

Diseño e Implementación de una Fuente de Corriente  
Alterna para medidores monofásicos de energía  
eléctrica, como instrumento de referencia de un sistema  
de verificación en sitio



Andrés Santiago Arias Naranjo  
Andrés Felipe Osorio Cifuentes

Director: Mg. Delio Eduardo Enrriquez Cabrera

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  
Popayán, 2017

**Diseño e Implementación de una Fuente de Corriente  
Alterna para medidores monofásicos de energía  
eléctrica, como instrumento de referencia de un sistema  
de verificación en sitio**

Andrés Santiago Arias Naranjo  
Andrés Felipe Osorio Cifuentes

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería  
Electrónica y Telecomunicaciones de la  
Universidad del Cauca para la obtención del Título de:  
Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Director: Mg. Delio Eduardo Enriquez Cabrera

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Popayán, 2017

# Agradecimientos

Gracias Dios por guiar nuestro camino, por concedernos una vida llena de felicidad y principalmente por regalarnos lo más bonito que es la familia.

Gracias a nuestras familias por brindarnos todo su tiempo, esfuerzo, ayuda, amor y cariño incondicionales a lo largo de nuestras vidas. Son el pilar y nos dan la fuerza y el ánimo para alcanzar nuestros sueños.

Gracias a todas las personas que nos han brindado su sincera amistad, apoyo y afecto.

# Índice general

<b>Lista de Figuras</b>	<b>III</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>IV</b>
<b>Introducción</b>	<b>V</b>
<b>1. Procesos y equipos dedicados a verificación in Situ.</b>	<b>1</b>
1.1. Verificación in Situ . . . . .	1
1.1.1. Verificación visual . . . . .	2
1.1.2. Aplicación de métodos de verificación . . . . .	2
1.1.2.1. Método Patrón - Carga del Usuario . . . . .	2
1.1.2.2. Método patrón - Carga Externa . . . . .	3
1.1.3. Realización del ensayo . . . . .	4
1.1.3.1. Funcionamiento sin carga . . . . .	4
1.1.3.2. Prueba de Exactitud . . . . .	4
1.1.3.3. Verificación de la Constante . . . . .	4
1.2. Equipos para verificación in Situ . . . . .	5
1.2.1. Sistemas integrales . . . . .	5
1.2.1.1. PTS 3.1 C . . . . .	5

1.2.1.2.	CheckSystem 2.1 S . . . . .	6
1.2.1.3.	CheckSystem 2.1 . . . . .	6
1.2.2.	Sistemas por separado . . . . .	7
1.2.2.1.	Applied Meters . . . . .	7
1.2.2.2.	Megger: . . . . .	10
1.2.2.3.	IdosD LTDA . . . . .	11
<b>2.</b>	<b>Captura y Análisis de Requerimientos.</b>	<b>13</b>
2.1.	Requerimientos de Hardware . . . . .	14
2.1.1.	Requerimientos del usuario . . . . .	14
2.1.2.	Requerimientos del sistema . . . . .	14
2.1.2.1.	Requerimientos funcionales . . . . .	14
2.1.2.2.	Requerimientos No funcionales . . . . .	15
2.2.	Procesos de la Ingeniería de Requerimientos . . . . .	16
2.2.1.	Obtención y Análisis de requerimientos . . . . .	17
2.2.1.1.	Descubrimiento de los requerimientos . . . . .	17
2.2.1.2.	Clasificación y organización de requerimientos . . . . .	18
2.2.1.3.	Ordenación por prioridades y negociación de requerimientos	18
2.2.1.4.	Documentación de requerimientos: . . . . .	18
2.2.1.5.	Ejecución de las actividades . . . . .	18
2.2.2.	Especificación de Requerimientos . . . . .	23
2.2.3.	Validación de Requerimientos . . . . .	23
2.2.3.1.	Verificación de validez . . . . .	23
2.2.3.2.	Verificación de consistencia . . . . .	23

2.2.3.3.	Verificaciones de completitud . . . . .	24
2.2.3.4.	Verificaciones de realismo . . . . .	24
2.3.	Modelo del Sistema . . . . .	26
2.3.1.	Modelo del Contexto . . . . .	27
2.3.2.	Modelo de Comportamiento . . . . .	28
<b>3.</b>	<b>Diseño y Selección de Componentes</b>	<b>30</b>
3.1.	Diseño . . . . .	30
3.2.	Espacio Morfológico . . . . .	32
3.2.1.	Subsistema de Tensión Alterna . . . . .	33
3.2.2.	Subsistema de Protecciones Eléctricas . . . . .	34
3.2.3.	Subsistema Suministrador de Corriente Alterna . . . . .	34
3.2.4.	Subsistema de Armónicas . . . . .	35
3.2.5.	Subsistema Control y Sincronización . . . . .	35
3.2.6.	Características de los posibles dispositivos . . . . .	37
3.2.6.1.	Relé . . . . .	37
3.2.6.2.	Optoacoplador . . . . .	37
3.2.6.3.	Filtros Sintonizados . . . . .	37
3.2.6.4.	Filtros Activos . . . . .	38
3.2.6.5.	Filtros pasivos . . . . .	38
3.2.6.6.	Transformador de tensión . . . . .	38
3.2.6.7.	Regulador de tensión . . . . .	38
3.2.6.8.	Inversor/Convertor . . . . .	39
3.2.6.9.	Cargas eléctricas . . . . .	39

3.2.6.10.	Triac . . . . .	39
3.2.6.11.	Oscilador . . . . .	40
3.2.6.12.	Transistores de potencia . . . . .	40
3.2.6.13.	FET y MOSFET de Potencia . . . . .	40
3.2.6.14.	Amplificador operacional . . . . .	40
3.2.6.15.	Varistor . . . . .	41
3.2.6.16.	Fusible . . . . .	41
3.3.	Reducción del espacio morfológico . . . . .	41
3.3.1.	Selección de dispositivos . . . . .	42
3.4.	Solución Electrónica Definitiva . . . . .	44
3.4.1.	Transformador de Voltaje . . . . .	45
3.4.1.1.	Diseño Matemático del Transformador . . . . .	46
3.4.1.2.	Especificaciones de Funcionamiento Deseadas . . . . .	46
3.4.1.3.	Algoritmos de Diseño . . . . .	47
3.4.1.4.	Comprobación de Cálculos . . . . .	52
3.4.2.	Banco de Cargas . . . . .	54
3.4.3.	Supresor de Sobre-picos y Ruido Transitorio . . . . .	55
3.4.4.	Control y Sincronización . . . . .	56
3.4.5.	Filtro de Armónicos . . . . .	57
<b>4.</b>	<b>Descripción de los componentes e Implementación del Sistema</b>	<b>62</b>
4.1.	Implementación . . . . .	62
4.1.1.	Transformador de corriente y voltaje . . . . .	62
4.1.1.1.	Materiales . . . . .	63

4.1.1.2.	Construcción y Desarrollo . . . . .	65
4.1.1.3.	Pruebas del Transformador . . . . .	67
4.1.1.4.	Características Técnicas . . . . .	68
4.1.2.	Banco de Cargas . . . . .	71
4.1.2.1.	Desarrollo . . . . .	71
4.1.2.2.	Pruebas . . . . .	73
4.1.3.	Sistemas implementados sobre PCB . . . . .	74
4.1.3.1.	Supresor de sobre-picos y ruido transitorio . . . . .	74
4.1.3.2.	Circuito de control y sincronización . . . . .	76
4.1.3.3.	Filtro supresor de Armónicos . . . . .	78
4.1.4.	Elementos de la Interfaz . . . . .	82
4.1.4.1.	Borneras . . . . .	82
4.1.4.2.	Fusible . . . . .	82
4.1.4.3.	Estructura mecánica del prototipo fuente de corriente . . .	83
4.2.	Interconexión de Componentes . . . . .	83
4.2.1.	Etapas de adaptación de la caja a las correspondientes salidas . . . .	84
4.2.2.	Etapas de Interconexiones . . . . .	85
4.2.2.1.	Interconexión fusible y filtro EMC . . . . .	85
4.2.2.2.	Interconexión supresor de picos y filtro EMC . . . . .	86
4.2.2.3.	Interconexión transformador y supresor de sobre-tensiones	86
4.2.2.4.	Interconexión transformador y banco de cargas . . . . .	87
4.2.2.5.	Interconexión Optoacoplador . . . . .	88
4.2.2.6.	Interconexión led . . . . .	88



4.2.2.7.	Interconexión devanado secundario 1 y borneras . . . . .	89
4.3.	Propuesta financiera de costos y materiales . . . . .	90
<b>5.</b>	<b>Estructura mecánica, pruebas funcionales y conclusiones</b>	<b>91</b>
5.1.	Pruebas Funcionales . . . . .	94
5.1.1.	Equipo de medición MT320 . . . . .	94
5.1.1.1.	Características . . . . .	94
5.1.1.2.	Funciones . . . . .	95
5.1.2.	Ensayos y pruebas realizadas a la fuente AC . . . . .	95
5.1.2.1.	Medición de los niveles de tensión armónica . . . . .	95
5.1.2.2.	Medición de los niveles de corriente armónica . . . . .	97
5.1.2.3.	Medición de valores activos . . . . .	98
5.1.2.4.	Mediciones de los vectores de tensión y corriente . . . . .	99
5.1.2.5.	Mediciones de voltaje y corriente . . . . .	99
5.2.	Conclusiones . . . . .	102
5.3.	Trabajos Futuros . . . . .	103

# Índice de figuras

1.1. Conexión entre medidor patrón, medidor residencial y la fuente de corriente alterna. . . . .	3
1.2. Equipo de ensayo con patrón y fuente monofásica clase 0,1. . . . .	5
1.3. Equipo de ensayo con patrón y fuente monofásica clase 0,05. . . . .	6
1.4. Fuente monofásica PPS 111. . . . .	8
1.5. Medidor Patrón WS 2320. . . . .	8
1.6. Montaje necesario para la verificación. . . . .	9
1.7. Conexión del equipo STE . . . . .	10
1.8. Phantom Load PA-25050K. . . . .	10
1.9. Carga Fantasma V3.0 . . . . .	11
1.10. Medidor monofásico AVM . . . . .	12
2.1. Procesos de la ingeniería de requerimientos . . . . .	13
2.2. Tipos de requerimientos no funcionales . . . . .	15
2.3. Proceso de obtención y análisis de requerimientos. . . . .	17
2.4. Modelo Arquitectónico de Alto Nivel . . . . .	27
2.5. Modelo de máquina de estados de la fuente de corriente alterna. . . . .	28
3.1. Diagrama de Bloques. . . . .	30

3.2. Componentes Opcionales. . . . .	36
3.3. Solución Electrónica. . . . .	44
3.4. Solución Electronica Definitiva . . . . .	45
3.5. Diseño del Transformador . . . . .	46
3.6. Sección núcleo . . . . .	52
3.7. Valores de cargas correspondientes a cada salida. . . . .	55
3.8. Filtro Supresor Transitorios Corriente Alterna. . . . .	55
3.9. Circuito de Control de suministro de energía. . . . .	56
3.10. Filtros Pasivos Sintonizados. . . . .	61
3.11. Conexión Filtros Pasivos . . . . .	61
4.1. Transformador construido previamente al final. . . . .	63
4.2. Chapas magnéticas del transformador. . . . .	64
4.3. Formaleta para el bobinado del transformador . . . . .	64
4.4. Máquina Casera para Embobinar. . . . .	66
4.5. Transformador Final. . . . .	67
4.6. Señales de voltaje de los devanados secundarios 1 y 2. . . . .	68
4.7. Señales de voltaje de los devanados secundarios 1 y 3. . . . .	68
4.8. Resistencias utilizadas para implementar el banco de cargas. . . . .	72
4.9. Carga 1: 1 resistenacia con disipador. . . . .	72
4.10. Carga 2: 3 resistencias con disipador. . . . .	72
4.11. Carga 3: 8 resistencias con disipador. . . . .	73
4.12. Formas de voltaje en cada carga. . . . .	73
4.13. Señales de voltaje y figura de <i>Lissajous</i> del circuito supresor de picos. . . . .	75

4.14. Señales de voltaje y figura de <i>Lissajous</i> del circuito supresor de picos. . . . .	75
4.15. Filtro EMC. . . . .	76
4.16. Señales de voltaje y figura de <i>Lissajous</i> del filtro EMC. . . . .	76
4.17. Circuito de sincronización implementado sobre PCB universal. . . . .	77
4.18. Esquema circuital del optoacoplador con pulsador. . . . .	78
4.19. Prueba del circuito de control con la fuente suministradora. . . . .	78
4.20. Circuito filtro de armónicos sobre PCB. . . . .	79
4.21. Señal de voltaje en 60 Hz. . . . .	80
4.22. Señal de voltaje en 180 Hz. . . . .	80
4.23. Armónicos presentes en la señal de voltaje del transformador sin filtro. . . . .	81
4.24. Armónicos presentes en la señal de voltaje del transformador con filtro. . . . .	81
4.25. Borneras para la interfaz de la fuente. . . . .	82
4.26. Fusible americano de 120 Voltios. . . . .	82
4.27. Caja metálica del prototipo. . . . .	83
4.28. Interconexión total del sistema fuente de corriente. . . . .	84
4.29. Borneras fijadas al chasis. . . . .	84
4.30. Filtro EMC y Supresor de sobre-picos fijados en el chasis. . . . .	85
4.31. Conexión entre el fusible y el filtro EMC. . . . .	85
4.32. Conexión supresor de picos y filtro EMC. . . . .	86
4.33. Conexión transformador y circuito supresor de sobre-picos. . . . .	86
4.34. Conexión carga 1 y devanado secundario 3. . . . .	87
4.35. Conexión carga 2 y devanado secundario 3. . . . .	87
4.36. Conexión carga 3 y devanado secundario 2. . . . .	88

4.37. Conexión led y entrada del sistema. . . . .	89
4.38. Conexión devanado secundario 1 y borneras. . . . .	89
4.39. Prototipo fuente de corriente AC. . . . .	90
5.1. Carcasa BOCUBE. . . . .	93
5.2. Esquema de conexiones en la caja BOCUBE. . . . .	93
5.3. Equipo portátil probador de medidores MT320. . . . .	95
5.4. Equipo portátil probador de medidores MT320. . . . .	96
5.5. Interfaz de los valores activos. . . . .	99
5.6. Vectores de voltaje y corriente en cada carga. . . . .	99

# Índice de tablas

1.1. Características generales de los diferentes sistemas de verificación. . . . .	7
1.2. Características técnicas de la fuente PPS 111. . . . .	8
1.3. Características técnicas del medidor patrón WS 2320 . . . . .	9
1.4. Características técnicas del equipo de conexión. . . . .	9
1.5. Características técnicas fuente PA-2505K. . . . .	11
1.6. Características carga fantasma V3.0 . . . . .	12
1.7. Lista de precios del sistema de verificación total de IdosD. . . . .	12
2.1. Métricas para especificar requerimientos no funcionales. . . . .	16
3.1. Características Subsistema Suministrador de Tensión Alterna . . . . .	33
3.2. Características Subsistema de Protecciones Eléctricas . . . . .	34
3.3. Características Subsistema Suministrador de Corriente Alterna . . . . .	34
3.4. Características Subsistema de Armónicas . . . . .	35
3.5. Características Subsistema Control y Sincronización . . . . .	35
3.6. Valores para determinar la densidad de corriente. . . . .	47
4.1. Dimensiones de las chapas. . . . .	64
4.2. Aislantes utilizados en transformadores. . . . .	65

4.3. Voltajes en el transformador sin carga a diferente hora. . . . .	67
4.4. Valores en el transformador con carga a través del tiempo. . . . .	74
4.5. Propuesta de costos y materiales . . . . .	90
5.1. Dimensiones caja BOCUBE. . . . .	93
5.2. Niveles de armónicos de voltaje presentes en la fuente. . . . .	96
5.3. Valores de THD de voltaje en el sistema. . . . .	97
5.4. Niveles de armónicos de corriente presentes en la fuente. . . . .	97
5.5. Valores de THD de corriente en el sistema. . . . .	98
5.6. Valores activos de cada carga. . . . .	98
5.7. Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo. . . . .	100
5.8. Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo. . . . .	100
5.9. Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo. . . . .	101
5.10. Voltajes en la estructura mecánica total en circuito abierto. . . . .	101
5.11. Variación de la corriente debido a la carga. . . . .	102
5.12. Variación de la corriente debido a la variación en la alimentación. . . . .	102
5.13. Precisión de la carga. . . . .	102

# Introducción

En la actualidad, es clara la importancia de los medidores de energía eléctrica cuyo funcionamiento y desempeño debe ser preciso y confiable puesto que, mediante éstos, las empresas prestadoras del servicio de energía, determinan el consumo de los usuarios de manera confiable [1], [2]. Para que se cumpla esto es necesario realizar procesos de verificación, ajuste y calibración que se realizan en los laboratorios de la empresa prestadora del servicio y que permitan determinar, mediante procedimientos exactos, si los instrumentos de medida cumplen con lo establecido en la norma técnica bajo la cual se rigen. Tomando como referencia la COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE S.A.S. E.S.P (CEO) de la ciudad de Popayán sus medidores residenciales de energía eléctrica se rigen bajo la NTC 4052.

Los procesos de verificación y validación que se encuentran especificados en la NTC 4856 y NTC 5900, se dan entre un medidor a prueba y un medidor patrón, donde se hace fluir corriente en serie a través de sus circuitos de corriente y se aplica una tensión en paralelo al circuito de tensión de ambos medidores, equivalente a la caída de tensión de la red eléctrica; siendo el medidor patrón el que cumple con las características esenciales de desempeño establecidas por los distintos entes reguladores [1], [2]. Además, hoy en día, gracias a la portabilidad de estos instrumentos es posible la verificación en sitio de medidores residenciales, sin la necesidad de tener que transportarlos a laboratorios de calibración, asegurando el servicio continuo y disminuyendo costos operativos de la empresa, logrando con esto mayor confiabilidad en los usuarios.

Sin embargo, estos equipos patrones de verificación en sitio, necesitan de una fuente suministradora de corriente alterna que brinde portabilidad y cumpla las especificaciones de precisión y confiabilidad. Estas fuentes de corriente alterna, se encuentran tanto en el mercado nacional como internacional, siendo este último el que garantiza mayor precisión, observándose en ambos mercados las mismas limitaciones de portabilidad y un costo elevado en este tipo de dispositivos, lo que hace difícil su adquisición.



La solución que permitirá el desarrollo de un prototipo de fuente de corriente alterna lo suficientemente portátil, robusto y confiable consta de cinco partes:

1. Realizar un análisis de requerimientos completo a través de la ingeniería de requerimientos, definiendo la condición inicial del prototipo para establecer las características técnicas y físicas que permitan delimitar el alcance del proyecto. Con este análisis se presentan los requerimientos y especificaciones tanto de portabilidad como metrológicos y electrónicos.
2. Diseñar el prototipo de fuente AC mediante un análisis morfológico, escogiendo la mejor tecnología que sea ajustable a los requerimientos del sistema.
3. Identificar y seleccionar los componentes electrónicos a utilizar capaces de cumplir con los requisitos propuestos, aclarando que para seleccionar dichos componentes, existen múltiples posibilidades, pero con ayuda de criterios de inclusión o parámetros que descartan la inclusión de otros dispositivos, se determinan los más viables.
4. Realizar un diagrama de conexión general para llevar a cabo la implementación de cada subsistema que conforma el sistema total, al mismo tiempo explicar su validación, la cual se realiza a través de pruebas funcionales.
5. Integrar el sistema y realizar pruebas funcionales en los laboratorios de la Universidad del Cauca y de la CEO de la ciudad de Popayán.

## Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de fuente de corriente alterna monofásica portátil para ser utilizado en un sistema de verificación en sitio.

## Objetivo Específicos

- Diseñar el esquema básico de una fuente de corriente alterna monofásica.
- Desarrollar una fuente de corriente alterna para medidores patrones de energía eléctrica.
- Implementar pruebas funcionales del prototipo portátil.

# Capítulo 1

## Procesos y equipos dedicados a verificación in Situ.

En el presente capítulo se describen los procesos necesarios para llevar a cabo la verificación in sitio y los equipos utilizados para realizar dicha verificación.

### 1.1. Verificación in Situ

En el estándar NTC 5900 [Anexo A] “Verificación in sitio para medición de energía eléctrica”, se define el proceso de validar las condiciones de funcionamiento físico y metrológico del dispositivo de medida de energía eléctrica. El proceso de verificación in sitio consiste básicamente de tres pasos:

1. Verificación visual.
2. Aplicación de métodos de verificación.
3. Realización del ensayo.

A continuación se describen cada uno de estos pasos.

### **1.1.1. Verificación visual**

Esta verificación empieza por una inspección visual que consta de dos etapas: en la primera, se realiza una revisión minuciosa del estado de los sellos que contiene el medidor como son: sellos de la tapa bornera y de la tapa principal del medidor; en la segunda etapa, se realiza una inspección del equipo de medida en donde se verifica el estado de las conexiones y las condiciones físicas y mecánicas de los componentes externos e internos del medidor hasta donde sea posible.

### **1.1.2. Aplicación de métodos de verificación**

Después de realizar la verificación visual, se procede a aplicar los métodos de verificación, existen dos métodos: el de Patrón - carga de usuario y el de Patrón - carga externa; el método Patrón - carga de usuario es aplicable en medidores multi-cuerpo y prepago, sistemas convencionales y no requiere la desconexión del medidor, por lo general se inicia con este método y dependiendo de las pruebas obtenidas se continua con el siguiente método. A continuación se describen cada uno de estos métodos y sus características.

#### **1.1.2.1. Método Patrón - Carga del Usuario**

Utilizando el medidor patrón, se realiza la verificación con la carga del usuario, teniendo en cuenta las condiciones de referencia [3]. Las principales características de este método se describen a continuación.

1. Los ensayos deben ser realizados conservando las condiciones en que se encuentre la instalación y el equipo de medida, incluso, bajo desviaciones en la posición del medidor.
2. Los rango de tensión permitidos deben encontrarse entre el -20 % y 15 % de la tensión nominal indicada en la placa del medidor.
3. Los rangos de corriente, deben encontrarse entre el 10 % de la corriente básica y la corriente máxima de la placa de características.

### 1.1.2.2. Método patrón - Carga Externa

Usando el medidor patrón y la carga externa o fuente de corriente, la cual debe permitir la realización del ensayo en, al menos, dos puntos de carga diferente. Este método consiste en la instalación de una carga controlada en los bornes del medidor y la instalación de un patrón con sensores de corriente externos con sus respectivos terminales para medir tensión. La conexión necesaria para llevar a cabo este método de forma correcta, se presenta en la figura 1.1, donde se observa que el voltaje es conectado en paralelo y la salida de corriente en serie, tanto al medidor de usuario como al medidor patrón.

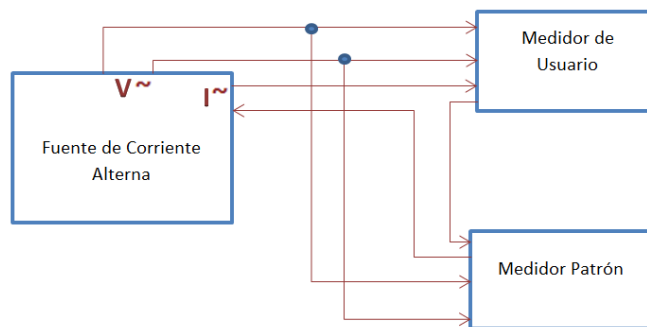


Figura 1.1: Conexión entre medidor patrón, residencial y fuente de corriente alterna.  
[Tomado de: Elaboración Propia]

Las características que debe tener la carga externa son las siguientes:

1. Los dos puntos o valores deben estar entre los siguientes rangos:
  - $10\%I_b \leq V_1 \leq 80\%I_b$
  - $I_b \leq V_2 < I_{max}$

Donde  $I_b$  e  $I_{max}$  están definidas en la norma IEC 62052, la cual plantea los valores eléctricos para los diferentes medidores.

2. La carga no debe presentar inestabilidad, tal que la variación de la corriente, durante el ensayo, sea superior al 10 %.
3. Los rangos de corriente deben encontrarse entre el 10 % de la corriente básica y la corriente máxima de la placa de características.
4. La fuente de corriente debe diseñarse de tal forma que evite cualquier riesgo en el uso bajo condiciones normales de operación, garantizando especialmente:

- Seguridad personal contra choques eléctricos.
- Seguridad personal contra efectos de temperatura excesiva.
- Protección contra propagación de fuego.
- Todas las partes sensibles a corrosión, deben estar protegidas.

### 1.1.3. Realización del ensayo

Después de aplicar los métodos de verificación de los medidores, se deben realizar ensayos de verificación. Existen tres ensayos o pruebas de verificación que son: funcionamiento sin carga, prueba de exactitud y verificación de la constante [3].

#### 1.1.3.1. Funcionamiento sin carga

Se desconecta totalmente la carga de usuario, dejando al medidor residencial sólo con la tensión de la red, o aplicando tensión generada por una fuente externa. Esta prueba se realiza en un tiempo recomendado de cinco (5) minutos.

#### 1.1.3.2. Prueba de Exactitud

Este ensayo consiste en realizar la verificación en un único punto de prueba a la corriente presente en el momento realizando tres repeticiones. El resultado se expresa como un error porcentual al comparar entre el medidor residencial y el medidor patrón. En este ensayo la norma técnica [3] define el límite de error máximo permitido.

#### 1.1.3.3. Verificación de la Constante

Este ensayo se basa en el método de dosificación de energía según lo establecido en la NTC 4856. Se debe aplicar una cantidad de energía conocida al medidor y se calcula la energía registrada por el medidor, mediante la diferencia entre las lecturas final e inicial. Se determina el error porcentual mediante la siguiente relación.

$$\text{Error Porcentual} = \frac{\text{Energía registrada} - \text{Energía aplicada}}{\text{Energía aplicada}} \times 100 \quad (1.1)$$

## 1.2. Equipos para verificación in Situ

Los equipos para realizar este proceso pueden dividirse en diferentes tipos, bien sea sistemas completos que incluyen el medidor patrón y la fuente de corriente y voltaje o sólo corriente. Por otro lado, se tiene el equipo medidor patrón y la fuente de corriente y tensión, trabajando de forma separada. A continuación, se presentan estos sistemas.

### 1.2.1. Sistemas integrales

A nivel internacional, la empresa chilena *Meter Test Equipment (MTE)* ofrece productos de última generación para realizar pruebas a medidores de energía eléctrica; esta organización proporciona una gama de equipos que incluyen sistemas portables para verificación de medidores tales como:

#### 1.2.1.1. PTS 3.1 C

Es un equipo de ensayo monofásico con patrón de referencia de clase 0,1 y fuente monofásica integrada de tensión e intensidad y se presenta en la figura 1.3, posee buena precisión y baja sensibilidad de interferencias externas, además permite ser usado sólo como patrón o conjuntamente con la fuente integrada.



