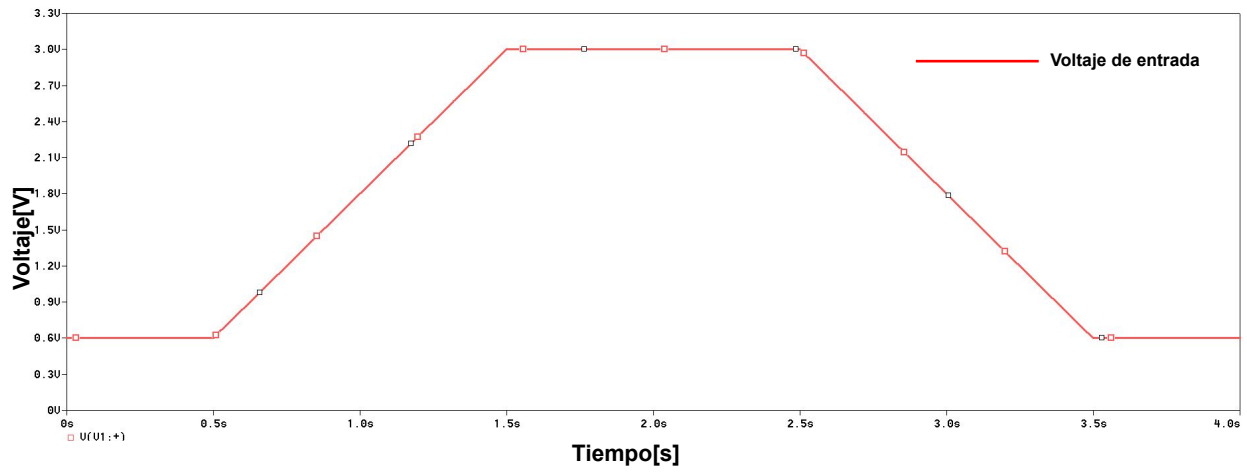
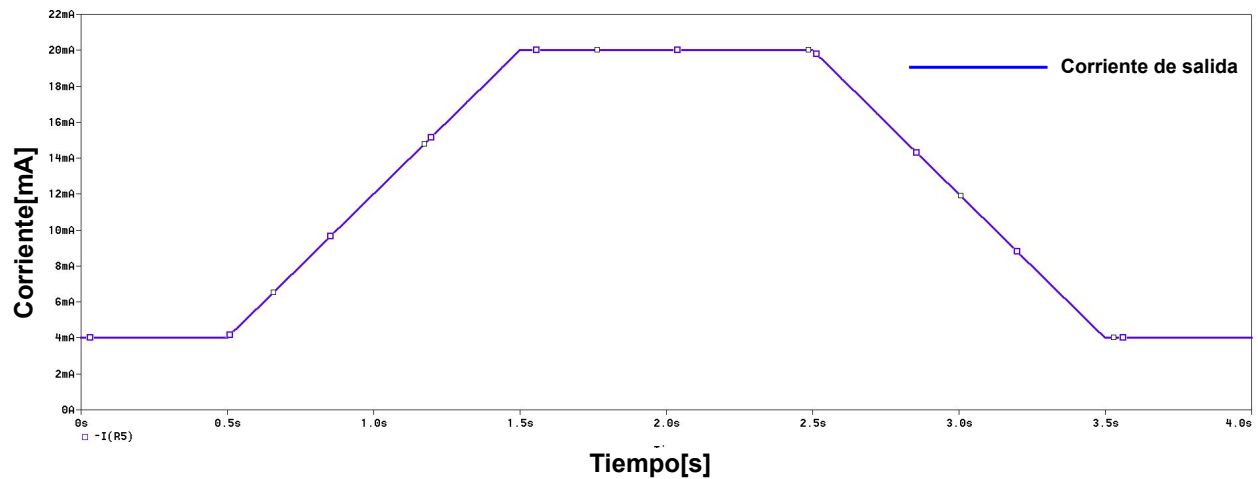


Figura 25.

Gráficas de entrada en tensión y salida de corriente



(a) Gráfica de entrada en tensión al circuito



(b) Gráfica salida en corriente del circuito

Nota. En la figura a se tiene la entrada en tensión, de acuerdo a los rangos del DAC. En la figura b se observa la salida en corriente en el rango especificado y variando de acuerdo a voltaje de entrada.

En la Figura 25 a se encuentra el voltaje de prueba al que es sometido el circuito en simulación. Para este caso, es una rampa que inicia en 0.6 V y finaliza en 3.0 V que pertenecen al

rango del DAC. En la Figura 25 b se obtiene a salida medida en la carga R5 según la Figura 24. Se puede observar que la corriente varia linealmente de acuerdo a la tensión de entrada y con los rangos requeridos para el proyecto de 4 a 20mA.

4.2. Primeras Pruebas en Software y Hardware

4.2.1. Prueba Etapa Analógica

Para realizar las primeras pruebas a las etapas analógicas, se realizan los respectivos montajes en protoboard. y se someten a pruebas en tensión y así verificar su correcto funcionamiento.

4.2.1.1. Prueba Circuito Protección Sobre tensión. Para esta prueba, se somete el circuito a una tensión desde 0V a 36V y se mide salida con multímetro.

En la Figura 26 parte izquierda es la entrada de tensión cuando sobrepasa los 36V, en la

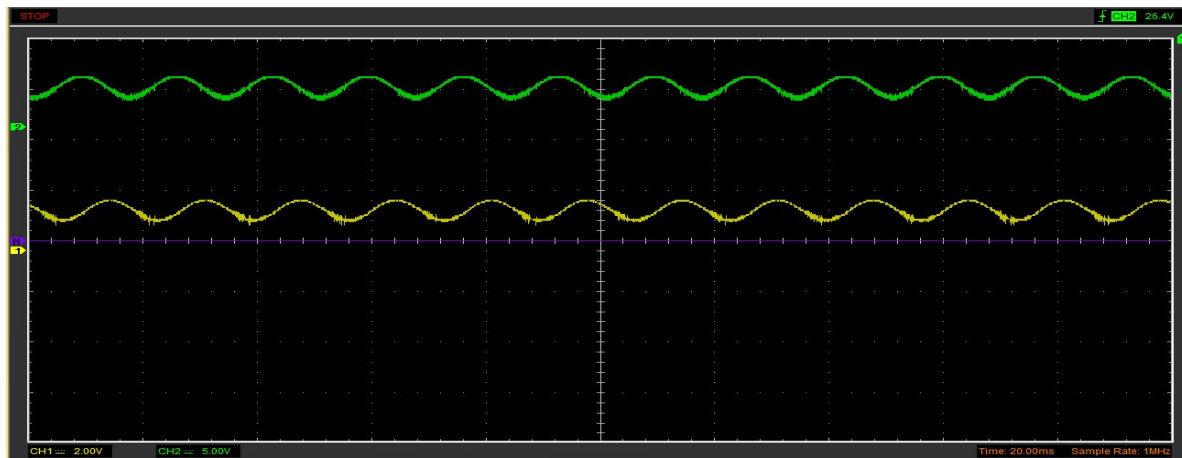
Figura 26.

