



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UNA
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA MECATRÓNICA

P R E S E N T A :

GONZÁLEZ NEGRETE MARÍA FERNANDA



**DIRECTOR DE TESIS:
ING. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO**

2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por darme la fortaleza, la sabiduría y el entendimiento para poder lograr esta meta tan importante en mi vida.

A mis padres.

Por estar siempre conmigo en cada paso, en cada proyecto, en cada sueño, en cada desvelo, en cada tropiezo y en cada triunfo; por guiarme y apoyarme en este largo camino que se llama vida. Por ser mi soporte en los momentos de frustración y por brindarme la oportunidad de crecer, de superarme y de llegar hasta este momento. Esto es para ustedes papás, es el fruto de todo su esfuerzo.

A mis hermanos.

Por su apoyo incondicional; por ayudarme, escucharme y motivarme en cada momento de mi vida; por su paciencia y por darme ánimos cuando más lo necesitaba.

A mis amigos.

Por su amistad, por todos sus consejos, por siempre creer en mí, por apoyarme y por motivarme para que nunca me diera por vencida a pesar de las circunstancias.

A mis compañeros.

Por todas las lecciones de vida aprendidas, por cada momento compartido en la carrera y por brindarme la oportunidad de compartir esta etapa de mi vida con cada uno de ellos.

A mis profesores.

Por ser mis guías durante toda la carrera, por todas las enseñanzas y, por proporcionarme las herramientas y los conocimientos que serán las bases para poder desarrollarme profesionalmente.

A mi director de tesis, Ing. Luis Yair Bautista Blanco.

Por guiarme en la realización de este proyecto, por su paciencia, por compartirme sus conocimientos y por cada uno de sus consejos tanto a nivel académico como a nivel personal. Gracias por el apoyo incondicional y por creer en mí.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería.

Por abrirme sus puertas y permitirme tener el honor de pertenecer a la máxima casa de estudios del país. Por ser mi segunda casa y formarme como profesionista y como una persona integral.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETIVOS.....	2
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Justificación.....	2
2 MARCO TEÓRICO	3
2.1 Definición de una subestación eléctrica.....	3
2.2 Clasificación de las subestaciones eléctricas por su función.....	4
2.2.1 Elevadoras.....	4
2.2.2 Reductoras	4
2.2.3 De maniobra.....	5
2.3 Clasificación de las subestaciones eléctricas por el tipo de instalación	5
2.3.1 Tipo Intemperie	5
2.3.2 Tipo Interior.....	6
2.3.3 Tipo Blindado	6
2.4 Componentes de una subestación	7
2.4.1 Elementos primarios de una subestación eléctrica	7
2.4.1.1 Transformador de potencia.....	7
2.4.1.2 Interruptor de potencia	12
2.4.1.3 Cuchilla fusible.....	14
2.4.1.4 Apartarrayos.....	16
2.4.1.5 Transformadores para instrumento	17
2.4.2 Elementos secundarios de una subestación eléctrica.....	18
2.4.2.1 Banco de capacitores.....	19
2.4.2.2 Tableros de control.....	19
2.4.2.3 Bancos de baterías	20
2.4.2.4 Interfaz hombre-máquina.....	20
2.4.2.5 Cables de potencia y de control	20
2.4.2.6 Sistema de tierra	21
2.4.2.7 Equipo contra incendio	21

2.4.2.8 Alumbrado.....	21
2.4.2.9 Trincheras, ductos, conductos y drenajes	22
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
3.1 Descripción de las Necesidades.....	23
3.2 Identificación de los Requerimientos	23
3.3 Planteamiento de las Especificaciones.....	23
4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	24
4.1 Conceptualización	24
4.2 Diagrama Unifilar	26
4.3 Sistematización	29
4.3.1 Subsistema de Transformación.....	29
4.3.2 Subsistema de Selección	29
4.3.3 Subsistema de Acondicionamiento.....	30
4.3.4 Subsistema de Verificación	30
4.3.5 Subsistema de Suministración	31
4.4 Configuraciones para la solución.....	31
4.5 Modelo Funcional.....	36
4.5.1 Secuencia de funcionamiento	37
5 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	39
5.1 Pruebas.....	39
5.1.1 Pruebas con condiciones simuladas.....	41
5.1.2 Pruebas con condiciones reales	50
5.2 Resultados.....	56
5.2.1 Resultados de las pruebas con condiciones simuladas	56
5.2.2 Resultados de las pruebas con condiciones reales	64
6 CONDICIONES PARA ESCALAMIENTO	73
7 CONCLUSIONES.....	75
ANEXOS.....	76
ANEXO I. SOLUCIONES PARA LAS DIFERENTES FUNCIONES	76
ANEXO II. CÓDIGO EN ARDUINO PARA PRUEBAS CON CONDICIONES SIMULADAS.....	84
ANEXO III. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA FUENTE DE VOLTAJE UTILIZADA	89
ANEXO IV. CÓDIGO EN ARDUINO PARA PRUEBAS CON CONDICIONES REALES	90
REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Elementos generales de un sistema en la alimentación a industrias.....	3
Figura 2.2 Subestación eléctrica elevadora.....	4
Figura 2.3 Subestación eléctrica reductora.....	4
Figura 2.4 Subestación eléctrica de maniobra.....	5
Figura 2.5 Subestación eléctrica tipo intemperie.....	5
Figura 2.6 Subestación eléctrica tipo interior.....	6
Figura 2.7 Subestación eléctrica tipo blindado.....	6
Figura 2.8 Diagrama eléctrico de un transformador.....	7
Figura 2.9 Partes internas de un transformador.....	8
Figura 2.10 Partes externas de un transformador.....	8
Figura 2.11 Interruptor de aceite.....	13
Figura 2.12 Interruptor neumático.....	13
Figura 2.13 Interruptor en Hexafloruro de Azufre (SF_6).....	14
Figura 2.14 Cuchilla fusible.....	15
Figura 2.15 Diferentes tipos de cuchillas desconectoras. a) con 3 aisladores, b) con 2 aisladores, c) cuchilla "AV", d) cuchilla con 3 aisladores de operación vertical con brazo horizontal 34.5 a 69 [kV], 400-1200 [A].....	15
Figura 2.16 Diagrama eléctrico de un apartarrayos.....	17
Figura 2.17 Localización de apartarrayos en una instalación eléctrica.....	17
Figura 2.18 Transformador para instrumento de corriente.....	18
Figura 2.19 Transformador para instrumento de potencial.....	18
Figura 2.20 Cable de potencia.....	20
Figura 2.21 Cable de control.....	21
Figura 4.1 Diagrama unifilar mostrando los componentes básicos de un sistema eléctrico industrial.....	26
Figura 4.2 Diagrama unifilar proporcionado por la fábrica.....	27
Figura 4.3 Diagrama de la distribución eléctrica de la fábrica.....	28
Figura 4.4 Dispositivos que componen la subestación eléctrica.....	28
Figura 4.5 Diagrama de funciones que componen el sistema de control.....	29
Figura 4.6 Modelo funcional.....	36
Figura 4.7 Disposición de los módulos (subsistemas) en el modelo funcional.....	37
Figura 5.1 Diagrama del modelo funcional conectado a un Arduino MEGA.....	40
Figura 5.2 Diagrama del modelo funcional utilizando un PLC y condiciones simuladas.....	41

Figura 5.3 Fuente regulable de voltaje.	42
Figura 5.4 Circuito representativo de la Ley de Ohm.	42
Figura 5.5 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la corriente (voltaje equivalente).	43
Figura 5.6 Generador de señales.....	44
Figura 5.7 Formas de onda de entrada y salida para un rectificador de onda completa.....	45
Figura 5.8 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura del voltaje.	46
Figura 5.9 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la frecuencia (voltaje equivalente)...	47
Figura 5.10 Osciloscopio digital.	48
Figura 5.11 Diagrama del circuito eléctrico utilizado en las pruebas con condiciones simuladas. ...	49
Figura 5.12 Duplicador de voltaje.	51
Figura 5.13 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la corriente (voltaje equivalente)...	53
Figura 5.14 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la frecuencia (voltaje equivalente). ...	54
Figura 5.15 Diagrama del circuito eléctrico utilizado en las pruebas con condiciones reales.....	55
Figura 5.16 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando no se presiona ningún push button (no se selecciona ninguna fuente).....	56
Figura 5.17 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 1.	57
Figura 5.18 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 2.	58
Figura 5.19 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Planta de Emergencia.....	58
Figura 5.20 Módulo de verificación de parámetros cuando se proporcionan los valores deseados	59
Figura 5.21 Módulo de verificación de parámetros con parámetros incorrectos.....	60
Figura 5.22 Módulo de verificación de parámetros cuando el voltaje no es el deseado.....	60
Figura 5.23 Módulo de verificación de parámetros cuando la corriente no es la deseada.	61
Figura 5.24 Módulo de verificación de parámetros cuando la frecuencia no es la deseada.	62
Figura 5.25 Módulo de suministrar cuando se cumplen las condiciones.....	63
Figura 5.26 Módulo de suministrar cuando no se cumplen ninguna de las condiciones.	63
Figura 5.27 Módulo de suministrar cuando no se cumple alguna de las condiciones.....	64
Figura 5.28 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando no se presiona ningún push button (no se selecciona ninguna fuente).....	65
Figura 5.29 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 1.	65
Figura 5.30 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 2.	66

Figura 5.31 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Planta de Emergencia.....	67
Figura 5.32 Módulo de verificación de parámetros cuando se proporcionan los valores deseados.....	67
Figura 5.33 Módulo de verificación de parámetros con parámetros incorrectos.....	68
Figura 5.34 Módulo de verificación de parámetros cuando el voltaje no es el deseado.....	69
Figura 5.35 Módulo de verificación de parámetros cuando la corriente no es la deseada.	69
Figura 5.36 Módulo de verificación de parámetros cuando la frecuencia no es la deseada.	70
Figura 5.37 Módulo de suministrar cuando se cumplen las condiciones.....	71
Figura 5.38 Módulo de suministrar cuando no se cumplen ninguna de las condiciones.	71
Figura 5.39 Módulo de suministrar cuando no se cumple alguna de las condiciones.....	72
Figura A.1 Proceso de acondicionamiento de la energía.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Conexiones típicas de transformadores.....	11
Tabla 2.2 Capacidades comerciales de cuchillas fusibles para montaje a la intemperie.	16
Tabla 2.3 Capacidades comerciales de cuchillas fusibles para montaje en interior.	16
Tabla 2.4 Niveles de iluminación recomendados.....	22
Tabla 3.1 Especificaciones a partir de los requerimientos.....	24
Tabla 4.1 Dispositivos que componen a la subestación eléctrica y sus características.	25
Tabla 4.2 Configuración 1 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.	31
Tabla 4.3 Configuración 2 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.	31
Tabla 4.4 Configuración 3 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.	32
Tabla 4.5 Configuración 4 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.	32
Tabla 4.6 Pros y contras de las soluciones para la función de reducir	33
Tabla 4.7 Criterios de selección para la función de reducir	34
Tabla 4.8 Configuración final para la solución.	35
Tabla 4.9 Comparación de dispositivos propuestos con dispositivos de la fábrica.	35
Tabla 5.1 Voltaje equivalente según la corriente.....	43
Tabla 5.2 Valores de voltaje y frecuencia proporcionados por el generador de señales.	44
Tabla 5.3 Voltaje equivalente según la frecuencia.	47
Tabla 5.4 Voltaje equivalente según la corriente.....	52
Tabla A.1 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función seleccionar	77
Tabla A.2 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función reducir	78
Tabla A.3 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función rectificar.	79
Tabla A.4 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función filtrar	79
Tabla A.5 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función regular	80
Tabla A.6 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función verificar presencia de energía.....	81
Tabla A.7 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función verificar parámetros.....	82
Tabla A.8 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función suministrar.....	83

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo realizado para la creación de un modelo funcional para la automatización de una subestación eléctrica de una fábrica, mediante el diseño de un controlador que logre el correcto monitoreo y funcionamiento de la misma, probando éste a través del modelo funcional con condiciones simuladas y condiciones reales.

En el primer capítulo se plantean los objetivos del proyecto, tanto el objetivo general como los objetivos específicos; además se explica el origen de este proyecto.

En el segundo capítulo se presenta una breve explicación de lo que es una subestación eléctrica, se mencionan algunas clasificaciones de ésta enfocadas al proyecto, así como también los diferentes dispositivos que la componen.

En el tercer capítulo se definen las necesidades del proyecto y, a partir de éstas se plantean los requerimientos y a su vez las especificaciones.

En el cuarto capítulo se muestra la conformación de la subestación eléctrica, es decir, los dispositivos que se tienen disponibles por parte de la fábrica. Por otro lado, se presenta el análisis de las funciones que integran el sistema de control para satisfacer las necesidades del proyecto y, por último, se plantean las diferentes configuraciones de solución para cumplir con las funciones del sistema de control.

En el quinto capítulo se explica en qué consisten las pruebas realizadas en el modelo funcional, utilizando condiciones simuladas y condiciones reales, así como también se presentan los resultados obtenidos en ambas pruebas.

En el sexto capítulo se enlistan las diferentes consideraciones que se tienen que tomar en cuenta para realizar el escalamiento del controlador diseñado a un nivel industrial, es decir, utilizando los parámetros que requiere la fábrica para su correcto funcionamiento, así como también propuestas de dispositivos que ayuden a la eficiencia de la subestación eléctrica.

Finalmente en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del proyecto.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Demostrar y visualizar, mediante un modelo funcional, la implementación de un controlador que permita el funcionamiento autónomo de una subestación eléctrica determinada.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y plantear las funciones que la subestación eléctrica tiene que cumplir para su adecuado funcionamiento.
- Realizar una investigación sobre los diferentes dispositivos que trabajarán en conjunto con el controlador a diseñar para realizar las funciones de la subestación eléctrica.
- Analizar y proponer la mejor configuración de solución para que en conjunto con el controlador a diseñar se logre el adecuado funcionamiento de la subestación eléctrica.
- Programar un controlador el cual se utilizará en el modelo funcional simulando los parámetros obtenidos de las especificaciones.
- Realizar un modelo funcional con indicadores para visualizar el funcionamiento completo del control de la subestación eléctrica.
- Plantear las consideraciones necesarias para realizar un escalamiento industrial.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto surge a partir de que la fábrica "X", una imprenta muy importante a nivel nacional, requiere tener un alto nivel de productividad para cumplir con su objetivo principal, el cual es fabricar la cantidad de piezas que indica el programa de producción, esto con base en la demanda anual estimada.

La fábrica tiene dos líneas de producción conformadas por 4 procesos de impresión diferentes, por lo que cuenta con 2 máquinas especiales para cada proceso, las cuales trabajan a una velocidad promedio de 8 mil hojas por hora a dos turnos y en ocasiones llegan a trabajar a tres turnos.

Por lo anterior es importante que el suministro de energía eléctrica sea continuo e ininterrumpido, minimizando así los paros de producción. Además se tiene que garantizar que la calidad de la energía sea la mejor posible, es decir, que cumpla con los parámetros que requieren las máquinas, ya que si éstos no son los adecuados las máquinas pueden sufrir daños y esto se traduce en pérdidas para la fábrica.