Figura 1.2: Equipo de ensayo con patrón y fuente monofásica clase 0,1  
[Tomado de: <http://www.mte.ch/home.html>]

### 1.2.1.2. CheckSystem 2.1 S

El equipo de ensayo monofásico con patrón de referencia de clase 0,05 y con fuente de intensidad monofásica integrada, presenta mayor precisión que el PTS 3.1 C, sus ventajas son: medida de intensidad directa o a pinza de corriente UCT; medida de potencia activa, reactiva y aparente; medida del ángulo de fase, factor de potencia y frecuencia. En la figura 1.3 se muestra el sistema de verificación en sitio del CheckSystem 2.1 S.



Figura 1.3: Equipo de ensayo con patrón y fuente monofásica clase 0,05  
[Tomado de: <http://www.mte.ch/home.html> ]

### 1.2.1.3. CheckSystem 2.1

Este equipo de ensayo monofásico con patrón de referencia de clase 0,2 y con fuente de intensidad monofásica, tiene las mismas ventajas y apariencia externa que el CheckSystem 2.1S, sin embargo, en cuanto a precisión, está por debajo de éste. La tabla 1.1 muestra las características generales de cada equipo mencionado anteriormente.

Características	PTS 3.1C	CheckSystem 2.1 S	CheckSystem 2.1
Tensión (VAC)	88 - 264	88 - 264	88 - 264
Frecuencia (Hz)	47 - 63	47 - 63	47 - 63
Consumo de potencia (VA)	320	150	150
Caja	Plástico duro	Plástico duro	Plástico duro
Dimensiones (mm)	430 x 218 x 250	273 x 247 x 178	273 x 247 x 178
Peso (Kg)	11	5,6	5,6
Clase del patrón	0,1	0,05	0,2
Precio (€)	25.958	14.119	14.119

Tabla 1.1: Características generales de los diferentes sistemas de verificación.

## 1.2.2. Sistemas por separado

Para estos sistemas, a nivel nacional, se encontró la empresa *idosd LTDA* y, a nivel internacional, la empresa *Applied Meters* y *Megger*. A continuación se describen los equipos que desarrolla cada empresa.

### 1.2.2.1. Applied Meters

Esta empresa eslovaca ofrece fuentes de corriente precisas, patrones de referencia y dispositivos para la conexión de medidores, entre los cuales se encuentra el *Equipo de Prueba versátil para contadores de energía (STE)*; es un equipo de medida de ajuste y pruebas para todos los modelos de medidores y está compuesto de: una fuente monofásica de señales denominada *Portable phantom source (PPS 111)*, el medidor patrón denominado *Working standar (WS 2320)* y el sistema de conexión rápida o *Portable handling system (PHS 11)*. A continuación se muestran las características técnicas de cada equipo que compone el sistema.

1. **Fuente PPS 111:** Esta fuente tiene un ajuste de corriente fino y grueso, una pantalla LCD indicando el valor de la corriente de salida y en las salidas de tensión y corriente, aislamiento galvánico. La figura 1.4 muestra la parte externa de la fuente de corriente PPS 111 y la tabla 1.2 muestra las características técnicas de esta fuente.





Figura 1.4: Fuente monofásica PPS 111.  
[Tomado de: <http://www.appliedmeters.sk/>]

<b>Fuente de tensión</b>	
Voltaje de salida (V)	230(220,240)/115(110,120)
Potencia (W)	80
Estabilidad	Según el voltaje de red
<b>Fuente de corriente</b>	
Rangos de corriente (A)	2, 20, 100
Resolución	1mA en el rango de 2 A 10mA en el rango de 20 A 100mA en el rango de 100 A
Estabilidad	Según el voltaje de la red
Dimensiones (mm)	406x330x174
Peso (Kg)	12
Precio (€)	2.730

Tabla 1.2: Características técnicas de la fuente PPS 111.

2. **Medidor Patrón WS 2320:** Este medidor se muestra en la figura 1.5, está equipado con un sensor óptico que detecta las vueltas del disco o las pulsaciones de un led. El sensor tiene auto-calibración y suprime las influencias de la luz externa, en la tabla 1.3 se tienen los valores técnicos de este dispositivo.



Figura 1.5: Medidor Patrón WS 2320.[Tomado de: <http://www.appliedmeters.sk/>]

Precisión de medida	Clase 0,2 Clase 0,1 Clase 0,05
Dimensiones (mm)	406x330x174
Peso (Kg)	5,5
Precio (€)	Clase 0,2-3.565 Clase 0,1-4.102 Clase 0,05-5.235

Tabla 1.3: Características técnicas del medidor patrón WS 2320

3. **Sistema de Conexión PHS 11:** Este sistema de fijación es mostrado en la figura 1.6, en la parte encerrada por el recuadro rojo, está equipado con un sistema de conexión rápida y es de fácil montaje, en la tabla 1.4 se tienen las características técnicas del equipo.

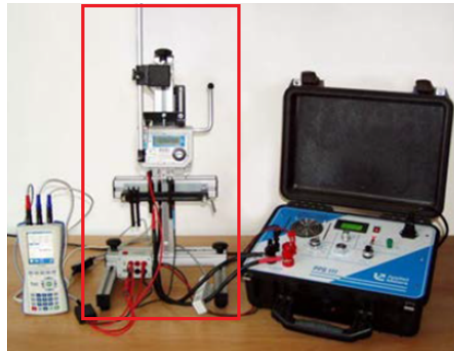


Figura 1.6: Montaje necesario para la verificación en sitio del sistema STE.  
[Tomado de: <http://www.appliedmeters.sk/>]

Dimensiones (mm)	455x350x160
Peso (kg)	7,5
Precio (€)	800
Precio total del sistema STE	8.765

Tabla 1.4: Características técnicas del equipo de conexión.

En la figura 1.6 se tiene el montaje necesario para realizar la verificación en sitio del sistema STE y en la figura 1.7, se muestra la conexión entre el medidor monofásico WS 2320, el medidor residencial y la fuente de corriente PPS 111.

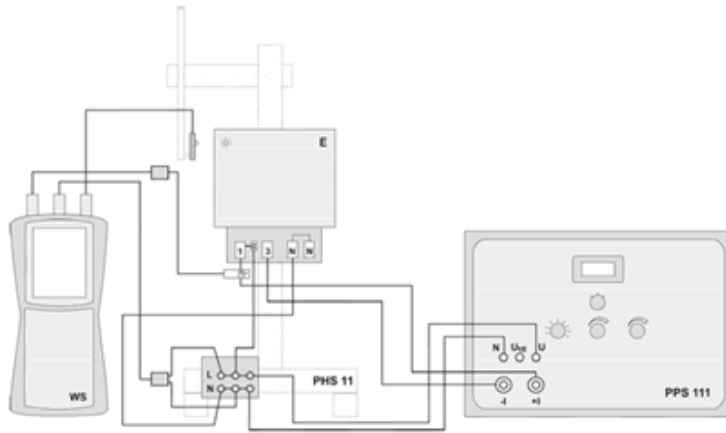


Figura 1.7: Conexión del equipo STE.

[Tomado de: <http://www.appliedmeters.sk/>]

#### 1.2.2.2. Megger:

Es una organización americana que diseña y fabrica equipos para medición de pruebas de energía. Los instrumentos *Megger*, se utilizan para garantizar la seguridad de las instalaciones eléctricas y mejorar la eficiencia de las pruebas y eficacia de los resultados; entre estos equipos se encuentran el PA-2505K denominado *Phantom Load*<sup>1</sup> y se utiliza para proporcionar una cantidad controlada de corriente para medidores de energía eléctrica. Las especificaciones eléctricas se encuentran en la tabla 1.5 y en la figura 1.8 se presenta la fuente PA-2505K.



Figura 1.8: Carga fantasma PA-25050K.

[Tomado de: <http://us.megger.com/phantom-load-pa2505k> ]

<sup>1</sup>En español carga fantasma y se refiere a la fuente de corriente alterna

Especificaciones de entrada	
Voltaje (VAC)	69 - 480
Frecuencia (Hz)	50 - 60
Especificaciones de salida	
Rangos de corriente (A)	2,5-5-15-50
Factor de Potencia	0,5-1
Dimensiones (mm)	519 W x 206 D x 295 H
Peso (Kg)	13,3
Precio (USD)	1.430

Tabla 1.5: Características técnicas fuente PA-2505K.

### 1.2.2.3. IdosD LTDA

Esta empresa colombiana radicada en bogotá, desarrolla equipos como: analizadores y verificadores de medidores polifásicos; un equipo denominado carga fantasma y el Z7000; éste último dispositivo es diseñado para reemplazar el cableado en sistemas de comunicación seriales. La descripción de los dispositivos de interés para este trabajo se muestran a continuación.

1. **Carga Fantasma V3.0:** Es una fuente que puede hacer fluir corriente a través del circuito de corriente de un medidor de energía eléctrica y, a su vez, que el circuito de tensión tenga una caída de potencial igual a la tensión de alimentación de la fuente.

Tiene tres amplitudes de corriente alterna, las cuales se eligen cambiando la posición del cable de fase de salida de la fuente y un puerto RS-232, el cual se comunica con el AVM, en la figura 1.9 se muestra la carga fantasma V3.0.



Figura 1.9: Carga fantasma V3.0  
[Tomado de:<http://www.idosde.com/>]

Las características generales de la carga fantasma se muestran en la tabla 1.6.

Tensión (VAC)	90min - 270max
Frecuencia (Hz)	50 - 60
Dimensiones (mm)	410 X 110 X 350
Peso (kg)	4
Precio (Pesos)	1'000.000

Tabla 1.6: Características carga fantasma V3.0

## 2. Medidor AVM

Es un equipo electrónico que sirve como verificador de la calibración de medidores de energía eléctrica, con este equipo es posible llevar un registro en memoria de las pruebas que se le realicen a cada medidor, llevando un historial que puede ser descargado en un computador por puerto serial. En la figura 1.10 se presenta el medidor AVM.



Figura 1.10: Medidor monofásico AVM

[Tomado de:<http://www.idosde.com/>]

El costo total de este sistema, incluido los cables de conexión y de alimentación, se muestra en la tabla 1.7.

Elementos	Precio (pesos)
Carga Fantasma V3.0	1'000.000
Medidor AVM	4'000.000
Cables de corriente	140.000
Cable COM CFV.3	90.000
Cable de Poder Carga Fantasma V3	10.000
Total	5'240.000

Tabla 1.7: Lista de precios del sistema de verificación total de IdosD.

## Capítulo 2

# Captura y Análisis de Requerimientos.

Para establecer el análisis de los requerimientos de diseño e implementación del sistema a realizar, se emplea la Ingeniería de Requerimientos (IR) [4], este proceso corresponde a 4 subprocesos de alto nivel que se llevan a cabo para conformar un documento final de requerimientos. Estos procesos tratan de: evaluar el sistema para determinar la utilidad para el negocio o lo que se requiere (estudio de viabilidad), descubrir requerimientos (obtención y análisis), transformar estos requerimientos en formularios estándar (especificación) y verificar que los requerimientos realmente definen el sistema que el cliente desea (validación). En la figura 2.1 se observa la relación entre estas actividades o subprocesos.

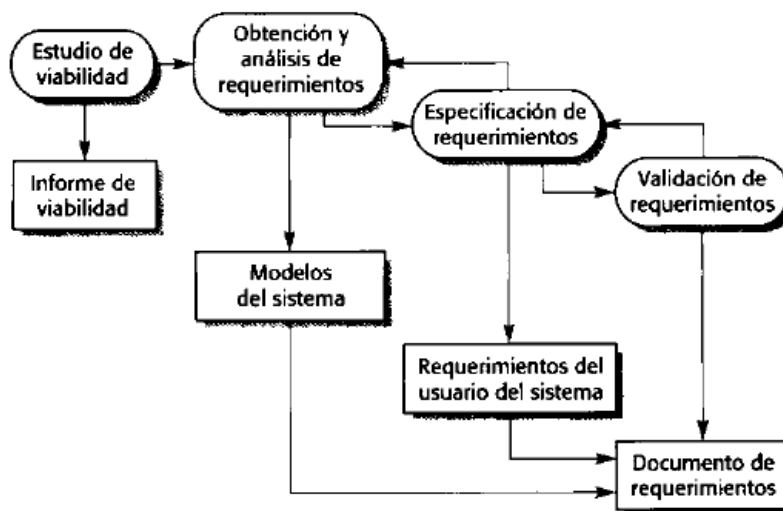


Figura 2.1: Procesos de la ingeniería de requerimientos.[Tomado de: [4]]

Para iniciar la IR, se comienza por conceptualizar los requerimientos principales para el proceso de levantamiento para más adelante detallar el proceso realizado para el levantamiento de los requerimientos y finalmente se explica el modelo en el cual se describe el funcionamiento total del sistema.

## **2.1. Requerimientos de Hardware**

A continuación se definen los requerimientos según lo planteado en [4] de esta manera: requerimientos del usuario, del sistema, funcionales y no funcionales.

### **2.1.1. Requerimientos del usuario**

Son declaraciones de los servicios que se espera que el sistema proporcione, y de las restricciones bajo las cuales debe funcionar. Estos requerimientos pueden ser descritos por: administradores, usuarios finales, ingenieros clientes, arquitectos del sistema entre otros.

### **2.1.2. Requerimientos del sistema**

Establecen con detalle las funciones, servicios y restricciones operativas del sistema, pueden ser descritos por: usuarios finales del sistema, ingenieros, clientes, arquitectos del sistema, desarrolladores Hw/Sw, entre otros. Estos requerimientos del sistema generalmente se clasifican en funcionales y no funcionales.

#### **2.1.2.1. Requerimientos funcionales**

Estos describen de forma clara lo que el sistema debe hacer, es decir cómo debe comportarse frente a entradas y/o situaciones particulares, también se puede detallar específicamente lo que el sistema no debe hacer.

### 2.1.2.2. Requerimientos No funcionales

Son restricciones de los servicios o funciones ofrecidos por el sistema, estos no se refieren directamente a las funciones específicas que proporciona el sistema, sino a las propiedades emergentes de éste como la fiabilidad, el tiempo de respuesta y almacenamiento. Los requerimientos del sistema no funcionales presentan la categorización mostrada en la figura 2.2, en la cual se observan los diferentes tipos de requerimientos no funcionales.

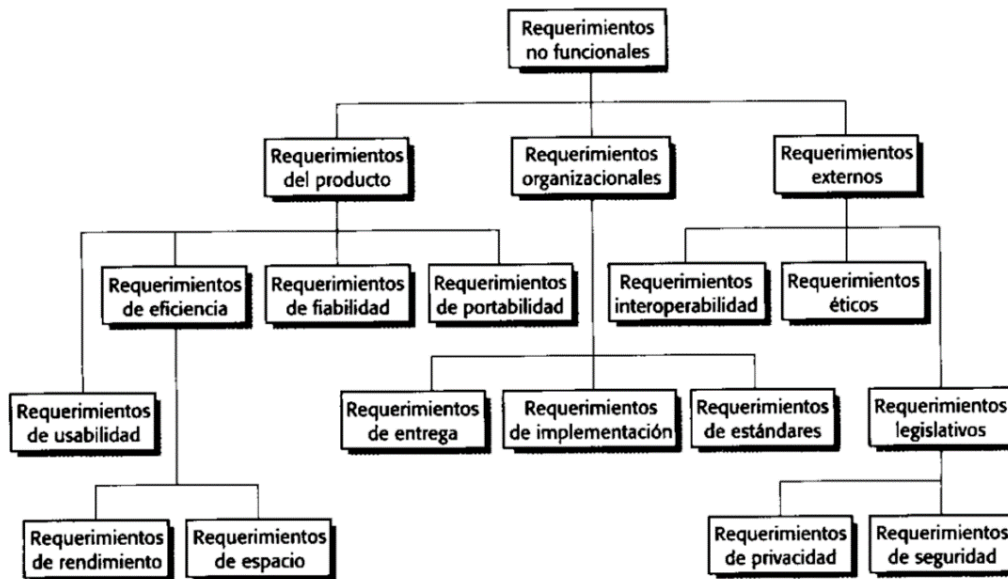


Figura 2.2: Tipos de requerimientos no funcionales. [Tomado de: [4]]

#### 1. Requerimientos del Producto:

Estos especifican el comportamiento del producto. Estos son los requerimientos de fiabilidad, portabilidad, usabilidad y los requerimientos de eficiencia que se dividen a su vez en dos: requerimientos de rendimiento referentes a la recuperación ante fallas y requerimientos de espacio.

#### 2. Requerimientos Organizacionales:

Estos se derivan de políticas y procedimientos existentes dentro de la organización, entre estos se encuentran los estándares en los procesos de verificación que se deben llevar a cabo, requerimientos de implementación y los requerimientos de entrega.



### 3. Requerimientos Externos:

Este apartado incluye todos los requerimientos que se derivan de los factores externos al sistema. Estos pueden incluir requerimientos de interoperabilidad que definen la manera en que la fuente se conecta con los dispositivos de medición de energía eléctrica; los requerimientos legislativos que deben seguirse para asegurarse que el sistema funcione dentro de la ley, y los requerimientos éticos, los cuales son puestos en un sistema para asegurar que será aceptado por los operadores.

Por otra parte se tienen las métricas usadas para especificar las propiedades no funcionales del sistema, estas métricas mostradas en la Tabla 2.1 ayudan a especificar los requerimientos no funcionales.

<b>Rapidez</b>	Tiempo de estabilidad de la fuente
<b>Tamaño</b>	Minimización de Dimensiones de la fuente
<b>Facilidad de uso</b>	Tiempo de formación de los operarios corto Sistema intuitivo
<b>Fiabilidad</b>	Tiempo medio entre fallas Probabilidad de no disponibilidad Disponibilidad
<b>Robustez</b>	Tiempo reinicio después de fallas Porcentaje de eventos que provocan fallos
<b>Portabilidad</b>	Soporta diferentes tipos de medidores de energía eléctrica

Tabla 2.1: Métricas para especificar requerimientos no funcionales.

## 2.2. Procesos de la Ingeniería de Requerimientos

En esta sección se detalla como levantar los requerimientos basándose en la IR, la cual tiene como objetivo que los requisitos alcancen un estado óptimo antes de seguir con la fase de diseño. Se debe tener en cuenta que la actividad de estudio de viabilidad se realiza sólo al principio del proyecto, a diferencia de las demás actividades que son cíclicas e iterativas durante todo el proceso. En la figura 2.1 se muestran estos procesos que a continuación se explicarán detalladamente.

### 2.2.1. Obtención y Análisis de requerimientos

Para definir fácilmente cada requerimiento se plantean una serie de actividades que se entrelazan a medida que el proceso avanza, en la figura 2.3 se observa cómo están entrelazadas estas actividades mediante la representación en espiral.

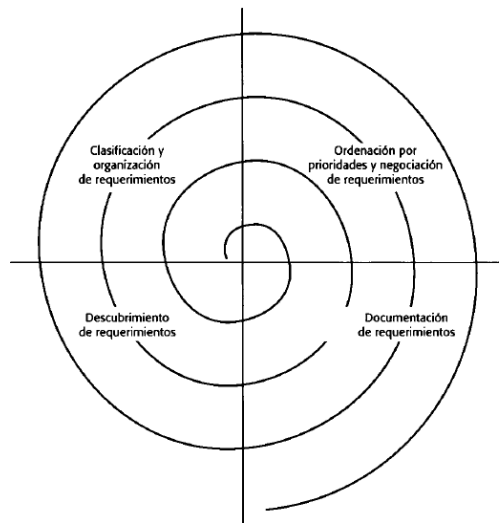


Figura 2.3: Proceso de obtención y análisis de requerimientos. [Tomado de [4]]

#### 2.2.1.1. Descubrimiento de los requerimientos

En esta actividad se procede a trabajar junto con el cliente y los operadores de la CEO para determinar el servicio que debe proporcionar el sistema, el rendimiento requerido y las limitaciones hardware, entre otras.

Para el presente caso, se hizo presencia en una de las brigadas de la CEO encargada de realizar el proceso de verificación en sitio, estas salidas fueron realizadas en el día 8 de agosto de 2016 en las horas de la mañana, también se entrevistaron a los operarios y se realizaron reuniones con los ingenieros pertenecientes a la CEO; según los e-mails estas reuniones fueron realizadas los días 23 de febrero y 4 de mayo del 2016, de esta forma es posible entender mejor el problema y las necesidades actuales.

También fue necesario realizar ensayos dentro de los laboratorios de la CEO, los cuales fueron realizados el día 6 de abril del presente año, en estos ensayos, se logra determinar

el correcto funcionamiento del prototipo y una caracterización de éste.

Gracias al acompañamiento de la CEO fue posible definir los requerimientos del sistema en cuanto a conexiones externas y periféricos; forma de uso y manejo. Por otra parte, fue posible determinar que era necesario bajo contenido armónico a la salida del sistema y a demás de permitir realizar el ensayo de verificación de la constante; por lo cual se decidió crear subsistemas que realicen estas funciones mencionadas, los cuales serán explicados más adelante.

#### **2.2.1.2. Clasificación y organización de requerimientos**

Se realiza la recopilación no estructurada de requerimientos y se clasifican en diferentes categorías acorde con el propósito y restricción requerida.

#### **2.2.1.3. Ordenación por prioridades y negociación de requerimientos**

Entre los diferentes técnicos y operarios se llega a un acuerdo a través de la negociación para determinar cuáles requerimientos son realmente importantes para el desarrollo del trabajo.

#### **2.2.1.4. Documentación de requerimientos:**

Se documenta los requerimientos y se entra en la siguiente vuelta de la espiral.

#### **2.2.1.5. Ejecución de las actividades**

En el presente trabajo se realiza la actividad 1, 2 y 4, omitiendo la actividad 3, ya que, todos los requerimientos obtenidos son prioridad del sistema, a continuación se muestran los resultados obtenidos para cada actividad; en la actividad 1 se tiene la lista a groso modo de todos los requerimientos, para la actividad 2 se organiza y se recopila los requerimientos mencionados y finalmente para la actividad 4 se presenta el documento de requerimientos especificado en [Anexo B].

**Actividad 1: Descubrimiento de los Requerimientos** Para esta actividad se tiene la recopilación general de los requerimientos, y serán mostrados en la siguiente actividad.

## **Actividad 2: Clasificación y Organización de Requerimientos**

Para esta actividad se debe recopilar todos los requerimientos. Se tiene la siguiente lista:

### **a) Requerimientos del Usuario [5]**

- Es necesario desarrollar un Sistema de Verificación en sitio Integrado para Medida Directa (SVIMD), el cual consta de un medidor patrón, una fuente de corriente y una impresora, independiente de esto se requiere el uso de un dispositivo celular el cual permitirá visualizar los procedimientos que se efectúan.

Es de tener en cuenta que el presente trabajo solo hace referencia al desarrollo de la fuente de corriente, ya que por cuestiones de tiempo y presupuesto el SVIMD se fragmenta en varios sub-sistemas, por lo que en el presente trabajo solo se desarrolla este dispositivo. Finalmente refinando este requerimiento se tiene el siguiente requerimiento:

- Es necesario desarrollar una fuente de corriente alterna acorde a las características de los demás elementos que conforman el SVIMD cumpliendo con las especificaciones de verificación.

### **b) Requerimientos del Sistema**

- *Requerimientos Funcionales:*
  - La fuente de corriente debe satisfacer las características eléctricas y mecánicas contempladas en la NTC 5900.
  - La fuente debe suministrar voltaje y corriente alterna con el mínimo contenido armónico.
- *Requerimientos No Funcionales:*

#### **1) Producto:**

- *Requerimientos de Fiabilidad:*
  - Se debe tener en cuenta la recuperación del sistema frente a fallas o caídas de voltaje.

- *Requerimientos de Portabilidad:*
  - El Sistema debe adaptarse a los diferentes medidores de energía eléctrica de clase 1 y 2 según lo estipulado en la NTC 5900.
- *Requerimientos de Usabilidad:*
  - Se debe realizar las debidas conexiones al medidor patrón y residencial antes de encender el equipo.
  - Fácil e intuitivo para los operarios.
  - El operario debe elegir el valor de corriente escogiendo la carga de salida.
  - Antes o durante la ejecución de la verificación, el procedimiento puede ser interrumpido si las condiciones de seguridad de los equipos a verificar se ven afectadas y puedan ocasionar algún peligro (botón de encendido/apagado).
- *Requerimiento de Rendimiento:*
  - Se debe contar con un buen tiempo de respuesta ante la ejecución del sistema.
  - El sistema debe presentar buena estabilidad durante la ejecución de los ensayos de verificación.
- *Requerimiento de Espacio:*
  - La fuente debe presentar dimensiones las cuales faciliten su integración al SVIMD y su desplazamiento.

## 2) Organizacionales:

- *Requerimientos de Estándares:*
  - La fuente se rige bajo las diferentes normativas incluidas en la NTC 5900.
  - Las características eléctricas están descritas por los valores de tensión, corriente y frecuencia detalladas en la NTC 5019.
  - La fuente de corriente debe estar diseñada de tal manera, que evite cualquier riesgo en el uso ordinario bajo condiciones normales de operación, garantizando especialmente: la seguridad personal contra choques

eléctricos, contra efectos de temperatura excesiva y la protección contra propagación de fuego y contra penetración de elementos sólidos, polvo y agua.

- La fuente debe tener en cuenta los debidos aislamientos, descritos en la Norma IEC/EN 60950 y detallados más adelante en los requerimientos de seguridad.
  - El dispositivo debe protegerse contra desajustes que pudieran invalidar el suministro de energía y debe contar con protección a daños y deterioro durante la manipulación, transporte, mantenimiento y almacenamiento.
  - Todas las partes del dispositivo electrónico especialmente las partes sensibles a corrosión, deben estar protegidas efectivamente.
  - Cualquier recubrimiento de protección no debe estar expuesto a daño, por condiciones normales de trabajo.
- *Requerimientos de Implementación:*
    - La fuente debe operar de forma constante sin deformaciones en la onda ni sobre picos de tensión ni corriente.
    - La carga no debe presentar una inestabilidad tal que la variación en la corriente durante el ensayo sea superior al 10 %.
    - La fuente debe suministrar energía con un contenido mínimo de armónicos.
    - La fuente debe ser portátil, es decir debe ser transportada fácilmente.
    - La fuente puede ser controlada y sincronizada mediante el medidor patrón.
  - *Requerimientos de Entrega:*
    - Monografía.
    - Manual de Usuario.