Prueba circuito protección sobre tensión



Figura 27.

Captura entrada y salida circuito de adecuación de la señal



Nota. La señal verde representa la salida del rectificador entrando al circuito. La señal amarilla representa la salida del circuito de adecuación.

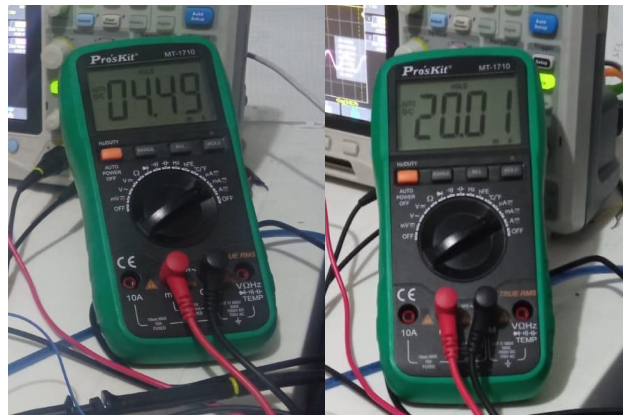
parte derecha se encuentra la tensión tomada a la salida del circuito. Cuando, la tensión de entrada sobrepasa los 36V la salida, toma un valor de 0V.

4.2.1.2. Prueba Circuito De Adecuación De La Señal. Una de las pruebas iniciales es con la etapa de adecuación de la señal. Debido, a que es importante estar seguro de la señal que entrara al microcontrolador y así evitar posibles daños en el ADC, estos primeros montajes se hacen en protoboard y se toma la señal de entrada y salida en un osciloscopio. La captura de esta prueba se puede observar en la Figura 27.

La señal amarilla que se aprecia en la Figura 27 es la salida en tensión del circuito de adecuación de la señal, en este caso la señal quedó montada sobre una tensión DC de 1.5V, ya de este modo, la señal está preparada para ser leída por el microcontrolador.

Figura 28.

Prueba circuito protección sobre tensión



4.2.1.3. Prueba Convertidor Tensión Corriente. En esta prueba, se somete el circuito a una tensión dc de 0.6V a 3.0V y se toma la salida en corriente con un multímetro.

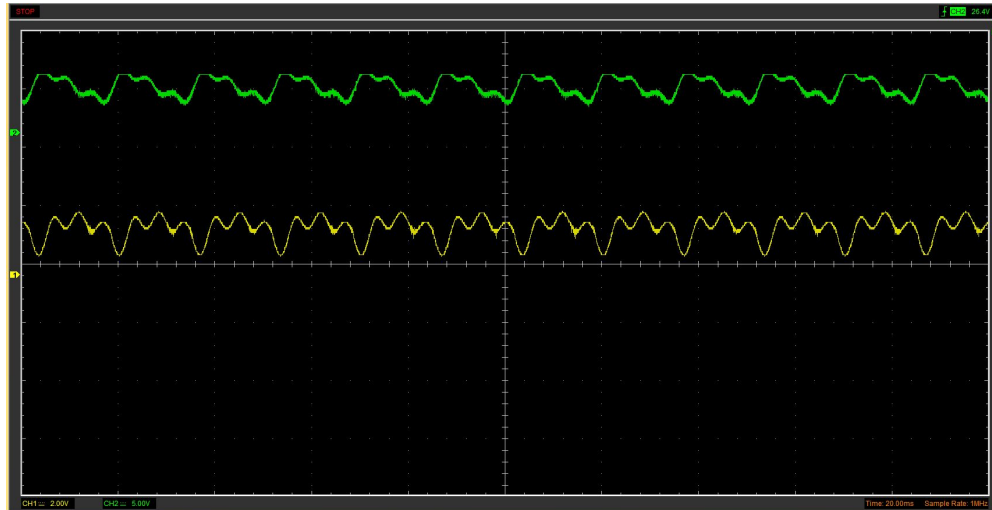
En la Figura 28 se observa dos casos, el primero cuando la tensión de entrada es de 0.6V la salida en corriente es de 4.49mA. El segundo caso es cuando el circuito es sometido a una tensión de 3.0V se observa una salida en corriente de 20.01 mA.

4.2.1.4. Prueba Algoritmo FFT. Un enfoque importante en este proyecto, es la forma para encontrar la frecuencia. En este caso, se uso la FFT, con objetivo de hacerlo lo suficientemente robusto ante armónicos no deseados dentro de la señal de rizado.

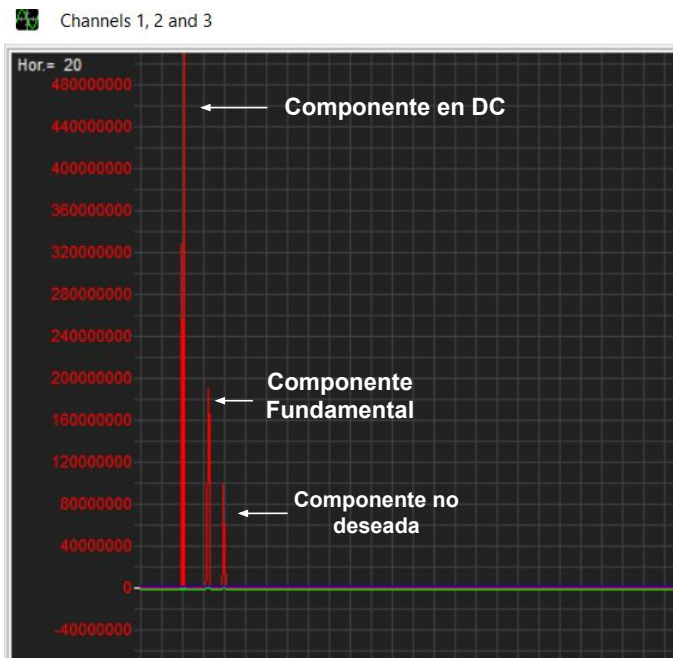
En este caso se integro la parte analógica de adecuación de la señal y se somete el circuito a una tensión AC con componente DC y un armónico adicional, que representa la salida de un rectificador. El objetivo de la prueba es que el software sea capaz de identificar los diferentes armónicos que componen la señal.