Por otro lado, a partir de la explosión de la subestación eléctrica que se tenía, la seguridad tanto del personal como de las instalaciones se convirtió en un aspecto de vital importancia para la fábrica, por consiguiente se busca que la nueva subestación eléctrica sea autónoma y que su

funcionamiento se monitoree vía remota, de tal forma que la intervención de su personal se reduzca a sólo darle mantenimiento a ésta, así como también se busca que cumpla con las medidas de seguridad necesarias para proteger a sus empleados e instalaciones.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Con base en las definiciones de Gilberto Enríquez Harper en sus libros "*Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas*" [1] y "*Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*" [2] y, de José Raúll Martín en su libro "*Diseño de Subestaciones Eléctricas*" [3], una subestación eléctrica se puede definir como un conjunto de dispositivos, los cuales interactúan entre sí para transformar y distribuir la energía eléctrica que recibe de las líneas de transmisión.

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar de diferentes maneras según las consideraciones que se hagan, sin embargo, para el desarrollo de este proyecto se clasificaron por su función y por el tipo de instalación.

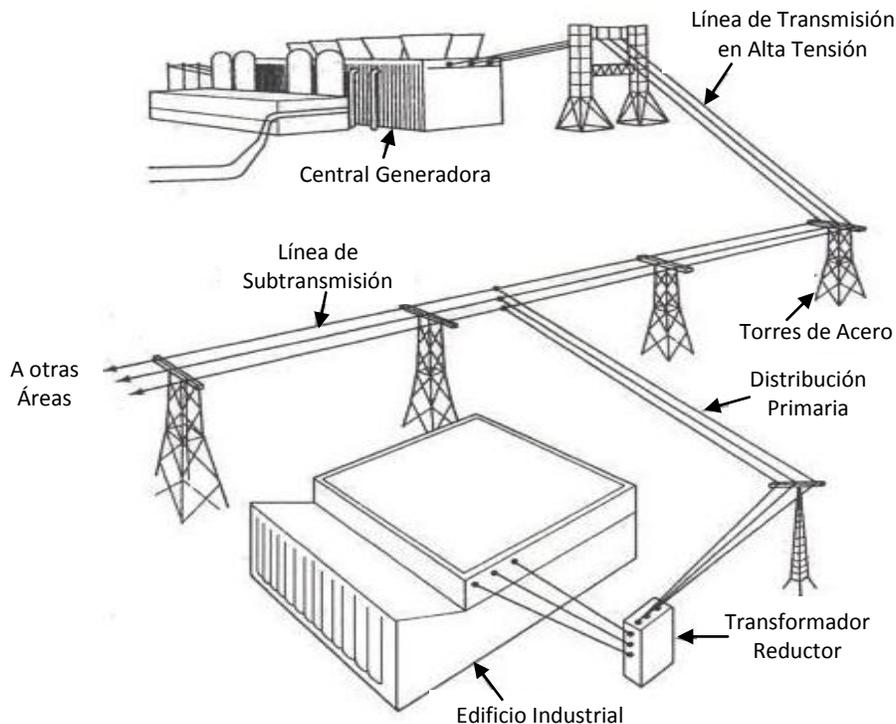


Figura 2.1 Elementos generales de un sistema en la alimentación a industrias [4].

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS POR SU FUNCIÓN

2.2.1 ELEVADORAS

En este tipo de subestaciones a través de los transformadores de potencia se modifican los parámetros principales en la generación de la energía eléctrica, es decir, se eleva el voltaje y se reduce la corriente de tal forma que la potencia se pueda transmitir a grandes distancias con el mínimo de pérdidas. Estas subestaciones generalmente se encuentran en las centrales eléctricas. Este proceso se usa comúnmente para facilitar el transporte de la energía, la reducción de las pérdidas del sistema y mejoras en el proceso de aislamiento de los conductores. [1]



Figura 2.2 Subestación eléctrica elevadora [5].

2.2.2 REDUCTORAS

En las subestaciones reductoras, mediante los transformadores de potencia se modifican los parámetros de transmisión de la energía eléctrica, es decir, se reduce el voltaje y se aumenta la corriente para que la potencia pueda ser distribuida a través de las redes de transmisión, de subtransmisión y los circuitos de distribución para su utilización. [1]



Figura 2.3 Subestación eléctrica reductora [6].

2.2.3 DE MANIOBRA

En estas subestaciones no se tienen transformadores de potencia, ya que no se requiere modificar el nivel de voltaje de las fuentes de alimentación y sólo se hacen operaciones de conexión y desconexión (switcheo). Las subestaciones de maniobra conectan varios circuitos (líneas) para distribuir el flujo de potencia a diferentes áreas del sistema. [1]



Figura 2.4 Subestación eléctrica de maniobra [7].

2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS POR EL TIPO DE INSTALACIÓN

2.3.1 TIPO INTEMPERIE

Son subestaciones construidas para operar expuestas a condiciones atmosféricas (lluvia, nieve, viento y contaminación ambiental), las cuales ocupan grandes extensiones de terreno. Generalmente se usan para sistemas de alta tensión (50 [kV] en adelante) y en una forma muy elemental en las redes de distribución aéreas. Requieren de equipos que sean capaces de soportar el funcionamiento en condiciones atmosféricas adversas. [1]



Figura 2.5 Subestación eléctrica tipo intemperie [8].

2.3.2 TIPO INTERIOR

Son subestaciones diseñadas para operar en interiores, las cuales no se encuentran sujetas a las condiciones de la intemperie. Esta solución en la actualidad sólo se utiliza en subestaciones que ocupan poco espacio, operan en un rango de 5 a 35 [kV] y se emplean en el interior de industrias o comercios. Estas subestaciones también se conocen como subestaciones unitarias. [1]



Figura 2.6 Subestación eléctrica tipo interior [9].

2.3.3 TIPO BLINDADO

En este tipo de subestaciones los equipos que la componen se encuentran completamente aislados en Hexafloruro de Azufre (SF_6) evitando así los arcos eléctricos. A pesar de que el equipo utilizado en estas subestaciones son más caros que los convencionales, éstas resultan económicas a largo plazo ya que se reducen los costos de mantenimiento. Por otro lado, el espacio que ocupan es 4 veces menor que el que ocupan las aisladas en aire, por lo que estas subestaciones se utilizan cuando se tienen problemas de espacio o en áreas de alta contaminación. Generalmente se utilizan en fábricas, hospitales, auditorios, edificios y centros comerciales.

Las subestaciones blindadas pueden ser diseñadas para operar a la intemperie o bien en interiores. En la actualidad, este tipo de subestaciones se instalan en diferentes países ya que admiten un alto nivel de voltaje en un espacio reducido, por ejemplo, en México, este tipo de subestaciones generalmente se diseñan en el rango de 115 a 400 [kV]. [1]



Figura 2.7 Subestación eléctrica tipo blindado [10].

2.4 COMPONENTES DE UNA SUBESTACIÓN

Una subestación eléctrica está compuesta por diferentes dispositivos, los cuales en conjunto realizan la transformación y distribución de la energía eléctrica. Basado en las definiciones que se encontraron en el libro "*Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*" [2], a continuación se describen los elementos primarios y secundarios que constituyen una subestación eléctrica.

2.4.1 ELEMENTOS PRIMARIOS DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Se les denominan así por el nivel de importancia en el correcto funcionamiento de una subestación eléctrica, ya que en caso de tener una falla en alguno de ellos se interrumpiría la transformación de la energía y por consiguiente la distribución de ésta. Estos dispositivos son los siguientes:

2.4.1.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Un transformador es un dispositivo que transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro conservando la frecuencia constante y cambiando el nivel de voltaje (aumentándolo o reduciéndolo), lo anterior lo realiza bajo el principio de inducción electromagnética (obtención de energía eléctrica a partir de las variaciones de flujo magnético). Tiene circuitos eléctricos que están eslabonados magnéticamente y aislados eléctricamente y por lo general su núcleo es de material ferromagnético, el cual reduce las pérdidas mejorando así la eficiencia del transformador.

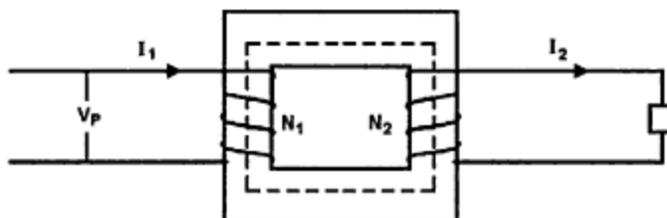


Figura 2.8 Diagrama eléctrico de un transformador [2].

Los elementos que constituyen a un transformador son los siguientes:

Partes internas de un transformador

- A. Núcleo de circuito magnético.
- B. Devanados.

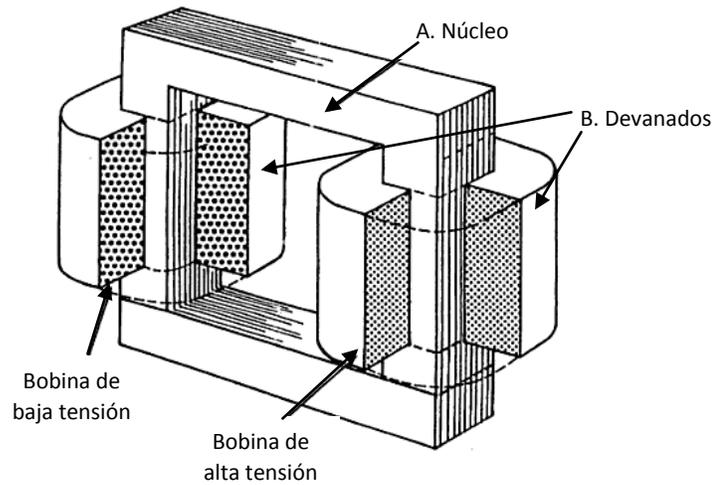


Figura 2.9 Partes internas de un transformador [2].

Partes externas de un transformador

1. Tanque o recipiente.
2. Tapa del tanque.
3. Ganchos de sujeción.
4. Boquillas aisladoras de alta tensión.
5. Boquillas aisladoras de baja tensión.
6. Termómetro.
7. Válvula de drenaje.
8. Tanque conservador.
9. Indicador de nivel.
10. Base para rodar.
11. Ruedas de rodar.
12. Tubos radiadores.
13. Placa de datos del transformador.

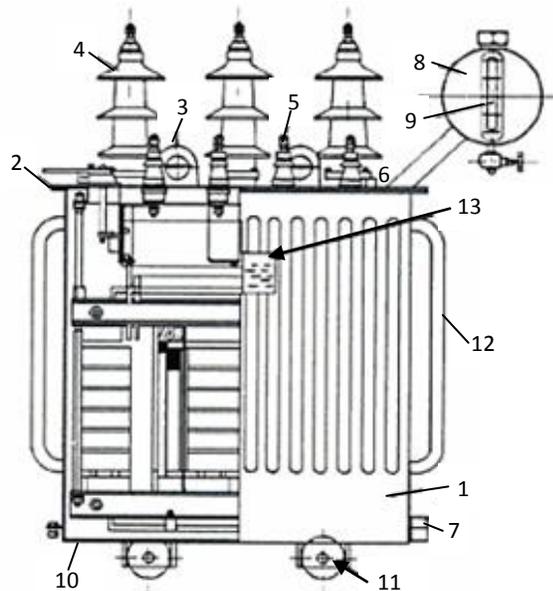


Figura 2.10 Partes externas de un transformador [2].

Otros elementos del transformador

- Aislamiento.
- Aislantes.
- Válvula de carga de aceite.
- Placa de tierra.
- Manómetro.
- Cambiador de derivaciones o taps.

La durabilidad de un transformador depende del comportamiento de sus aislamientos, por ello es importante proveer los medios de enfriamiento adecuados, tanto para el núcleo como para los devanados.

En un transformador, el tipo de aislamiento se elige dependiendo la temperatura máxima de operación de éste, en condiciones normales de trabajo del transformador. Los diferentes tipos de aislamientos que existen son los siguientes:

- Aislamiento clase A. Diseñado para operar a temperaturas menores o igual a 55 [°C].
- Aislamiento clase B. Este tipo de aislamiento puede operar con temperaturas de hasta 80 [°C].
- Aislamiento clase F. Diseñado para trabajar con temperaturas de hasta 115 [°C].
- Aislamiento clase H. Esta clase de aislantes permite diseñar para temperaturas de 150 [°C] y hasta 220 [°C]. Estos aislamientos son los más usados en los transformadores tipo seco.

El tipo de enfriamiento se elige dependiendo la potencia con la cual trabajará el transformador. Los transformadores con potencias inferiores a 50 [kVA] se pueden enfriar por medio del flujo de aire que los rodea, mediante unas rejillas de ventilación en la caja para que el aire pueda circular por los devanados y alrededor del núcleo. En los transformadores tipo seco se puede utilizar la circulación forzada de aire mediante ventiladores, con ello se logra aumentar la capacidad de disipación de calor.

Los transformadores de distribución con potencias menores a 200 [kVA], están usualmente inmersos en aceite y encerrados en tanques de acero. En donde el aceite transporta el calor del transformador hacia el tanque, donde es disipado por radiación y convección hacia el exterior del transformador.

Los tipos de enfriamiento que más se utilizan son:

- Tipo OA. Sumergido en aceite con enfriamiento propio. Se utilizan en transformadores de más de 50 [kVA] con voltajes superiores a 15 [kV], en donde el aceite circula dentro de un tanque con paredes lisas o corrugadas o en algunos casos por tubos radiadores.
- Tipo OW. Sumergido en aceite con enfriamiento por agua. En estos transformadores el agua de enfriamiento es conducida por serpentines los cuales están en contacto con el aceite aislante del transformador.
- Tipo FOA. Sumergido en aceite, enfriado con aceite forzado y aire forzado. En estos transformadores operan al mismo tiempo las bombas de aceite y los ventiladores para disipar el calor.
- Tipo OW/A. Sumergido en aceite con enfriamiento por agua y por aire.

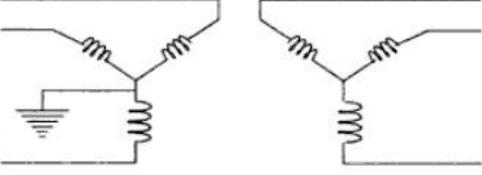
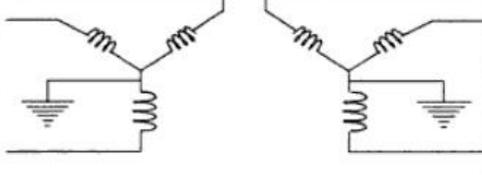
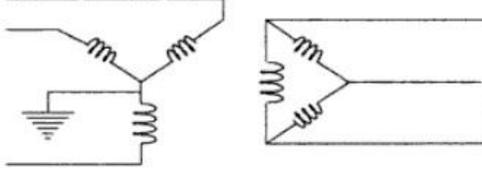
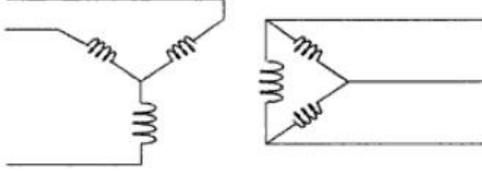
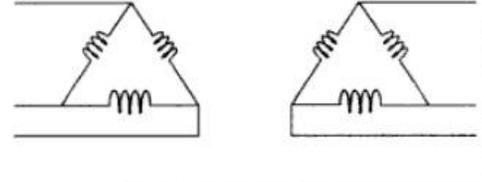
- Tipo OA/FA. Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado, en el cual se utilizan ventiladores para aumentar la capacidad de disipación de calor.
- Tipo OA/FA/FOA. Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio a base de aire forzado y aceite forzado, en el cual se adicionan ventiladores y bombas para la circulación de aceite.
- Tipo FOW. Transformadores sumergidos en aceite con enfriamiento por agua forzada.
- Tipo AA. Se utiliza en los transformadores tipo seco con enfriamiento propio, ya que no contienen aceite ni otro líquido para enfriamiento, para capacidades inferiores a los 2000 [kVA] y voltajes menores de 15 [kV].
- Tipo AA/FA. Transformadores tipo seco enfriado por aire forzado.