### 3) **Externos:**

- *Requerimientos de Interoperabilidad:*

- La fuente de corriente debe ser conectada y desconectada fácilmente a lo diferentes medidores, luego debe tener las correctas adaptaciones para su adecuado funcionamiento.
- Se requiere de una entrada (voltaje de la red pública) para alimentar la fuente y dos salidas (voltaje y corriente) para alimentar los mencionados medidores.
- *Requerimientos de Seguridad:*
  - El sistema no debe presentar ningún riesgo para el técnico encargado de operar el instrumento.
  - Aislamiento funcional: Aislamiento necesario para el correcto funcionamiento del equipo.(IEC/EN 60950).
  - Aislamiento básico: Aislamiento que proporciona protección básica contra descargas eléctricas.(IEC/EN 60950).
  - Aislamiento complementario: Protección contra descargas eléctricas en caso de un fallo en el aislamiento básico.(IEC/EN 60950).
  - Aislamiento doble: Aislamiento que comprende el aislamiento básico y el complementario.(IEC/EN 60950).
  - Aislamiento reforzado: Un único sistema de aislamiento que ofrece un grado de protección contra descargas eléctricas equivalente al aislamiento doble.(IEC/EN 60950).
  - La fuente debe tener en cuenta los campos y cambios de temperatura de los elementos externos que conforman entre si el ambiente en el cual se ejecutará el sistema, los principales son: campos de eléctricos y magnéticos, calentamiento y perturbaciones por ruido.
  - La fuente debe estar protegida ante variantes climáticas como al agua, el polvo, frio y calor.

### **Actividad 3: Documentación de Requerimientos**

Esta actividad corresponde al documento de requerimientos presentado en [Anexo B], el cual se construye de forma iterativa hasta lograr un

documento final y refinado que englobe por completo los requerimientos del sistema.

Finalizadas mencionadas actividades se da por culminado la etapa de obtención de requerimientos.

### **2.2.2. Especificación de Requerimientos**

En esta etapa se generan tablas detalladas de cada requerimiento explicando la funcionalidad y características de cada uno, estas tablas se encuentran en el documento de requerimientos [Anexo B], cabe mencionar que estas especificaciones ayudan a esclarecer los requerimientos en el proceso de validación.

### **2.2.3. Validación de Requerimientos**

Durante el proceso de validación se deben llevar a cabo diferentes verificaciones sobre el documento de requerimientos, estas son:

#### **2.2.3.1. Verificación de validez**

Para esta etapa se eliminan los requerimientos que pueden ser una extensión o pueden estar contenidos en otros, es decir que un usuario puede pensar que necesita un sistema aparte para determinada función pero, es posible que solo necesite una extensión adicional para solventar el problema.

#### **2.2.3.2. Verificación de consistencia**

Los requerimientos en el documento no deben contradecirse, para este caso se revisa cada requerimiento y se encuentra que ninguno se contradice.



### 2.2.3.3. Verificaciones de completitud

El documento de requerimientos debe incluir requerimientos que definan todas las funciones propuestas por el usuario. Para esto se realizaron varias reuniones a posteriori con los usuarios donde se revisó extensamente todos los requerimientos del sistema, determinándose que el documento engloba por completo las funciones definidas por estos.

### 2.2.3.4. Verificaciones de realismo

Para estas verificaciones se tiene en cuenta el presupuesto y además deben ser verificadas para asegurar que puedan implementarse.

#### 1. Requerimientos del Usuario [5]

- Es necesario desarrollar una fuente de corriente alterna acorde a las características de los demás elementos que conforman el SVIMD cumpliendo con las especificaciones de verificación.

#### 2. Requerimientos del Sistema

- *Requerimientos Funcionales:*
  - La fuente de corriente debe satisfacer las características eléctricas y mecánicas contempladas en la NTC 5900.
  - La fuente debe suministrar voltaje y corriente alterna con el mínimo contenido armónico.
- *Requerimientos No Funcionales:*
  - a) **Producto:**
    - *Requerimientos de Fiabilidad:*
      - Se debe tener en cuenta la recuperación del sistema frente a fallas o caídas de voltaje.
    - *Requerimientos de Portabilidad:*
      - El Sistema debe adaptarse a los diferentes medidores de energía eléctrica de clase 1 y 2 según lo estipulado en la NTC 5900.
    - *Requerimientos de usabilidad:*

- Se debe realizar las debidas conexiones al medidor patrón y residencial antes de encender el equipo.
- El operario debe elegir el valor de corriente escogiendo la carga de salida.
- Antes o durante la ejecución de la verificación, el procedimiento puede ser interrumpido si las condiciones de seguridad de los equipos a verificar se ven afectadas y puedan ocasionar algún peligro (botón de encendido/apagado).
- *Requerimiento de rendimiento:*
  - El sistema debe presentar buena estabilidad durante la ejecución de los ensayos de verificación.
- *Requerimiento de espacio:*
  - La fuente debe presentar dimensiones las cuales faciliten su integración al SVIMD y pueda ser transportada fácilmente.

**b) Organizacionales:**

- *Requerimientos de estándares:*
  - La fuente se rige bajo las diferentes normativas incluidas en la NTC 5900.
  - Aislamiento reforzado (IEC/EN 60950).
- *Requerimientos de Implementación:*
  - La fuente debe operar de forma constante sin deformaciones en la onda ni sobre picos de tensión ni corriente.
  - La carga no debe presentar una inestabilidad tal que la variación en la corriente durante el ensayo sea superior al 10 %.
  - La fuente debe suministrar energía con un contenido mínimo de armónicos.
  - La fuente debe ser portátil, es decir debe ser transportada fácilmente.
  - La fuente puede ser controlada y sincronizada mediante el medidor patrón.
- *Requerimientos de Entrega:*
  - Monografía.
  - Manual de Usuario [Anexo F].

**c) Externos:**

- *Requerimientos de interoperabilidad:*
  - La fuente de corriente debe ser conectada y desconectada fácilmente a lo diferentes medidores, luego debe tener las correctas adaptaciones para su adecuado funcionamiento.
  - Se requiere de una entrada (voltaje de la red pública) para alimentar la fuente y dos salidas (voltaje y corriente) para alimentar los mencionados medidores.
- *Requerimientos de Seguridad:*
  - El sistema no debe presentar ningún riesgo para el técnico encargado de operar el instrumento.
  - El sistema contará con aislamiento reforzado(IEC/EN 60950).
  - La fuente debe tener en cuenta los campos y cambios de temperatura de los elementos externos que conforman entre si el ambiente en el cual se ejecutará el sistema, los principales son: campos de eléctricos y magnéticos, calentamiento y perturbaciones por ruido.
  - La fuente debe estar protegida ante variantes climáticas como al agua, el polvo, frio y calor.

## 2.3. Modelo del Sistema

Existen diferentes formas de expresar los requerimientos del sistema. Una técnica ampliamente usada es documentar la especificación del sistema como un conjunto de modelos del sistema. Estos modelos son representaciones gráficas que describen el proceso de negocio, el problema a resolver y el sistema que tiene que ser desarrollado. El uso de representaciones graficas ayuda a comprender fácilmente las descripciones detalladas en lenguaje natural de los requerimientos del sistema.

Pueden usarse diferentes modelos para representar el sistema desde diferentes perspectivas: “perspectiva externa” en la que se modela el contexto del sistema, “perspectiva de comportamiento” para modelar el comportamiento del sistema y una “perspectiva estructural” en la que se modela la arquitectura del sistema o la estructura de éste.

Teniendo en cuenta lo anterior para el presente trabajo se tiene que para una perspectiva externa se usará el modelo de contexto, para una perspectiva de comportamiento se utili-

zará el modelo de máquinas de estado y para una perspectiva estructural se desarrollará un modelo de arquitectura del sistema a desarrollar.

### 2.3.1. Modelo del Contexto

El modelo del contexto se describe mediante un modelo arquitectónico de alto nivel, el cual se expresa con diagramas de bloques sencillos en donde cada subsistema se representa por un rectángulo con nombre, y las líneas indican asociaciones entre los subsistema.

La figura 2.4 muestra los diferentes sub-sistemas que componen al sistema total, el cual necesita de un sistema protector de sobre-picos para el requerimiento de la NTC 5900 sobre la seguridad integral del operario; un sistema que suministre voltaje y corriente con igual fase e independientes entre sí, según lo exige los valores eléctricos establecidos en la NTC 5900; un sistema que sea capaz de controlar el suministro de energía hacia el medidor patrón, para realizar el proceso de verificación de la constante planteado en la NTC 5900 y un sistema que mitigue el contenido armónico de la señal de salida, según la planteado en las reuniones realizadas con los ingenieros y operarios de la CEO.

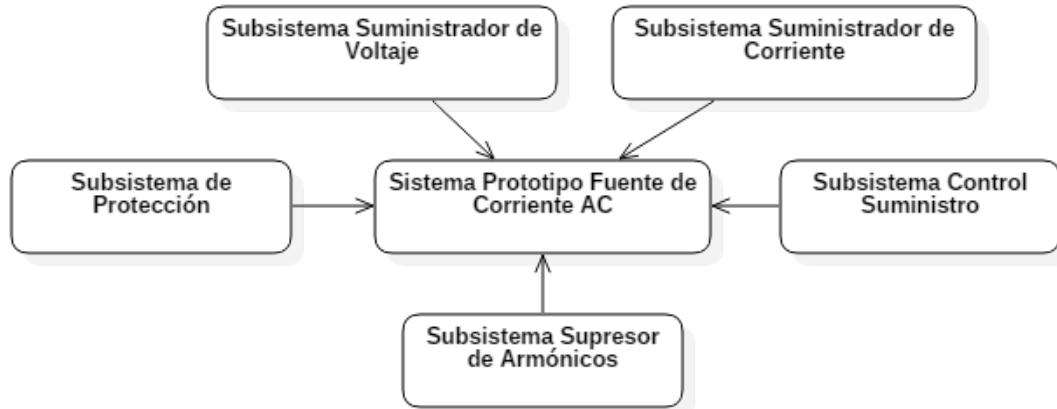


Figura 2.4: Modelo arquitectónico de la fuente de corriente alterna.

[Fuente: Elaboración Propia]

### 2.3.2. Modelo de Comportamiento

Estos modelos se utilizan para describir el comportamiento del sistema en su totalidad, en el presente proyecto se emplea el modelo de máquinas de estado que permite modelar el sistema en tiempo real, debido a que el sistema de alimentación está dirigido por estímulos del entorno del SVIMD.

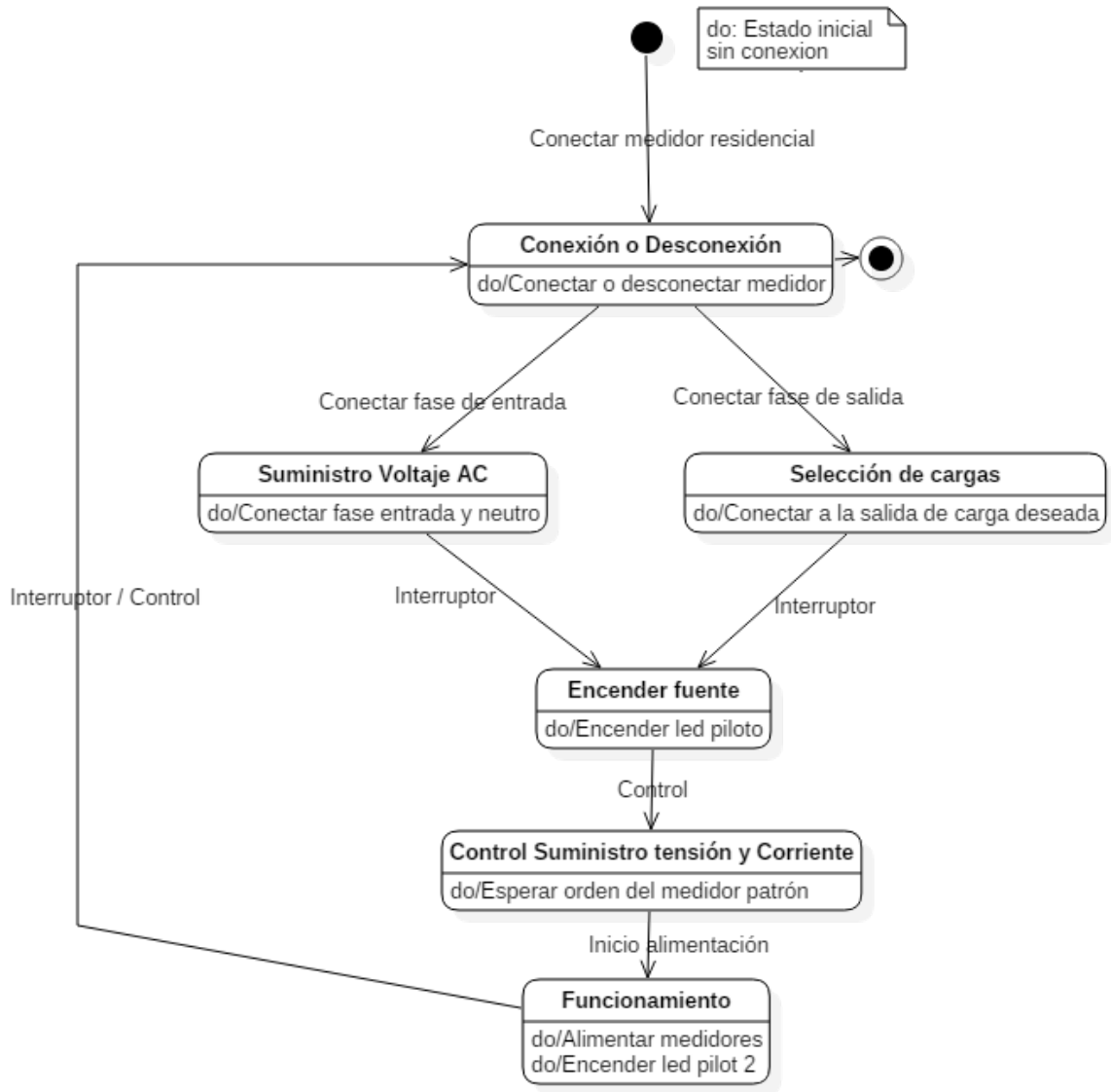


Figura 2.5: Modelo de máquina de estados de la fuente de corriente alterna.  
[Fuente: Elaboración Propia]

Este modelo muestra los estados del sistema y los eventos que provocan las transiciones de un estado a otro. En la figura 2.5 se observa el modelo de comportamiento del presente proyecto, aquí se definen los siguientes estados:

1. *Estado inicial*: En este estado la fuente se encuentra totalmente desconectada de todos los demás sistemas.
2. *Conexión/Desconexión*: Este estado ocurre cuando se conecta la fuente de corriente alterna a la red eléctrica o viceversa.
3. *Suministro voltaje AC*: Se realiza la conexión entre el medidor residencial y la fuente de corriente, la cual consiste en conectar la fase de entrada.
4. *Selección de cargas*: Se realiza la conexión entre el medidor residencial y la fuente de corriente alterna, la cual consiste en seleccionar la salida de carga deseada.
5. *Encender fuente*: Mediante la acción de un interruptor se enciende o apaga la fuente.
6. *Control suministro tensión y corriente*: Este estado consiste en controlar el suministro de energía para realizar el ensayo de verificación de la constante capítulo 1.
7. *Funcionamiento*: Finalmente el estado de funcionamiento permite alimentar de manera controlada tanto el medidor patrón, como el medidor residencial.

# Capítulo 3

## Diseño y Selección de Componentes

En el presente capítulo se presenta el diseño del prototipo de la fuente de corriente y las metodologías para la selección de la solución electrónica más óptima y funcional del sistema; además se describen los procesos y el funcionamiento de cada uno de los subsistemas que conforman el sistema total.

### 3.1. Diseño

Mediante la captura de requerimientos llevada a cabo previamente en el capítulo anterior y con el fin de satisfacer estos, se concluye el siguiente modelo del plano de alimentación:

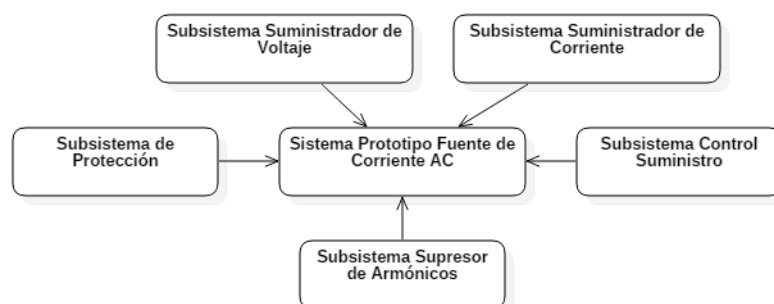


Figura 3.1: Diagrama de bloques. [Fuente: Elaboración Propia]

El modelo del sistema total, se fundamenta en cinco subsistemas, en la Figura 3.1, se

puede apreciar de manera general como es la articulación del sistema:

1. El subsistema de protección como su nombre lo indica es el cual protege al sistema total contra sobre picos de tensión y corrientes parasitas provenientes de la red eléctrica, además aislara el funcionamiento de la fuente en caso de presentar corto circuitos o grandes temperaturas internamente no controlables.
2. El subsistema suministrador de voltaje entrega una señal de voltaje sinusoidal equivalente a la caída de tensión de la red eléctrica, con bajo ruido y contenido armónico, tal como se ha especificado en la hoja de requerimientos [Anexo B].
3. El subsistema suministrador de corriente entrega una señal sinusoidal con 3 valores diferentes de amplitud, estas señales deben presentar bajo contenido armónico, tal como se encuentran especificados en la hoja de requerimientos [Anexo B] y sus valores son debido a que la fuente es dedicada a un sistema de verificación en sitio por lo que debe cumplir con los valores de suministro de corriente establecidos por la NTC 5900.
4. El subsistema de control de suministro de energía, permite o no el paso de la señal entrante de voltaje y corriente, tanto al medidor patrón, como al residencial, es decir, que el suministro puede ser iniciado o interrumpido en el momento que el operario lo desee, este subsistema es de gran importancia para el proceso de dosificación de energía, que se debe llevar a cabo para el ensayo de la verificación de la constante.
5. El subsistema supresor de armónicos es de gran importancia y cuidado al momento de diseñarlo e implementarlo ya que tiene la gran responsabilidad de mitigar tanto tensiones como corrientes armónicas, de tal forma que el contenido armónico presente en la señal de salida se encuentre por debajo de los niveles establecidos en la norma IEEE/ANSI 519 [Anexo C].

Para desarrollar el diseño de cada uno de los subsistemas planteados anteriormente se acude a la técnica de análisis morfológico, herramienta que fue desarrollada e implementada por *Fritz Zwicky* un reconocido astrofísico y científico aeroespacial. Esta técnica permite analizar y determinar mediante el uso de múltiples combinaciones la solución más apropiada de acuerdo al propósito del proyecto.



El análisis morfológico es un método combinatorio de ideación creativa, consiste en descomponer un sistema en subsistemas hasta llegar a los elementos más esenciales o estructuras más básicas y con sus parámetros construir una matriz que permitirá multiplicar las relaciones entre mencionadas partes. La ventaja que ofrece este método es que facilita la reducción del espacio morfológico gracias a la incorporación de criterios de preferencias (criterios de inclusión) y de exclusión. El análisis morfológico comprende dos fases, en la primera fase se construye el espacio morfológico y en la segunda fase se reduce el espacio morfológico [6].

## 3.2. Espacio Morfológico

El espacio morfológico es el número de los posibles escenarios, el cual está conformado por todas las combinaciones posibles resultantes de la descomposición del sistema y de la formulación de hipótesis que dan solución a cada uno de los subsistemas, por lo tanto, para construir el espacio morfológico se debe realizar una cuidadosa selección de los subsistemas que componen el sistema bajo estudio y formular hipótesis sobre la solución del subsistema. Un escenario se caracteriza por la selección de una hipótesis particular en cada uno de los subsistemas que componen el sistema global.

Para la generación de hipótesis se utiliza la herramienta *Brainstorming* o “tormenta de ideas”, es un método de creación de ideas en grupo muy utilizado para identificar problemas, ofrecer soluciones alternativas a dichos problemas o facilitar oportunidades de mejora. Básicamente, esta técnica consiste en plantear un tema o palabra clave a partir de la cual, los integrantes del grupo de varias personas, aportan las ideas que se les van ocurriendo, con rapidez, dejando volar la imaginación. Se trata de conseguir el mayor número de ideas concepto en el menor tiempo. Esta herramienta fue creada en el año 1941 por *Alex F. Osborne*. y hay cuatro reglas básicas que se deben seguir para asegurar el éxito de la sesión: las críticas no son aceptables, todas las ideas valen, cuanto más audaces sean mejor; se busca cantidad, a más ideas más soluciones; y por último, unir las ideas de los otros, combinarlas y mejorarlas.

Para realizar el proceso *Brainstorming* se deben identificar los subsistemas que conforman el sistema total, para esto se recurre al diseño propuesto, a partir de la ingeniería de reque-

rimientos, mostrado en la figura 3.1 para posteriormente proceder con la sesión de “lluvia de ideas” [Anexo B]. Después de esto se genera una matriz que relaciona los subsistemas con cada una de las hipótesis formando con esto el espacio morfológico. A continuación se muestra el espacio morfológico que contiene cada una de las hipótesis solución de cada subsistema, con el fin de especificar mejor esta parte se muestra todo el desglose de las hipótesis generadas en cada uno de los subsistemas.

### 3.2.1. Subsistema de Tensión Alterna

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
Transformador de Tensión	Obtener 120 voltios a la salida con baja corriente
Inversor/Conversor	Dispositivo que convierte corriente continua en corriente alterna(componente principal oscilador-mosfet, transformador-) con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador
Regulador de Tensión	Permite fijar el valor de tensión deseado de forma controlada
Línea Directa	Tomar una ramificación del voltaje de la red eléctrica

Tabla 3.1: Características Subsistema Suministrador de Tensión Alterna

### 3.2.2. Subsistema de Protecciones Eléctricas

Componente	Función
Varistores	Proteger circuitos contra variaciones de tensión y transientes
Fusibles	Permitir el paso de la corriente mientras no supere un valor establecido; protección contra sobrecargas y cortocircuitos

Tabla 3.2: Características Subsistema de Protecciones Eléctricas

### 3.2.3. Subsistema Suministrador de Corriente Alterna

Componente	Función
Cargas Eléctricas	Resistores de potencia y de baja tolerancia (cerca del 1 %), para permitir un consumo determinado de corriente
Triac	Dispositivo de control que permite el paso de corriente alterna a una carga determinada como un motor o un resistor de alta potencia. Sólo trabaja con energía alterna
Oscilador	Generador de ondas sinusoidales y triangulares si utilizan cristales de cuarzo; si utilizan capacitores y resistores pueden ser los circuitos de relajación o de onda cuadrada y rectangular.
Transistores de Potencia	Utilizando las configuraciones en colector común o seguidores de emisor, pueden conseguirse grandes amplificadores de potencia.
Mosfet	Dispositivo semiconductor de alta potencia que puede, al igual que los transistores, producir altas corrientes con pequeñas variaciones en el voltaje de entrada.
Amplificador Operacional	Dispositivo de alta precisión y de grandes aplicaciones electrónicas, por su alta impedancia de entrada y su alta ganancia.

Tabla 3.3: Características Subsistema Suministrador de Corriente Alterna

### 3.2.4. Subsistema de Armónicas

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
Filtros Activos	Están compuestos por resistores, capacitores y amplificadores operacionales en configuración de Seguidor de Voltaje, denominados giradores (Gyrator), que reemplazan las bobinas en su función pero no en sus características electromagnéticas.
Filtros Pasivos	Sus componentes pasivos (inductor, resistencia y capacitores) permiten facilidad y bajo costo para la implementación
Filtros Sintonizados	Estos filtros están sintonizados a una única frecuencia, se componen de circuitos RLC en serie y en paralelo o con cristales de cuarzo

Tabla 3.4: Características Subsistema de Armónicas

### 3.2.5. Subsistema Control y Sincronización

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
Relés	Consta de dos circuitos: un circuito electromagnético y un circuito de contactos
Optoacoplador	Es un componente electrónico que se utiliza como transmisor y receptor óptico

Tabla 3.5: Características Subsistema Control y Sincronización

En las anteriores tablas se muestran los elementos que han sido contemplados en cada subsistema mencionado anteriormente, como las posibilidades a ser los constituyentes de la solución electrónica definitiva de la fuente de corriente.

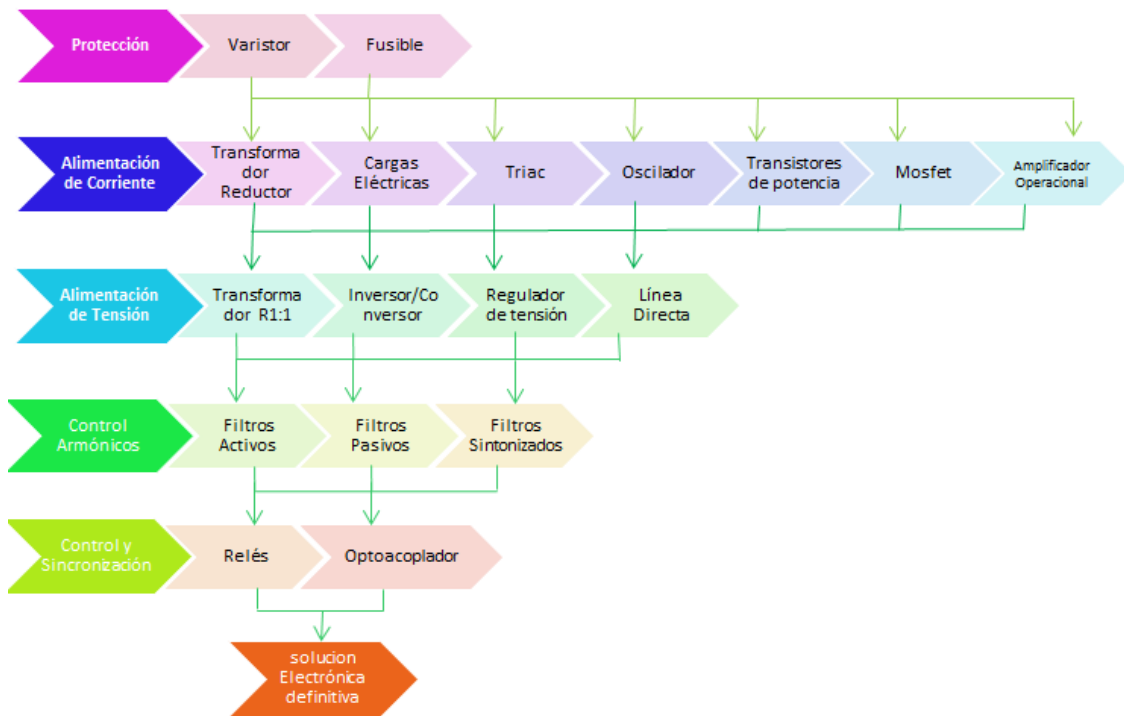


Figura 3.2: Componentes opcionales. [Fuente: Elaboración Propia]

En la figura 3.2 se presenta la visualización matricial de los escenarios, que resultan de la combinación de cada una de las posibilidades y que se puede calcular cuantitativamente de la siguiente forma:

$$E.M = D. Protección \times D. Voltaje \times D. Corriente \times D. Control \times D. Supresor Armónicos \quad (3.1)$$

Donde:

E.M	=	Espacio Morfológico
Dispositivos de Protección	=	2
Dispositivos de Tensión	=	4
Dispositivos de Corriente	=	7
Dispositivos de Control	=	2
Dispositivos de Armónicos	=	3

$$E.M = 2 \times 7 \times 4 \times 2 \times 3 = 336 \quad (3.2)$$

El valor obtenido del espacio morfológico refleja la cantidad de escenarios que deben ser analizados y estudiados para la selección del escenario más viable, frente a la solución electrónica definitiva del sistema.