Figura 29.

Prueba Algoritmo FFT



(a) Gráfica de la salida del rectificador



(b) Representación del vector de la FFT generado por el algoritmo

En la Figura 29a la señal verde, representa la salida de un rectificador que se le suma un armónico. La señal amarilla, representa la salida del circuito analógico antes de entrar al ADC del microcontrolador.

En la Figura 29 b representa el vector del la FFT, para lograr distinguir los armónicos se gráfica el vector que sale del algoritmo. Como se puede observar salen tres armónicos el primero, es el componente en DC de 1.5V generado en el circuito de adecuación de la señal. En el segundo armónico, se observa la componente fundamental es decir, la frecuencia natural de rizado. Finalmente, el tercer armónico representa el armónico no deseado que se le suma a la señal.

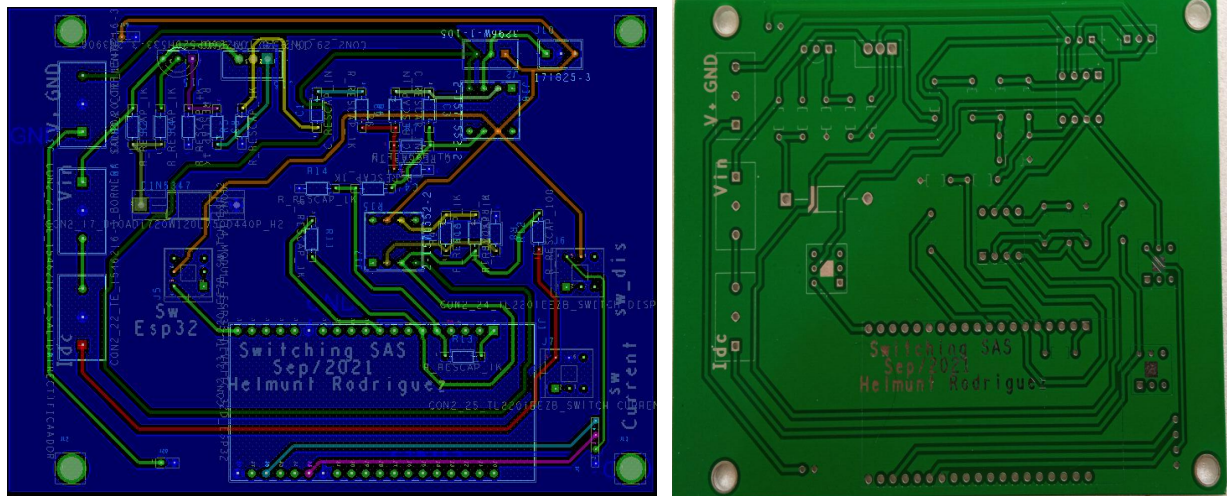
4.2.2. Diseño de PCB y Ensamblaje

Una vez realizadas todas las pruebas tanto de la parte analógica, como de la parte digital se define la topología definitiva, que se observa en la Figura 12 y se procede a hacer el diseño de la PCB.

Con la PCB fabricada como se observa en la Figura 30 b, se procede a realizar el ensamblaje de todos los elementos como se puede ver en la Figura 31, para así proceder a hacer las diferentes pruebas.

Es importante, mencionar que para el proyecto se fabrico un empaque de acuerdo a las medidas de la pcb, recordando que el dispositivo es para montar en campo para tableros de comunicación y control. Este empaque se fabrico en una impresora 3D, como se observa en la Figura 32