Para elegir que transformador utilizar en una subestación eléctrica es importante considerar su capacidad, es decir, la demanda inicial y en años posteriores; así como las pérdidas anuales en [kW].

Existen varias configuraciones de transformadores las cuales se mencionan a continuación:

- Conexión Delta-Delta. Esta configuración se utiliza en sistemas de transmisión donde los voltajes de operación no son altos y la continuidad del servicio debe ser mantenida aún si uno de los transformadores falla. Con esta conexión los voltajes permanecen iguales independientemente del grado de desbalance de la carga y tiene la ventaja de poder conectar los devanados primario y secundario sin desfasamiento.
- Conexión Estrella-Estrella. Esta configuración se utiliza en sistemas de transmisión en donde los voltajes de operación son elevados, ya que disminuye la cantidad de aislamiento, esta conexión da un buen servicio siempre y cuando la carga trifásica es balanceada, en caso contrario el neutro eléctrico tiende a ser desplazado del punto central, es decir, se obtienen voltajes diferentes entre la línea y el neutro.
- Conexión Delta-Estrella. Esta configuración se utiliza en sistemas de transmisión donde se requiere elevar el voltaje. Una de las ventajas de esta conexión es que se pueden tener 2 voltajes diferentes entre fase y neutro.
- Conexión Estrella-Delta. Esta configuración se utiliza en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir los voltajes.

Tabla 2.1 Conexiones típicas de transformadores [2].

CONEXIÓN Y SÍMBOLO	DIAGRAMA
<p>ESTRELLA ATERRIZADA / ESTRELLA</p> 	
<p>ESTRELLA ATERRIZADA / ESTRELLA ATERRIZADA</p> 	
<p>ESTRELLA ATERRIZADA / DELTA</p> 	
<p>ESTRELLA / DELTA</p> 	
<p>DELTA / DELTA</p> 	

2.4.1.2 INTERRUPTOR DE POTENCIA

Un interruptor es un dispositivo cuya función es interrumpir y restablecer la continuidad en un circuito eléctrico, la interrupción que realizan estos dispositivos tiene que ser con carga o con corriente de corto circuito.

Las magnitudes que se deben considerar en el proceso de cierre-apertura en un interruptor de potencia cuando se desconecta automáticamente una vez que se cierra el interruptor y se produce la corriente de corto circuito son las siguientes:

- Voltaje nominal, que es el voltaje normal de operación del interruptor.
- Corriente inicial de corto circuito, ya que ésta se considera el valor instantáneo de la corriente de falla.
- Corriente de ruptura, el cual es el valor permanente de la corriente de corto circuito.
- Capacidad interruptiva, que es la potencia de interrupción a una corriente de ruptura para trifásicos.
- Voltaje de restablecimiento, es el que se presenta en el interruptor después de la desconexión.

Las condiciones de operación que puede ofrecer un interruptor dependen de las magnitudes anteriores con la cual fue diseñado, sin embargo, el parámetro principal para diseñar un interruptor es la corriente de corto circuito, ya que ésta nos indica cual es la corriente máxima que debe soportar el interruptor antes de fallar.

El ciclo de trabajo de un interruptor consiste en una serie de aperturas y cierres, o ambas a la vez, con el fin de revisar su funcionamiento y someterlos a las condiciones de operación con la cual fue diseñado.

Los interruptores de potencia pueden ser de diferentes tipos, como son:

- Interruptores de Aceite. En estos interruptores se utiliza aceite para eliminar el arco eléctrico que se genera cuando ocurre una falla. Estos interruptores utilizan contactos móviles y fijos, que se van separando al presentarse la falla creando un arco eléctrico entre ellos y a su vez una burbuja de gases, la cual se elimina con ayuda de un tubo de fuga de gases.

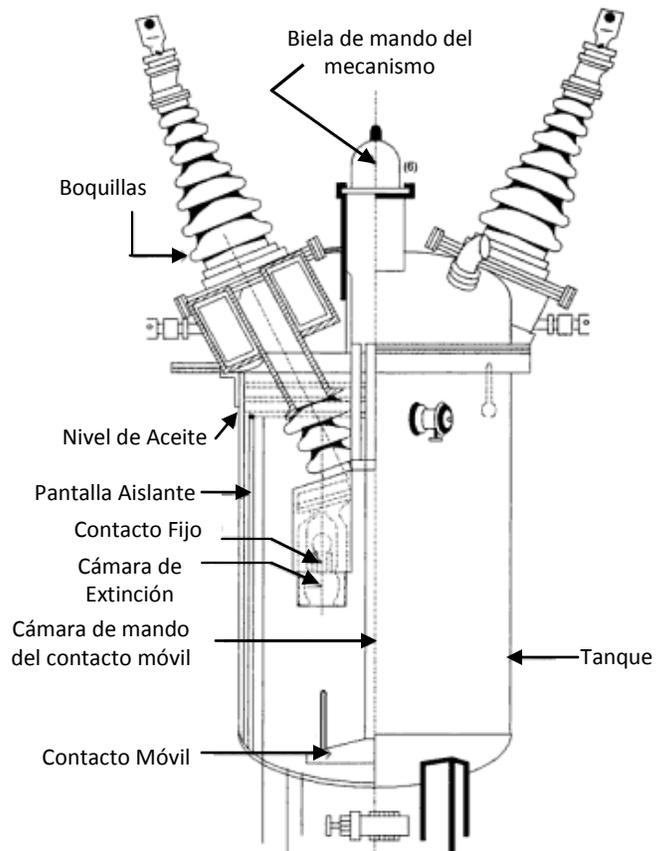


Figura 2.11 Interruptor de aceite [2].

- **Interruptores Neumáticos.** En estos interruptores el medio para extinguir los arcos eléctricos es aire a presión, evitando expansiones e incendios. Cuando se presenta una falla se acciona y se abre la válvula principal permitiendo el acceso de aire a presión para eliminar el arco eléctrico.

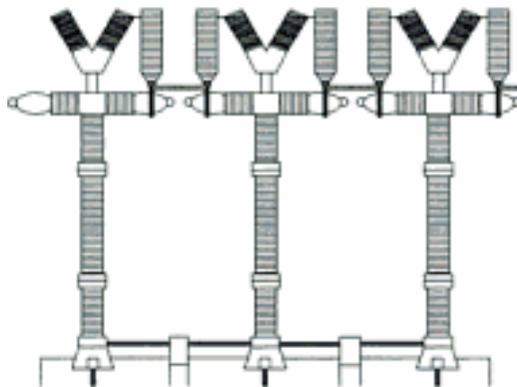


Figura 2.12 Interruptor neumático [2].

- Interruptores en Hexafloruro de Azufre (SF_6). Gracias a las excelentes propiedades aislantes del SF_6 , éste se ha considerado una excelente solución para extinguir los arcos eléctricos además de que su mantenimiento es reducido en comparación de otros interruptores. Actualmente se fabrican en tensiones de hasta 800 [kV] y corrientes de corto circuito de hasta 63 [kA].

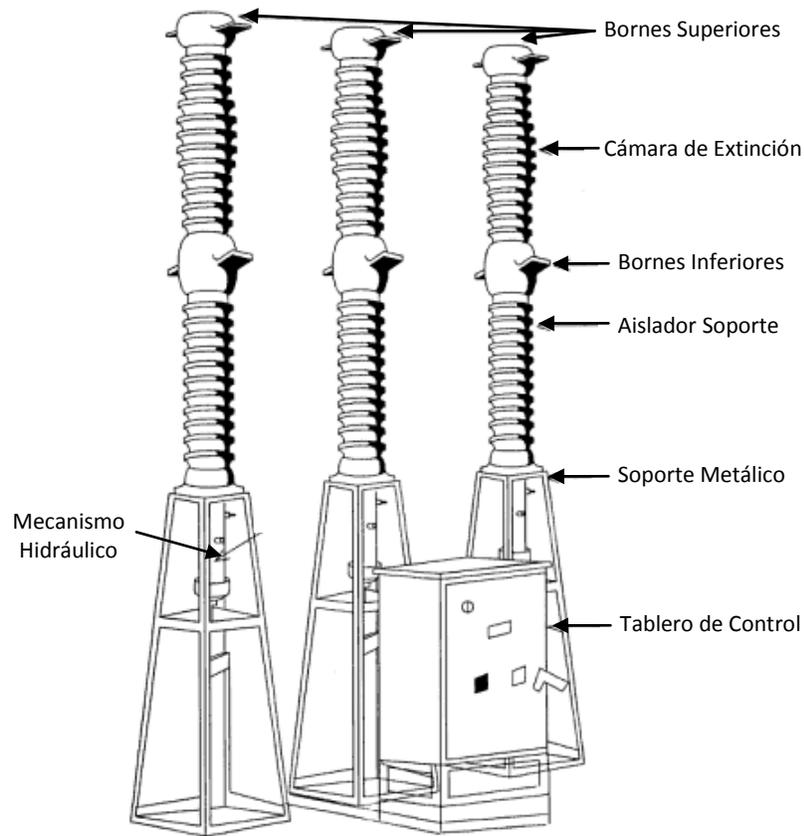


Figura 2.13 Interruptor en Hexafloruro de Azufre (SF_6) [2].

2.4.1.3 CUCHILLA FUSIBLE

Una cuchilla fusible es un elemento de conexión y desconexión de circuitos eléctricos, pero a su vez funciona como un elemento de protección. Dentro de la cuchilla tiene un dispositivo fusible, el cual se elige de acuerdo al valor de corriente nominal que va a circular por él.

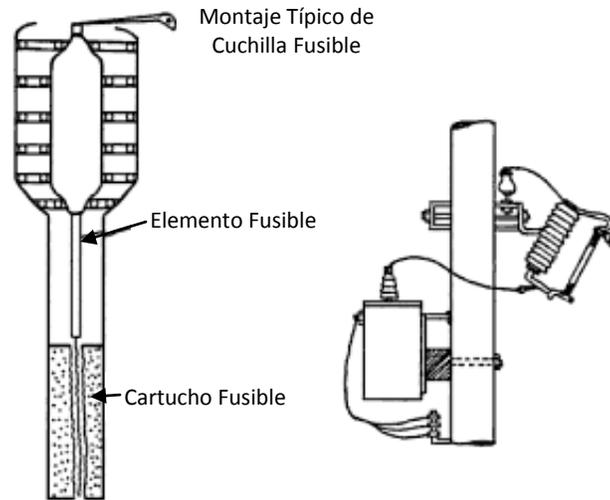


Figura 2.14 Cuchilla fusible [2].

Existen diferentes tipos de cuchillas fusibles o desconectoras, dependiendo el uso que se les dé (con carga, sin carga o puesta a tierra), el tipo de accionamiento (manual o automático) y su forma de desconexión (con 3 aisladores, con 2 aisladores, cuchilla "AV", cuchilla de 3 aisladores, etc.).

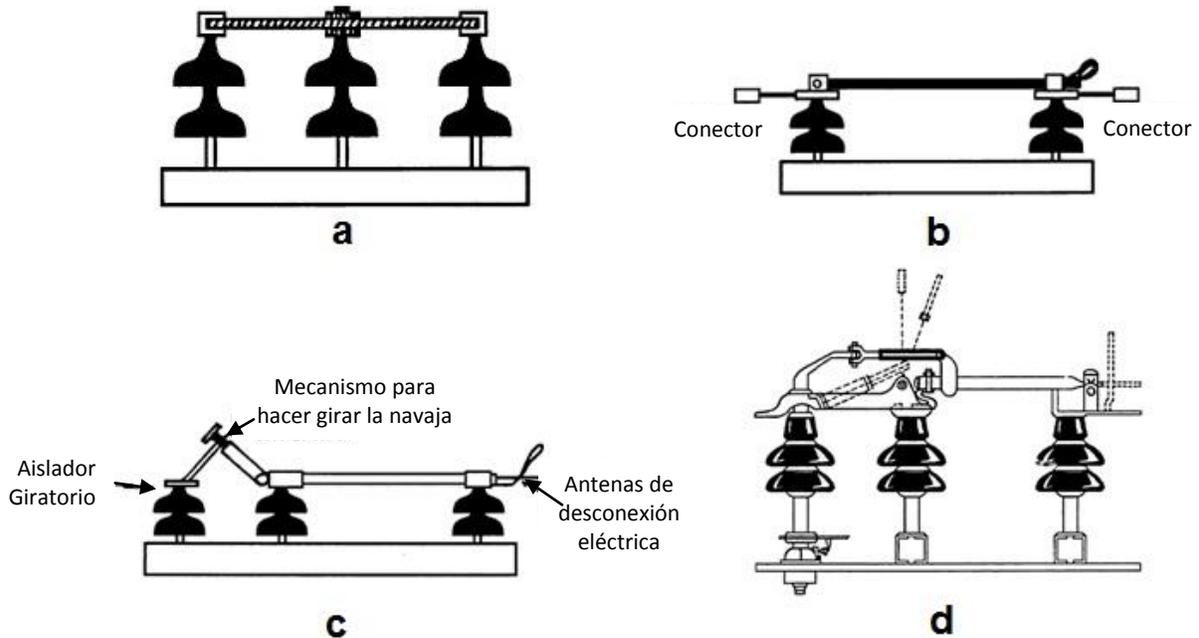


Figura 2.15 Diferentes tipos de cuchillas desconectoras. a) con 3 aisladores, b) con 2 aisladores, c) cuchilla "AV", d) cuchilla con 3 aisladores de operación vertical con brazo horizontal 34.5 a 69 [kV], 400-1200 [A] [2].

Algunas capacidades comerciales de cuchillas fusibles de operación vertical en grupo para montaje a la intemperie se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Capacidades comerciales de cuchillas fusibles para montaje a la intemperie.

Voltaje Nominal [kV]	7.5	15	23	34.5	46	69
Corriente continuada [A]	600	600	600	600	600	600
Frecuencia [Hz]	50-60	50-60	50-60	50-60	50-60	50-60
Apertura de cuchillas	90°	90°	90°	90°	90°	90°

Algunas capacidades comerciales de cuchillas fusibles de operación vertical en grupo para montaje en interior se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Capacidades comerciales de cuchillas fusibles para montaje en interior.

Voltaje Nominal [kV]	6	7.5	15	23	30
Corriente continuada [A]	600	600	600	600	600
Frecuencia [Hz]	50-60	50-60	50-60	50-60	50-60
Apertura de cuchillas	90°	90°	90°	90°	90°

Los parámetros que se deben considerar para la selección de una cuchilla fusible (desconectora) son los siguientes:

- Tensión nominal de separación, es el voltaje de operación que se tiene a partir de la separación de las cuchillas.
- Corriente nominal, es la corriente de operación de la cuchilla.
- Corriente de corto circuito simétrica, es la amplitud de la corriente de corto circuito que no cambia en el tiempo y está desfasada 90° con respecto al voltaje.
- Corriente de corto circuito asimétrica, es la amplitud de la corriente de corto circuito que cambia en el tiempo debido a la presencia de una componente de corriente continua de caída exponencial y está retrasada 90° con respecto al voltaje.
- Tipo de montaje, forma de instalación de las cuchillas (horizontal o vertical).
- Forma de mando, tipo de accionamiento (manual o motorizada).