Para determinar la elección más viable y funcional del sistema, es necesario considerar cada una de las características de los dispositivos y de esta manera realizar un análisis que permita establecer criterios que posibiliten descartar diferentes dispositivos. Por esta razón, se presentan las características eléctricas, electrónicas, mecánicas y económicas de cada uno de los dispositivos para que de este modo sea posible determinar qué dispositivos harán parte de la solución electrónica definitiva usando criterios de exclusión.

### **3.2.6. Características de los posibles dispositivos**

#### **3.2.6.1. Relé**

- Dispositivo electromagnético que estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador [7].
- Existen multitud de tipos distintos de relés dependiendo del número de contactos, de su intensidad admisible, del tipo de corriente de accionamiento, del tiempo de activación y desactivación, entre otros. Además de su economía

#### **3.2.6.2. Optoacoplador**

- Es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac [8].
- Posee funciones como aislador circuital para el control de potencia en interfaces en circuitos lógicos entre otros y además es económico.

#### **3.2.6.3. Filtros Sintonizados**

- Circuito RLC el cual presenta una impedancia mínima a la frecuencia de un armónico definido o el caso contrario de los armónicos que presentan una impedancia mínima

a frecuencias mayores a la de sintonía (filtro pasa-alto).

- Este filtro se sintoniza a la frecuencia de la armónica que se desea eliminar, lo que significa que para esta frecuencia, las reactancias de la inductancia y del condensador se hacen iguales y por lo tanto se anulan, entonces la impedancia que presentará el filtro para esta frecuencia es mínima (valor igual a la resistencia), y absorberá la mayor parte de la corriente armónica contaminante.

#### **3.2.6.4. Filtros Activos**

- Son filtros electrónicos analógicos, distinguidos por el uso de uno o más componentes activos que pueden ser un tubo de vacío, un transistor o un amplificador operacional [9].
- Estos filtros requieren de una fuente de alimentación y además el amplificador operacional limita la señal de salida a partir de los cuales surgen no linealidades.

#### **3.2.6.5. Filtros pasivos**

- Estos filtros se diseñan exclusivamente con elementos pasivos como resistencias, inductores y capacitores y son utilizados en sistemas de corriente alterna.

#### **3.2.6.6. Transformador de tensión**

- A partir de los respectivos cálculos puede diseñarse el transformador con una salida, varias salidas y valores deseados; Teniendo en cuenta que su tamaño es proporcional a su capacidad en vatios [9].
- El valor económico significativo depende de que tanto alambre se gaste en la implementación de este.

#### **3.2.6.7. Regulador de tensión**

- Permite mantener un nivel de tensión constante.

- Los reguladores conmutados poseen mayor rendimiento de conversión pero una desventaja es la producción de ruido electromagnético producido por la conmutación a frecuencias elevadas.
- Los reguladores electromecánicos, basan su principio de funcionamiento en un auto transformador de columna, sobre la cual se dispone un cursor accionado por un servomotor, que en su recorrido suma o resta espiras, ofrece alta precisión y eficiencia del 99 %.

#### **3.2.6.8. Inversor/Conversor**

- Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda rectangular. Esta onda rectangular alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario, debido a esto presenta el trabajo en conjunto con varios componentes, por lo tanto más tamaño y más costo económico.

#### **3.2.6.9. Cargas eléctricas**

- Existen diferentes tipos de cargas: capacitiva, inductiva y resistiva.
- Son relativamente económicos, pueden fabricarse de diferentes materiales, su tamaño depende de que tanta potencia disipan, su estabilidad depende de la temperatura de funcionamiento y de la potencia disipada.
- Las cargas puramente resistivas no generan desfase entre la corriente y tensión, a diferencia de las otras cargas.

#### **3.2.6.10. Triac**

- Dispositivo semiconductor que conduce en los dos sentidos y funciona como un interruptor capaz de conmutar la corriente alterna.
- Presenta diferentes modos de funcionamiento y disparo.



### **3.2.6.11. Oscilador**

- Es un circuito electrónico que produce una señal electrónica repetitiva, generalmente una onda senoidal o una onda cuadrada, pero podría ser diferente.
- Los osciladores son circuitos electrónicos generalmente alimentados con corriente continua capaces de producir ondas sinusoidales con una determinada frecuencia.

### **3.2.6.12. Transistores de potencia**

- Son dispositivos activos que presentan diferentes configuraciones y permiten amplificar corriente a través de pequeños impulsos de corriente, se encuentran limitados por la cantidad de corriente que manejan. [10].

### **3.2.6.13. FET y MOSFET de Potencia**

- Este tipo de transistores permiten amplificar corriente a través de pequeños impulsos de voltaje [11] .
- Los transistores Mosfet tienen las siguientes características: conmutación a altas frecuencias, sistemas inversores, generadores de altas frecuencias para inducción de calor, sistemas de alimentación ininterrumpidos (ups), tienen diferentes regiones de trabajo.

### **3.2.6.14. Amplificador operacional**

- Dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia acoplado en corriente continua que tiene dos entradas y una salida; se encuentra limitado por las bajas corrientes que maneja [12]
- Los diseños varían entre cada fabricante y cada producto, pero todos los amplificadores operacionales tienen básicamente la misma estructura interna, que consiste en tres etapas: Amplificador diferencial, Amplificador de tensión y Amplificador de salida.

### 3.2.6.15. Varistor

- Este dispositivo presenta una alta capacidad de absorción de energía respecto a las dimensiones del componente y cuenta con una amplia gama de voltajes lo que permite una selección fácil del componente correcto para una aplicación específica.
- Tiempo de respuesta de menos de 20 ns, absorbiendo el transitorio en el instante que ocurre.
- Alto grado de aislamiento, económico y bajo consumo (en stand-by).

### 3.2.6.16. Fusible

- Presentan diferentes formas, tamaños, precios y capacidades de corriente; por lo que se debe tener en cuenta la función que va a desempeñar y el objeto a proteger.

## 3.3. Reducción del espacio morfológico

Conociendo las características y comportamientos de cada uno de los dispositivos, y teniendo en cuenta los requerimientos establecidos, se procede a realizar una reducción del espacio morfológico. Gracias al manejo de criterios de exclusión es posible reducir el espacio morfológico a un número de posibilidades menores y por consiguiente mucho más manejables.

Este análisis consiste en descartar todas aquellas opciones que son inconsistentes o que no son compatibles. Los criterios de exclusión permiten seleccionar los dispositivos que hacen parte de cada subsistema y que garantizan la viabilidad y la calidad de la solución electrónica, los criterios que han sido definidos son los siguientes:

1. Disponibilidad: hace referencia a la facilidad de adquirir el producto en el mercado.
2. Escalabilidad: hace referencia a la capacidad que tiene el dispositivo de permitir la incorporación de nuevas funcionalidades en el transcurso del tiempo.
3. Incompatibilidad: hace referencia a la falta de compatibilidad de los dispositivos para los propósitos establecidos.

4. Soporte y material de apoyo: hace referencia a la cantidad y calidad de información que permitan conocer la configuración y estructura de los dispositivos.
5. Requiere de dispositivos o circuitos adicionales: se refiere a la adquisición de dispositivos adicionales para la implementación de un dispositivo.
6. Difícil implementación: hace referencia a la dificultad de implementar el arreglo.
7. Sobredimensionamiento: se refiere a que un dispositivo pese a que presente grandes cualidades, resulta ser exagerado para su implementación.
8. Alto Costo: el cliente espera que el desarrollo del dispositivo electrónico patrón sea de bajo costo, por lo tanto este es un criterio determinante para tener en cuenta en la selección del dispositivo
9. Herramientas de desarrollo: hace referencia a la disponibilidad y compatibilidad de herramientas que pueden ser utilizadas según el gusto del desarrollador.
10. Exactitud de las medidas: al tratarse de un dispositivo para verificación en sitio, se requiere de un alto nivel de exactitud, pues de ello depende el proceso.
11. Portabilidad: Hace referencia al tamaño de los dispositivos, ya que el sistema total es para usarse en sitio este debe ser lo más portable o pequeño posible.

Con los criterios de exclusión previamente establecidos, se procede a realizar el análisis respectivo de cada uno de los dispositivos, con el propósito de descartar uno o varios de ellos.

### 3.3.1. Selección de dispositivos

- **Inversor** El criterio octavo, (alto costo) y onceavo (portabilidad) aplican para el equipo inversor ya que este presenta un tamaño considerable y un elevado costo de adquisición, lo que perjudica al proyecto ya que este debe ser elaborado de forma portátil y con elementos económicos.
- **Regulador de tensión** El criterio quinto (Requiere de dispositivos o circuitos adicionales) y tercero (Incompatibilidad) aplican sobre los reguladores debido a que es

necesario hacer uso de circuitos adicionales para el correcto funcionamiento, aumentando considerablemente su tamaño, implicando que el criterio onceavo (portabilidad) también aplique a estos. Además teniendo en cuenta el requerimiento de fase entre los voltajes de salida, resulta incompatible para el propósito del proyecto.

- **Línea directa** El criterio tercero (Incompatibilidad) aplica sobre este método, ya que no es posible controlar de alguna manera la fase de la red, haciendo que si se genera desfase entre la línea de tensión y la de corriente, no exista forma de controlar.
- **Triac** El criterio quinto (Requiere de dispositivos adicionales) aplica a los triacs ya que para implementar estos dispositivos es necesario de un arreglo circuital adicional para activar el dispositivo y además protegerlo de altas corrientes, lo cual aumenta las dimensiones del sistema fuente de corriente, generando más criterios a tener en cuenta.
- **Oscilador** El criterio quinto (requiere de dispositivos adicionales), sexto (Difícil Implementación) y séptimo (sobredimensionamiento) aplican sobre los osciladores de señales, ya que, estos dispositivos, por lo general, requieren de otros componentes para mejorar su señal de oscilación, también las características que ofrecen los osciladores sobrepasan los requerimientos necesarios del proyecto.
- **FET y MOSFET de potencia** El criterio quinto (circuitos adicionales) y sexto (Difícil implementación) aplica en los transistores mosfet, por una parte es necesario una fuente DC para la polarización de estos, haciendo que se incrementen los requerimientos de la fuente, por otra parte para el correcto funcionamiento de estos es necesario comprender completamente sus circuitos de implementación. Para este dispositivo se trataron de implementar pruebas de funcionamiento pero no se obtuvieron los resultados esperados en cuanto a corriente de surtidor.
- **Amplificador Operacional** El criterio quinto (Requiere de dispositivos) aplica a los amplificadores debido a que estos necesitan de una fuente DC dual, tiene baja eficiencia a altas temperaturas y no es posible manejar grandes corrientes por lo que presenta incompatibilidad con los requerimientos (criterio 3).
- **Filtros Activos** El criterio quinto (Requiere de dispositivos o circuitos adicionales) y octavo (alto costo) son criterios que permiten descartar los filtros activos. Respecto al criterio de dispositivos adicionales, los filtros activos se encuentran conformados por amplificadores operacionales que necesitan de una fuente dual para ser polarizado correctamente.

- **Reles** Se encontró que los relés pueden ser disparados o accionados debido a corrientes armónicas u otras alteraciones, por lo que se tiene como elemento optimo aislador entre circuitos de alta y baja potencia el Optoacoplador.

### 3.4. Solución Electrónica Definitiva

Con base en los criterios de exclusión, ha sido posible determinar los elementos que no harán parte del sistema electrónico, de este modo, la propuesta a la selección electrónica vista desde cada uno de los subsistemas correspondientes al sistema total se presenta en la figura 3.3

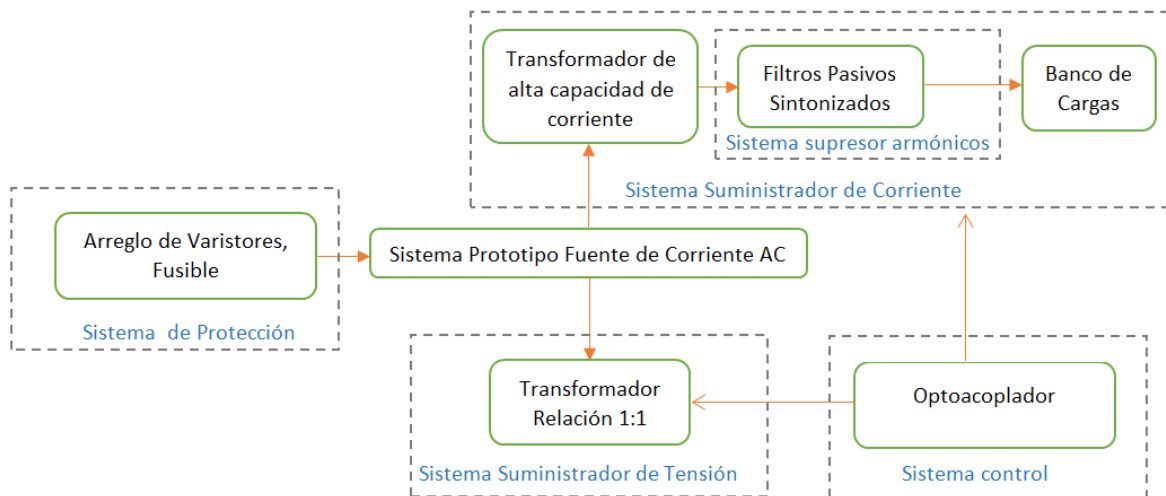


Figura 3.3: Solución electrónica. [Fuente: Elaboración Propia]

Como se observa en la figura anterior, el subsistema suministrador de corriente está comprendido por dos partes: un transformador de alta capacidad de corriente y un banco de cargas, los cuales trabajan en conjunto para suministrar la corriente deseada. Para el subsistema suministrador de voltaje se tiene un transformador de relación 1:1. Por esta razón se define un único transformador para ambas funciones, conformando así la solución definitiva del sistema, según lo muestra la figura 3.4.

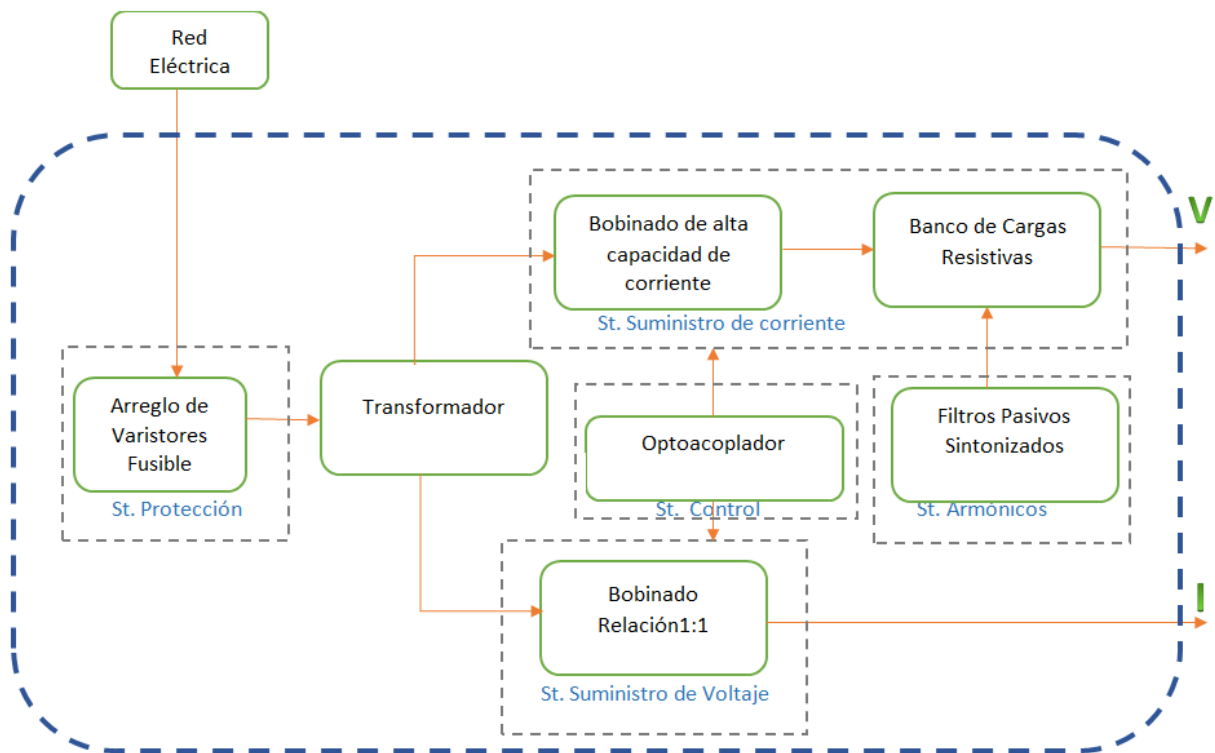


Figura 3.4: Solución Electronica Definitiva [Fuente: Elaboración Propia]

Con los dispositivos principales ya seleccionados, se procede a realizar una descripción de la función que se requiere en cada subsistema y se determinan los cálculos y componentes necesarios para que cada uno de estos opere de manera correcta.

### 3.4.1. Transformador de Voltaje

Este transformador es del tipo acorazado con el devanado secundario dividido en dos: para el primer devanado secundario se obtiene un valor de 120 voltios con una corriente máxima de 0,05 miliamperios, y en el segundo se obtiene un voltaje aproximadamente de 0,7 voltios con capacidad de alta corriente. Con esta caída de tensión y un banco de cargas, es posible generar las tres salidas de corriente requeridas.

- **Bobinado Suministrador de Voltaje:** Este bobinado es el primer secundario y se denominará de ahora en adelante como devanado secundario 1, es diseñado con una relación de 1:1. El objetivo en este devanado es el suministro de voltaje con un valor igual a la caída de tensión de la red eléctrica.

- **Bobinado de Alta Capacidad de Corriente:** Este devanado cumple la función de reductor, es un devanado capaz de soportar altas corrientes debido al calibre del hilo de cobre utilizado para el bobinado, en este caso soporta una corriente de 40 amperios AC.

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a realizar el diseño matemático del transformador según los requerimientos establecidos.

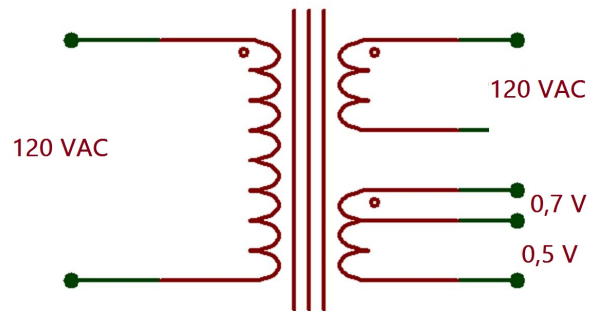


Figura 3.5: Diseño del transformador. [Fuente: Elaboración Propia]

### 3.4.1.1. Diseño Matemático del Transformador

En el mercado actual, existen varias opciones para conseguir el transformador requerido en cada oportunidad, pero cuando esto no es posible se debe proceder a su construcción para lo cual es necesario tener en cuenta las condiciones de diseño para transformadores.

El diseño de cualquier equipo es un proceso de cálculo mediante el cual se trata de determinar sus dimensiones geométricas, de modo de obtener un comportamiento pre-especificado. Para el proceso de diseño se emplean las siguientes especificaciones detalladas a continuación: especificaciones de funcionamiento deseadas, algoritmo de diseño y la comprobación de cálculos.

### 3.4.1.2. Especificaciones de Funcionamiento Deseadas

En el caso más simple serán las características nominales, es decir:  $V_2$ ,  $V_1$ ,  $f$  y la potencia aparente  $S$

1. **Voltaje de entrada:** Señal sinusoidal proveniente de la red eléctrica.
2. **Relación de vueltas:** Para el secundario se tendrá una relación de 1:1 y en el terciario un reductor con relación de 240:1.
3. **Frecuencia de funcionamiento:** 60 Hertz
4. **Potencia a suministrar:** Esta es la potencia aparente del secundario en circuito cerrado, es decir, con una carga y se mide en Voltio-Ampere (VA), inicialmente se aproxima esta potencia mediante la corriente y el voltaje que entrega los bobinados de salida, para este caso se tiene:

$$S = 120V \times 0,05A + 0,7V \times 40A = 34VA \quad (3.3)$$

Debido a los estudios realizados previamente, se tiene que el transformador debe diseñarse con una potencia mayor a esta para evitar sobrecarga y caídas de tensión, por esto se realiza el transformador para el doble de la corriente a suministrar.

$$S = 120V \times 0,05A + 0,7V \times 80A = 62VA \quad (3.4)$$

### 3.4.1.3. Algoritmos de Diseño

1. **Sección de conductores primario y secundario:** La sección de los conductores se determina mediante la intensidad y la densidad de corriente que atraviesa cada devanado, la densidad de corriente es la cantidad de Amperios que circulan por cada milímetro cuadrado de la sección del conductor, y se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$S_c = \frac{I}{J} \quad (3.5)$$

El valor de la densidad de corriente se puede obtener a partir de la siguiente tabla:

Potencia (VA)	10 a 50	51 a 100	101 a 200	201 a 500	501 a 1000
J (A/mm <sup>2</sup> )	4	3,5	3	2,5	2

Tabla 3.6: Valores para determinar la densidad de corriente.

Este resultado está determinado en unidades cuadradas ( $cm^2$ ), para determinar el valor del calibre, puede consultarse las tablas AWG para alambre de cobre en [Anexo



D], si se desea el valor exacto del calibre en unidades lineales ( $cm$ ), es necesario aplicar la relación de área de una circunferencia:

Recordando que el área del círculo es:

$$A_c = \pi \times r^2 \quad (3.6)$$

Dado que el radio es:

$$r^2 = \frac{Dimetro^2}{2^2} \text{ se obtiene :} \quad (3.7)$$

$$A_c = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (3.8)$$

En ocasiones los valores obtenidos no existen en forma normalizada, por lo tanto se opta por el valor próximo por encima del estándar.

2. **Número de vueltas por voltio** Según [13], especifica la cantidad de vueltas necesarias para obtener el valor de un voltio ( $1V$ ), para determinar la relación de vueltas por voltio, se considera al transformador como ideal, bajo estas condiciones se tiene que: El flujo magnético que se produce en el primario junto con el que se produce en el secundario son iguales al flujo magnético mutuo, es decir que:

$$\phi_m = \phi_p \quad (3.9)$$

Según la ley de inducción de Faraday (3.10), el voltaje en una bobina viene dado por:

$$\varepsilon = n\varepsilon = -n \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (3.10)$$

El signo negativo indica el sentido de la corriente, éste se desprecia debido a que se trabaja en corriente alterna, además considerando el voltaje inducido en el primario se tiene lo siguiente:

$$\varepsilon_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.11)$$

Teniendo que:

$$\phi_m = \Phi_m \text{sen}(\omega t) \quad (3.12)$$

Entonces

$$\epsilon_p = N_p \frac{d}{dt} [\Phi_m \text{sen}(\omega t)] \quad (3.13)$$

$$\epsilon_p = N_p \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \omega \quad (3.14)$$

Teniendo en cuenta que interesa sólo la magnitud se tiene que:

$$\epsilon_p = N_p \cdot \omega \cdot \Phi_m \quad (3.15)$$

Para el valor efectivo se tiene que:

$$\varepsilon = \frac{\epsilon}{\sqrt{2}} \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_p = \frac{N_p \cdot \omega \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_p = \frac{2\pi \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m \quad (3.18)$$

Y de igual forma se obtiene la f.e.m para el devanado secundario:

$$\varepsilon_s = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m \quad (3.19)$$

Dividiendo (3.18) y (3.19) se tiene lo siguiente:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m} \quad (3.20)$$

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (3.21)$$

La ecuación (3.21) es igual a la mencionada en el capítulo 1, es decir que cumple la relación de transformación, de lo que se deduce que el voltaje en una de las bobinas en función del flujo magnético y el número de vuelta está dado por:

$$V = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m \quad (3.22)$$

Recordando que  $\Phi_m$  es el valor máximo y despejándolo se obtiene:

$$\Phi_{max} = \frac{V}{4,44.f.N} \quad (3.23)$$

Lo que indica que el flujo para una frecuencia  $f$  dada y un número de vueltas determinado, varía en porción al voltaje aplicado  $V$ , lo que significa que el flujo debe permanecer constante.

Recordando que el flujo magnético está dado por:

$$\Phi_{max} = B.S_n \quad (3.24)$$

Donde:

$$\begin{aligned} B &= \text{Campo Magnético en Gauss} \\ S_n &= \text{Área Transversal del núcleo en cm}^2 \end{aligned}$$

Entonces la ecuación (3.23) queda como

$$V = 4,44.f.N.B.S_n \quad (3.25)$$

Para finalmente obtener la relación amperios sobre voltio así

$$\frac{N}{V} = \frac{1}{4,44.f.B.S_n} \quad (3.26)$$

Para utilizar la relación en función del campo expresado en Gauss y no alterar las demás unidades de las variables, se multiplica por el factor de conversión  $1 \times 10^8$ , resultando finalmente la siguiente relación:

$$\frac{N}{V} = \frac{1 \times 10^8}{4,44.f.B.S_n} \quad (3.27)$$

Donde:

$$\begin{aligned} NV &= \text{Relación de vueltas por voltio medido en vueltas/volio} \\ f &= \text{frecuencia en Hertz} \\ B &= \text{Campo Magnético en Gauss} \\ S_n &= \text{Área Transversal del núcleo en cm}^2 \end{aligned}$$

Esta ecuación se puede relacionar al transformador del presente trabajo, teniendo en cuenta que la frecuencia de trabajo es de 60Hz y utilizando un valor estándar para el

campo magnético de  $10000\text{Gauss}$  debido a la potencia de diseño del transformador. Se debe aclarar que es recomendable utilizar valores entre  $7000$  y  $9000\text{ Gauss}$  para evitar saturación del núcleo, con esto mayor generación de contenido armónico. Reemplazando estos valores se obtiene lo siguiente:

$$\frac{N}{V} = \frac{1 \times 10^8}{4,44 \times 60 \times 10000 \times S_n} \quad (3.28)$$

Obteniendo como resultado:

$$\frac{N}{V} = \frac{37,5}{S_n} \quad (3.29)$$

3. **Número de vueltas de los Conductores** Para determinar este valor, es necesario conocer previamente la relación de espiras por voltio, simplemente despejando  $N$  de la ecuación (3.27), se tiene la siguiente expresión:

$$N_p = \frac{1 \times 10^8 \times V_p}{4,44.f.B.S_n} \quad (3.30)$$

Análogamente se puede determinar las espiras en el secundario

$$N_s = \frac{1 \times 10^8.V_s}{4,44.f.B.S_n} \quad (3.31)$$

#### 4. Sección transversal del núcleo

Existe una forma que relaciona la potencia aparente del transformador con la sección núcleo, según lo plantea la siguiente ecuación:

$$S_n = K\sqrt{S} \quad (3.32)$$

Los valores de  $K$  se obtienen a partir de la información obtenida en la web y a través del proceso de aprendizaje y construcción de transformadores, según esto, se obtiene que para un valor de  $K = 1$ , el transformador presenta pequeñas vibraciones, mientras que para valores mayores ( $K = 1,5$ ), el transformador presentaba menos vibraciones, ocasionando menor calentamiento en el núcleo. Por esta razón se toma la constante  $K=1,5$  para generar menos calentamiento y vibraciones internas en el transformador.