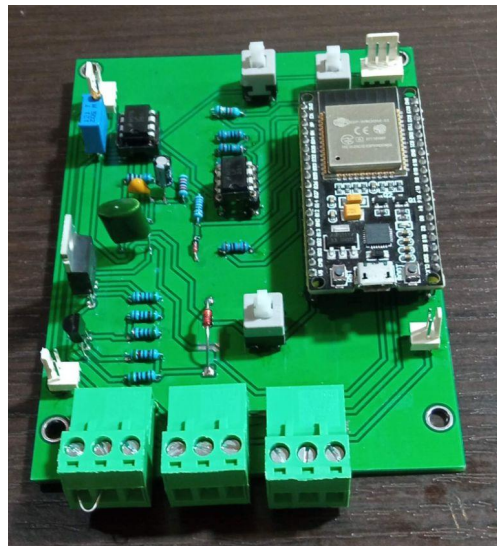
Figura 30.
Diseño de PCB



(a) PCB Diseñada en Cadence Allegro

(b) PCB fabricada

Figura 31.
PCB Ensamblada

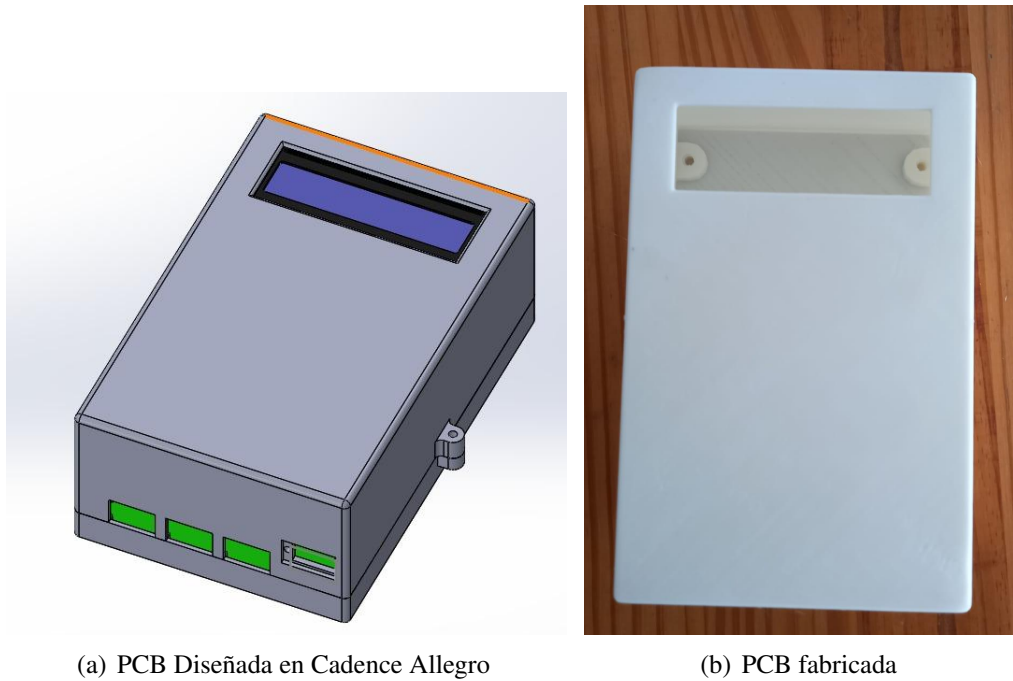


4.2.3. Pruebas con Dispositivo Final

4.2.3.1. Pruebas Iniciales De Funcionamiento. Con el el dispositivo ensamblado, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento. Como primera prueba se somete se arma un Setup

Figura 32.

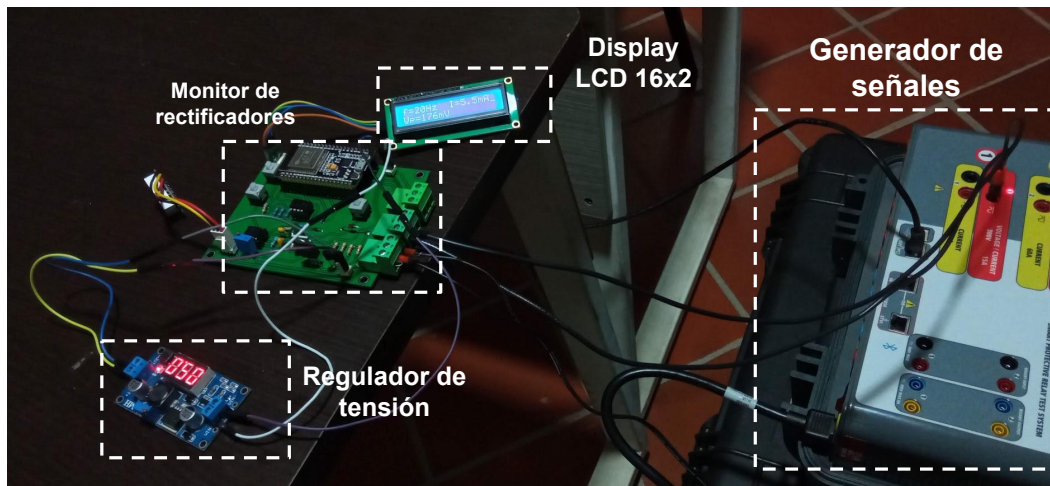
Empaque fabricado para el dispositivo



de medida como se observa en la Figura 33.

Figura 33.

Setup de prueba de funcionamiento



La prueba tiene como objetivo, someter el dispositivo a una señal que proviene del generador de señales que se observa en la Figura 33. El generador simula la señal de salida de un rectificador. Finalmente el dispositivo lee la señal y muestra los parámetros requeridos como lo son frecuencia de rizado, Amplitud de rizado y corriente dc en función de la frecuencia. En el display 16x2 como se observa en la Figura 34