2.4.1.4 APARTARRAYOS

La función de los apartarrayos es proteger las instalaciones contra sobretensiones de origen atmosférico. Éste se encuentra conectado permanentemente en el sistema y sólo opera cuando se presenta una sobretensión descargando la corriente a tierra.

Su principio de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores, cuya separación está determinada por el voltaje con el que se va a operar.

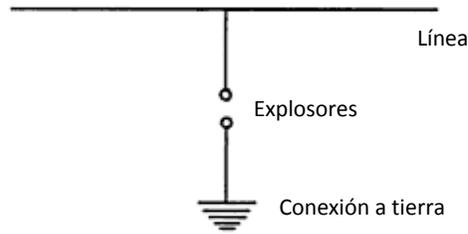


Figura 2.16 Diagrama eléctrico de un apartarrayos [2].

Entre los más comunes existen los siguientes dos tipos de apartarrayos:

1. Apartarrayos tipo autovalvular, el cual tiene varias chapas de explosores conectados en serie por medio de resistencias variables, cuya función principal es dar una operación más sensible y precisa. Éstos se emplean cuando se busca una gran seguridad de operación y cuando se va a operar con grandes voltajes (150 a 400 [kV]).
2. Apartarrayos de resistencia variable. El cual tiene dos explosores, y se conecta en serie a una resistencia variable. Se emplea cuando se opera con voltajes medianos (1 a 36 [kV]) y en sistemas de distribución (13 a 35 [kV]).

Para dar mayor seguridad a las instalaciones cuando se presentan descargas directas, se colocan unas varillas conocida como bayonetas e hilos de guarda semejantes a los que se colocan en las líneas de transmisión.

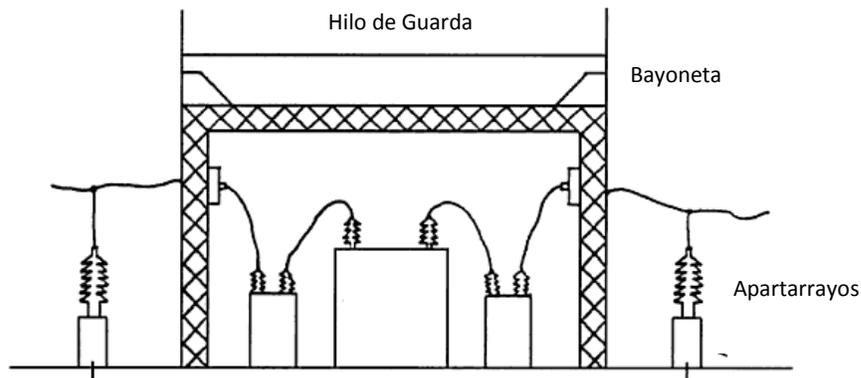


Figura 2.17 Localización de apartarrayos en una instalación eléctrica [2].

2.4.1.5 TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTO

Los transformadores para instrumento son los que se emplean para alimentar a los equipos de medición, control o protección. Estos se dividen en dos clases diferentes:

1. Transformadores de corriente. El cual tiene como principal función cambiar el valor de la corriente, con la cual se pueda alimentar a los instrumentos de medición, control o protección. La capacidad de estos transformadores es muy baja y puede ser de 15 a 70 [VA]. Estos transformadores son pequeños y su aislamiento puede ser de resinas sintéticas, aceite o líquidos no inflamables. La corriente del devanado secundario siempre es de 5 [A] sin importar la relación de transformación.

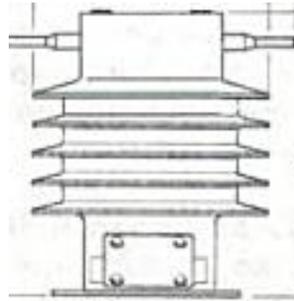


Figura 2.18 Transformador para instrumento de corriente [11].

2. Transformadores de potencial. Tiene como función principal transformar los valores de voltaje sin tomar en cuenta la corriente. Su capacidad varía de 15 a 60 [VA]. Estos transformadores son al igual que los transformadores de corriente, pequeños y llegan a utilizar los mismos tipos de aislamiento. En este tipo de transformador el voltaje del devanado secundario es normalmente de 115 [V] sin importar la relación de transformación.

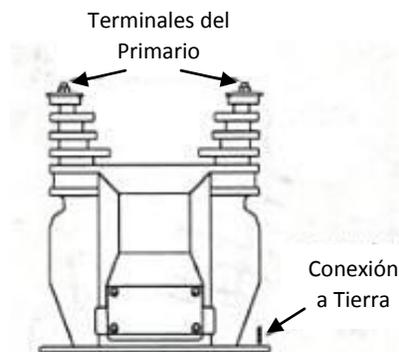


Figura 2.19 Transformador para instrumento de potencial [11].

2.4.2 ELEMENTOS SECUNDARIOS DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Los elementos secundarios son aquellos que ayudan al correcto funcionamiento de una subestación eléctrica, pero en caso de tener alguna falla en alguno de ellos no se interrumpiría la distribución de la energía, ya que unos son de supervisión y otros son de protección, de control o de construcción. Algunos de estos elementos son los siguientes:

2.4.2.1 BANCO DE CAPACITORES

Es un conjunto de celdas capacitivas, el cual tiene como función principal corregir el factor de potencia, con ello se logra mayor eficiencia eléctrica en el sistema, es decir, mejora la regulación de voltaje y por ende la calidad de la energía, además de lograr incrementar la capacidad disponible de los equipos conectados. [12]

2.4.2.2 TABLEROS DE CONTROL

Un tablero eléctrico es un gabinete que contiene los dispositivos de conexión, control, medición, protección, alarmado y señalización, el cual debe cumplir con ciertos criterios de diseño y normas para que tenga un correcto funcionamiento una vez que se energice, garantizando así la seguridad de los operadores y de las instalaciones en las cuales se ubique. [13]

Algunos criterios de diseño para los tableros de control que hay que considerar según la especificación CFE V6700-62 [14], son los siguientes:

- Se deben diseñar para servicio interior.
- Debe mantener la temperatura ambiente.
- Cada gabinete debe tener las siguientes dimensiones: 900 [mm] de ancho por 800 [mm] de fondo y 2300 [mm] de alto.
- El calibre de la lámina de acero utilizada para los gabinetes debe ser de un espesor no menor de 2.5 [mm], excepto las tapas laterales y la puerta posterior, las cuales deben ser de un espesor no menor a 1.7 [mm].
- Los gabinetes deben contar con dos accesos para el cable de control en la parte superior e inferior, dichos accesos deben contar con tapas removibles y empaques para evitar la entrada de polvo.
- La estructura de cada gabinete debe estar conformada por un bastidor a base de perfiles angulares de acero, garantizando la rigidez mecánica del conjunto en cualquier condición de transporte y montaje.
- En el frente debe contar con una puerta con acrílico transparente de un espesor no menor a 5 [mm], con empaques de sello para evitar la entrada de polvo, cerradura de manivela de tipo pivote y marco estructural para evitar que se flexione.

Algunas normas internacionales que aplican a los tableros de control son la *IEC 62271-200 (2003)* "General requirement for metal enclosed switchgear", la *IEC 60 298 (1990)* "Metal enclosed switchgear and control gear for rated voltages upto and including 36 KV" y la *IEEE C37.20.2 (1999)* "IEEE Standard for metal-clad switchgear".

2.4.2.3 BANCOS DE BATERÍAS

Los bancos son un conjunto de baterías conectadas en serie o paralelo para obtener el voltaje de corriente directa requerida en las subestaciones eléctricas y se utilizan principalmente para garantizar el suministro de energía necesaria para el funcionamiento del equipo de protección, así como también proveen energía a los dispositivos de control, medición, señalización y circuitos de alarma que componen a una subestación eléctrica. [15]

Es importante que en donde se instalen los bancos de baterías se coloque un extractor de gases para eliminar los gases de hidrógeno que producen cuando suministran energía a los diversos equipos, ya que son altamente explosivos y representan un alto riesgo tanto para las instalaciones como para el personal. [15]

2.4.2.4 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA

Con la utilización de una interfaz hombre-máquina se logra el monitoreo y control de la operación de todos los componentes de la subestación eléctrica. Esta interfaz puede ser una computadora o una pantalla LED o LCD en la cual se observan los diferentes parámetros de interés para el correcto funcionamiento de la subestación eléctrica así como el detalle de las alarmas que se disparan. [15]

2.4.2.5 CABLES DE POTENCIA Y DE CONTROL

La función principal de los cables de potencia es transportar la energía eléctrica, éstos deben estar perfectamente aislados para su correcto funcionamiento y evitar cortos circuitos. Este tipo de cable es utilizado en instalaciones subterráneas, ductos o en tensiones mayores de 5 [kV]. [16]

Los cables de potencia pueden ser de cobre o de aluminio y operan en un rango de 5 a 35 [kV] a una temperatura normal de 90 [°C] y a una temperatura de 250 [°C] en condiciones de corto circuito. [17]

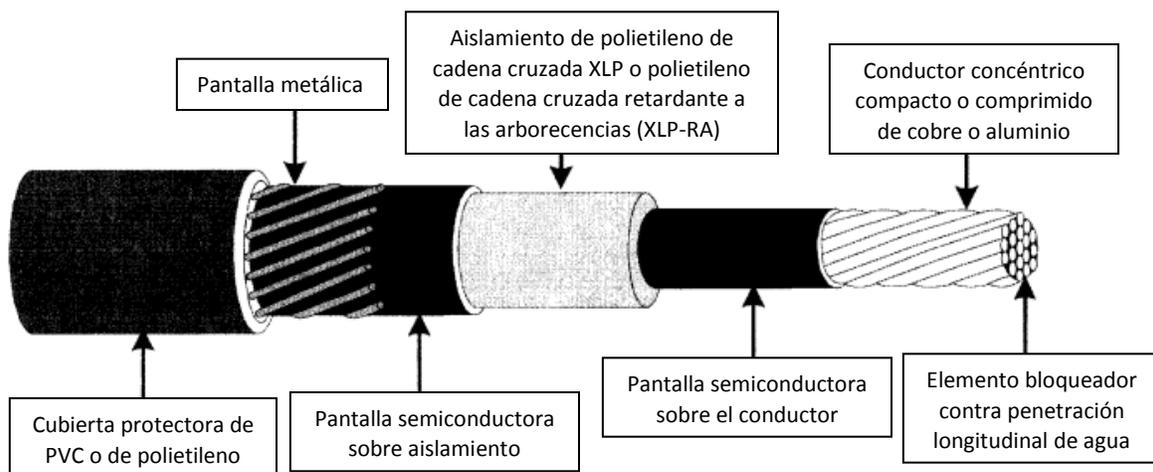


Figura 2.20 Cable de potencia [17].

Los cables de control sirven para conducir las señales entre los diferentes dispositivos para lograr el monitoreo y el control de la energía que se transporta en la subestación eléctrica, así como también en sistemas de señalización e instrumentación eléctrica y/o electrónica. Este tipo de cable puede operar con voltajes de hasta 600 [V] a una temperatura máxima de 75 [°C]. Son resistentes a la propagación de incendios, resistentes a la humedad y con excelentes propiedades dieléctricas. Pueden ser instalados en ductos subterráneos, trincheras, tubo conduit, ductos metálicos y no metálicos con tapa. [18]

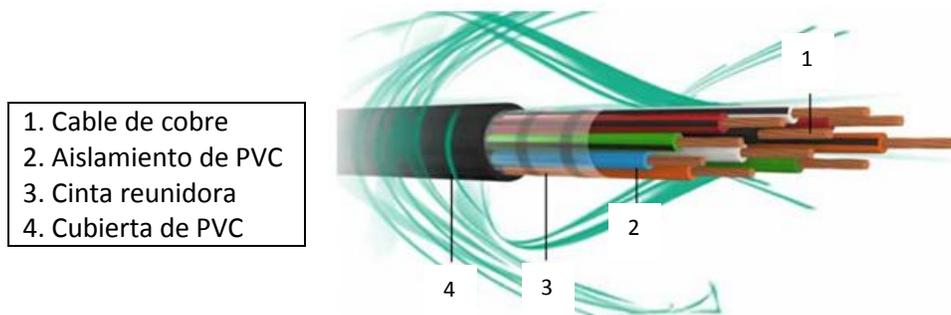


Figura 2.21 Cable de control [18].

2.4.2.6 SISTEMA DE TIERRA

Un sistema de tierras en una subestación eléctrica se utiliza para proteger al personal cuando se encuentre trabajando en las instalaciones o con los equipos que componen a la subestación eléctrica, evitando el riesgo de una descarga eléctrica debido a fallas; además de disipar las corrientes eléctricas indeseables para proteger a los equipos. [19]

2.4.2.7 EQUIPO CONTRA INCENDIO

En una subestación eléctrica existen diferentes componentes que pueden producir un incendio como lo son los bancos de baterías o los transformadores, por tal motivo es importante el uso de un equipo contra incendio ya sean automático o manual, de tal forma que al presentarse un incendio se active y se puedan accionar los aspersores de agua o algún polvo químico seco que se esparza en el área evitando que el fuego se propague, así como también contar con extintores cerca de la subestación eléctrica. [20]

2.4.2.8 ALUMBRADO

Las áreas de la subestación eléctrica deben tener una iluminación adecuada para que el personal operativo y de mantenimiento pueda realizar sus trabajos, garantizando así la correcta operación del equipo. [20]

Los factores que hay que considerar para conseguir una visión eficaz, rápida y cómoda para realizar los trabajos son los siguientes:

- Importancia de los detalles de los objetos que se tratan de distinguir.
- Distancia de los objetos al observador.
- Factores de reflexión en el área.
- Contraste entre los detalles y los fondos.
- Tiempo empleado en la observación.

Según la importancia de los factores mencionados se recomiendan algunos niveles de iluminación para las diferentes áreas de trabajo, mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Niveles de iluminación recomendados [20].

Local	Nivel de iluminación (luxes)	
	(Preferible)	(Mínimo)
Locales Interiores:		
a) Cuartos de baterías	200	100
b) Cuartos de control:	300	200
- Alumbrado de emergencia, todas las áreas	30	
c) Caseta Metal Clad	300	200
Local		
Áreas Exteriores		
a) Zona de equipo instalado y de paso:		
- Iluminación general horizontal	20	
- Iluminación general vertical (sobre equipo)	20	
b) Zonas alrededor de la caseta de control:		
- Entrada principal	100	

2.4.2.9 TRINCHERAS, DUCTOS, CONDUCTOS Y DRENAJES

Son instalaciones subterráneas que tienen por objeto alojar los cables de control, de fuerza, de potencia y fibra óptica para interconectar los equipos primarios, secundarios, tableros de medición, tableros de protección y demás componentes de una subestación eléctrica. [20]

El diámetro de los ductos depende de la cantidad y calibre del cable a alojar. Para los registros el tipo y la cantidad depende de la cantidad de ductos a alojar y de la distribución de éstos. [16]

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una vez entendido lo que es una subestación eléctrica y, a partir de la importancia de lograr un alto nivel de productividad, eficiencia y calidad en el servicio de energía eléctrica, la fábrica "X" requiere un control que logre el correcto monitoreo y funcionamiento de una subestación eléctrica, la cual distribuye la energía a los diferentes equipos de producción. Cabe mencionar que esto se debe lograr con la menor intervención del personal, de tal forma que tengan menor contacto con la subestación eléctrica preservando así su seguridad.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS NECESIDADES

Es fundamental tener un control automático de la subestación eléctrica, de tal forma que se pueda abastecer energía de manera continua durante todo el año a la fábrica "X", así mismo, es necesario reducir la intervención del personal en el control del abastecimiento de energía en la fábrica.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

A partir de las necesidades descritas los requerimientos para este proyecto son los siguientes:

- Suministrar energía eléctrica de manera ininterrumpida y continua a los equipos de producción.
- Minimizar los paros de producción debido a las fallas en el suministro eléctrico.
- Lograr que el tiempo de respuesta del sistema sea el mínimo posible.
- Suministrar la energía que demanda cada equipo de producción.
- Garantizar la calidad de la energía.
- Fácil de implementar.
- Tener condiciones seguras para el equipo y el personal de mantenimiento y de operación.
- Fácil de utilizar.
- Amigable con el usuario.
- Estandarizar simbologías, códigos de colores y diagramas eléctricos.
- Crear un manual de operación y protocolo de fallas.
- Tener un protocolo de pruebas previas a las que se realizaran en la instalación.
- Realizar planos y diagramas del sistema completo.