El área transversal corresponde a las dimensiones del núcleo como lo muestra la figura 3.6:

$$S_n = a.b \quad (3.33)$$

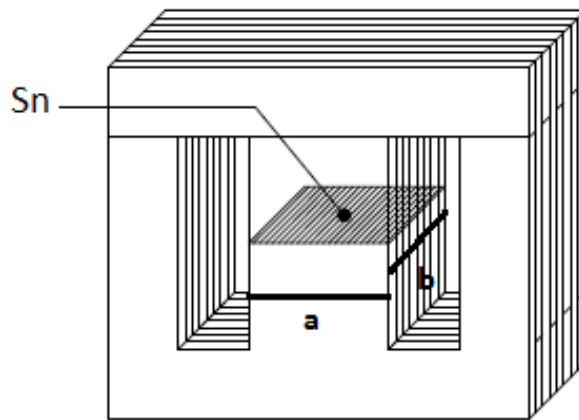


Figura 3.6: Sección Núcleo. [Elaboración Propia]

Conociendo la sección núcleo previamente,  $a$  y  $b$  pueden elegirse de tal forma que se ajuste a la potencia y al tamaño de diseño requeridos, por lo general ocurre que se deba escoger un valor normalizado para  $a$ , determinándose  $b$ .

#### 5. Elección del Carrete

Según [11] el alambre de los bobinados se arrolla sobre un carrete de material aislante, el cual puede elaborarse con cartón presphan, debido a que las dimensiones del transformador no son estándar, se debe elaborar un carrete del tamaño correcto para el núcleo del transformador, el cual es mostrado en detalle en el 4.

#### 3.4.1.4. Comprobación de Cálculos

A continuación se realizan los cálculos necesarios para el diseño del transformador.

1. **Sección Transversal del Núcleo:** Siendo necesaria una potencia nominal mayor y con un tamaño central ( $b$ ) de chapas en forma de EI de  $4,5\text{cm}$ , se determina la altura del núcleo con ayuda de (3.33) se obtiene lo siguiente:

$$S_n = k\sqrt{S} \quad (3.34)$$

$$S_n = 1,5\sqrt{62} = 11,81\text{cm}^2 \quad (3.35)$$

Despejando  $a$  y con un valor de  $K = 1,5$  se obtiene:

$$11,81 = 4,5 \times a \quad (3.36)$$

$$a = \frac{11,81}{4,5} = 2,6cm \quad (3.37)$$

## 2. Número de vueltas por voltio:

Reemplazando  $S_n$  en la ecuación (3.29) se obtiene que:

$$\frac{N}{V} = \frac{37,5}{11,81cm^2} \quad (3.38)$$

Resultando:

$$\frac{N}{V} \approx 3,1 \quad (3.39)$$

## 3. Número de vueltas de los Conductores:

De las ecuaciones (3.40) y (3.42) se obtiene lo siguiente:

$$N_p = \frac{1 \times 10^8 \times 120}{4.44 \times 60 \times 10000 \times 12,16} \quad (3.40)$$

Obteniendo

$$N_p = 370,43 \approx 371 \text{ espiras} \quad (3.41)$$

Análogamente se determina las espiras en el secundario, obteniéndose:

$$N_s = 1,54 \approx 1,6 \text{ espiras} \quad (3.42)$$

## 4. Sección de conductores primario y secundario:

De la ecuación (3.5) se determina el calibre de cada conductor.

Reemplazando se tiene:

$$S_{c_p} = \frac{I_p}{J} \quad (3.43)$$

Como anteriormente se planteó que la corriente máxima del primario era de aproxi-

madamente  $50mA$  y tomando  $J = 3$  como valor estándar, se obtiene que:

$$S_{c_p} = \frac{50m}{3} \quad (3.44)$$

$$S_{c_p} \approx 0,016mm^2 \quad (3.45)$$

Este valor según la tabla AWG del [Anexo D] corresponde a un calibre número 35.

Para la sección de los secundarios se tiene que:

$$S_{c_s1} = \frac{40A}{3} \quad (3.46)$$

$$S_{c_s1} = 13,3mm^2 \quad (3.47)$$

Lo que corresponde a un calibre número 6.

### 5. Eleccion del Carrete

Debido a que no es posible encontrar el tamaño necesario según los valores estándares para carretes, se procede a la construcción de éste y se presenta en el capítulo 4.

### 3.4.2. Banco de Cargas

Para el suministro de corriente se tienen 3 cargas resistivas puras con el fin de suministrar 3 valores diferentes de corriente, el valor de cada carga es encontrado de acuerdo al amperaje que se quiere suministrar a través de la ley de ohm, ya que el voltaje será de un valor constante. Para el diseño, se tiene en cuenta los valores establecidos en el documento de requerimientos planteado por la IR y el voltaje con el que se diseñó el bobinado de alta capacidad de corriente. En la figura 3.7 se muestran las 3 diferentes cargas con los valores calculados para obtener la corriente requerida.

Donde:

Voltaje Bobinado de Alta Corriente	=	0,5v
Valores de Corriente	=	5, 10/15 y 40Av
Valor de la carga $R_{L1}$	=	0,1 $\Omega$
Para la carga $R_{L2}$	=	0,033 $\Omega$
Para la carga $R_{L3}$	=	0,0125 $\Omega$

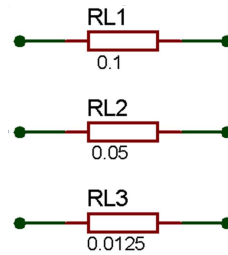


Figura 3.7: Valores de cargas correspondientes a cada salida.  
[Fuente: Elaboración Propia]

### 3.4.3. Supresor de Sobre-picos y Ruido Transitorio

El presente supresor es un circuito protector contra sobretensiones transitorias las cuales pueden alcanzar valores de cientos de voltios y una duración de milisegundos, pueden ser originados por fenómenos atmosféricos o por conmutaciones en la red, lo cual causa daños o inclusive destrucción de los equipos conectados a la red e interrupción del servicio.

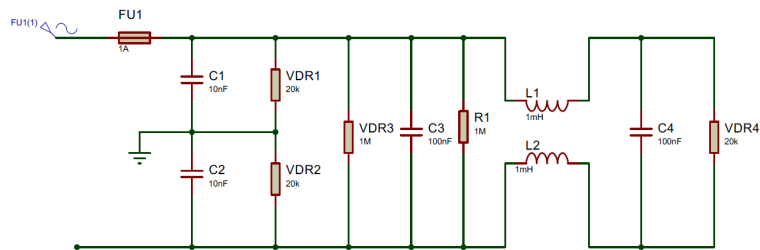


Figura 3.8: Filtro supresor de transitorios de corriente alterna.  
[Fuente: <http://www.qsl.net/cx1ddr/filtros/filtros.html> ]

El circuito protege a los demás dispositivos eléctricos contra parásitos, picos de tensión y transitorios en modo diferencial y común. En modo diferencial se tiene las redes  $C_2$  y  $C_3$  las cuales ponen a tierra las corrientes parásitas asimétricas, y  $VDR_1$ ,  $VDR_2$  los posibles



transitorios. Los condensadores  $C_1$ ,  $C_4$  y varistores VDR3, VDR4 forman parte de la red en modo común y suprimen los parásitos y transitorios simétricos.

La resistencia  $R_1$  se encarga de descargar los condensadores cuando falta la tensión de red, evitando posibles descargas accidentales. La inductancia del transformador  $T_1$  puede variar desde  $1mH$  a  $3mH$ .

### 3.4.4. Control y Sincronización

Debido al proceso de dosificación de energía que se debe realizar en la verificación en sitio de medidores residenciales, es necesario el diseño adecuado de un subsistema que permita el control del suministro de la fuente AC a través de una señal lógica que le es enviada en el momento que el operario desee esta función del SVIMD, por lo tanto como se mencionó en el capítulo anterior el dispositivo más adecuado para llevar a cabo esta función es el optoacoplador, este dispositivo es un aislador acoplado ópticamente el cual internamente cuenta con un dispositivo de emisión (led) y recepción (fototriac), este último actúa como interruptor que se activa cuando se satura mediante la luz emitida por el diodo led. En la figura 3.9 se presenta el arreglo circuital el cual es capaz de controlar el suministro de energía a partir de una señal lógica. Este dispositivo se interconecta con el microcontrolador que se encuentra en el medidor patrón diseñado en [5], y con el transformador que hace parte de la fuente A.C.

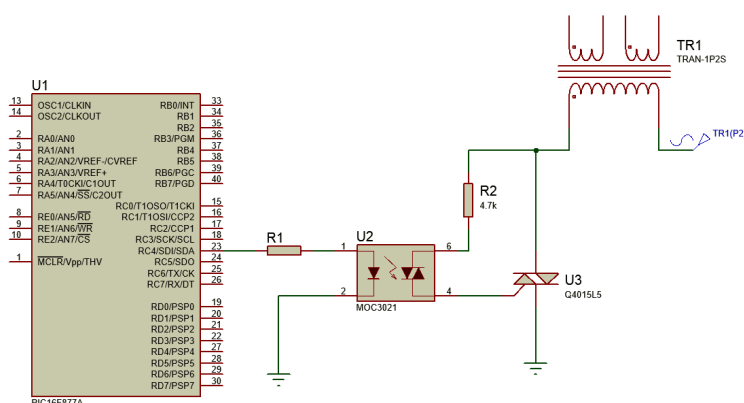


Figura 3.9: Circuito de control de suministro de energía.  
[Fuente: Elaboración Propia]

### 3.4.5. Filtro de Armónicos

En la captura de requerimientos que se realizó gracias a la IR, es posible destacar que uno de los requerimientos de prioridad es que la señal de salida sea lo más posible semejante a una onda sinusoidal pura, por esta razón es de gran importancia diseñar un sistema que sea capaz de eliminar o reducir el contenido armónico de la señal de salida del sistema total. Llevando esta problemática a la realidad se tiene que la norma IEEE 519 “Prácticas Recomendadas y Requisitos para el control de armónicos En Sistemas de Energía Eléctrica” [Anexo C], la cual establece algunos niveles aceptables de contenido armónico dependiendo del tipo de servicio que el sistema brinda.

Teniendo en cuenta estas recomendaciones y el sistema a diseñar e implementar, se concluyó que la solución más factible son los filtros pasivos, por ello se diseñan 3 filtros de ajuste simple sintonizados a frecuencias de 180, 300 y 420 Hertz, estos filtros se diseñan sintonizados a estas frecuencias ya que corresponden a señales correspondientes al tercer, quinto y séptimo armónico que normalmente son los que más afectan a la señal, según la norma IEEE 519. Para el diseño de estos filtros se realizaron los cálculos pertinentes presentados a continuación:

Para una circuito RLC serie se tiene una impedancia igual a:

$$Z = R + X_l + X_c \quad (3.48)$$

$$X_l = j\omega.L \quad (3.49)$$

$$X_c = \frac{1}{j\omega.C} \quad (3.50)$$

Donde:

$X_l$  : Reactancia Inductiva en Ohmios.

$X_c$  : Reactancia Capacitiva en Ohmios.

Cuando el filtro se encuentra en resonancia significa que la reactancia inductiva y capacitiva son iguales por lo tanto la ecuación (3.48) se convierte en  $Z = R$ . Además:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.51)$$

Donde:

$\omega_n$  : Frecuencia angular de sintonización en radianes.

$$X_0 = \omega_n \cdot L = \frac{1}{\omega_n \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.52)$$

$$X_l = \frac{X_c}{n^2} \quad (3.53)$$

$n$  : Número de armónico.

Teniendo  $X_0$  como la reactancia del inductor o capacitor en la frecuencia de sintonización, por lo tanto

$$n = \frac{f_n}{f}$$

Donde:

$f_n$  : Frecuencia angular de sintonización en grados.

$f$  : Frecuencia del sistema.

El factor de calidad en el filtro sintonizado, está definido como:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (3.54)$$

Debido a que se van a diseñar tres filtros de ajuste simple sintonizados para mitigar el tercer, quinto y séptimo armónico, la potencia reactiva se divide entre el número de filtros, por lo que se toma el mismo valor de capacitancia para las tres ramas RLC.

$$c_1 = c_2 = c_3 = 97 \mu\text{faradios} \quad (3.55)$$

De la ecuación (3.50) se tiene que:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f.c} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 97\mu} = 27,34\Omega \quad (3.56)$$

Ahora se halla la reactancia inductiva para sintonizar cada rama del filtro.

De la ecuación (3.49) se tiene lo siguiente:

$$X_{l3} = \frac{27,34\mu f}{3^2} = 3,03\Omega \quad (3.57)$$

$$X_{l5} = \frac{27,34\mu f}{5^2} = 1,093\Omega \quad (3.58)$$

$$X_{l7} = \frac{27,34\mu f}{7^2} = 0,558\Omega \quad (3.59)$$

De la ecuación (3.53) se tiene que:

$$L_3 = \frac{3,03}{2\pi \times 60} = 8,05mh \quad (3.60)$$

$$L_5 = \frac{1,093}{2\pi \times 60} = 2,90mh \quad (3.61)$$

$$L_7 = \frac{0,558}{2\pi \times 60} = 1,48mh \quad (3.62)$$

A partir de la ecuación (3.52) se calcula la reactancia del filtro cuando este entra en resonancia.

$$X_{03} = \sqrt{\frac{8,05}{97\mu f}} = 9,109\Omega \quad (3.63)$$

$$X_{05} = \sqrt{\frac{2,95}{97\mu f}} = 5,467\Omega \quad (3.64)$$

$$X_{07} = \sqrt{\frac{1,40}{97\mu f}} = 3,9\Omega \quad (3.65)$$

Ahora de la ecuación (3.54) se obtiene el valor de  $R$  utilizando un factor de calidad del filtro de mil para los tres arreglos, debido a que la impedancia del filtro en resonancia debe ser menor al de la carga.

$$R_1 = \frac{9,109}{1000} = 9,1m\Omega \quad (3.66)$$

$$R_2 = \frac{5,467}{1000} = 5,46m\Omega \quad (3.67)$$

$$R_3 = \frac{3,9}{1000} = 3,9m\Omega \quad (3.68)$$

para verificar la frecuencia a la cual se encuentra resonando cada rama hace el siguiente cálculo:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} \quad (3.69)$$

Donde:

$f_r$  : Frecuencia de resonancia.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{8,05mh \times 97\mu faradios}} = 180,1Hz \quad (3.70)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{2,90mh \times 97\mu faradios}} = 300,07Hz \quad (3.71)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,48mh \times 97\mu faradios}} = 420,05Hz \quad (3.72)$$

De esta forma se puede comprobar que los filtros se encuentran correctamente diseñados.

A partir de los cálculos anteriores se encontraron los valores de los elementos que constituyen cada uno de los filtros y con los cuales se pretende mitigar el efecto producido por el 3, 5 y 7 armónico. En la figura 3.10 se observa el diseño de los filtros y la frecuencia a la cual están sintonizados cada uno.

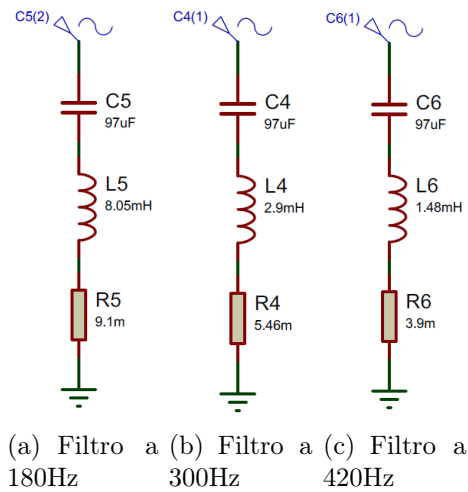


Figura 3.10: Filtros pasivos sintonizados a determinada frecuencia. [Tomado de: [11]]

La conexión indicada en la figura 3.11 muestra que los filtros se conectan antes de la carga correspondiente a 40 amperios, esto debido a que es la carga que presenta mayor porcentaje de armónicos en su señal.

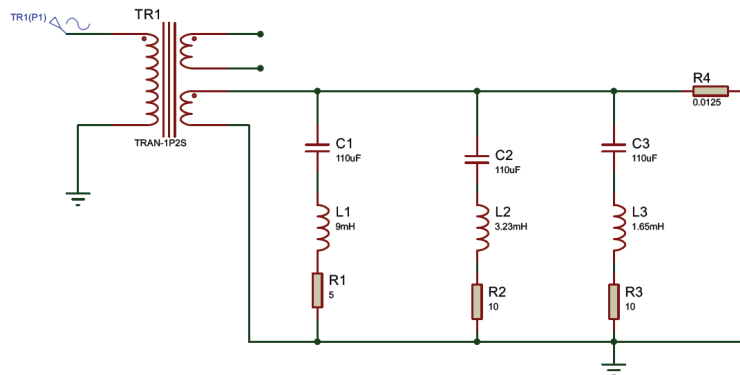


Figura 3.11: Conexión filtros pasivos. [Fuente: Elaboración Propia]

Finalizado el diseño de cada uno de los subsistemas se da por concluido el diseño total de una fuente de corriente alterna para el proceso de verificación en sitio de medidores residenciales monofásicos, cumpliendo así con el primer objetivo de presente trabajo.

Por tanto en este capítulo se presentó la solución electrónica a partir de un análisis de cada uno de los elementos considerados, en el siguiente capítulo se estudia cada una de las especificaciones de los elementos seleccionados para posteriormente proceder con su debida implementación y conexión.

# Capítulo 4

## Descripción de los componentes e Implementación del Sistema

En este capítulo se presenta la implementación y la interconexión de los dispositivos, para esto se procede a estudiar cada uno de los elementos seleccionados para comprender la forma en como estos deben ser conectados e implementados.

### 4.1. Implementación

#### 4.1.1. Transformador de corriente y voltaje

Para implementar este transformador se parte del diseño y los valores obtenidos para la construcción del mismo. Se comienza por embobinar el devanado primario y luego cada uno de los devanados secundarios, es importante aclarar que la construcción de un transformador depende de varios factores, por esto y con el fin de un mejor entendimiento se plantean los materiales, el desarrollo y pruebas que verifican la correcta implementación.

Es importante resaltar que fue necesario un estudio completo para la construcción de transformadores monofásicos, en el documento solo se muestran algunas fotos de los diferentes procesos de construcción y en la figura 4.1 se muestra el transformador que se construyó previamente al utilizado en el sistema suministrador, esto debido a una caída de tensión presentada en el devanado secundario de relación 1:1 cuando se conecta una

carga en el otro devanado del transformador, además de esto, no se obtuvo el valor deseado de corriente debido al aumento de resistencia por parte de los cables y conductores que se usaron para construir la carga, con estos resultados se decidió construir otro transformador de mayor potencia para evitar la caída de voltaje en el devanado secundario 1 y con un tap en el otro devanado para obtener una salida extra de mayor voltaje, para compensar el aumento de la resistencia y de esta forma desarrollar un transformador que cumpliera con las características de fase, forma de onda y voltajes necesarios para el correcto funcionamiento de la fuente.



Figura 4.1: Transformador construido previamente al final. [Fuente: [11]]

#### 4.1.1.1. Materiales

1. *Chapa Magnética:* Para los transformadores que trabajan en frecuencias bajas se recomienda utilizar un núcleo compuesto de chapas magnéticas de acero al silicio y para frecuencias altas, núcleos de ferrita, para el presente caso se trabaja con la frecuencia de la red eléctrica, por lo tanto el núcleo se selecciona de chapas magnéticas de acero al silicio, las cuales se disponen alternadas de forma que el conjunto quede sólidamente unido. Las chapas del transformador son de grano no orientado indicando buena calidad y fueron adquiridas por parte de la empresa Frana International S.A.S.

En las esquinas de las chapas apiladas se realizan orificios por los que se hace pasar tornillos roscados con su debido aislamiento, en los que se disponen tuercas que permiten una unión firme y sólida de las chapas, además aplicando un baño de barniz dieléctrico se refuerza la unión ayudando a conformar un núcleo sólido. En la figura 4.2 se muestra las chapas escogidas para la construcción del transformador y en la Tabla 4.1 se muestra las dimensiones de dichas chapas [11].



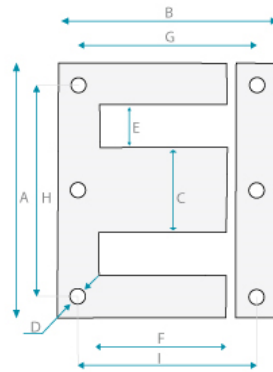


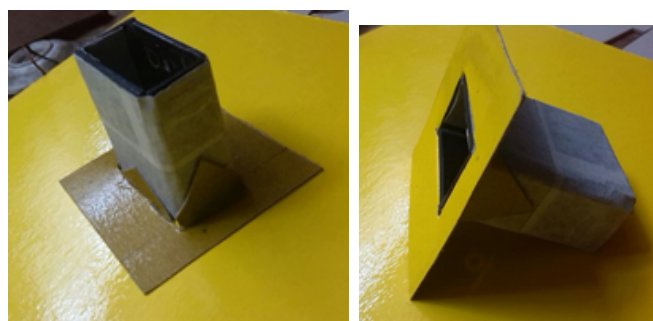
Figura 4.2: Chapas magnéticas del transformador.

[Fuente: <http://www.franainternational.com/es/laminaciones-ei/monofasico.html>]

A	B	C	D	E	F	G
135	112,5	45	7,5	22,5	67,5	90

Tabla 4.1: Dimensiones de las chapas.

2. *Formaleta*: Es un carrete cuadrado que se usa como soporte para enrollar el alambre y evitar que se disperse, ayudando al buen encajamiento del alambre, se consiguen en plástico, cartón y fibra de vidrio. La formaleta debe encajar de forma justa al núcleo del transformador, de lo contrario el dispositivo presentaría vibraciones al momento de energizarlo. Debido a que no fue posible adquirir una formaleta acorde a las dimensiones del núcleo se contruye una utilizando cartón presphan de 0,1 mm, tal como se muestra en la figura 4.3 se muestra la construcción de la formaleta.



(a)

(b)

Figura 4.3: Formaleta para el bobinado del transformador.[Fuente: Elaboración Propia]

3. *Hilo de Cobre*: Es un elemento fundamental en la fabricación de transformadores, se debe tener en cuenta el recocido del hilo ya que éste debe permitir ser manipulado fácilmente [11]. Las Tablas que relacionan los hilos de cobre más utilizados para la construcción de pequeños transformadores, con indicación de sus características principales se encuentran en [Anexo D].
4. *Aislamientos*: Los aislantes eléctricos utilizados normalmente en la construcción de pequeños transformadores no son muchos, pero son muy importantes, ya que, un 95% de las averías que se producen en los transformadores son debidas a fallos de aislamiento. Un aislante falla cuando, por las razones que sean, la diferencia de tensión existente en los dos elementos que el aislante separa logra perforarlo, poniendo en contacto directo ambos elementos [11].

Los materiales aislantes citados en la Tabla 4.2 se utilizan para el aislamiento entre capas, para el aislamiento entre espiras basta con el barniz aislante con el que se baña el hilo conductor, por ser la tensión existente entre espira y espira de pequeño valor. Para el caso del transformador se usó cartón presphan de 0,05 mm para aislar el devanado secundario del primario.

<b>Aislante</b>	<b>Grueso</b>	<b>Tensión de perforación</b>
Papel vidrio	0,03	650
Papel vidrio	0,04	800
Papel aceitado	0,05	1000
Tela aceitada	0,05	3100
Cartón presphan	0,05	3200
Cartón presphan	0,1	6000
Cartón presphan	0,12	7700
Mica	0,05	8000
Mica pura	0,05	12500

Tabla 4.2: Aislantes utilizados en transformadores.

#### 4.1.1.2. Construcción y Desarrollo

Con la formaleta construida se procede a embobinar el devanado primario, no sin antes asegurar el alambre y dejar dentro de la formaleta al menos un centímetro de cable, que va al exterior del transformador para que al enrollar el cable éste ayude a asegurarlo. El cable que va al exterior se suelda con el alambre esmaltado y se aísla para evitar daños por corto circuito; para este aislamiento se utiliza espagueti termoencogible de 3 milímetros.

Posteriormente se procede a enrollar el alambre para el devanado primario, de abajo hacia arriba, de izquierda a derecha, apretando muy bien y teniendo cuidado de no dejar espacios entre las vueltas de alambre. Para enrollar el alambre se usa una máquina mostrada en la figura 4.4, esta máquina consta de una estructura en madera como se observa en la parte a) a la cual se sujetan 2 tornillos, uno de estos tiene una manivela ligada por la cual se incrusta la formaleta y en el otro tornillo se pone el rollo de alambre como se observa en la parte b).

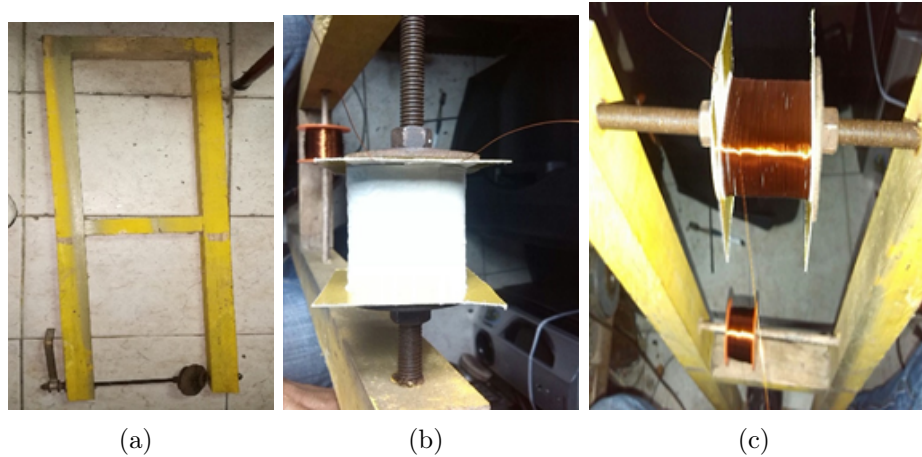


Figura 4.4: Máquina Casera para Embobinar.[Fuente: Elaboración Propia]

De igual forma se embobina el devanado secundario de relación 1:1, se debe tener en cuenta que los devanados deben estar totalmente aislados de lo contrario presentaría corto circuito, para esto se utiliza cartón presphan de 0,05mm de espesor y cinta de enmascarar.