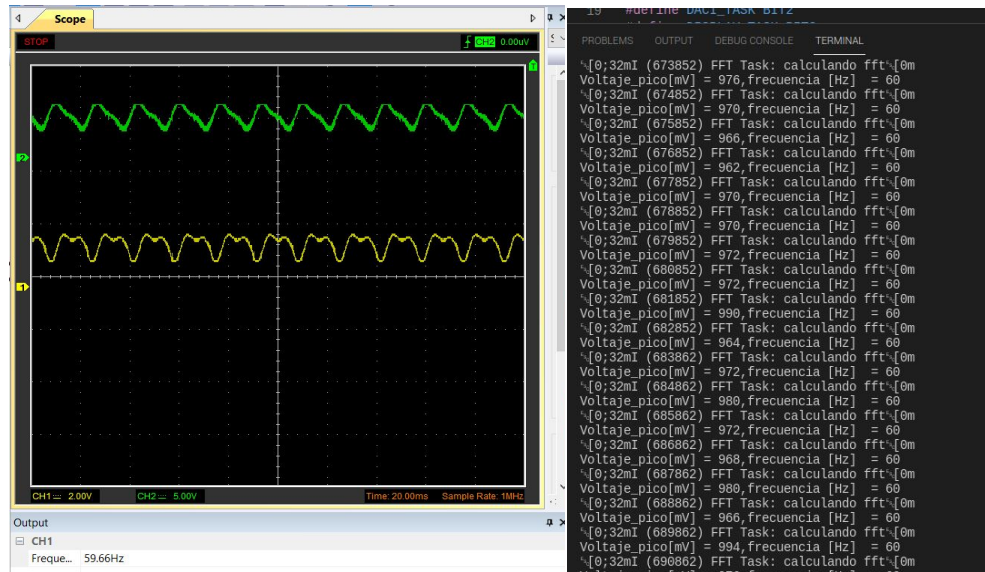
Figura 34.
Variables En Display 16x2



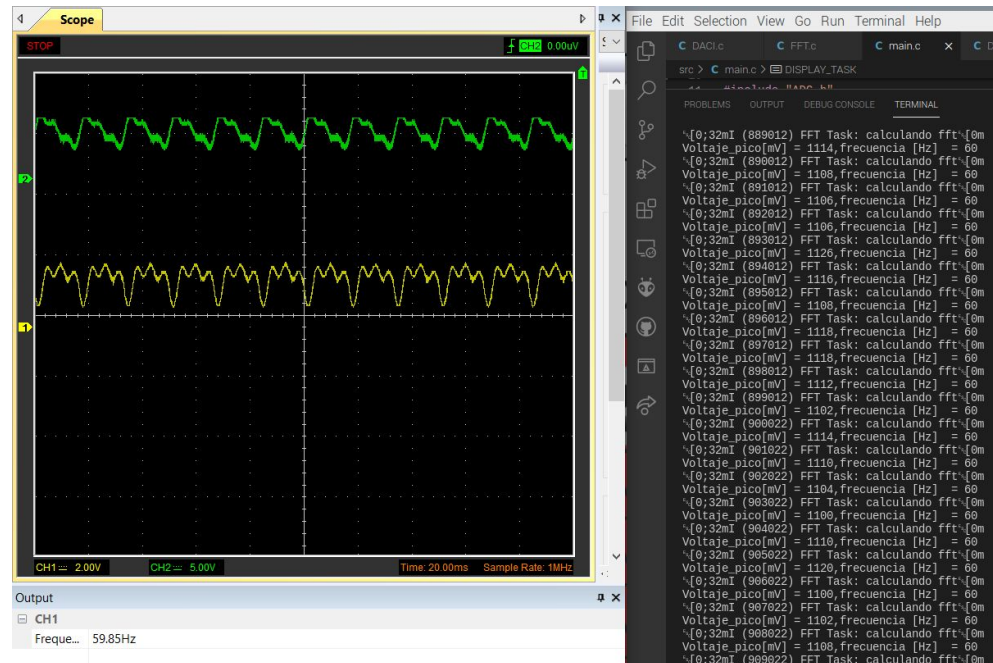
4.2.3.2. Pruebas de Robustez. En estas pruebas, usando el generador de señales de la Figura 34 se somete el dispositivo a una señal AC que se le suma una tensión DC de 30V. Adicionalmente, se le integran armónicos de baja amplitud. El propósito es general la salida del rectificador lo mas real posible.

En la Figura 35 a, se puede observar el resultado cuando el dispositivo es sometido a una señal de rizado con un armónico adicional. En la Figura 35 b, es el resultado cuando se agregan dos armónicos a la señal de rizado. Como se puede observar el algoritmo sigue identificando solamente la frecuencia fundamental de señal, ignorando el resto.

Figura 35.
Resultados De Robustez con dos armónicos



(a) Resultado con un armónico



(b) Resultado con dos armónicos

Nota. La señal de tensión verde representa la salida del rectificador, La señal de tensión amarilla representa la entrada al ADC del microcontrolador.

Adicionalmente, para demostrar la robustez del algoritmo con respecto a los armónicos se hace una comparación con porcentaje de error del valor tomado del osciloscopio y el valor obtenido por el dispositivo, como se observa en la Tabla 1

Tabla 1

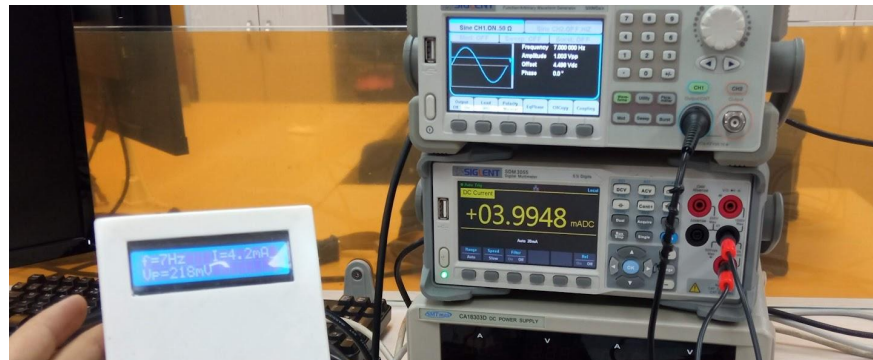
Tabla de porcentaje de error de la frecuencia obtenida del dispositivo comparada con la obtenida en osciloscopio.

	Valor de frecuencia en Osciloscopio	Valor de frecuencia en Dispositivo	%Error
1 armonico en la señal	59,66 Hz	60Hz	0,57 %
2 armonicos en la señal	59,85Hz	60Hz	0,26 %

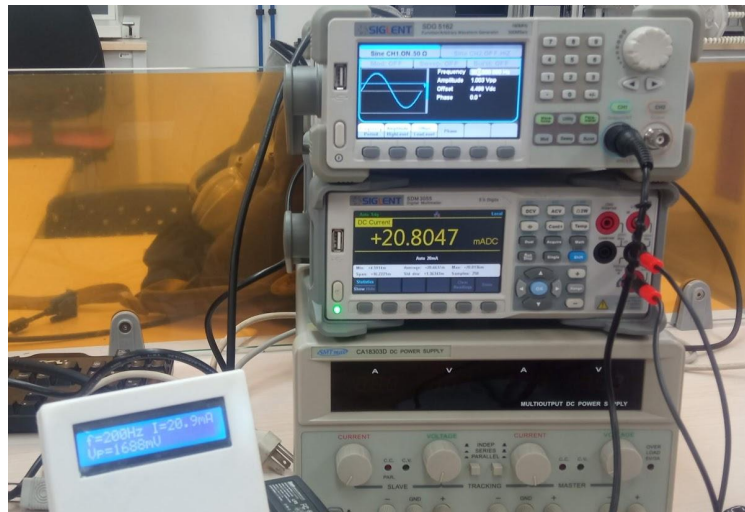
4.2.3.3. Pruebas de Salida De Corriente dc de 4 a 20mA. Ahora bien una vez verificada la robustez, se procede a verificar la ultima etapa que es la generación de la corriente dc en función de la frecuencia. Esta corriente debe ser de 4 a 20 mA, donde para valores de frecuencia de 6 a 200 Hz respectivamente.

Para lograr comprobar esa especificación se monta el Setup de medida que se observa en la Figura 36. donde se usa un multímetro de alta eficiencia para dar confianza a las medidas.

Figura 36.
Resultados De salida de corriente



(a) Salida de corriente para 7Hz



(b) Salida de corriente para 200Hz

En la Figura 36 a se observa que para una frecuencia de 7Hz, se tiene una corriente exacta de 3.9948 mA, y en la Figura 36 b, se tiene una corriente de 20.8047mA para una frecuencia de 200Hz.