3.3 PLANTEAMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES

A partir de los requerimientos identificados y los datos históricos que se pudieron obtener sobre los eventos presentados en la fábrica, se plantearon las especificaciones, las cuales ayudarán a verificar que tan satisfactorio es el desempeño del controlador a diseñar en conjunto con los dispositivos a proponer con base en una métrica, permitiendo así validar las decisiones del diseño, como se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Especificaciones a partir de los requerimientos.

REQUERIMIENTO	MÉTRICA	PARÁMETRO	UNIDADES
Suministrar energía eléctrica de manera ininterrumpida y continua a los equipos de producción.	Porcentaje del año	90	%
Minimizar los paros de producción debido a las fallas en el suministro eléctrico.	Paros presentados por año	≤ 5	No. de paros
Suministrar la energía que demanda cada equipo de producción.	Voltaje CD	220	[Volts]
Garantizar la calidad de la energía.	Porcentaje de pérdidas al año	≤ 10	%
Garantizar la calidad de la energía.	Factor de Potencia	≥ 0.9	adimensional
Garantizar la calidad de la energía.	Disponibilidad de energía	≥ 95	%

Como se puede observar en la tabla 3.1 sólo se mencionan algunos requerimientos, los cuales se pueden verificar con ayuda de una métrica. Los demás requerimientos de este proyecto no son medibles ya que son de estandarización, facilidad de uso y de implementación y, de ingeniería de detalle, es decir, lo que se requiere es la creación de documentos, planos y diagramas que sirvan de guía para el manejo, control y construcción de la subestación eléctrica.

4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

4.1 CONCEPTUALIZACIÓN

El alcance de este proyecto es la realización de un modelo funcional a escala, con el cual se mostrará el funcionamiento del controlador a diseñar para cumplir las funciones de la subestación eléctrica, en otras palabras, el sistema de control; el cual trabajará en conjunto con los dispositivos a proponer. El funcionamiento se podrá visualizar a partir de la realización de pruebas con condiciones simuladas y posteriormente pruebas con condiciones reales.

Con base en las necesidades, los requerimientos y las especificaciones, se realiza un análisis de las funciones que debe cumplir la subestación eléctrica así como una investigación sobre los dispositivos que podrán satisfacer cada una de las funciones, para finalmente diseñar el controlador, el cual es la base del proyecto general.

Para llevar a cabo el proyecto, es importante conocer la subestación eléctrica a la que se pretende dar servicio, es decir, cuales son los dispositivos que componen a ésta así como las características de cada uno, para que, posterior a la investigación se pueda determinar si los dispositivos con los que se cuenta son útiles o no, mismos que se describen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Dispositivos que componen a la subestación eléctrica y sus características.

Nombre del Equipo	Marca	Modelo	No. Serie	Características principales	Capacidad	Cantidad	Unidad
Subestación eléctrica en media tensión, en gas SF6 (incluye: interruptor dos interruptores derivados en SF6)		S/M	S/N	Tensión servicio 23 [kV], 60 [Hz], trifásica, motorizada, automática, medio aislante SF6	600 [A]	1	Pza.
Transformador tipo seco encapsulado en resina epóxica	G.E.	S/M		Conexión delta-estrella, 23000/220-127 VCA, 60 [Hz], trifásico	500 [kVA]	1	Pza.
Transformador tipo seco encapsulado en resina epóxica	Alkargo	S/M	39372	Conexión delta-estrella, 23000/220-127 [VCA], 60 [Hz], trifásico	500 [kVA]	1	Pza.
Tableros de distribución	Moeller	Modan 6000	S/N	Tensión de servicio 220 [VCA], 60 [Hz], trifásico, cinco hilos. Incluye interruptores electromagnéticos y termomagnéticos versión extraíble	2500 [A]	Varios	Pza.
Banco de capacitores automático con reactores de rechazo e interruptor electromagnético	Moeller			Tensión de servicio 220 [VCA], 60 [Hz]	500 kVAR	1	Pza.
Filtro para disturbios eléctricos	Vogar	LAN-13G6C	S/N	Monofásico de 24 [A] por fase, tensión de entrada 120/208 [V], tensión de salida 120/208 [V], frecuencia 58.8-61.2 [Hz]	24 [A] por fase	1	Pza.
Pantalla de control y monitoreo tipo Touch Screen (PLC)	Moeller	8532000600	5081798			1	Pza.

4.2 DIAGRAMA UNIFILAR

“El diagrama unifilar de una subestación eléctrica es el resultado de conectar en forma simbólica y a través de un solo hilo todo el equipo mayor que forma parte de la instalación, considerando la secuencia de operación de cada uno de los circuitos” [3].

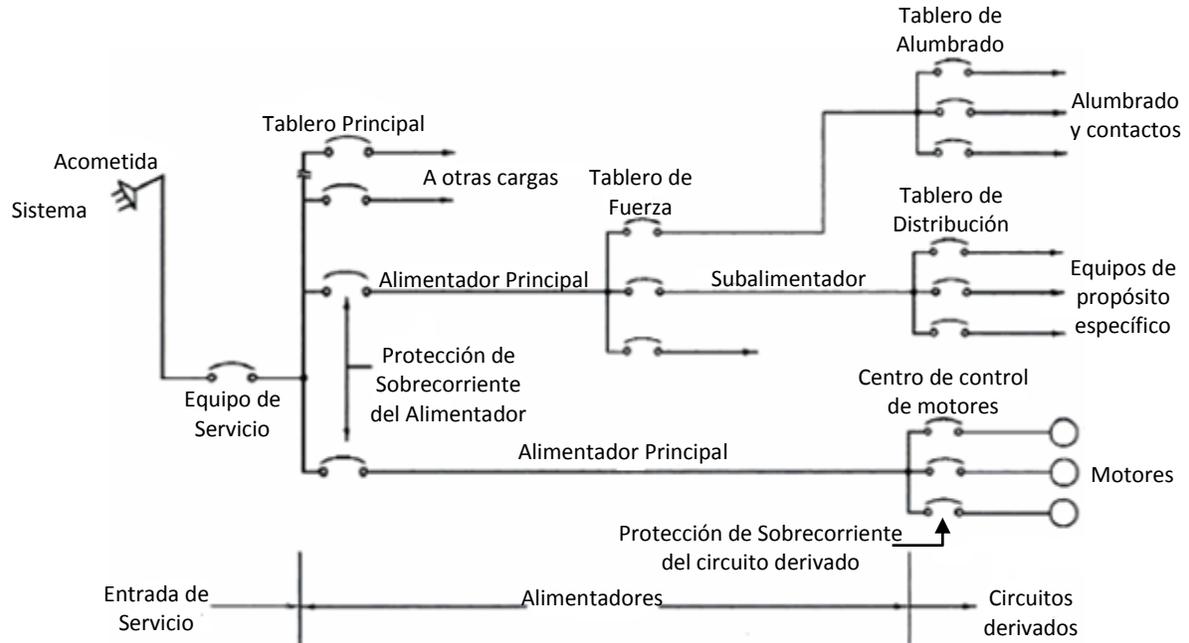


Figura 4.1 Diagrama unifilar mostrando los componentes básicos de un sistema eléctrico industrial [4].

Partiendo de la definición anterior y para una visualización más rápida se utilizará el diagrama unifilar (figura 4.2) proporcionado por la fábrica, en el cual se muestra las diferentes fuentes de energía y las diferentes áreas a las cuales suministra energía la subestación eléctrica.

Las fuentes de energía que se tienen son tres; dos acometidas proporcionadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en donde la energía llega a dos transformadores conexión delta-estrella de 500 [kVA] de capacidad y una planta de emergencia obtenida a partir de un generador de 600 [kVA].

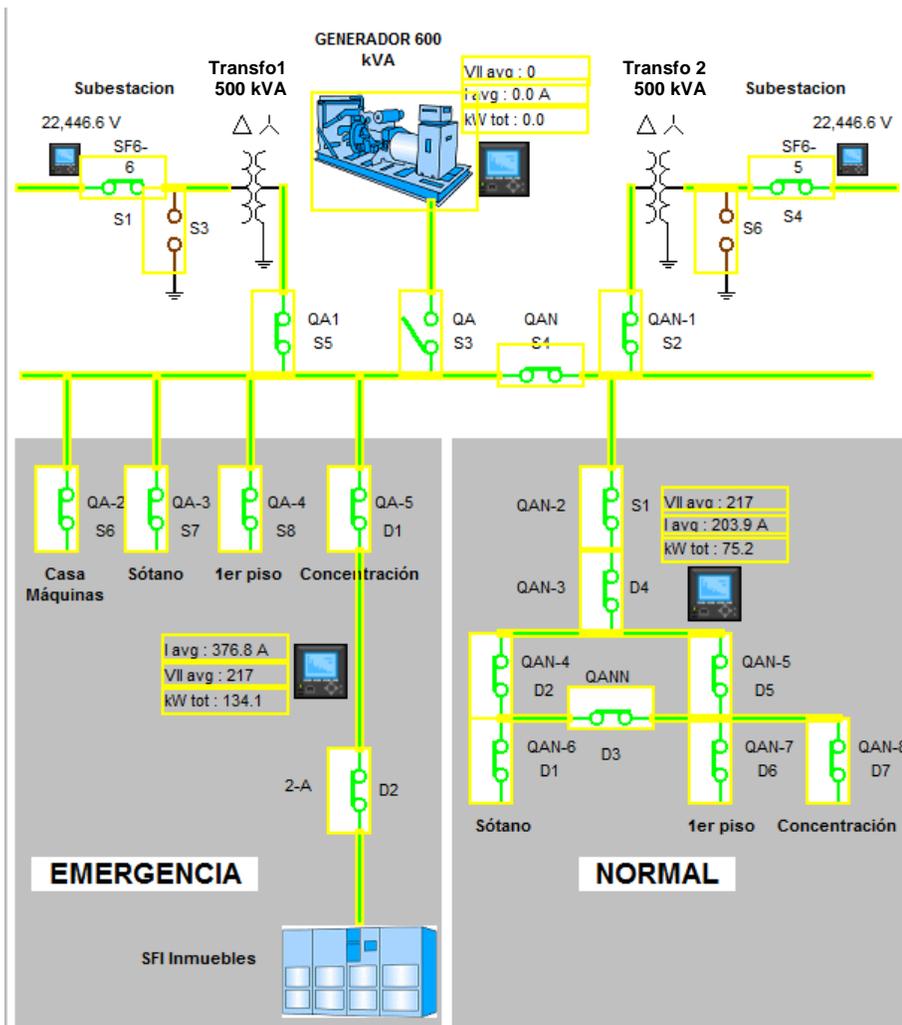


Figura 4.2 Diagrama unifilar proporcionado por la fábrica.

Otra forma de visualizar la distribución eléctrica a partir de las dos acometidas de CFE y la interconexión que hay entre las diferentes áreas que alimentan a toda la fábrica es la que se muestra en la figura 4.3.

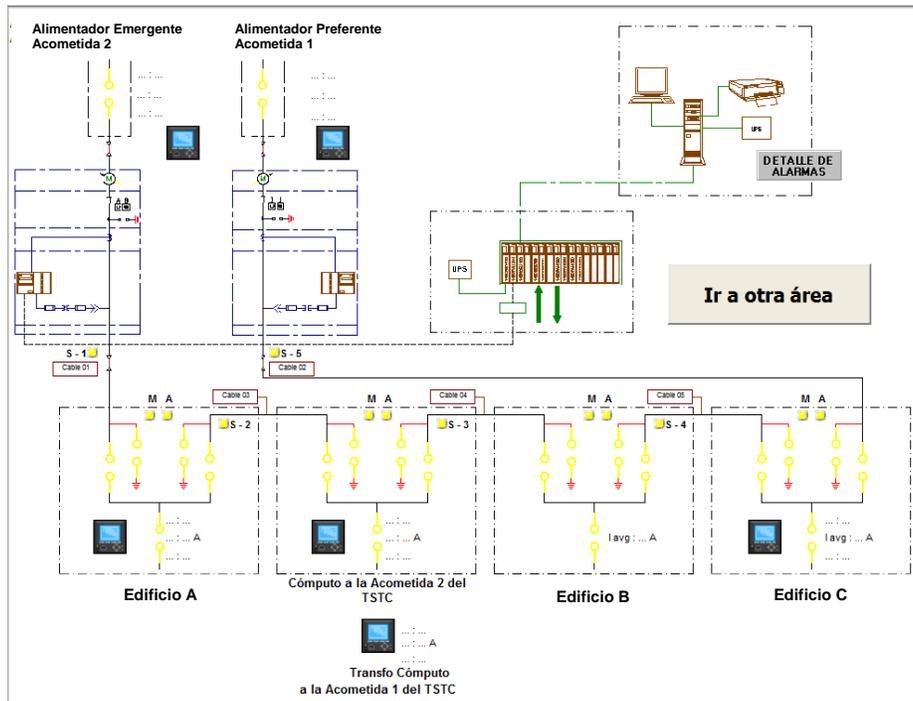


Figura 4.3 Diagrama de la distribución eléctrica de la fábrica.

En la figura 4.4 se muestra de manera gráfica cómo está conformada la subestación eléctrica. Se tienen gabinetes, pantallas táctiles e interruptores termomagnéticos (rectángulos de color verde). La zona con la cual se trabajó en este proyecto es la encerrada en el recuadro de color rojo, estos tres gabinetes representan a las tres fuentes de energía.

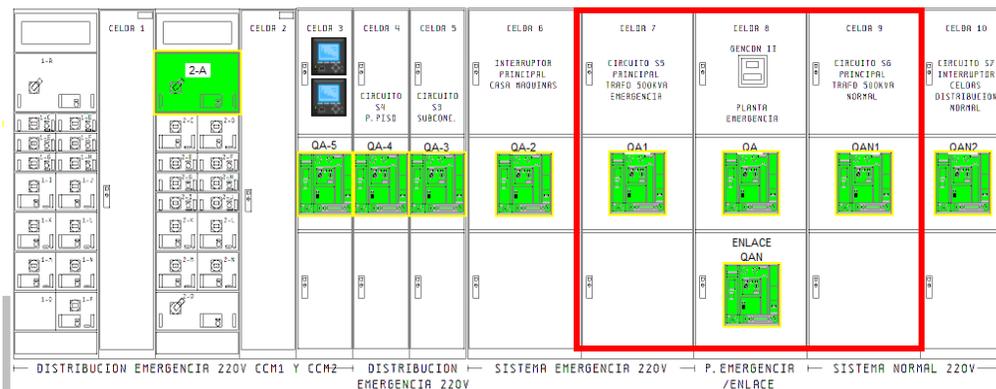


Figura 4.4 Dispositivos que componen la subestación eléctrica.