En la figura 4.5 se puede observar el transformador en su totalidad, las chapas se encuentran alineadas dentro de la formaleta y se ajustan de tal modo que sea compacto, en la parte a) se muestra la vista frontal correspondiente a las entradas del transformador y una lámina de cobre que abraza a todo el transformador, esto con el fin de evitar dispersión del flujo magnético, los cables rojos junto con el negro representan la entrada del transformador (devanado primario) y el cable verde está soldado a una lámina de cobre sujeta entre los devandos primario y secundario y representa la tierra física del transformador.

En la parte b) se observa la vista posterior correspondiente a la salida del transformador, los cables de color azul representan la salida del devanado secundario 1, los cables negros y blanco son las salidas de alta capacidad de corriente con un tap (cable blanco) que

aumenta la relación de vueltas, aumentando así el voltaje. El cable que se encuentra en-vuelto en el espagueti de fibra de vidrio y tiene un terminal es el común para el devanado de alta capacidad de corriente.

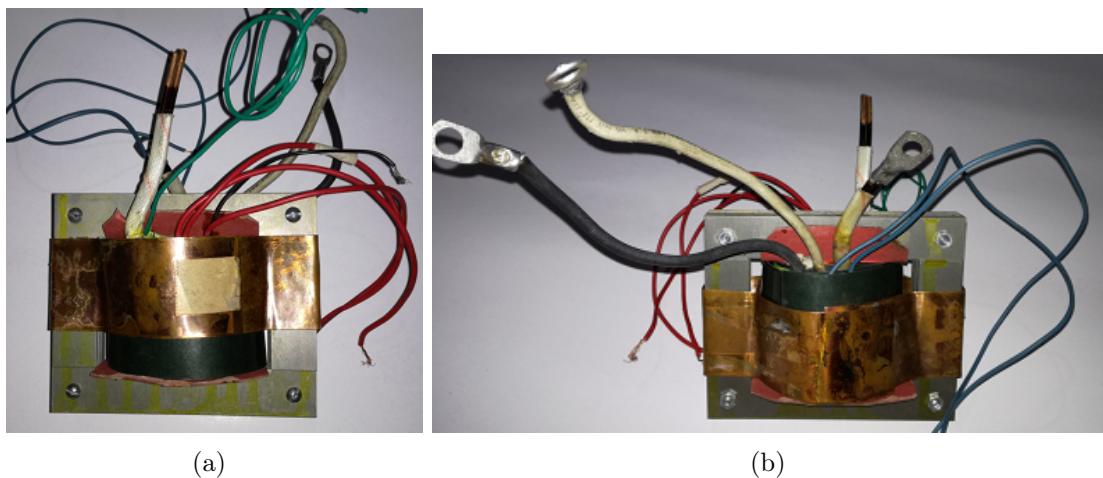


Figura 4.5: Transformador Final.[Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.1.1.3. Pruebas del Transformador

Posterior a la implementación se realizan pruebas de funcionamiento para cada devanado en circuito abierto, estos valores son mostrados en la Tabla 4.3.

Hora	Voltaje Red (V)	Devanado Secundario 1	Devanado Secundario 2	Devanado Secundario 3
9:00 AM	125,6	130,8	0,81	0,54
4:00 PM	121,3	126,7	0,78	0,52
10:00 PM	126,5	132,1	0,82	0,55

Tabla 4.3: Voltajes en el transformador sin carga a diferente hora.

Con ayuda del osciloscopio se observa el comportamiento de cada una de las señales obtenidas en el devanado secundario, donde se verificó que las dos señales se encontraban en fase, tal como lo muestra la figura 4.6, en la cual se aprecian las señales de voltajes en circuito abierto de los devanados 1 y 2 y en la figura 4.7 las señales de voltaje para los devanados 1 y 3, al lado derecho se aprecia la imagen con su correspondiente “curva de Lissajous”, esta curva es la gráfica del sistema de ecuaciones paramétricas correspondientes a la superposición de movimientos armónicos simples en direcciones perpendiculares, la trayectoria resultante sirve para determinar el desfase existente entre dos señales distintas

de la misma frecuencia. Mediante el uso del osciloscopio y el modo de deflexión exterior (XY), se forma en la pantalla una “curva de Lissajous”. Para este caso la figura obtenida, indica que el desfase existente es de 0 grados [14].

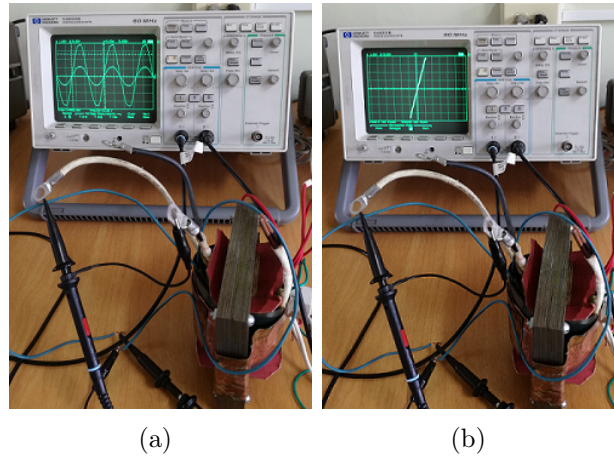


Figura 4.6: Señales de voltaje de los devanados secundarios 1 y 2.  
[Fuente: Elaboración Propia]

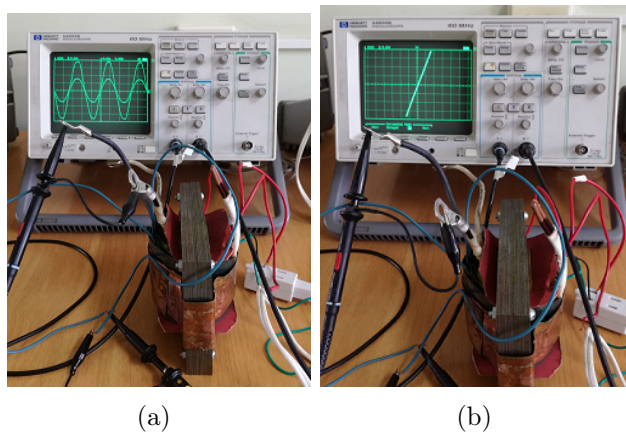


Figura 4.7: Señales de voltaje de los devanados secundarios 1 y 3.  
[Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.1.1.4. Características Técnicas

1. *Potencia Nominal*: Es aquella que puede obtenerse en el secundario sin sobrecalentamientos peligrosos y en servicio continuo. Para transformadores con más de un secundario la potencia nominal será igual a la suma aritmética de las potencias individuales de cada secundario, esto es:

$$P_n = P_{s1} + P_{s2} \quad (4.1)$$

$$P_n = 120V \times 0,05A + 0,7V \times 40A = 34VA \quad (4.2)$$

El valor del voltaje de 0,7 voltios de la ecuación anterior se debe a la caída de tensión que se presenta en el transformador a carga máxima.

2. *Pérdidas de Potencia:* Existen varios tipos de pérdidas como las pérdidas en vacío, las cuales se producen en vacío y se mantienen inalterables en carga. Las pérdidas por carga dependen esencialmente de la carga conectada al transformador. Se tiene entonces que las pérdidas en vacío, son producidas debido a la histéresis y a las corrientes de Foucault, es decir pérdidas en el hierro. Las pérdidas por carga se producen en el devanado primario y secundario del transformador por efecto Joule y también se denominan pérdidas en el cobre su valor se expresa en la siguiente relación:

$$P_c = I_p^2 \cdot R_p + I_s^2 \cdot R_s \quad (4.3)$$

Para el presente trabajo se tiene dos devanados, luego las pérdidas en el cobre están como  $P_{c1}$  para el devanado 1 y  $P_{c2}$  para el devanado 2, entonces se tiene:

$$P_{c1} = 0,05^2 \times 0,2 + 0^2 \times 0,2 = 0,0005w \quad (4.4)$$

$$P_{c2} = 0,05^2 \times 0,2 + 40^2 \times 0,0001 = 0,1605w \quad (4.5)$$

Se aproxima que el cable conductor tiene una resistencia mucho menor al valor de la carga. Durante el funcionamiento en carga del transformador aparecen simultáneamente las pérdidas en vacío y las pérdidas debido a la carga, de forma que las pérdidas totales valen:

$$P_p = P_v + P_c \quad (4.6)$$

Para determinar la potencia en el hierro se debe tener en cuenta que de la potencia aplicada al primario (potencia total) una parte se perderá en el hierro y otra en el cobre, el resto será la potencia aplicada en el secundario (potencia útil), esto es:

$$P_1 = P_c + P_{fe} + P_2 \quad (4.7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_1 & : \text{ potencia aplicada} = 0,3A \times 120V = 36W \\ P_2 & : \text{ Potencia Útil} = 34,4W \end{aligned}$$

Luego:

$$P_{fe} = P_1 - P_2 - P_c \quad (4.8)$$

Tomando  $P_{c2}$  se tiene:

$$P_{fe} = 36 - 34,4 - 0,1605w = 1,43W \quad (4.9)$$

Luego:

$$P_p = 36 - 34,4 - 0,1605w = 1,43W \quad (4.10)$$

Entonces despejando  $P_p$  de (4.6) se tiene que:

$$P_p = 0,1605w + 1,43w = 1,59w \quad (4.11)$$

3. *Rendimiento*: El rendimiento de un transformador, como el de cualquier dispositivo eléctrico, está definido por la igualdad:

$$\eta = \frac{\text{Potencia - cedida}}{\text{Potencia - absorbida}} \quad (4.12)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P & : \text{ Potencia Útil} \\ P_A & : \text{ Potencia absorbida} \\ P_L & : \text{ Potencia perdida} \end{aligned}$$

Luego se puede expresar el rendimiento como:

$$\eta = \frac{P}{P_A} = \frac{P}{P + P_p} \quad (4.13)$$

Para el transformador del presente trabajo se tiene que:

$$P = 34,4w \quad (4.14)$$

$$P_A = P + P_p = 34,4w + 1,59w = 35,99w \quad (4.15)$$

Luego:

$$\eta = \frac{34,4}{35,99} = 0,955 \quad (4.16)$$

## 4.1.2. Banco de Cargas

### 4.1.2.1. Desarrollo

Para la implementación del banco de cargas se debe tener en cuenta el voltaje suministrado por el bobinado de alta capacidad de corriente y la resistencia que implica los conectores y cable de transmisión de energía, debido a esto se realizó una modificación en el diseño de las cargas; por lo que se tiene lo siguiente:

- Voltaje suministrado bobinado 2 y 3 = 0,5 y 0,8 voltios respectivamente.
- Valores requeridos de corriente: 5 - 15 y 40 Amperios.

Haciendo uso de la Ley de Ohm se tiene que:

- Para la carga RL1:  $I = V/R$ ,  $5A = 0,5/R$ ,  $R = 0,1\Omega$ .
- Para la carga RL2:  $I = V/R$ ,  $15A = 0,5/R$ ,  $R = 0,025\Omega$ .
- Para la carga RL3:  $I = V/R$ ,  $40A = 0,7/R$ ,  $R = 0,0175\Omega$ .

De esto se concluye que los valores de impedancia son muy pequeños, lo que dificulta su adquisición; entre los valores comerciales se encontraron de 0,1 a 5w y 20w, por lo tanto es posible obtener la carga  $R_L1$  y con arreglos en paralelo se pueden obtener los demás valores de impedancias a una mayor capacidad de disipación de potencia, ya que si se conectan 2 resistencias en paralelo, la tensión es común para las dos, la resistencia es fija



y en ese momento sólo puede variar la corriente que pasa a través del conjunto, como la resistencia es menor entonces la corriente será mayor, aumentando a su vez la potencia de disipación de esta.



Figura 4.8: Resistencias utilizadas para implementar el banco de cargas. [Fuente: Elaboración Propia]

En la imagen 4.8 se observa el tipo de carga a utilizar para implementar el banco de cargas y en las imágenes 4.9, 4.10 y 4.11 se observa el arreglo de cada carga, cabe mencionar que las resistencias de cada carga son de precisión y puramente resistivas y su ficha técnica se encuentra en [Anexo C]; debido que la superficie del componente no es suficiente para mantener el flujo térmico necesario, se debe ampliar la zona de radiación mediante disipadores, sobre todo para las cargas de 40 y 15 amperios las cuales presentan mayor disipación de potencia, las resistencias se fijan al disipador mediante una lámina metálica que la sujeta con ayuda de tornillos y grasa disipadora, la cual aparte de fijar, ayuda a mejorar la disipación de calor entre las resistencias y el disipador.



Figura 4.9: Carga 1 con disipador. [Fuente: Elaboración Propia]



Figura 4.10: Carga 2 con disipador. [Fuente: Elaboración Propia]

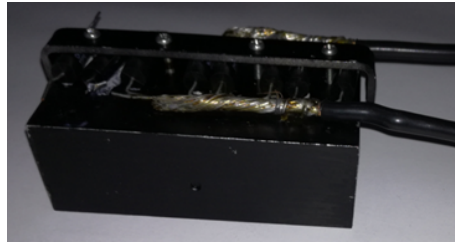


Figura 4.11: Carga 3 con disipador. [Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.1.2.2. Pruebas

Se realizaron pruebas con las 3 cargas, verificando la forma de la señal. En la figura 4.12 se observa las 3 señales de voltaje con su respectiva carga.

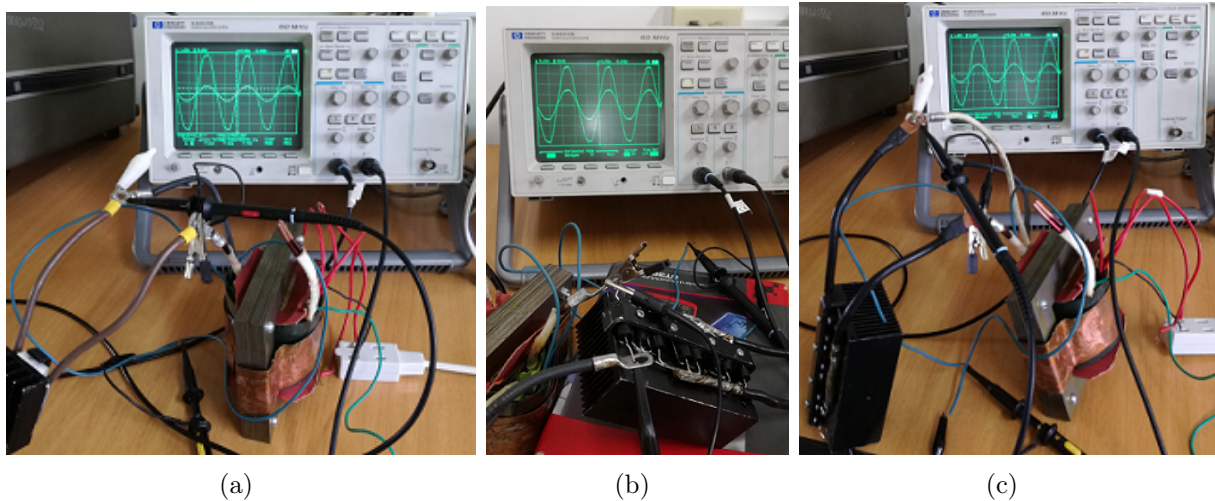


Figura 4.12: Formas de voltaje en cada carga.  
[Fuente: Elaboración Propia]

Cabe mencionar que para las cargas 1 y 2 (5 y 15 amperios) se usará sólo la salida del devanado 3 y para la carga 3 (40 amperios) se usará la salida del devanado 2, esto se debe a que al conectar la carga de 40 amperios al devanado 3, se produce una caída de tensión, tal que no es la suficiente para generar la corriente necesaria de 40 amperios, por lo que fue necesario ajustar esta carga a la salida de mayor de voltaje (devanado 2). Los valores obtenidos en la tabla 4.4 fueron tomados durante determinado tiempo y en diferentes días.

Tiempo (min)	Voltaje Red (V)	Carga	Devanado Secundario 1	Devanado S. 2	Devanado S. 3	Corriente (A)
0	125,6	1	130,7	0,81	0,52	5,26
	124,3	2	129,1	0,8	0,51	15,84
	125,8	3	130,8	0,71	0,51	40,05
5	125,5	1	129,7	0,81	0,52	5,25
	124,7	2	130,3	0,80	0,51	15,76
	126,3	3	128,2	0,72	0,51	40,18
10	125,7	1	130,7	0,81	0,53	5,32
	125,2	2	130,5	0,81	0,52	14,76
	128,2	3	127,8	0,71	0,54	40,85
15	125,3	1	130,7	0,81	0,52	5,24
	124,8	2	130,3	0,80	0,51	14,92
	126,3	3	127,9	0,72	0,51	39,86

Tabla 4.4: Valores en el transformador con carga a través del tiempo.

### 4.1.3. Sistemas implementados sobre PCB

Para los sistemas que requieren ser implementados sobre una placa de circuito impreso (PCB) se debe tener en cuenta las normas y estándares usados para el correcto diseño de circuitos PCB, en especial se sugieren las normas establecidas en [5] en el capítulo 5, donde se describe algunas recomendaciones generales al momento de implementar un circuito esquemático. Cabe mencionar que existen centros para capacitar personal especializado en el diseño de circuitos sobre PCB.

Existen diferentes herramientas y software que ofrecen esta función, como EAGLE, PCB-wizard, PCB123 y Altium Designer. En el presente proyecto se diseñó el circuito impreso del supresor de sobre-tensiones sobre la herramienta EAGLE gracias a las facilidades que ofrece.

#### 4.1.3.1. Supresor de sobre-picos y ruido transitorio

Para la implementación se comienza por el circuito esquemático mostrado en la figura 4.13 parte a). Después hacer el diseño de la tarjeta PCB se imprime y finalmente se montan los elementos sobre la PCB.

En la figura 4.13 parte b), se observa el circuito montado sobre la PCB, la entrada está al lado izquierdo y la salida en el lado derecho de la imagen. Como recomendación no se

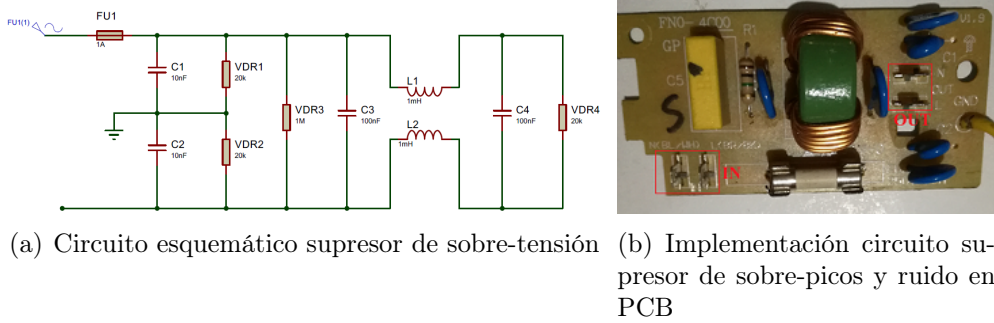


Figura 4.13: Señales de voltaje y figura de *Lissajous* del circuito supresor de picos. [Fuente: Elaboración Propia]

debe incrementar los valores de los condensadores C2 y C3, ya que por ellos se deriva una pequeña corriente a tierra. Para construir las bobinas se utiliza un núcleo toroidal.

Para este circuito también se realizaron las pruebas mostradas en la figura 4.14 para verificar el desfase y la forma de la señal en la entrada y salida del circuito, en este caso la señal de salida no presenta ruido ni deformaciones en la onda respecto a la entrada.

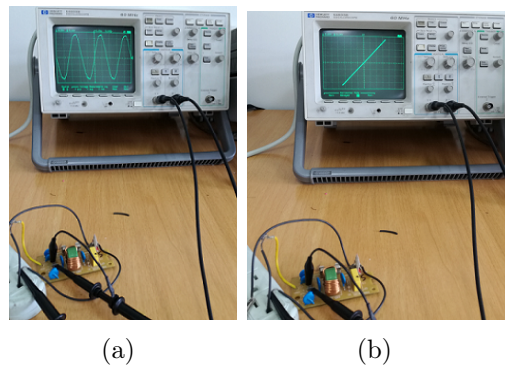


Figura 4.14: Señales de voltaje y figura de *Lissajous* del circuito supresor de picos. [Fuente: Elaboración Propia]

Aparte de este circuito de protección se tiene un filtro EMC para disminuir el ruido proveniente de la red eléctrica, el cual se muestra en la figura 4.15. Este filtro es de fácil adquisición en el comercio además de económico.

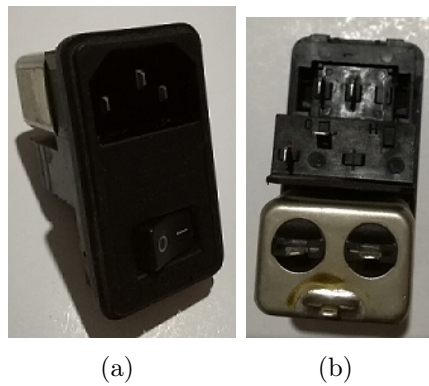


Figura 4.15: Filtro EMC.  
[Fuente: Elaboración Propia]

Las pruebas realizadas en este dispositivos se observan en la figura 4.16 y consisten en observar la forma de la señal y el desfase entre la señal de entrada y salida.

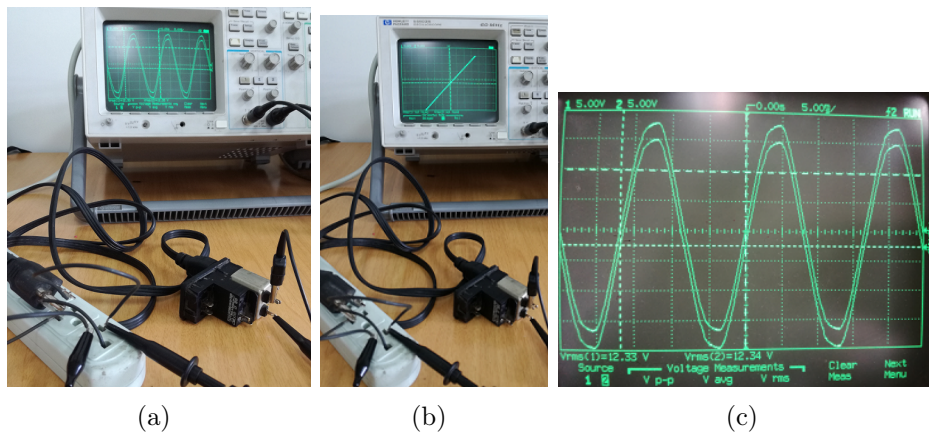


Figura 4.16: Señales de voltaje y figura de *Lissajous* del filtro EMC.  
[Fuente: Elaboración Propia]

Con lo anterior se comprueba que el circuito diseñado y el filtro EMC no afectan ni la amplitud ni la fase de la señal de entrada.

#### 4.1.3.2. Circuito de control y sincronización

Para la implementación de este subsistema se presentan los componentes necesarios y la forma en que estos se interconectan para llevar a cabo la función de control y sincronización al momento de realizar la prueba de dosificación de energía especificada en la NTC 5900.

1. *Materiales:*

- Moc 3021 (Optocacoplador)
- 1 resistencia 1k y 4,7k
- Q 4010 (Triac)
- Tarjeta PCB universal

2. *Desarrollo:*

Para el desarrollo se procede a montar los componentes sobre la PCB universal y teniendo en cuenta el diseño propuesto en el capítulo anterior se realizan las conexiones pertinentes para el correcto funcionamiento del subsistema. En la figura 4.17 se observa la implementación del subsistema de control, el cable amarillo y negro representan la entrada de voltaje directo, el cual se encuentra conectado en serie al interruptor según la figura 4.18.

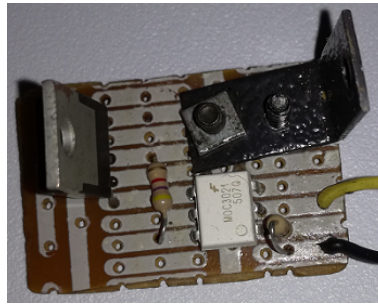


Figura 4.17: Circuito de sincronización implementado sobre PCB universal.

[Fuente: Elaboración Propia]

3. *Prueba:*

Para realizar la prueba del subsistema por separado se procede a montar el circuito de la figura 4.18 donde el pulsador representa el pulso D.C. del microcontrolador y mediante el cual se interrumpe el paso de corriente, de esta manera se verificó que el circuito propuesto cumple con lo que se requiere.

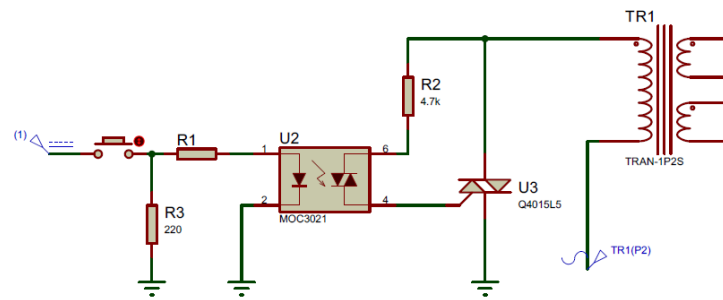


Figura 4.18: Esquema circuital del optoacoplador con pulsador.

[Fuente: Elaboración Propia]

En la figura 4.19 se muestra la prueba realizada en el sistema suministrador. En la parte a) se observa la presencia de voltaje en la salida de la fuente mientras no se oprime el botón, en la parte b) se observa que el voltaje en la salida cae a cero voltios cuando se mantiene oprimido el botón, de esta forma se compruebo que el circuito de control funciona de manera correcta.

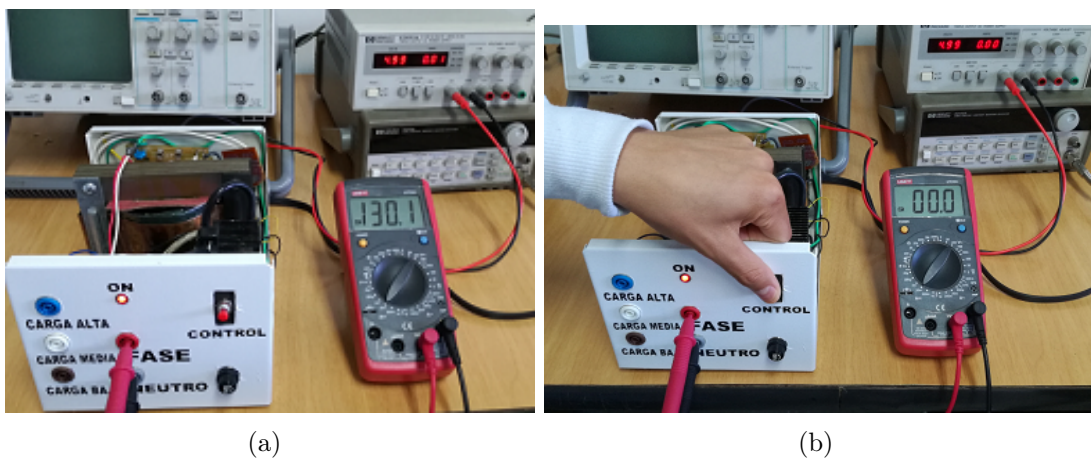


Figura 4.19: Prueba del circuito de control con la fuente suministradora.

[Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.1.3.3. Filtro supresor de Armónicos

Con los valores encontrados en el diseño matemático de los filtros de ajuste simple para la mitigación de armónicos se procede a la debida implementación. Para este proceso se deben tener en cuenta varios aspectos esenciales como: la realización de cada una de las

bobinas y el hecho de que el sistema trabaje con corriente alterna hace que los capacitores a usar sean no polar

1. *Materiales:*

**Bobinas:** Para la implementación de cada bobina se utilizó un alambre calibre 18 y 3 núcleos toroides sobre los cuales se embobina hasta llegar al valor que se requería, las mediciones de estos valores se realizaron con ayuda del medidor RLC marca PHILIPS modelo PM6303 del laboratorio de la universidad del cauca.

**Capacitores:** Para la implementación de cada filtro es necesario una capacitancia no polar la cual no presenta problemas para trabajar en corriente alterna, debido a que el valor requerido es de difícil adquisición, se recurre a la conexión en anti paralelo de dos capacitores electrolíticos y de esta forma volver este arreglo un capacitor no polar, a pesar de estar conformado por capacitores electrolíticos, por esta razón es necesario el uso de dos capacitores de  $220\mu H$  conectados en anti-paralelo, los cuales al medir su valor de capacitancia en el puente RLC marca PHILIPS referencia PM6303 del laboratorio de la universidad del cauca se obtuvo un valor de  $97\mu H$  según lo planteado en diseño del capítulo 3

2. *Desarrollo:*

En primer lugar se elaboraron cada una de las bobinas de manera correcta para posteriormente montarlas sobre una PCB universal junto con el arreglo de capacitores y la resistencia necesaria en cada rama, en la figura 4.20 se observa la implementación de estos.

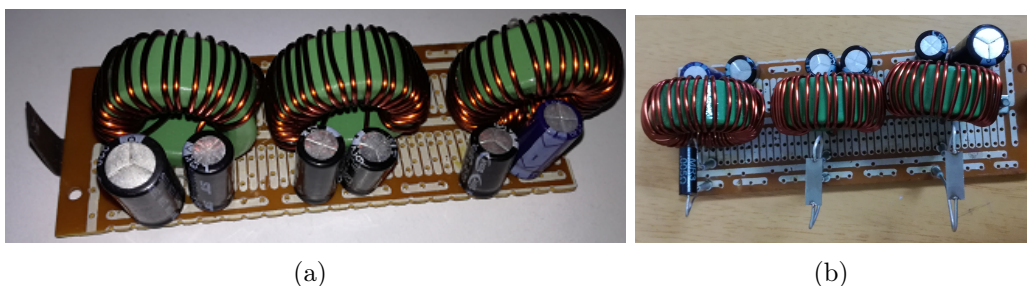


Figura 4.20: Circuito filtro de armónicos sobre PCB.  
[Fuente: Elaboración Propia]

3. *Pruebas:*

A partir de un generador de funciones se generaron señales de distintas frecuencias,



por lo cual fue posible observar el comportamiento del filtro en presencia de frecuencias más altas o bajas diferentes a la frecuencia de sintonía y en la frecuencia de sintonía, esto se hizo a través de un osciloscopio de doble canal del laboratorio de la universidad del cauca. En las figuras 4.21 y 4.22 se observa la prueba realizada al filtro usando el generador de funciones y el osciloscopio, la prueba consistía en mirar la forma de la señal de salida a medida que aumentaba la frecuencia de la señal de entrada, esperando que a medida que aumenta la frecuencia de entrada, la amplitud a la salida disminuyera.

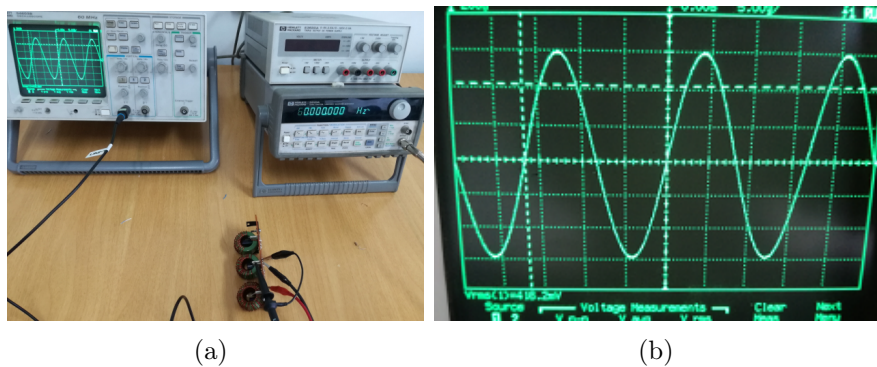


Figura 4.21: Señal de voltaje en 60 Hz.  
[Fuente: Elaboración Propia]

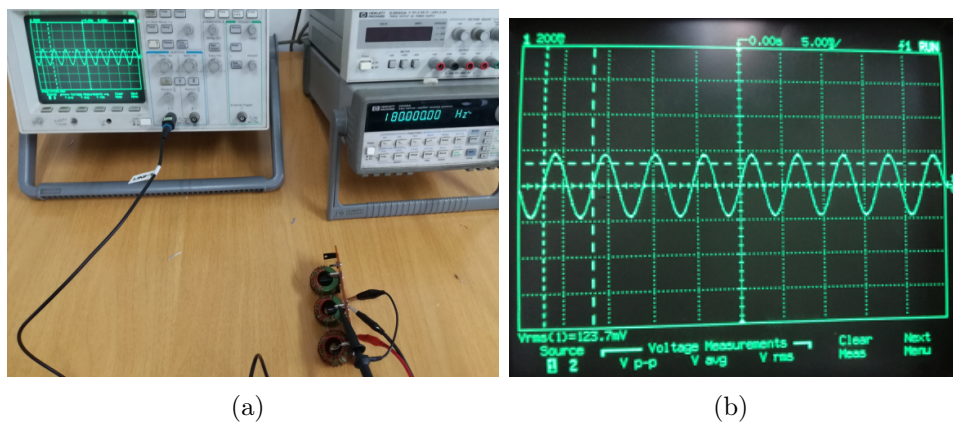


Figura 4.22: Señal de voltaje en 180 Hz.  
[Fuente: Elaboración Propia]

En la figura 4.23 se observa el espectro de la señal de salida de la carga alta sin conectar el filtro al sistema y se observa el 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup> armónico; y en la figura 4.24 se observa que al conectar el filtro en la carga alta, se presenta una reducción de estos, cumpliendo así con lo esperado. Esta prueba se realiza con ayuda del

analizador de espectro de marca Hewlett Packard referencia 3580A del laboratorio de la universidad del cauca.

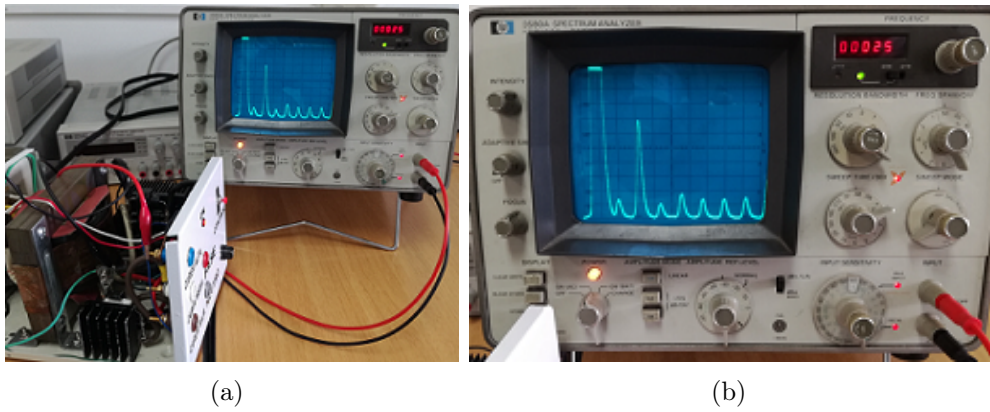


Figura 4.23: Armónicos presentes en la señal de voltaje del transformador sin filtro.  
[Fuente: Elaboración Propia]

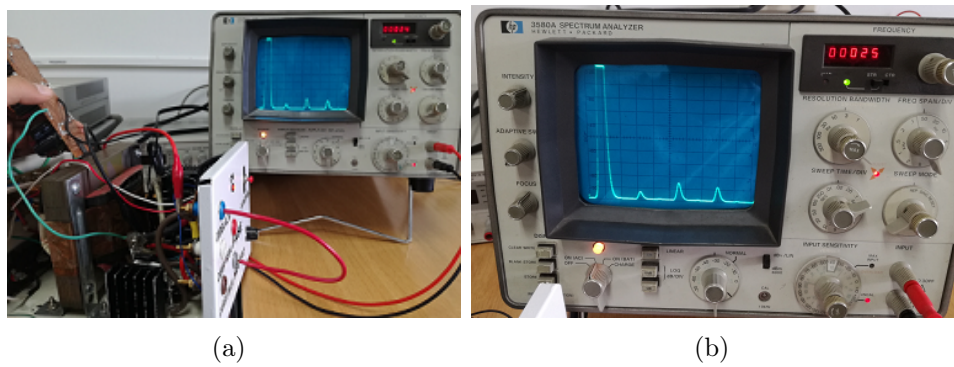


Figura 4.24: Armónicos presentes en la señal de voltaje del transformador con filtro.  
[Fuente: Elaboración Propia]

## 4.1.4. Elementos de la Interfaz

### 4.1.4.1. Borneras

Las borneras o conectores rígidos mostrados en la figura 4.25 están aislados y tienen un diámetro de  $0,4\text{mm}$  las partes metálicas son niqueladas o bañadas en oro, poseen una capacidad máxima de corriente de 32 amperios según lo muestra su ficha técnica adjuntada en [Anexo C], aclarando que de pueden soportar una corriente máxima de 42 Amperios.

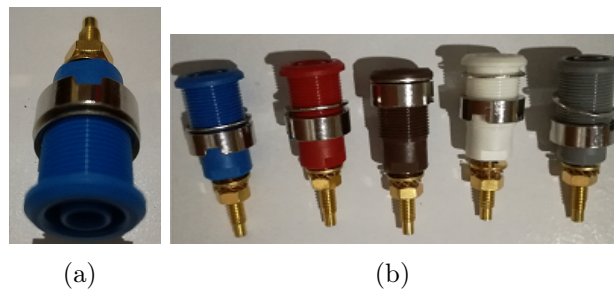


Figura 4.25: Borneras para la interfaz de la fuente.  
[Fuente: Elaboración Propia]

### 4.1.4.2. Fusible

Es un componente de seguridad utilizado para prevenir daños por exceso de corriente eléctrica, está compuesto por un conductor fino que si la corriente del circuito excede un valor predeterminado durante cierto tiempo, el conductor del fusible se abre por efecto Joule. Con el fin de permitir el cambio de este fácilmente se utiliza un porta fusible de cartucho, tipo americano de 6 mm de diámetro por 32 mm de largo tal como se muestra en la figura 4.26.



Figura 4.26: Fusible americano de 120 Voltios.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.4.3. Estructura mecánica del prototipo fuente de corriente

La Estructura mecánica mostrada en la figura 4.27, es el chasis que sostiene y encierra todo los subsistemas y componentes, los cuales conforman el prototipo fuente de corriente alterna, cabe mencionar que no fue posible adquirir una caja que cumpliera con todas las normas de seguridad y protección debido a su alto costo, no obstante en el capítulo 5 se presenta una estructura acorde con los requisitos de seguridad y protección planteados por el documento de requerimientos [Anexo B].

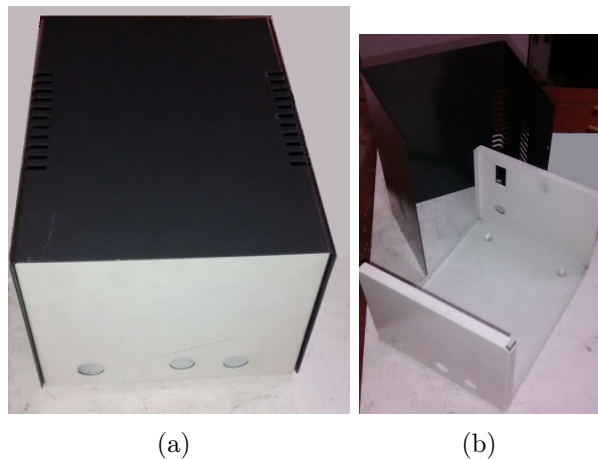


Figura 4.27: Caja metálica del prototipo.  
[Fuente: Elaboración Propia]

## 4.2. Interconexión de Componentes

En esta sección se indican las interconexiones de cada uno de los componentes electrónicos de cada subsistema y en la figura 4.28 se muestra la interconexión circuital entre estos.

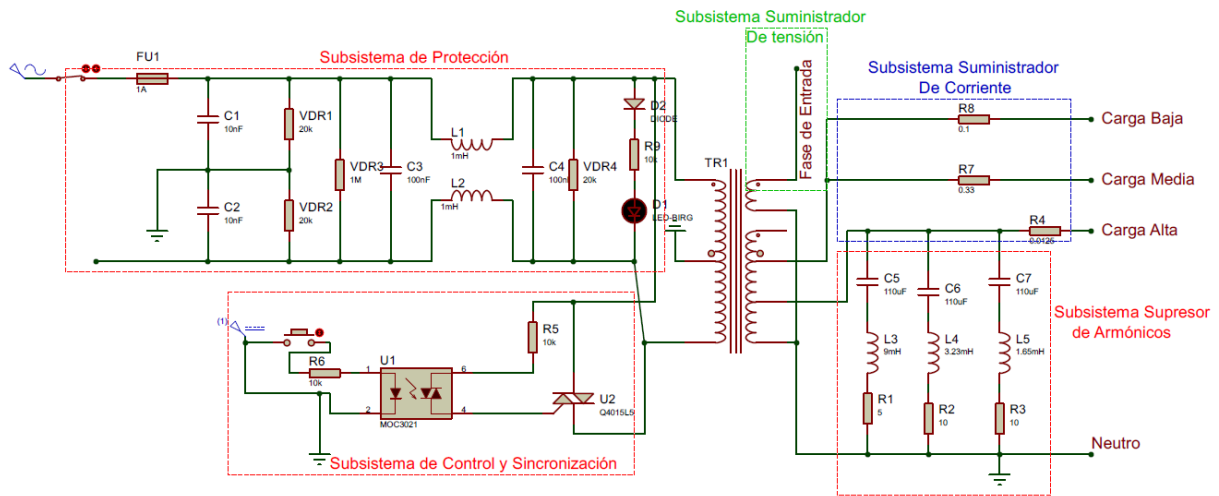


Figura 4.28: Interconexión total del sistema fuente de corriente.

Fuente: Elaboración Propia

La conexión interna de la fuente se realiza por etapas, las cuales se dividen en:

#### 4.2.1. Etapa de adaptación de la caja a las correspondientes salidas

Para esta etapa se realizaron los orificios necesarios tanto para la conexión del cable de poder, como de las borneras de salida, los orificios se realizaron con ayuda de un taladro y hechos a medida. En la figura 4.29 se observan los orificios y las borneras situadas en cada uno de estos.



Figura 4.29: Borneras fijadas al chasis.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4.30 se observa la ubicación espacial del filtro supresor de picos y del filtro EMC dentro de la caja, para fijar el circuito supresor de picos a la pared del chasis, fue necesario ajustarlo con tornillos y tuercas como se muestra en las figuras.

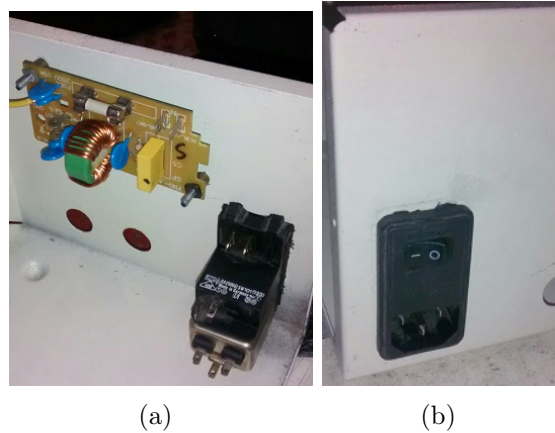


Figura 4.30: Filtro EMC y supresor de sobre-picos fijados en el chasis.  
[Fuente: Elaboración Propia]

## 4.2.2. Etapa de Interconexiones

### 4.2.2.1. Interconexión fusible y filtro EMC

En la figura 4.31 se observa la forma de conectar el filtro EMC y el fusible, se observa claramente que tanto el común de entrada como la salida del interruptor se conectan directamente al fusible, soldando las puntas en cada componente.



Figura 4.31: Conexión entre el fusible y el filtro EMC.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2.2. Interconexión supresor de picos y filtro EMC

En la figura 4.32 se observa la forma de conexión entre el filtro supresor de sobre-tensiones y el filtro de entrada EMC, se puede observar que a la entrada del filtro supresor de picos se ha conectado la fase del filtro EMC y la entrada del interruptor. Como cada circuito tiene su propia tierra, estas deben unirse al final al mismo punto, para este caso mediante el cable verde se hace la unión de la tierra entre el filtro EMC y el supresor de sobre-picos, y con ayuda del mismo tornillo del circuito supresor se fijan las tierras al chasis.



Figura 4.32: Conexión supresor de picos y filtro EMC.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2.3. Interconexión transformador y supresor de sobre-tensiones

En la figura 4.33 se observa la conexión entre la entrada del transformador y la salida del circuito supresor de sobre-tensiones. El común de circuito supresor se conecta al común del transformador y la entrada de voltaje a la línea del transformador.

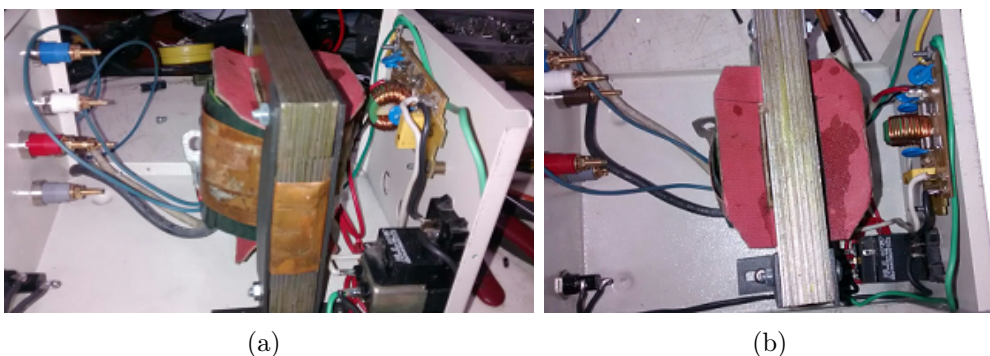


Figura 4.33: Conexión transformador y circuito supresor de sobre-picos.  
[Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.2.2.4. Interconexión transformador y banco de cargas

**Interconexión carga 1:** La carga 1 se encuentra situada en la parte inferior del disipador de la carga 3, como se presenta en la gráfica 4.34, en la parte a) se observa la carga conectada a dos cables rojos, en la parte b) se muestra la conexión entre un extremo de la carga 1 (cable color rojo) y la salida del transformador (cable color negro) y en el mismo punto conectada la carga 2 (cable color café), y la parte c) muestra el otro extremo de la resistencia conectada a la bornera de color café mediante el cable color rojo siendo esta la salida de carga baja.

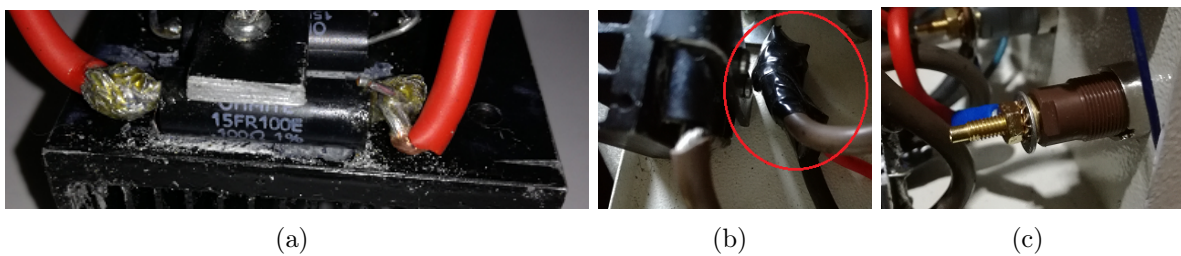


Figura 4.34: Conexión carga 1 y devanado secundario 3.[Fuente: Elaboración Propia]

**Interconexión carga 2:** La carga 2 se conecta al devanado secundario 3, en la figura 4.35 en la parte a) se observa la conexión entre un extremo de la carga (cable color café) y una salida del transformador (cable color negro), y en la parte b) se observa el otro extremo de la carga conectada a la bornera de color blanco que sera la salida de carga media.

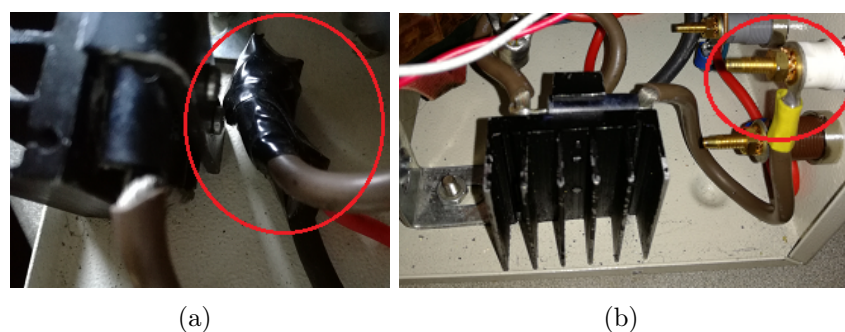


Figura 4.35: Conexión carga 2 y devanado secundario 3.  
[Fuente: Elaboración Propia]

**Interconexión carga 3:** Como se mencionó anteriormente, el transformador posee un tap el cual genera una salida adicional de 0,8 voltios (devanado secundario 2) la



cual está conectada solo en la carga de 40 amperios (carga 3) esto debido a que esta carga presenta un caída de voltaje mucho mayor que las demás necesitando un voltaje mayor para que se obtenga el valor deseado. En la gráfica 4.36 se observa la conexión entre la carga 3 y la salida del devanado 3 en la figura la parte a) muestra un extremo de la carga atornillado a la salida correspondiente al devanado 3 del transformador y en la parte b) se muestra la conexión del otro extremo de la carga a la bornera de color azul que será la carga de salida alta.

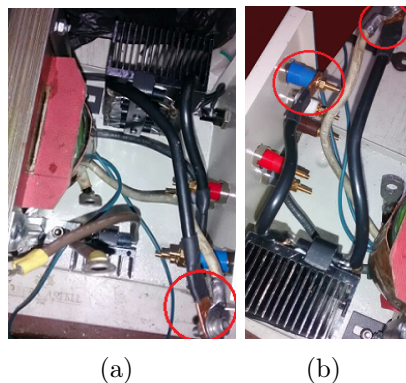


Figura 4.36: Conexión carga 3 y devanado secundario 2.  
[Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.2.2.5. Interconexión Optoacoplador

Para la interconexión del Optoacoplador con el sistema de protección y el transformador se debe tener en cuenta el diagrama circuital de la figura 4.28, en esta parte se tiene un interruptor normalmente cerrado que permitirá controlar el suministro de corriente y voltaje.

#### 4.2.2.6. Interconexión led

Para esta conexión es necesario de un diodo 1N4006 y una resistencia de 18K en serie al led, en la figura 4.37 se muestra la conexión directa entre la entrada del sistema tomada del supresor de picos y el led, el diodo y la resistencia se encuentran inmersos en el espagueti termoencogible de color verde y no es posible su visualización

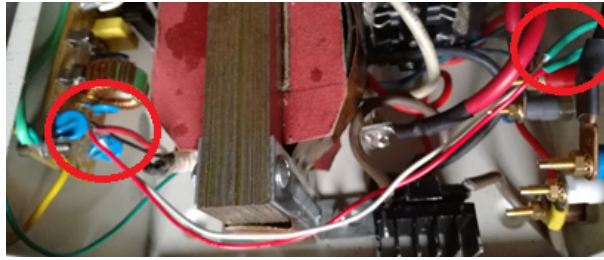


Figura 4.37: Conexión led y entrada del sistema.  
[Fuente: Elaboración Propia.]

#### 4.2.2.7. Interconexión devanado secundario 1 y borneras

La fuente de corriente presenta la salida de fase y neutro en las borneras roja y gris correspondientemente, como se observa en la figura 4.38 a la bornera gris se encuentra conectado dos cables, los cuales son los comunes de los dos devanados, este punto se representa la unión de los comunes y se hace con el fin de reducir salidas y para efectos de pruebas. Se puede observar que en la bornera roja se conecta la fase de salida proveniente del transformador (cables color azul).

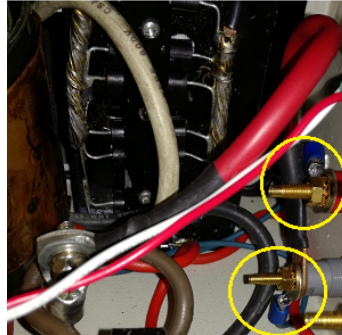


Figura 4.38: Conexión devanado secundario 1 y borneras.  
[Fuente: Elaboración Propia.]

Con lo anterior se da por implementado el sistema suministrador de corriente alterna para medidores residenciales mostrado en la figura 4.39 y con adaptabilidad para el medidor patrón realizado en [5]. Con esto se cumple el segundo objetivo del presente trabajo.

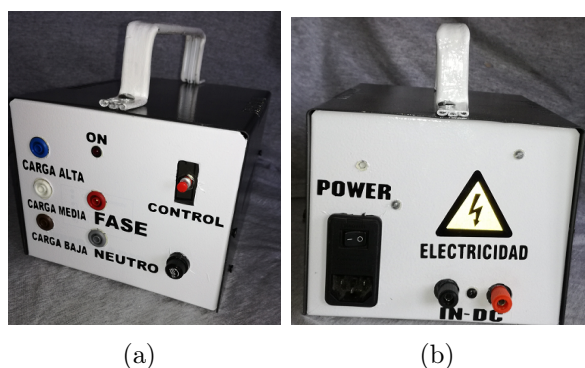


Figura 4.39: Prototipo fuente de corriente AC. [Fuente: Elaboración Propia]

### 4.3. Propuesta financiera de costos y materiales

El costo total de los materiales para elaborar el prototipo, incluida la mano de obra y los materiales necesarios, se presenta en la Tabla 4.5.