Para dar mas claridad de los valores obtenidos del mínimo y máximo de corriente, se hace

Tabla 2

Tabla de porcentaje de error del valor de corriente máximo y mínimo obtenido con respecto al valor esperado.

	Valor de corriente esperado	Valor de corriente obtenido	%Error
Valor Mínimo	4 mA	3.9948 mA	0,13 %
Valor Máximo	20 mA	20.8047mA	4.0235 %

una comparación con respecto a la corriente esperada para el valor mínimo que es 4mA y el valor máximo que es 20mA. Estos valores, se pueden encontrar en la Tabla 2

4.2.3.4. Caracterización de Corriente vs Frecuencia. Finalmente como parte de las pruebas, se somete al dispositivo a todo el rango de frecuencias de 6Hz a 200Hz y se toman datos del comportamiento de la corriente con respecto a la frecuencia.

Tomando los valores de la tabla 3 se generan modelos matemáticos, de la frecuencia en función de la corriente, con el propósito de entregar al cliente la ecuación y el se encargara de agregarla en el sistema SCADA. Con la ecuación agregada, el sistema SCADA puede ver la frecuencia a partir de la corriente de 4 a 20 mA generada por el dispositivo monitor de rectificadores.

Inicialmente se plantea un modelo matemático lineal de la frecuencia en función de la corriente, a partir de los datos tomados con la tabla 3. La ecuación 1 propone el modelo matemático lineal mencionado.

$$f = 11.4705I_{outdc} - 38.882[Hz] \quad (1)$$

Tabla 3

Valores de corriente en funcion de la frecuencia

Frecuencia		Corriente	
7	107	3,9987	14,3287
12	112	4,5382	14,8823
17	117	5,1989	15,3401
22	122	5,5597	15,894
27	127	6,0121	16,3517
32	132	6,6157	16,9112
37	137	7,0786	17,3732
42	142	7,6214	17,8388
47	147	8,1872	18,4044
52	152	8,6401	18,9796
57	157	9,1958	19,2096
62	162	9,6556	19,4667
67	167	10,1985	19,6396
72	172	10,6586	19,9131
77	177	11,221	20,1125
82	182	11,6795	20,3105
87	187	12,2333	20,5731
92	192	12,765	20,7405
97	197	13,3093	20,7942
102	202	13,6822	20,8115

En la Figura 37 a se puede observar el comportamiento de las medidas tomadas, y la representación gráfica del modelo matemático planteado.

Con el propósito una mejor adaptación de las medidas se propone de igual forma un modelo polinómico de la frecuencia en función de la corriente. La ecuación 2 se propone el modelo polinómico.

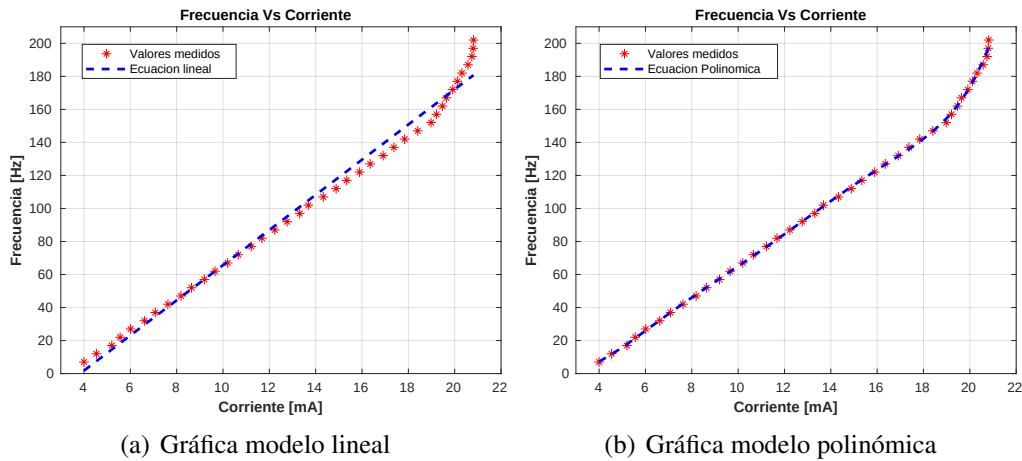
$$f = 0.0001I_{outdc}^6 - 0.0074I_{outdc}^5 + 0.1980I_{outdc}^4 - 2.7155I_{outdc}^3 + 19.9080I_{outdc}^2 - 63.8489I_{outdc} + 74.3182[Hz] \quad (2)$$

En la Figura 37 b se puede observar, la gráfica de la ecuación del modelo polinómico y el comportamiento de los datos tomados. En este caso se adaptó mejor un modelo de 6to orden.

El cliente y dependiendo el sistema SCADA tomara el modelo que mejor se adapte a sus necesidades.

Figura 37.

Gráficas modelos matemáticos



En la tabla 4 se pueden observar los respectivos errores de cada uno de los modelos matemáticos planteados.

Tabla 4

Valores de frecuencia para modelos polinómicos y lineales

Frecuencia modelo polinómico	Frecuencia modelo lineal	%Error con modelo polinómico	%Error con modelo lineal
7,2859675	6,98508835	4,08525071	0,21302357
11,584556	13,1734231	3,46203426	9,77852583
17,798953	20,75198245	4,69972353	22,070485
21,424571	24,89053885	2,61558422	13,138813
26,063637	30,07979305	3,46801032	11,4066409
32,265628	37,00338685	0,83008622	15,6355839
36,957331	42,3130813	0,11532122	14,3596792
42,349595	48,5392687	0,83236903	15,5696874
47,844385	55,0292776	1,79656415	17,0835694
52,168697	60,22426705	0,32441685	15,8158982
57,421092	66,5984239	0,73875845	16,8393402
61,754473	71,8725598	0,39601049	15,9234835
66,89367	78,09989425	0,15870216	16,5670063
71,292214	83,3774713	0,983036	15,8020435
76,742831	89,8284805	0,3339853	16,6603643
81,25171	95,08770475	0,91254924	15,9606155
86,767613	101,4400677	0,26711197	16,5977789
92,112535	107,5389325	0,12232113	16,890144
97,596947	113,7823257	0,6154091	17,3013666
101,33832	118,0596751	0,64870236	15,7447795
107,74258	125,4753534	0,69400133	17,2666854
113,09793	131,8254222	0,98029697	17,7012698
117,41523	137,0766171	0,35489471	17,1595018
122,50525	143,430127	0,41414003	17,5656779
126,62957	148,6801749	0,29167873	17,0710038
131,65858	155,0979196	0,25865411	17,4984239
135,9199	160,3972906	0,7883953	17,0783143
140,47914	165,7379554	1,07102846	16,71687
146,69622	172,2256702	0,20665123	17,1603199
154,31359	178,8235018	1,5220966	17,6470407
157,88819	181,4617168	0,56572411	15,5807113
162,34567	184,4107824	0,2133769	13,8338163
165,66161	186,3940318	0,80142892	11,6131927
171,51517	189,5312136	0,28187735	10,192566
176,3193	191,8184313	0,38457753	8,37199506
181,60032	194,0895903	0,21960457	6,64263201
189,49354	197,1017436	1,33344511	5,4020019
195,11827	199,0219053	1,62410156	3,65724232
197,02908	199,6378711	0,01475952	1,33902086
197,65613	199,8363108	2,15042898	1,07113329