4.3 SISTEMATIZACIÓN

Un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí para lograr un objetivo definido.

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza un enfoque sistemático en donde el sistema se divide en diferentes subsistemas dependiendo la función de cada uno, de tal forma que el análisis se facilita para posteriormente buscar la mejor solución para cada subsistema. Para ello se utiliza un diagrama de bloques, donde partiendo de las entradas conocidas y la salida esperada se definen los diferentes subsistemas.

Una vez conocida la estructura de la subestación eléctrica se realiza un análisis de las funciones que integran el sistema de control para satisfacer las necesidades del proyecto. Este análisis es la base para el diseño del controlador que se utilizará en el modelo funcional. En la figura 4.5 se muestra el diagrama del funcionamiento completo del sistema.

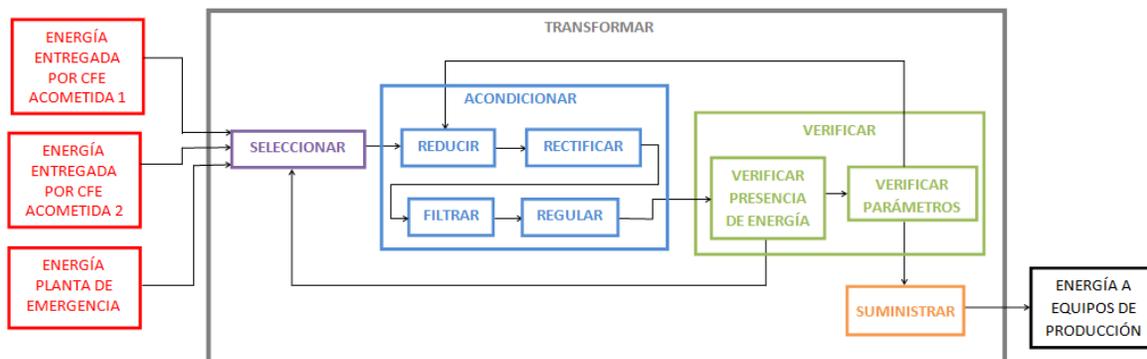


Figura 4.5 Diagrama de funciones que componen el sistema de control.

A continuación se explica de manera breve que tareas se realizan en cada una de las funciones, las cuales serán subsistemas del sistema de control, que se muestran en la figura 4.5, de tal forma que se entienda el flujo de la energía en todo el sistema.

4.3.1 SUBSISTEMA DE TRANSFORMACIÓN

La función de este subsistema es modificar la energía que proporciona CFE (dos acometidas) y la energía de la planta de emergencia (generador) de tal manera que la energía que se suministra a los equipos de producción sea la adecuada, esto es que cumpla con los parámetros establecidos para este proyecto.

4.3.2 SUBSISTEMA DE SELECCIÓN

Este subsistema determina cual es la fuente de energía que se va a acondicionar en función de su nivel de energía, priorizando la acometida 1, luego la acometida 2 y por último la planta de emergencia. Lo anterior es para que solo una de las fuentes de energía trabaje, si la que está en

funcionamiento no está dentro del rango de voltaje determinado como adecuado, este subsistema se encarga de realizar un cambio entre las fuentes de energía de tal forma que la energía permanezca en el nivel adecuado.

El objetivo es que la energía que proporciona la acometida 1 sea la fuente principal, en caso de que ésta falle, comenzaría a trabajar la acometida 2 hasta que la acometida 1 se restablezca a su valor normal, es decir, al valor que se especificó en el capítulo anterior. En caso de fallar ambas acometidas la fuente de energía sería la proporcionada por la planta de emergencia.

4.3.3 SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO

El subsistema de acondicionamiento pretende corregir los problemas de la calidad del suministro eléctrico proveniente del subsistema de selección o en su caso del subsistema de verificación, de tal forma que se obtenga una energía con los parámetros requeridos, es decir, que cumpla con las especificaciones determinadas en el capítulo anterior.

Este subsistema está integrado por 4 funciones que trabajan en conjunto y continuamente para lograr el correcto acondicionamiento de la energía y por consiguiente lograr una buena calidad en la energía que se va a suministrar a los diferentes equipos de producción, es decir, obtener una estabilidad en el voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico libre de disturbios eléctricos (ej. transitorios, ruido eléctrico, sobrevoltaje, variación de frecuencia, variación de voltaje, etc.); tales funciones son las siguientes:

- **REDUCIR.** Disminuye el nivel de la energía (voltaje de corriente alterna) proveniente del subsistema de selección al valor del nivel de energía (voltaje de corriente alterna) requerido.
- **RECTIFICAR.** Convierte la energía de valor requerido (voltaje de corriente alterna) en energía (voltaje) de corriente continua, manteniendo el valor requerido.
- **FILTRAR.** Mejora la energía de corriente continua obtenida por el proceso de rectificación para lograr una energía libre de variaciones de amplitud en ésta.
- **REGULAR.** Reduce por completo el rizado (variación de voltaje) en la energía de corriente continua y ajusta el nivel de energía proveniente del proceso de filtrado para proporcionar y mantener una energía de corriente continua con el valor requerido constante.

4.3.4 SUBSISTEMA DE VERIFICACIÓN

Este subsistema tiene dos importantes funciones que realizar, las cuales son:

- **VERIFICAR PRESENCIA DE ENERGÍA.** Se comprueba la presencia de energía acondicionada para posteriormente verificar los parámetros de ésta. En caso contrario se seleccionará otra fuente de energía, mediante el subsistema de selección.
- **VERIFICAR PARÁMETROS.** Se comprueba que la energía acondicionada cumpla con los parámetros requeridos para que ésta pase al subsistema de suministro. En caso contrario la

energía regresa al subsistema de acondicionamiento para corregir los problemas que ésta tenga.

4.3.5 SUBSISTEMA DE SUMINISTRACIÓN

Finalmente, una vez que se verifica que la energía cumple con los parámetros requeridos, ésta llega al subsistema de suministro, el cual se encarga de distribuir la energía a los diferentes equipos de producción en la fábrica para su correcto funcionamiento.

4.4 CONFIGURACIONES PARA LA SOLUCIÓN

Una vez identificadas las funciones que tendría que cumplir el sistema de control se realiza una investigación y un análisis sobre las diferentes soluciones que se podrían utilizar para cumplir con las especificaciones mencionadas en el capítulo anterior. Las diferentes soluciones así como sus especificaciones técnicas de cada una se muestran en el ANEXO I.

Después de realizar una comparación de las características de cada una de las soluciones, las configuraciones que resultaron fueron las que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.2 Configuración 1 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.

CONFIGURACIÓN 1	
FUNCIÓN	SOLUCIÓN
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico tipo seco
Rectificar	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro
Regular	Banco de capacitores
Verificar Presencia de Energía	Interruptor electromagnético
Verificar Parámetros	PLC
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión

Tabla 4.3 Configuración 2 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.

CONFIGURACIÓN 2	
FUNCIÓN	SOLUCIÓN
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico de potencia sumergido en aceite
Rectificar	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro
Regular	Banco de capacitores
Verificar Presencia de Energía	Interruptor electromagnético
Verificar Parámetros	PLC
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión

Tabla 4.4 Configuración 3 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.

CONFIGURACIÓN 3	
FUNCIÓN	SOLUCIÓN
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico tipo seco
Rectificar	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro
Regular	Banco de capacitores
Verificar Presencia de Energía	Voltímetro y Amperímetro
Verificar Parámetros	PLC
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión

Tabla 4.5 Configuración 4 de dispositivos para todas las funciones del sistema de control.

CONFIGURACIÓN 4	
FUNCIÓN	SOLUCIÓN
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico de potencia sumergido en aceite
Rectificar	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro
Regular	Banco de capacitores
Verificar Presencia de Energía	Voltímetro y Amperímetro
Verificar Parámetros	PLC
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión

Como se puede observar en las configuraciones anteriores, los casos en los que se tienen diferentes soluciones son para las funciones de reducir y verificar presencia de energía.

Para la función de reducir se debe investigar cuáles son los pros y los contras de cada uno de los dispositivos propuestos, los cuales se exponen en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Pros y contras de las soluciones para la función de reducir [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39].

REDUCIR			
TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO SECO		TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA SUMERGIDO EN ACEITE	
PROS	CONTRAS	PROS	CONTRAS
Bajo costo de instalación	Alto costo unitario	Bajo costo unitario	Alto costo de instalación
No contamina	Ruidoso	Poco ruidoso	Produce gases contaminantes
No hay riesgo de explosión o incendio, se auto-extinguen	Altas pérdidas en vacío y en plena carga	Mínimas pérdidas en vacío y plena carga	Existe el riesgo de explosión o incendio
No requiere grandes mantenimientos	Baja resistencia a las sobretensiones y sobrecargas prolongadas	Alta resistencia a las sobretensiones y sobrecargas prolongadas	Requiere grandes mantenimientos
No requiere construcciones civiles especiales	Requieren ventilación adecuada	Mayor control de funcionamiento	Requiere construcciones civiles especiales
Resistentes a la corrosión		Se puede instalar a la intemperie	No son resistentes a la humedad
Resistentes a la humedad		Buen funcionamiento en atmósferas contaminadas	No son resistentes a la corrosión
Dimensiones menores			Dimensiones mayores
Peso menor			Mayor peso
No requiere contenedor de fluidos			Necesita un depósito colector de aceite
No requiere accesorios (válvulas, tanques, etc.)			Necesita accesorios (rejillas cortafuegos, válvulas, tanques de aceite, etc.)
Duración mínima de 20 años, en condiciones normales			Duración mínima de 10 años, en condiciones normales
Se puede instalar en cualquier lugar			Puede tener fugas o derrames
Bajo costo de seguros			Alto costo de seguros

Para saber que dispositivo es el más conveniente a utilizar para cumplir con la función de reducir se proponen algunos criterios, los cuales ayudarán a tomar una decisión en la elección del dispositivo, esto con base en los requerimientos y necesidades obtenidos en el inicio del proyecto. Los criterios que se van a tomar en cuenta se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Criterios de selección para la función de reducir [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39].

REDUCIR		
CRITERIO DE SELECCIÓN	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO SECO	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA SUMERGIDO EN ACEITE
Facilidad en la implementación	X	X
Eficiencia	X	
Seguridad	X	
Instalación sencilla	X	
Facilidad de utilización	X	X
Vida útil	X	
Costo total (unitario + instalación)		X
Mínimo mantenimiento necesario	X	
Tamaño y peso	X	
Amigable con el ambiente (no contamina)	X	
Pérdidas mínimas (en vacío y en plena carga)		X
Resistencia a factores del medio ambiente	X	
Resistencia a variaciones de voltaje prolongadas		X

A pesar de que ambos transformadores cumplen con la función de reducir y cubren los parámetros deseados de operación, se puede observar en la tabla 4.7 que el transformador trifásico tipo seco cumple con la mayor cantidad de criterios de selección. Si bien es cierto que el costo total inicial es mayor en el transformador trifásico seco, el costo a largo plazo es mínimo ya que no requiere mucho mantenimiento y su vida útil es mayor, además es fácil de instalar en cualquier lugar ya que es seguro tanto a nivel de operación como para el personal que lo opere o que le brinde mantenimiento.

Por otra parte, aunque las pérdidas en vacío y a plena carga son 23% mayores que en el transformador trifásico sumergido en aceite, se puede seguir considerando como la mejor opción ya que a pesar de estas pérdidas la eficiencia del transformador sigue siendo alta.

Por último si bien el transformador trifásico seco no es tan resistente a las sobrecargas prolongadas, no es un factor relevante ya que la capacidad de sobrecarga del transformador seco lo soportaría sin tener daños. En caso contrario, con la utilización de un interruptor electromagnético se puede lograr que no afecten estas sobrecargas en el funcionamiento del transformador.

Dado el análisis anterior, se determina que el mejor dispositivo a utilizar para cumplir con la función de reducir es el transformador trifásico seco.

Por otro lado, se realiza el análisis de las tareas que cumplen el amperímetro, el voltímetro y el interruptor electromagnético, determinando que estos tres dispositivos se pueden integrar para cumplir con la función verificar presencia de energía, ya que además de cumplir con esta función el amperímetro y el voltímetro dan una lectura de la corriente y el voltaje respectivamente, de tal forma que también ayudan a la función verificar parámetros.

Por lo que la configuración final que cumple con todas las funciones del proyecto es la que se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Configuración final para la solución.

FUNCIÓN	SOLUCIÓN
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico tipo seco
Rectificar	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro
Regular	Banco de capacitores
Verificar Presencia de Energía	Interruptor electromagnético, Amperímetro y Voltímetro
Verificar Parámetros	PLC
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión

Comparando los componentes que conforman la configuración final según la investigación realizada (tabla 4.8) con los componentes que conforman a la subestación eléctrica a la que se pretende dar servicio (tabla 4.1) se puede concluir que los dispositivos con los que cuenta la fábrica son los adecuados y se recomienda que se consideren los dispositivos restantes (marcados en rojo en la tabla 4.9) para lograr el correcto funcionamiento de la subestación eléctrica.

Tabla 4.9 Comparación de dispositivos propuestos con dispositivos de la fábrica.

FUNCIÓN	CONFIGURACIÓN FINAL	SUBESTACIÓN ELÉCTRICA
Seleccionar	Interruptor automático de media tensión	Interruptor automático de media tensión
Reducir	Transformador trifásico tipo seco	Transformador tipo seco encapsulado en resina epóxica
Rectificar	Rectificador Trifásico	Rectificador Trifásico
Filtrar	Filtro	Filtro para disturbios eléctricos
Regular	Banco de capacitores	Banco de capacitores automático con reactores de rechazo e interruptor electromagnético
Verificar Presencia de Energía	Interruptor electromagnético, Amperímetro y Voltímetro	Interruptor electromagnético, Amperímetro y Voltímetro
Verificar Parámetros	PLC	Pantalla de control y monitoreo tipo Touch Screen (PLC)
Suministrar	Tablero de distribución en baja tensión	Tablero de distribución

4.5 MODELO FUNCIONAL

Como ya se mencionó, el alcance de este proyecto es un modelo funcional (figura 4.6) a escala el cual proporciona una visión del funcionamiento del controlador diseñado para su implementación a nivel industrial utilizando los dispositivos propuestos en la sección anterior.

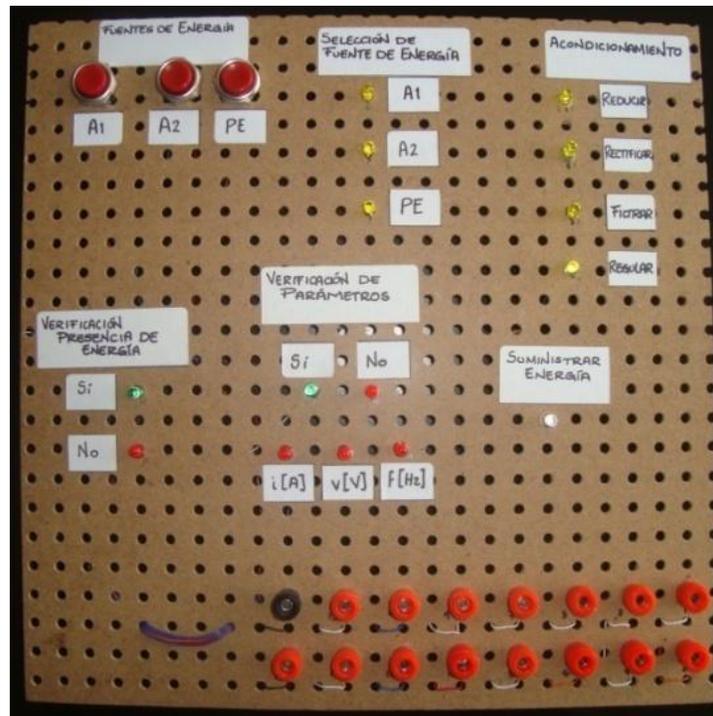


Figura 4.6 Modelo funcional.