DISPOSITIVO	CANTIDAD	PRECIO (PESOS)
Subsistema Protector de sobretensión	1	\$ 6.800
Subsistema suministrador de tensión	1	\$ 26.300
Subsistema suministrador de corriente	1	\$ 28.500
Subsistema de control	1	\$ 7.500
Subsistema supresor de armónicos	1	\$ 4.400
Cables, aislantes y terminales	1	\$ 8.700
Cargas de precisión	10	\$ 90.000
Borneras	1	\$ 84.400
Carcasa IP 66/IP 67BOCUBE 96016324	1	\$ 112.400
Etiqueta interfaz	1	\$ 10.000
Mano de obra		\$ 100.000
Total		\$ 479.000

Tabla 4.5: Propuesta de costos y materiales

# Capítulo 5

## Estructura mecánica, pruebas funcionales y conclusiones

Existen normas industriales para gabinetes eléctricos que ayudan a promover la seguridad, la eficiencia en el diseño y a definir los niveles mínimos de rendimiento al momento de diseñar e implementar un sistema como producto estándar. Entre las normas globales para gabinetes en la industria eléctrica las de mayor reconocimiento mundial son:

- *IEC 60529*
- *NEMA 250*
- *UL 50, 50E*

La Comisión Electrotécnica Internacional o *International Electrotechnical Commission (IEC)* en inglés, es una organización mundial encargada de la preparación y publicación de normas técnicas internacionales para las tecnologías eléctricas, electrónicas y otras relacionadas. Entre sus publicaciones se encuentra la norma IEC 60529 la cual incluye una lista de códigos, llamados números característicos, que se usan para identificar niveles de protección contra el ingreso. Normalmente es conocida como la protección IP, estos códigos reflejan la capacidad del gabinete eléctrico de proteger contra el acceso a partes electrificadas por parte de personas, herramientas, humedad, polvo y suciedad [15].

La *Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos* o NEMA por sus siglas en inglés, es una asociación industrial estadounidense, creada el 1 de septiembre de 1926 . Este organismo es el responsable de numerosos estándares industriales comunes usados en el campo de la electricidad. NEMA ha establecido una amplia gama de estándares para encapsulados de equipamientos eléctricos, publicados como *NEMA Standards Publication 250*. Esta norma cubre gabinetes para equipo eléctrico y se ocupa al igual que la IEC 60529 de la protección contra el ingreso, pero difiere en que también se ocupa de las especificaciones que detallan los criterios mínimos de la construcción, el rendimiento, de pruebas, la resistencia a la corrosión, entre otros [16].

*Underwriters Laboratories (UL)* es una organización de certificación independiente de seguridad de productos que se encarga de escribir normas y hacerlas cumplir mediante pruebas e inspección de terceros. Las normas UL 50, 50E se basan en las normas NEMA 250. Su diferencia radica en que NEMA solo indica la forma del diseño pero no exige el cumplimiento a través de las pruebas de un tercero y visitas de cumplimiento en el sitio. Sin embargo la certificación UL es una confirmación formal de que se ha cumplido con la construcción y el rendimiento exigidos después de que se hayan efectuado análisis y pruebas.

Con base en las anteriores normativas mencionadas y debido al propósito global del proyecto, el cual es, conformar un sistema de verificación en sitio integrado de medida directa (SVIMD) [5], se recomienda una carcasa de la serie BOCUBE de la empresa BOCLA referencia 96016324, la cual se basa en la normativa IEC 60529 y cumple con las características IP66 (proporciona protección contra la penetración de cualquier cuerpo sólido y protección contra inundaciones) e IP67 (proporciona protección contra la penetración de cualquier cuerpo sólido y protección contra la inmersión temporal). En la figura 5.1 se muestra la carcasa BOCUBE seleccionada para el SVIMD en dos posiciones, sus dimensiones permiten adecuar fácilmente los componentes al interior de este y son mostradas en la Tabla 5.1

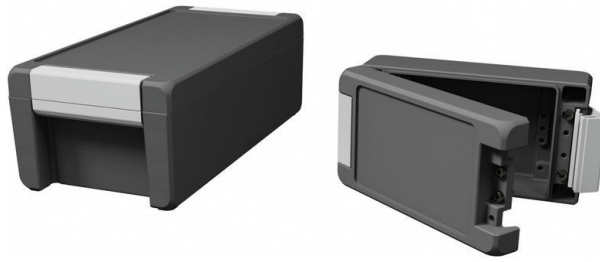


Figura 5.1: Carcasa BOCUBE.

Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
271	170	60

Tabla 5.1: Dimensiones caja BOCUBE.

En la Tabla 5.1 puede observarse que la carcasa cuenta con dimensiones bastantes extensas lo que permite una amplia zona de montaje para conectores, casquillos y elementos de funcionamiento que pueden ser reordenados y distribuidos de forma adecuada para aprovechar al máximo el espacio disponible dentro de la carcasa. Por lo tanto el montaje externo que se requiere para el SVIMD consta del canal de fase y neutro, los canales de carga baja, media y alta, la ranura para el puerto USB, el led de encendido y finalmente la ranura del fusible empotrable y el conector a la red eléctrica tal como se muestra en la figura 5.2

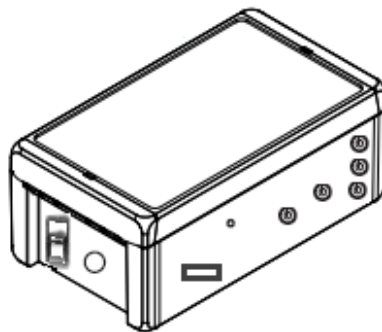


Figura 5.2: Esquema de conexiones en la caja BOCUBE.

La carcasa cuenta en su interior con diferentes puntos de instalación de circuitos impresos a través de tornillos, lo que hace fácil la incorporación de las PCB y demás módulos

brindando la estabilidad suficiente al sistema. Además de las características anteriores expuestas cabe mencionar que la selección del gabinete o carcasa depende directamente de los requerimientos mecánicos del sistema establecidos en la NTC 5900, por lo que con la información suministrada, se puede concluir que el gabinete BOCUBE de BOPLA se ajusta a los propósitos tanto del presente proyecto como del proyecto global.

## **5.1. Pruebas Funcionales**

Realizada la implementación e integración de los subsistemas, el sistema fuente de corriente alterna se da por culminado, claro está, que para garantizar el correcto funcionamiento y el cumplimiento de los requerimientos propuestos, la fuente de corriente debe ser sometida a diferentes pruebas las cuales fueron realizadas entre los laboratorios de la universidad del cauca y los laboratorios de la CEO [Anexo E]. A continuación se describen los ensayos realizados y los datos obtenidos en cada uno de ellos, pero antes de esto se presenta una breve descripción del instrumento de medida perteneciente a la CEO, con el cual se realizaron las mediciones a la fuente de corriente.

### **5.1.1. Equipo de medición MT320**

El MT320 es un patrón portátil basado en la más moderna tecnología en lo referente a la medición de potencia y energía, cuenta con una exactitud del 0.05

#### **5.1.1.1. Características**

- Medición de intensidad hasta máx. de 120 A con pinzas con error compensado.
- Excepcional estabilidad en la medición a largo plazo y por temperatura.
- Medición de intensidad hasta un máximo de 10000 A utilizando el adaptador correspondiente.
- No introduce error adicional en las mediciones reactivas.

### 5.1.1.2. Funciones

- Verificación de contadores de energía eléctrica de 2 , 3 Y 4 hilos.
- Verificación de los registradores de energía y potencia.
- Medición de potencia y energía activa, reactiva y aparente.
- Medición de frecuencia, ángulo de fase y factor de potencia, análisis hasta el cuatragésimo armónico.

En la figura 5.3 se observa la parte exterior del equipo de medición.



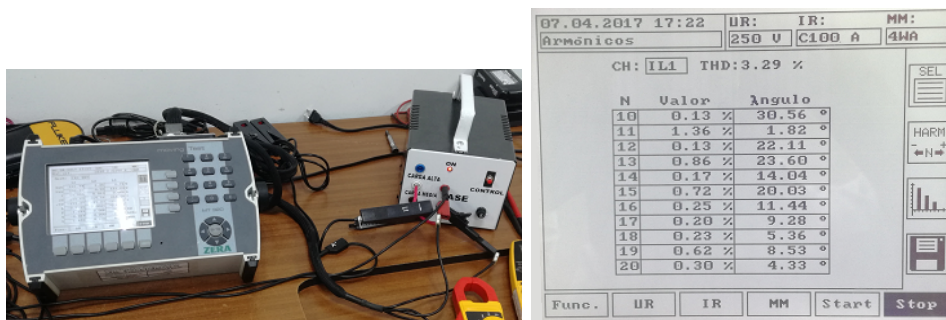
Figura 5.3: Equipo portátil probador de medidores MT320.[Fuente: Elaboración Propia]

## 5.1.2. Ensayos y pruebas realizadas a la fuente AC

### 5.1.2.1. Medición de los niveles de tensión armónica

Este ensayo consiste en medir el porcentaje de los niveles de tensión de los armónicos en cada una de las cargas, para esto se utilizó el instrumento MT320. El montaje realizado para llevar a cabo la prueba se puede observar en la figura 5.4 en la parte a) y en la parte b) se observa la interfaz que muestra los datos obtenidos. Los resultados obtenidos para cada carga están consignados en las tablas 5.2 y 5.3.





(a) Montaje realizado para la prueba (b) Interfaz del equipo probador MT320

Figura 5.4: Equipo portátil probador de medidores MT320.[Fuente: Elaboración Propia]

No. Armónico	Carga Baja (% Amplitud)	Carga Media (% Amplitud)	Carga Alta (% Amplitud)
1	100	100	100
2	0,22	0,15	0,08
3	1,61	1,45	1,09
4	0,22	0,19	0,10
5	1,62	1,57	1,23
6	0,24	0,23	0,07
7	0,26	0,76	1,35
8	0,26	0,26	0,10
9	1,35	1,27	0,25
10	0,33	0,29	0,08
11	0,69	0,12	1,40
12	0,46	0,23	0,18
13	0,42	0,68	1,00
14	0,47	0,27	0,05
15	1,01	0,92	0,81
16	0,62	0,22	0,19
17	0,13	1,20	0,39
18	0,66	0,21	0,06
19	0,52	0,60	0,73
20	0,42	0,48	0,23

Tabla 5.2: Niveles de armónicos de voltaje presentes en la fuente.

<b>Carga de Salida</b>	<b>Distorsión armónica total de tensión (%)</b>
Alta	3,45
Media	3,74
Baja	3,88

Tabla 5.3: Valores de THD de voltaje en el sistema.

### 5.1.2.2. Medición de los niveles de corriente armónica

Esta prueba consiste en medir el porcentaje de los niveles de corriente de los armónicos en cada una de las cargas, para esto se realizó el mismo montaje anterior y los datos obtenidos encuentran en las Tablas 5.4 y 5.5.

<b>No. Armónico</b>	<b>Carga Baja (% Amplitud)</b>	<b>Carga Media (% Amplitud)</b>	<b>Carga Alta (% Amplitud)</b>
1	100	100	100
2	0,21	0,11	0,07
3	1,58	1,49	1,45
4	0,23	0,16	0,05
5	1,61	1,56	1,22
6	0,25	0,16	0,07
7	0,27	0,75	1,3
8	0,26	0,20	0,07
9	1,40	1,23	0,21
10	0,34	0,22	0,13
11	0,76	0,10	1,36
12	0,40	0,20	0,13
13	0,55	0,51	0,86
14	0,42	0,35	0,17
15	0,95	0,85	0,72
16	0,53	0,25	0,25
17	0,26	0,97	0,20
18	0,57	0,38	0,23
19	0,51	0,57	0,62
20	0,61	0,24	0,30

Tabla 5.4: Niveles de armónicos de corriente presentes en la fuente.

<b>Carga de Salida</b>	<b>Distorsión armónica total de corriente (%)</b>
Alta	3,29
Media	3,53
Baja	3,81

Tabla 5.5: Valores de THD de corriente en el sistema.

Como se puede observar en las Tablas 5.3 y 5.5, los valores de la distorsión armónica total de tensión se encuentran en los niveles permitidos por la IEEE 519, teniendo en cuenta que los valores de THD se están tomando los 40 primeros armónicos.

### 5.1.2.3. Medición de valores activos

Gracias a las multifuncionalidades que tiene el MT320 fue posible obtener diferentes mediciones de valores activos en cada una de las cargas, para su mejor visualización, estos valores son consignados en la Tabla 5.6 y en la figura 5.5 se muestra la interfaz del equipo al obtener los valores activos de la fuente de corriente AC.

<b>Valores a Medir</b>	<b>Carga Baja</b>	<b>Carga Media</b>	<b>Carga Alta</b>
<b>Voltaje entre fase y neutro (V)</b>	122,43	121,7	119,66
<b>Corriente (A)</b>	4,576	15,530	40,238
<b>Angulo Voltaje (°)</b>	0	180,73	181,59
<b>Angulo entre voltaje y corriente (°)</b>	-179,83	-179,27	-178,41
<b>Factor de Potencia</b>	-1	-0,9999	-0,9995
<b>Potencia Actica (kW)</b>	-0,560	-1,891	-4.813
<b>Potencia Reactiva (kVAr)</b>	-0,002	-0,024	-0,133
<b>Potencia Aparente (kVA)</b>	0,560	1,891	4,815

Tabla 5.6: Valores activos de cada carga.

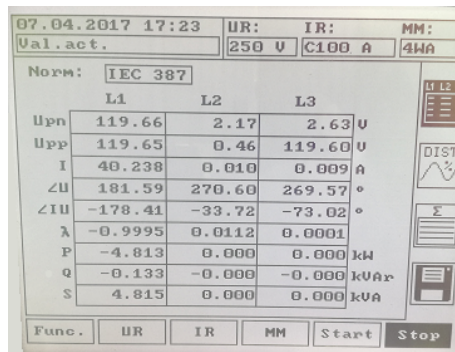
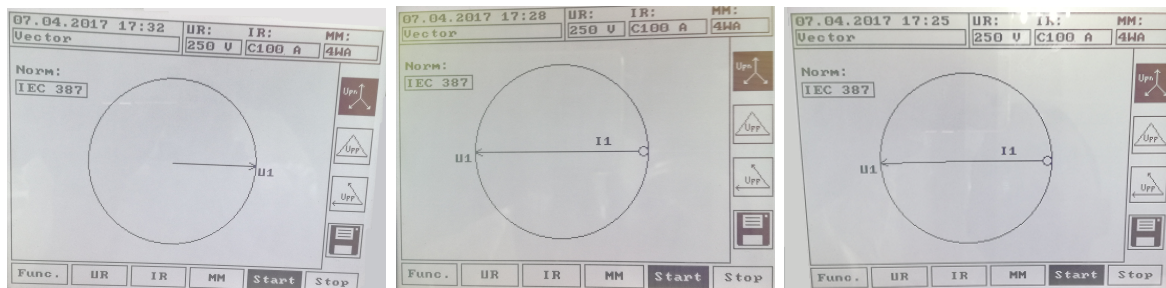


Figura 5.5: Interfaz de los valores activos. [Fuente: Elaboración Propia]

#### 5.1.2.4. Mediciones de los vectores de tensión y corriente

El equipo de medición MT320 cuenta con la opción de visualizar fasorialmente los vectores correspondientes de tensión y corriente, tal como se muestra en la figura 5.6.



(a) Carga de 5 Amperios.

(b) Carga de 15 Amperios.

(c) Carga de 40 Amperios.

Figura 5.6: Vectores de voltaje y corriente de cada carga. [Fuente: Elaboración Propia]

#### 5.1.2.5. Mediciones de voltaje y corriente

Para detallar específicamente el funcionamiento y comportamiento de la fuente de corriente AC se realizaron pruebas de voltaje y corriente durante determinado tiempo, en diferentes días espacios. En las siguientes Tablas se muestran los valores obtenidos a través de las herramientas de medición de voltaje y corriente.

Tiempo (min)	Voltaje Red (V)	Carga	Devanado Secundario 1	Devanado S. 2	Devanado S. 3	Corriente (A)
0	121,3	1	124,1	0,78	0,51	5,14
	120,3	2	130,1	0,8	0,51	14,84
	125,8	3	127,6	0,71	0,51	40,05
5	121,1	1	124,2	0,78	0,52	5,25
	121,5	2	130,3	0,80	0,51	15,16
	126,3	3	128,2	0,72	0,51	40,18
10	119,3	1	130,7	0,81	0,53	5,32
	125,2	2	130,5	0,81	0,52	14,76
	125,9	3	127,8	0,71	0,54	40,85
15	119,1	1	130,7	0,81	0,52	5,24
	120,8	2	130,3	0,80	0,51	14,92
	126,3	3	127,9	0,72	0,51	39,86

Tabla 5.7: Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo.

Tiempo (min)	Voltaje Red (V)	Carga	Devanado Secundario 1	Devanado S. 2	Devanado S. 3	Corriente (A)
0	132,2	1	136,6	0,832	0,541	4,98
	129,3	2	132,9	0,792	0,494	16,7
	130,1	3	131,4	0,68	0,472	43,5
5	132,5	1	136,1	0,820	0,539	5,01
	129,4	2	132,9	0,789	0,494	16,46
	130,3	3	131,6	0,636	0,481	43,7
10	132,1	1	136,3	0,830	0,541	5,01
	130,3	2	133,8	0,795	0,500	16,64
	130,5	3	131,9	0,636	0,480	42,8
15	132,1	1	136,1	0,827	0,538	5,04
	131,3	2	135,2	0,808	0,506	16,52
	130,1	3	131,8	0,638	0,481	39,1
20	134,4	1	138,2	0,844	0,548	5,04
	130,7	2	134,5	0,805	0,509	15,52
	130,2	3	131,5	0,637	0,480	39,1
25	132,5	1	136,5	0,828	0,537	5,04
	131,5	2	135,5	0,806	0,508	15,52
	130,1	3	131,8	0,637	0,480	39,1

Tabla 5.8: Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Voltaje Red (V)</b>	<b>Carga</b>	<b>Devanado Secundario 1</b>	<b>Devanado S. 2</b>	<b>Devanado S. 3</b>	<b>Corriente (A)</b>
0	123,2	1	128,1	0,796	0,511	4,98
	128,3	2	132,2	0,792	0,517	16,15
	128,1	3	132,1	0,724	0,482	39,5
5	124,1	1	129,3	0,810	0,521	4,96
	126,5	2	130,5	0,789	0,504	15,86
	126,3	3	128,8	0,721	0,481	39
10	124,2	1	128,2	0,81	0,521	5,01
	127,1	2	132,1	0,788	0,510	15,94
	127,2	3	130,2	0,71	0,514	39,2
15	126,5	1	123,8	0,80	0,538	5,04
	125,2	2	130,5	0,78	0,506	15,52
	127,3	3	130,5	0,71	0,481	39,1

Tabla 5.9: Valores de voltaje y corriente en la estructura mecánica total a través del tiempo.

<b>Voltaje Red (V)</b>	<b>Devanado Secundario 1</b>	<b>Devanado Secundario 2</b>	<b>Devanado Secundario 3</b>
123,2	128,1	0,79	0,53
128,0	133,1	0,84	0,56
126,5	132,1	0,82	0,55
127,6	133,2	0,82	0,55
127,8	133,4	0,82	0,55
128,7	132,6	0,815	0,543
129,4	133,1	0,831	0,55
132,4	136,6	0,835	0,57

Tabla 5.10: Voltajes en la estructura mecánica total en circuito abierto.

Gracias a la realización de las anteriores pruebas fue posible analizar detalladamente el comportamiento de la fuente de corriente y de esta forma se logró caracterizar el prototipo implementado. Con esto se da por concluido el trabajo, cumpliendo con el tercer y último objetivo específico.

<b>Carga de Salida</b>	<b>Carga (<math>m\Omega</math>)</b>	<b>Variación de la corriente debido a la carga</b>
Baja	100	$40mA/m\Omega$
Media	25	$330mA/m\Omega$
Alta	12	$830mA/m\Omega$

Tabla 5.11: Variación de la corriente debido a la carga.

<b>Carga de Salida</b>	<b>Carga (<math>m\Omega</math>)</b>	<b>Variación de la corriente debido a la carga</b>
Baja	100	$15mA/v$
Media	25	$120mA/v$
Alta	12	$300mA/v$

Tabla 5.12: Variación de la corriente debido a la variación en la alimentación.

<b>Carga de Salida</b>	<b>Carga (<math>m\Omega</math>)</b>	<b>Precisión</b>
Baja	100	$\pm 5\%$
Media	25	$\pm 5\%$
Alta	12	$\pm 5\%$

Tabla 5.13: Precisión de la carga.

Como se puede observar en los resultados obtenidos en cada una de las pruebas la fuente de corriente presenta gran estabilidad, se encuentra acorde a las especificaciones establecidas en la NTC5900, sus valores de THD tanto de corriente como de tensión se encuentran dentro de los niveles permitidos y además puede ser integrado al SVIMD; por lo que se concluye que el sistema fuente de corriente alterna sirve y funciona como un sistema de referencia para la verificación en sitio de medidores residenciales.

## 5.2. Conclusiones

- El prototipo fuente de corriente fue desarrollado basándose en la problemática referentes a la verificación en sitio de medidores de energía eléctrica. De este modo se

logró obtener un dispositivo que proporciona una solución eficiente y de bajo costo en cuanto al consumo energético, la robustez y la portabilidad.

- Gracias a la ingeniería de requerimientos, fue posible determinar los requisitos generales del proyecto, ya que, permitió identificar las funcionalidades más esenciales, permitiendo un enfoque adecuado a cada uno mediante el documento de requerimientos y conformando a partir de estos una serie de subsistemas los cuales juntos conforman el prototipo final y engloban todos los requisitos del sistema.
- Los componentes seleccionados para cada subsistema, son el resultado de una serie de posibilidades que han permitido el desarrollo de un sistema fundamentado en dispositivos de bajo costo y actuales, pero que mantienen un nivel de calidad y precisión acorde a la NTC 5900.
- Es importante que las chapas empleadas en la fabricación de transformadores tengan el corte limpio para no ocasionar cortocircuitos entre chapas y aumentar con ello las pérdidas por corrientes parásitas.
- El prototipo de fuente de corriente tiene un bajo consumo de potencia para su funcionamiento, dándole al sistema un valor agregado, frente a los dispositivos de alimentación que hoy en día son fabricados.
- La entrada del transformador está directamente conectada a la red eléctrica, luego las variaciones de tensión en la red causarán variaciones en la tensión de salida del transformador lo que produce variación de corriente, pero estas variaciones de corriente se encuentran dentro del rango de tolerancia exigido por la NTC 5900.
- Debido a la falta de presupuesto no fue posible adquirir una estructura que cumpliera con las reglas de seguridad y protección exigidas por la NTC 5900.

### 5.3. Trabajos Futuros

- Implementar el diseño del medidor patrón plasmado en [5] y adaptarlo al subsistema de sincronización planteado anteriormente.
- Integrar los dos diseños para formar un solo equipo medidor y fuente de corriente.
- Diseñar el presente trabajo basando su funcionamiento en algún dispositivo diferente al transformador.



# Bibliografía

- [1] S. de Servicios Públicos Domiciliarios, “Superintendencia de servicios públicos,” <http://www.superservicios.gov.co/>, 1999. [Online]. Available: [http://www.redconsumidor.gov.co/publicaciones/superintendencia\\_de\\_servicios\\_publicos\\_domiciliarios\\_pub](http://www.redconsumidor.gov.co/publicaciones/superintendencia_de_servicios_publicos_domiciliarios_pub)
- [2] “Comision de regulacion de energia y gas,” ley 142 y 143, 1994. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>
- [3] I. C. de Normas Técnicas y Certificación, “Verificación en sitio de equipos para medición de energía eléctrica,” *ICONTEC*, no. 5900, 2011.
- [4] I. Somerville, *Ingeniería del Software*, 7th ed., PEARSON, Ed. Miguel Martín-Romo, 2005.
- [5] Y. D. A. D. P. C. Tafurt, “Diseño de un dispositivo electrónico patrón para la calibración en sitio de medidores residenciales,” Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, 2016.
- [6] J. M. B. Leonardo Gómez Torrego, *Análisis Morfológico: Teoría y Práctica*. Ediciones SM, 2007.
- [7] G. P. D. S. F. Ebel, S. Idler, *Fundamentos de la técnica de automatización*, FESTO, Ed., Enero 2008. [Online]. Available: [https://lehrerfortbildung-bw.de/u\\_matnatech/nwt/gym/weiteres/fb1/atechnik/grundlagen/es/kapitel/563062\\_Fundamentos\\_de\\_la\\_tecnica\\_de\\_automatizacion.pdf](https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/nwt/gym/weiteres/fb1/atechnik/grundlagen/es/kapitel/563062_Fundamentos_de_la_tecnica_de_automatizacion.pdf)
- [8] P. S. Alfonso Carretero Montero, Francisco Javier Ferrero Feroe, *Electricidad y Electrónica*, EDITEX, Ed., 2009. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=\\_g0xi3Til6AC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=_g0xi3Til6AC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

- [9] M. N. O. S. Charles K. Alexander, *Fundamentos de Circuitos eléctricos*, M.-H. INTERAMERICANA, Ed. Aristeo Vera Bermúdez, 2006. [Online]. Available: <https://hellsingge.files.wordpress.com/2014/03/fundamentos-de-circuitos-elc3a9ctricos-3edi-sadiku.pdf>
- [10] *El transistor de Potencia, Electrónica Industrial*, no. Apartado 3.2. [Online]. Available: [http://www.iuma.ulpgc.es/~roberto/asignaturas/EI/transparencias/EI\\_Tema\\_3.2.Transistor\\_potencia.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~roberto/asignaturas/EI/transparencias/EI_Tema_3.2.Transistor_potencia.pdf)
- [11] F. R. Vassallo, *Componentes Electrónicos Para Audio e Imagen*. Grupo editorial ceac S.A., 2000.
- [12] T. L. Floyd, *Dispositivos Electrónicos*, octava ed., R. N. salas, Ed. Prentice Hall, 2008. [Online]. Available: <ftp://kim.ece.buap.mx/pub/profesor/JCC/Libros/Dispositivos%20electronicos%208va%20ed-Floyd.pdf>
- [13] G. E. Harper, *Curso de Transformadores y Motores de inducción*, 4th ed., N. E. Limusa, Ed., 2005. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=IBS13ls30R8C&pg=PA33&dq=lazo+de+histeresis&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=lazo%20de%20histeresis&f=falsehttps://books.google.com.co/books?id=IBS13ls30R8C&pg=PA33&dq=lazo+de+histeresis&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=lazo%20de%20histeresis&f=false](https://books.google.com.co/books?id=IBS13ls30R8C&pg=PA33&dq=lazo+de+histeresis&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=lazo%20de%20histeresis&f=falsehttps://books.google.com.co/books?id=IBS13ls30R8C&pg=PA33&dq=lazo+de+histeresis&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=lazo%20de%20histeresis&f=false)
- [14] L. S. M. Burke, J.R, *Física :La naturaleza de las cosas /Susan M. Lea, John Robert Burke*. International Thomson Editores, 1999, vol. 1.
- [15] *NORMAS GLOBALES PARA GABINETES EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA*, hoffman Std.
- [16] C. A. Galizia, “Los grados de protección ip en los equipos e instalaciones y so interpretación según iec y nema.”