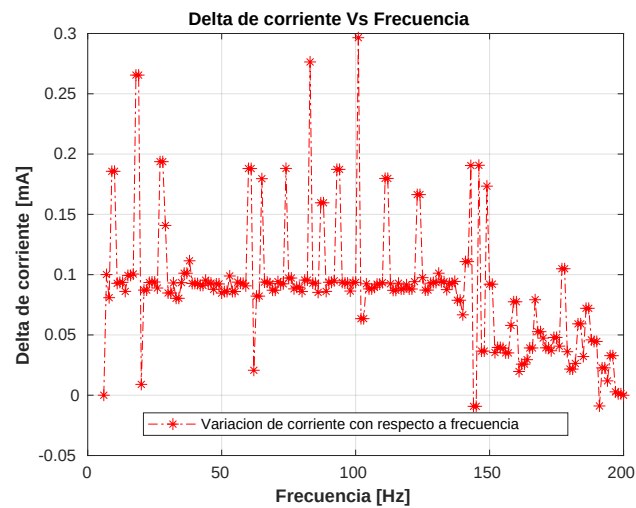
4.2.3.5. Caracterización Variación De Corriente Con Respecto A la Frecuencia. Final-

mente como parte de la caracterización del dispositivo, es necesario saber que tanta corriente varia

con respecto a la frecuencia. Para ejecutar la actividad se procedió tomar medidas de corriente de salida para todos los valores de frecuencia de 6 Hz a 200Hz con un paso de un 1 Hz. Los resultados se encuentran en la tabla de variación con respecto a frecuencia que se encuentra en los anexos del documento.

Figura 38.

Variación de corriente con respecto a la frecuencia



Con los valores de la tabla anexa, se realizó una respectiva gráfica, de los valores de variación de corriente con respecto a la frecuencia. En el rango de frecuencia de 6 a 145Hz se puede observar un comportamiento constante de 0.1mA por cada Hz. Después de 145Hz el valor tiende a ser más inestable.

5. Conclusiones

1. Se tiene una robustez del algoritmo de la FFT, de acuerdo a la sección 4.2.3.2 y a la Tabla 1 se demuestran errores de 0.57 % y 0.26 % del valor de frecuencia obtenido por el dispositivo con respecto al arrojado por el osciloscopio.
2. La salida del dispositivo en corriente DC cumplió con los márgenes establecidos para operar entre 4 a 20 mA. Según la Tabla 2 se compara el valor mínimo y máximo de corriente con los valores esperados, se tiene un error de 0.13 % y 4.0235 % respectivamente.
3. En la caracterización de la frecuencia con respecto a la corriente se obtuvieron dos modelos matemáticos uno lineal y uno polinómico. El modelo que mas se acerco al comportamiento de la corriente es el polinómico debido a según la Tabla 4 el error máximo es del 4.6997 %
4. La variación de corriente respecto a la frecuencia logró un salto de 0.1mA por cada 1Hz. Respecto a la Figura 38 y la Tabla ubicada en los anexos en la página 68, la afirmación anterior es valida para los rangos de frecuencia comprendidos entre 6Hz y 145Hz.

6. Recomendaciones

1. De acuerdo la Figura 37, solo se evidencia un comportamiento lineal en los rango de 6Hz a 145Hz. Es necesario realizar una revisión al DAC del microcontrolador y al circuito transductor de tensión a corriente.
2. Para enviar los datos de los parámetros, como frecuencia, amplitud y corriente al sistema SCADA. Se recomienda en la parte de software, integrar las variables dentro de un protocolo de comunicación industrial y así ser enviado al sistema SCADA.
3. Para un mejor manejo de las variables analógicas, se recomienda que el ADC y el DAC sean externos al microcontrolador ya que puede tener una mejor eficiencia y libera procesamiento de computo.
4. Con el propósito de ampliar la cantidad de rectificadores que se pueda monitorear, es necesario agregar mas parámetros como valor en DC corriente y demás. Adicionalmente, aumentar el rango de voltaje de entrada.

Referencias Bibliográficas

- Cho, M.-H., Lee, W.-H., Kim, H.-S., & Cha, H.-W. (2014). A design of novel transducer converting output signals of sensor modules to 4 20ma. En *2014 International SoC Design Conference (ISOCC)*, pp. 102–103. [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7087551>.
- Espinosa Jarrín, F. V. (2011). Automatización de un sistema de protección catódica para estructuras metálicas enterradas. B.S. thesis, QUITO/EPN/2011. [Online] Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3905/1/CD-3636.pdf>.
- Espressif, S. (2021). Esp32 datasheet. *IotYbased microcontroller*. [Online] Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- Espressif, S. (2022). Espressif documentation. url: <https://docs.espressif.com/projects/espressif/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>.
- Hart, D. W. & Bautista, A. B. (2001). *Electrónica de potencia*, volumen 32. Prentice Hall Madrid, España.
- Iorgulescu, M. (2013). Study of three-phase bridge rectifier diagnosis based on output voltage and current analysis. En *2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVAN-*

CED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), pp. 1–6. [Online] Available:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6563524>.

Loachamin Nasimba, J. P. (2019). Diseño y simulación de protección catódica en la industria petrolera. B.S. thesis, QUITO/UPS/2019. [Online] Available:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18175/1/UPS%20-%20ST004385.pdf>.