El modelo funcional está conformado por tres botones que representan las tres diferentes fuentes de energía y 15 leds que se encuentran distribuidos en 5 módulos diferentes, los cuales se explicarán a detalle en la siguiente sección.

El objetivo principal de este modelo es mostrar mediante el encendido y apagado de leds la secuencia lógica del controlador diseñado, a partir de la lectura que se va a realizar de tres parámetros diferentes, los cuales son: el voltaje, la corriente y la frecuencia y, los botones que fungirán como las tres fuentes de energía que se tienen.

Se va a realizar la medición de los parámetros mencionados, ya que son las magnitudes principales de la energía eléctrica, de tal forma que se pueda verificar la calidad de la energía (estabilidad en el voltaje y la frecuencia y, la continuidad del servicio eléctrico) que se va a suministrar a los equipos de producción y, por consiguiente lograr el correcto funcionamiento de éstos.

4.5.1 SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO

Para explicar el funcionamiento del controlador diseñado a partir del modelo funcional y los módulos que lo conforman (figura 4.7), que son los subsistemas mencionados en la sección 4.3, es importante recordar la jerarquización que se considera en el subsistema de selección, la cual es:

1. "A1": Acometida 1
2. "A2": Acometida 2
3. "PE": Planta de Emergencia

Cada fuente de energía será representada con un push botton y cada indicador de cada módulo será representado con un led.

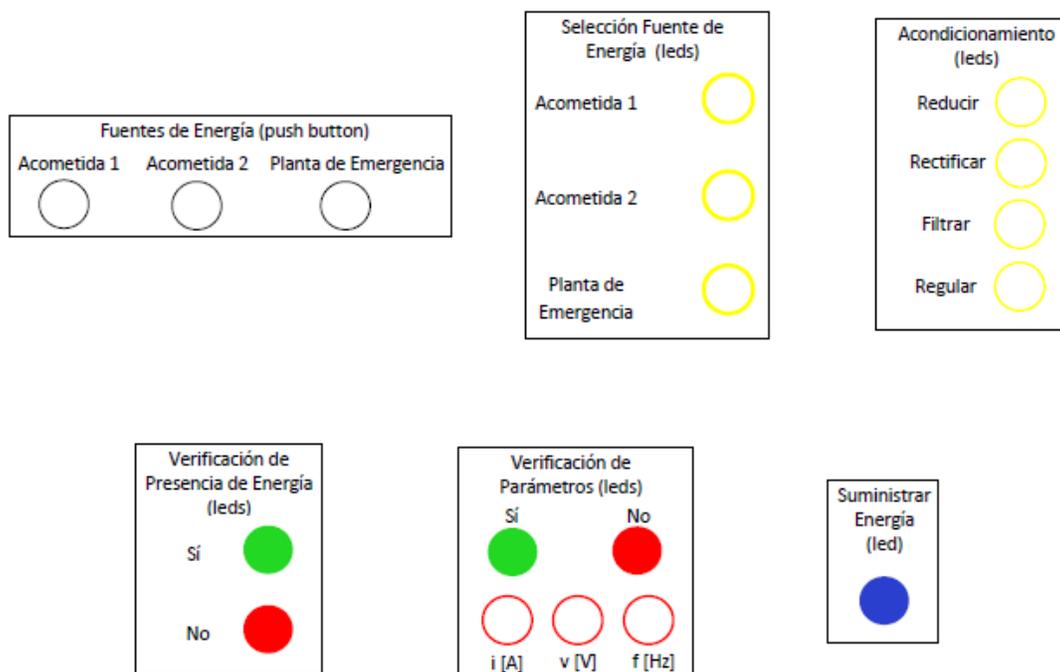


Figura 4.7 Disposición de los módulos (subsistemas) en el modelo funcional.

Módulo de Selección de Fuente de Energía

Considerando la jerarquización antes mencionada, se tienen varios casos los cuales se presentan a continuación:

El indicador llamado "A1" se encenderá si:

- "A1" se encuentra presionado pero "A2" y "PE" no.
- "A1", "A2" y "PE" están presionados.
- "A1" y "A2" se encuentran presionados.
- "A1" y "PE" se encuentran presionados.

El indicador llamado "A2" se encenderá si:

- "A2" se encuentra presionado pero "A1" y "PE" no.
- "A2" y "PE" se encuentran presionados.

El indicador llamado "PE" se encenderá si:

- "PE" se encuentra presionado pero "A1" y "A2" no.

Módulo de Acondicionamiento

Una vez seleccionada la fuente de energía, los indicadores de "REDUCIR", "RECTIFICAR", "FILTRAR" y "REGULAR" se encenderán y apagarán uno detrás del otro, mostrando el proceso de acondicionamiento.

En caso de que no se seleccione la fuente de energía, los indicadores estarán apagados.

En caso de que el indicador "NO" del módulo de verificación de parámetros esté encendido, los indicadores de "REDUCIR", "RECTIFICAR", "FILTRAR" y "REGULAR" se encenderán y apagarán uno detrás del otro.

Módulo de Verificación de Presencia de Energía

El indicador llamado "SÍ" se encenderá si: "A1" y/o "A2" y/o "PE" se encuentran presionados.

El indicador llamado "NO" se encenderá si: "A1", "A2" y "PE" no se encuentren presionados.

Módulo de Verificación de Parámetros

En este módulo se consideran tres parámetros, que son:

1. "i": corriente
2. "v": voltaje
3. "f": frecuencia

Para generar los parámetros requeridos del proyecto, se diseñará un circuito electrónico, el cual se explicará en el siguiente capítulo.

El indicador llamado "NO" se encenderá si alguno, algunos o todos los indicadores ("i", "v" y "f") se encuentran prendidos.

El indicador llamado "SÍ" se encenderá si los indicadores "i", "v" y "f" se encuentran apagados.

Módulo Suministrar Energía

Una vez encendidos el indicador “Sí” del módulo de verificación de parámetros y el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía, se prenderá el indicador llamado “SUMINISTRAR”. En caso contrario, el indicador “SUMINISTRAR” se apagará.

5 PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 PRUEBAS

Las pruebas que se van a realizar para verificar el funcionamiento del controlador diseñado a partir de la secuencia mencionada en la sección 4.5.1, se harán con condiciones simuladas y con condiciones reales, es decir, se obtendrán de dos formas diferentes los tres parámetros considerados.

La razón principal por la cual se van a realizar pruebas con condiciones simuladas, es porque se puede variar la frecuencia y con ello verificar que el controlador funcione correctamente, ya que en la vida real la energía que suministra la Compañía Federal de Electricidad (CFE) y que se obtiene a través de los contactos de energía eléctrica es de 127 [V] corriente alterna a una frecuencia fija de 60 [Hz], por consiguiente en condiciones reales sólo se puede trabajar con esa frecuencia. Por otro lado la energía ya está acondicionada, es decir, se encuentra libre de disturbios eléctricos y eso facilita las lecturas de los parámetros de interés además de que se puede verificar el funcionamiento del controlador para cada parámetro por separado.

En las pruebas con condiciones reales, se utilizará la energía que suministra CFE a los contactos de energía eléctrica (127 [V] corriente alterna a una frecuencia de 60 [Hz]), la cual se tendrá que acondicionar para poder realizar la medición de los parámetros y con ello verificar el funcionamiento del controlador, en este caso los tres parámetros a medir se obtendrán de la misma fuente de energía.

Para facilitar las pruebas en el modelo funcional, se va a utilizar un microcontrolador Arduino MEGA, ya que interiormente tiene un convertidor analógico-digital el cual permite realizar lecturas analógicas y obtener una salida digital, así como también puede realizar lecturas digitales, tiene una gran cantidad de entradas y salidas analógicas y digitales con lo cual nos permite visualizar cada uno de los indicadores, además la programación para el Arduino es muy sencilla, ya que sólo se necesita indicar en qué condiciones se prende o se apaga un led a partir de los botones que se presionan y las lecturas de los parámetros.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama del circuito eléctrico del modelo funcional conectado a un Arduino MEGA.

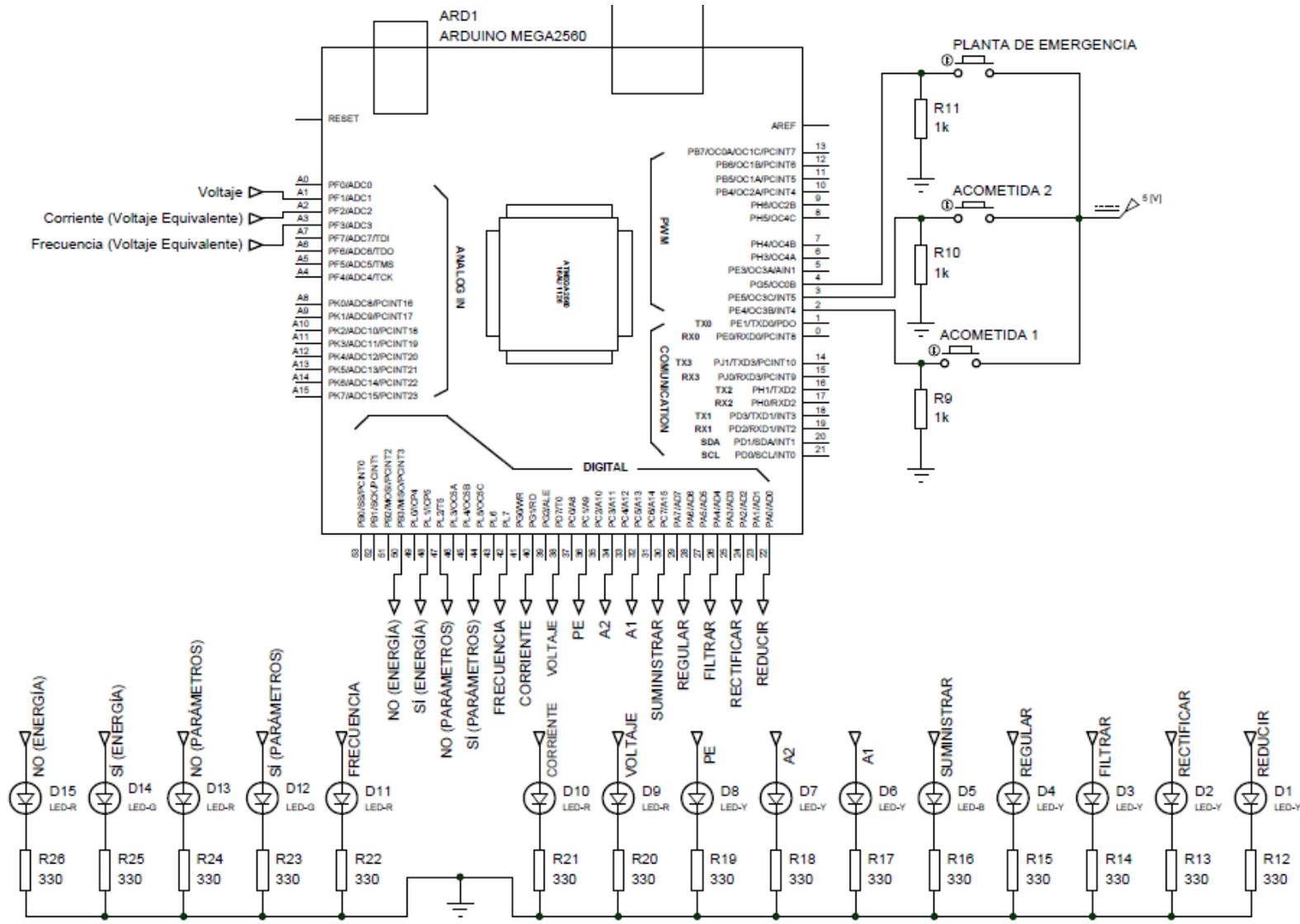


Figura 5.1 Diagrama del modelo funcional conectado a un Arduino MEGA.

La ventaja que se tiene de realizar las pruebas en el modelo funcional con un Arduino es que se puede trasladar la programación del controlador diseñado a un diagrama de escalera y utilizar un PLC, ya que al igual que en el Arduino el PLC maneja entradas y salidas digitales. Sin embargo, para las lecturas de los parámetros se necesita un convertidor analógico-digital (ej. Arduino UNO) y relevadores para cada parámetro, los cuales mandarían la señal digital que necesita el PLC.

En la figura 5.2 se muestra un diagrama del modelo funcional utilizando un PLC y condiciones simuladas.

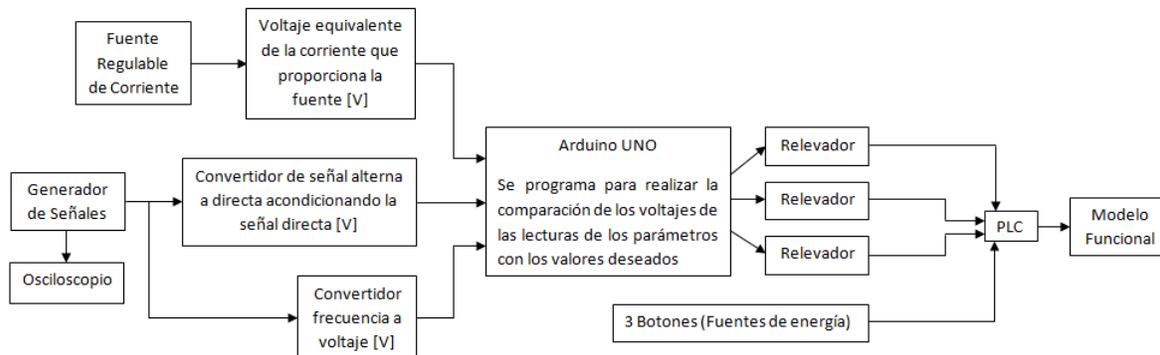


Figura 5.2 Diagrama del modelo funcional utilizando un PLC y condiciones simuladas.

Antes de comenzar a explicar en qué consisten las pruebas, es importante mencionar que el Arduino MEGA trabaja con voltajes positivos en un rango de 0 a 5 [V], por lo cual éste será el rango de uso en las pruebas. Por otro lado, es necesario tener una tierra común entre el Arduino MEGA y todo el circuito eléctrico, para que éste último y el controlador diseñado puedan funcionar correctamente, es decir, evitar un corto circuito y obtener las lecturas correctas de los parámetros, ya que se tiene la misma referencia.

5.1.1 PRUEBAS CON CONDICIONES SIMULADAS

Las pruebas con condiciones simuladas consisten en elegir la fuente de energía presionando uno, varios o ningún push botton del modelo funcional, de tal forma que se compruebe que el controlador diseñado cumple con la secuencia de funcionamiento del subsistema de selección, así como también de la función de verificación de presencia de energía, lo anterior mediante los indicadores (leds) de cada módulo del modelo funcional.