Oppenheim, Alan V and Willsky and others (1997). *Signals & systems*. Pearson Educación.

Penin, A. R. (2011). *Sistemas Scada*. marcombo.

Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.

SEMTECH, E. (2021). 1n4753 datasheet. *IotYbased microcontroller*.

ANEXOS

Tabla de variación de corriente respecto a la frecuencia.

Tabla para indicar la Variacion de corriente con respecto a la frecuencia.		
Frecuencia [Hz]	Corriente [mA]	Delta de Corriente
6	3,9045	0
7	4,0046	0,1001
8	4,0961	0,0809
9	4,177	0,1857
10	4,3627	0,1857
11	4,4599	0,0928
12	4,5527	0,0936
13	4,6463	0,0936
14	4,7386	0,0861
15	4,8247	0,0994
16	4,9241	0,0994
17	5,0178	0,1005
18	5,1183	0,2655
19	5,3838	0,2655
20	5,4771	0,009
21	5,4861	0,0872
22	5,5733	0,0872
23	5,6566	0,0935
24	5,7501	0,0939
25	5,844	0,0939
26	5,9354	0,0889
27	6,0243	0,1937
28	6,218	0,1937
29	6,3043	0,1408
30	6,4451	0,0848
31	6,5299	0,0848
32	6,6306	0,0931
33	6,7237	0,0804
34	6,8041	0,0804
35	6,8981	0,0934
36	6,9915	0,1012
37	7,0927	0,1012
38	7,247	0,1115
39	7,3585	0,0927
40	7,4512	0,0927
41	7,5422	0,0926
42	7,6348	0,0911
43	7,7259	0,0911
44	7,8287	0,0954
45	7,9241	0,093
46	8,0171	0,093
47	8,1979	0,0878

48	8,2857	0,0923
49	8,378	0,0923
50	8,4802	0,0847
51	8,5649	0,086
52	8,6509	0,086
53	8,748	0,0989
54	8,8469	0,086
55	8,9329	0,086
56	9,1141	0,0938
57	9,2079	0,0929
58	9,3008	0,0929
59	9,3883	0,0907
60	9,479	0,188
61	9,667	0,188
62	9,7547	0,0207
63	9,7754	0,0822
64	9,8576	0,0822
65	9,9415	0,1796
66	10,1211	0,0938
67	10,2149	0,0938
68	10,3083	0,0926
69	10,4009	0,0871
70	10,488	0,0871
71	10,5824	0,0942
72	10,6766	0,0924
73	10,769	0,0924
74	10,8685	0,1881
75	11,0566	0,0972
76	11,1538	0,0972
77	11,2443	0,0882
78	11,3325	0,0896
79	11,4221	0,0896
80	11,5165	0,086
81	11,6025	0,0955
82	11,698	0,0955
83	11,7877	0,2764
84	12,0641	0,0929
85	12,157	0,0929
86	12,1665	0,0853
87	12,2518	0,1596
88	12,4114	0,1596
89	12,5047	0,0861
90	12,5908	0,0937
91	12,6845	0,0937
92	12,7707	0,0949
93	12,8656	0,1873
94	13,0529	0,1873

95	13,1392	0,0936
96	13,2328	0,093
97	13,3258	0,093
98	13,4259	0,0864
99	13,5064	0,0936
100	13,6645	0,0936
101	13,6934	0,2965
102	13,9834	0,0635
103	14,0469	0,0635
104	14,0748	0,0924
105	14,1672	0,0882
106	14,2554	0,0882
107	14,3534	0,0895
108	14,4429	0,0921
109	14,535	0,0921
110	14,6308	0,0934
111	14,7242	0,1798
112	14,904	0,1798
113	14,9984	0,0924
114	15,0908	0,087
115	15,1778	0,087
116	15,2704	0,0929
117	15,3633	0,0881
118	15,4514	0,0881
119	15,546	0,0916
120	15,6376	0,0881
121	15,7257	0,0881
122	15,9121	0,0942
123	16,0063	0,1664
124	16,1727	0,1664
125	16,1954	0,0975
126	16,2875	0,0872
127	16,3747	0,0872
128	16,4606	0,0929
129	16,5535	0,0935
130	16,647	0,0935
131	16,8413	0,1012
132	16,9425	0,0941
133	17,0366	0,0941
134	17,1207	0,0876
135	17,2083	0,0927
136	17,301	0,0927
137	17,4027	0,0944
138	17,4971	0,0788
139	17,5759	0,0788
140	17,7689	0,0667
141	17,8356	0,1108

142	17,9464	0,1108
143	18,0431	0,1905
144	18,2336	-0,0092
145	18,2244	-0,0092
146	18,3589	0,1907
147	18,5496	0,0366
148	18,5862	0,0366
149	18,6451	0,1734
150	18,8185	0,0921
151	18,9106	0,0921
152	18,968	0,0354
153	19,0034	0,0396
154	19,043	0,0396
155	19,0907	0,039
156	19,1297	0,0351
157	19,1648	0,0351
158	19,2107	0,0579
159	19,2686	0,0775
160	19,3461	0,0775
161	19,4247	0,0197
162	19,4444	0,0258
163	19,4702	0,0258
164	19,5023	0,0295
165	19,5318	0,0392
166	19,571	0,0392
167	19,594	0,0792
168	19,6732	0,0527
169	19,7259	0,0527
170	19,7593	0,0474
171	19,8067	0,0393
172	19,846	0,0393
173	19,8926	0,0369
174	19,9295	0,0479
175	19,9774	0,0479
176	19,9809	0,0407
177	20,0216	0,1049
178	20,1265	0,1049
179	20,1803	0,0361
180	20,2164	0,0217
181	20,2381	0,0217
182	20,2904	0,0264
183	20,3168	0,0592
184	20,376	0,0592
185	20,4054	0,0321
186	20,4375	0,0721
187	20,5096	0,0721
188	20,5357	0,0459

189	20,5816	0,0446
190	20,6262	0,0446
191	20,6621	-0,0089
192	20,6532	0,0227
193	20,6759	0,0227
194	20,6974	0,0119
195	20,7093	0,0328
196	20,7421	0,0328
197	20,746	0,0028
198	20,7488	0,0012
199	20,7571	0,0012
200	20,759	0