Por otro lado se van a generar los tres parámetros de interés y éstos se van a variar para comprobar que se cumpla con la función de verificación de parámetros, es decir, que el controlador muestre a través de los indicadores (leds) del módulo del modelo funcional si los valores medidos son iguales o diferentes a los valores deseados de cada parámetro.

Finalmente si se cumple con el subsistema de verificación, se podrá visualizar que la energía es apta para suministrarse, mediante el encendido del indicador correspondiente.

Para las pruebas con condiciones simuladas, la corriente se va a obtener a partir de una fuente regulable de voltaje (figura 5.3).



Figura 5.3 Fuente regulable de voltaje.

Siguiendo la Ley de Ohm, se sabe que al conectar una fuente con un cierto voltaje a una resistencia, se puede obtener la corriente suministrada (Ec. 1).

$$V = Ri \rightarrow i = \frac{V}{R} \dots Ec.1$$

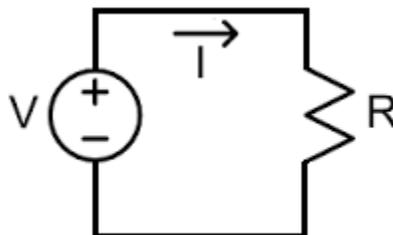


Figura 5.4 Circuito representativo de la Ley de Ohm.

Para saber si la corriente suministrada es la deseada, se va a tomar el voltaje equivalente proporcionado por la fuente, el cual se estará variando para verificar el funcionamiento correcto del controlador.

Considerando que la corriente deseada es de $i = 0.04 \text{ [A]}$, utilizando una resistencia de $R = 100 \text{ [\Omega]}$ y a partir de la Ec. 1, se puede definir que el voltaje equivalente deseado es de 4 [V] , como se indica en la Ec. 2.

$$V = (100 \text{ [\Omega]})(0.04 \text{ [A]}) = 4 \text{ [V]} \dots Ec.2$$

Considerando la resistencia $R = 100 \pm 5 \text{ [\Omega]}$ y realizando mediciones con un multímetro para obtener el voltaje equivalente suministrado por la fuente según la corriente, se tienen los siguientes valores:

Tabla 5.1 Voltaje equivalente según la corriente.

Corriente [A]	Voltaje [V]
0.010	1.02
0.015	1.52
0.020	2.02
0.025	2.53
0.030	3.03
0.035	3.53
0.040	4.03
0.045	4.53
0.050	5.02

Como se puede observar en la tabla 5.1 el voltaje equivalente obtenido tiene una pequeña variación, por lo que se considerará tener una tolerancia (promedio) de ± 0.03 [V], es decir, se tendrá un rango deseado de voltaje equivalente para la corriente de:

$$3.97 \leq V_i \leq 4.03 \text{ [V]}$$

Sin embargo, al realizar mediciones con el Arduino MEGA para verificar el rango de voltaje deseado, por cuestiones de la digitalización de éste, el rango de voltaje asociado a la corriente deseada será de:

$$3.90 \leq V_i \leq 4.30 \text{ [V]}$$

Para que se mantenga el voltaje proporcionado y no tengan efecto las impedancias que llegaran a presentarse, se coloca un seguidor de voltaje usando un amplificador operacional alimentándolo con 0 [V] y 5 [V], para posteriormente mandar la señal a la entrada analógica designada en el microcontrolador Arduino MEGA, como se muestra en el diagrama de la figura 5.5.

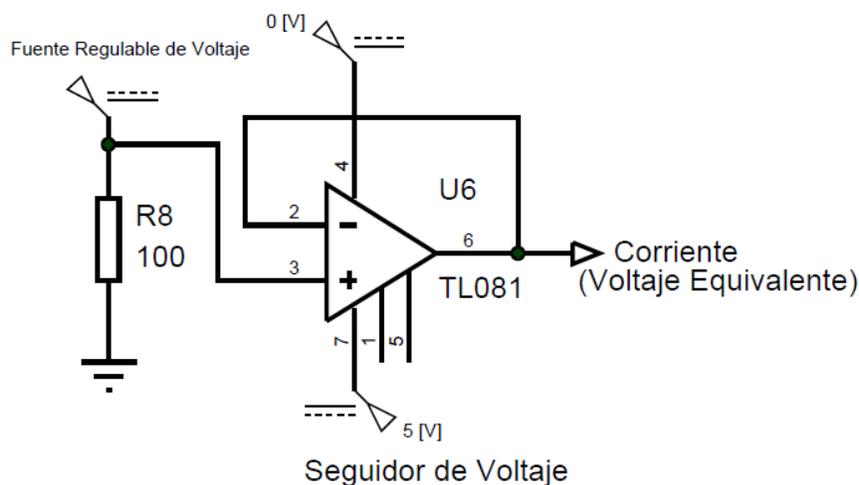


Figura 5.5 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la corriente (voltaje equivalente).

Tanto el voltaje como la frecuencia se van a obtener a partir de un generador de señales (figura 5.6) con una onda sinusoidal, la cual representa la energía de corriente alterna ya acondicionada, es decir, sin ningún disturbio eléctrico (sobrevoltajes, ruido eléctrico, distorsión armónica, etc.) como se encuentra en la realidad.



Figura 5.6 Generador de señales.

Para tener una tierra común entre los circuitos eléctricos que se van a armar y el Arduino MEGA, se va a conectar una de las terminales del generador a tierra, de tal forma que la referencia sea la misma para ambos.

Al realizar mediciones con el osciloscopio para conocer las variaciones que tiene el generador de señales, se obtienen las siguientes mediciones de voltaje pico a pico y frecuencia (tabla 5.2).

Tabla 5.2 Valores de voltaje y frecuencia proporcionados por el generador de señales.

Voltaje pico a pico [V]	Voltaje pico a pico medido [V]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia medida [Hz]
2.0	2.08	40	40.03
2.5	2.48	45	44.96
3.0	3.04	50	50.05
3.5	3.52	55	55.07
4.0	4.04	60	60.02
4.5	4.48	65	64.94
5.0	5.04	70	70.03

Como se muestra en la tabla 5.2, se tiene una variación (promedio) de ± 0.03 [V] de pico a pico para el voltaje y una variación (promedio) de ± 0.04 [Hz] para la frecuencia. Por lo anterior, se definen los siguientes rangos de valores deseados para el voltaje y para la frecuencia:

$$\text{Voltaje: } 1.97 \leq v \leq 2.03 \text{ [V]}$$

$$\text{Frecuencia: } 59.96 \leq f \leq 60.04 \text{ [Hz]}$$

En el caso del voltaje se toma sólo en cuenta el valor de la amplitud que proporciona el generador de señales, ya que al rectificar la señal se obtiene un voltaje de corriente directa, es decir, sólo se tendrá voltaje positivo como se muestra en la figura 5.7.

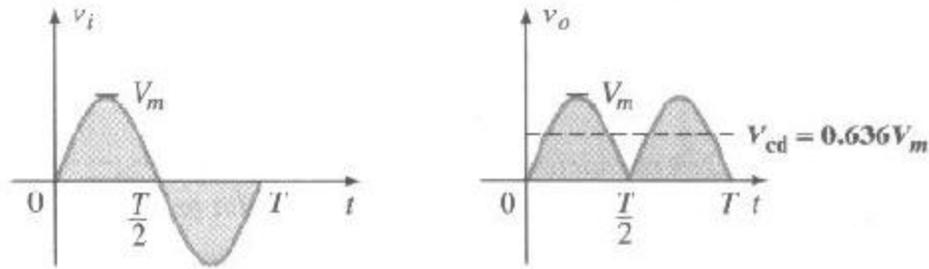


Figura 5.7 Formas de onda de entrada y salida para un rectificador de onda completa [21].

Para rectificar la señal proporcionada por el generador, ésta se ingresa a un puente de diodos (arreglo de 4 diodos 1N4005) y a la salida del rectificador se conecta un filtro (capacitor) para mantener el valor de voltaje en corriente directa.

El filtro que se va a utilizar es un filtro de capacitor, y su valor se obtiene a partir del tiempo de descarga del capacitor de la siguiente forma:

Considerando una frecuencia de 60 [Hz], el periodo de onda que proporciona el generador de funciones se define como:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60[\text{Hz}]} = 0.0166\bar{6}[\text{s}] = 16.66[\text{ms}] \quad \dots \text{Ec. 3}$$

Por otro lado el tiempo de descarga de un capacitor se define de la siguiente forma:

$$td = 4\tau = 4RC \quad \dots \text{Ec. 4}$$

Donde: R es una resistencia de carga.

C es el capacitor (filtro) que se muestra en la figura 5.8.

Se sabe que el valor de la constante de tiempo (τ) representa el tiempo que tarda, en este caso en que el capacitor proporcione un 63.2% de la carga total.

En la Ec. 4 se considera una constante de tiempo de 4τ para que el porcentaje de descarga del capacitor sea de aproximadamente 2%, de tal forma que el capacitor mantenga un voltaje casi constante, es decir, que el voltaje a la salida del filtro sea el voltaje máximo que se obtiene de la salida del rectificador (amplitud de la señal proporcionada por el generador de señales).

Finalmente considerando que el tiempo de descarga es igual que el periodo de onda del generador de señales para lograr lo anterior y considerando una resistencia de carga de 390 [Ω], el valor del capacitor que se requiere se calcula como se muestra en la Ec. 5:

$$C = \frac{td}{4R} = \frac{T}{4R} = \frac{1}{4(390[\Omega])} \frac{1}{60}[\text{s}] = 10.68 \times 10^{-6} [\text{F}] = 10.68[\mu\text{F}] \quad \dots \text{Ec. 5}$$

Se colocará un capacitor de 10 [μF] ya que éste es un valor comercial, sin embargo, no se va a colocar ninguna resistencia de carga, esto porque solo se utilizó para calcular el valor del capacitor. En este caso si se dejará esta resistencia lo que provoca es que el voltaje a la salida del filtro sea menor, lo anterior porque la resistencia consume la corriente proporcionada por el generador de señales.

Una vez armado el rectificador y el filtro, al realizar mediciones con el Arduino MEGA para verificar el rango de voltaje deseado, por cuestiones de la digitalización de éste, el rango de voltaje deseado será de:

$$1.85 \leq V \leq 2.15 \text{ [V]}$$

Posteriormente esta señal entra a un seguidor de voltaje (amplificador operacional alimentado con 0 [V] y 5 [V]) para mantener su valor y por último se envía a la entrada analógica designada en el Arduino MEGA, como se observa en la figura 5.8.

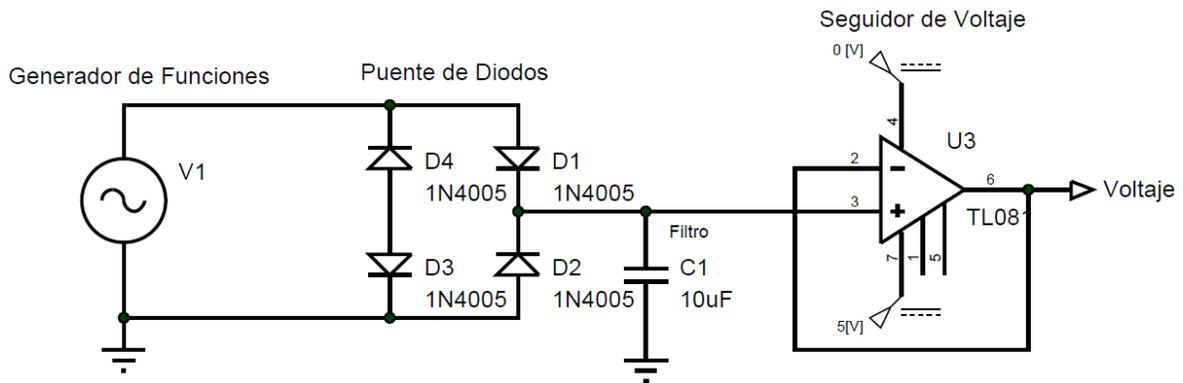


Figura 5.8 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura del voltaje.

Por último para saber si la frecuencia que se tiene en la señal proporcionada por el generador de señales es la deseada, se utiliza un convertidor de frecuencia a voltaje (LM2907) alimentado con 5 [V] y utilizando la configuración típica que se encuentra en la hoja de especificaciones del LM2907, esto con el objetivo de poder trabajar con el voltaje equivalente y poder realizar la comparación con el valor deseado. Posteriormente para que el valor equivalente de voltaje proporcionado se mantenga se coloca un seguidor de voltaje (amplificador operacional alimentado con 0 [V] y 5 [V]) y se envía la señal a la entrada designada en el Arduino MEGA, al igual que como se hace con los otros dos parámetros (figura 5.9).

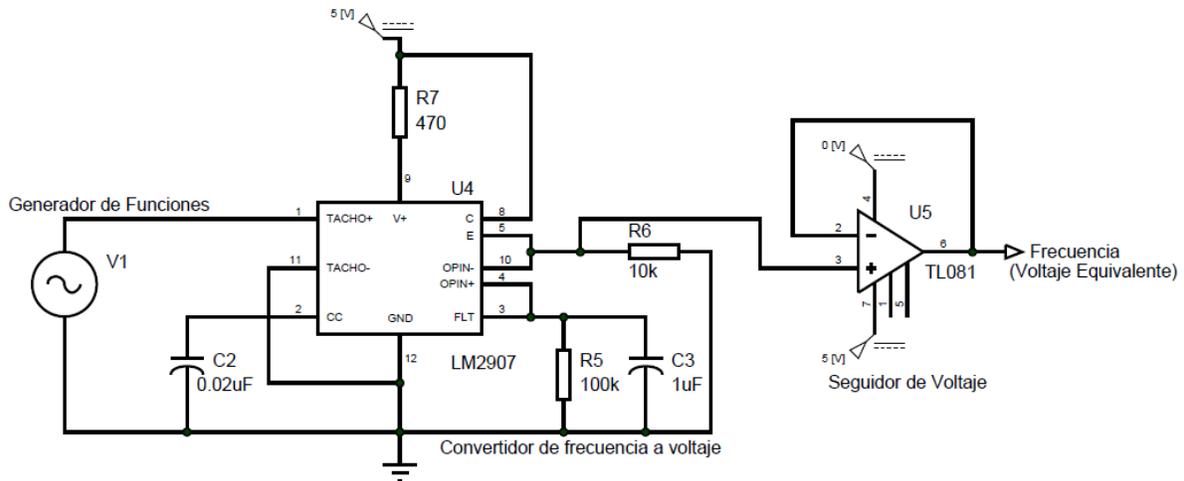


Figura 5.9 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la frecuencia (voltaje equivalente).

Al realizar mediciones con un multímetro para obtener un voltaje equivalente según la frecuencia de la señal, considerando la alimentación para el convertidor de frecuencia a voltaje de 5 [V], se observa en la tabla 5.3 que se tiene 0.006 [V] por [Hz], es decir, se tendrá un rango deseado de voltaje equivalente para la corriente de:

$$0.33 \leq V_f \leq 0.35 [V]$$

Tabla 5.3 Voltaje equivalente según la frecuencia.

Frecuencia [Hz]	Voltaje [V]
40.03	0.22
44.96	0.25
50.05	0.28
55.07	0.31
60.02	0.34
64.94	0.37
70.03	0.40

Sin embargo, al realizar mediciones con el Arduino MEGA para verificar el rango de voltaje equivalente deseado para la frecuencia, por cuestiones de la digitalización de éste, el rango de voltaje asociado a la frecuencia deseada será de:

$$0.30 \leq V_f \leq 0.45 [V]$$

Para observar los valores tanto del voltaje como la frecuencia se utilizará un osciloscopio digital (figura 5.10).

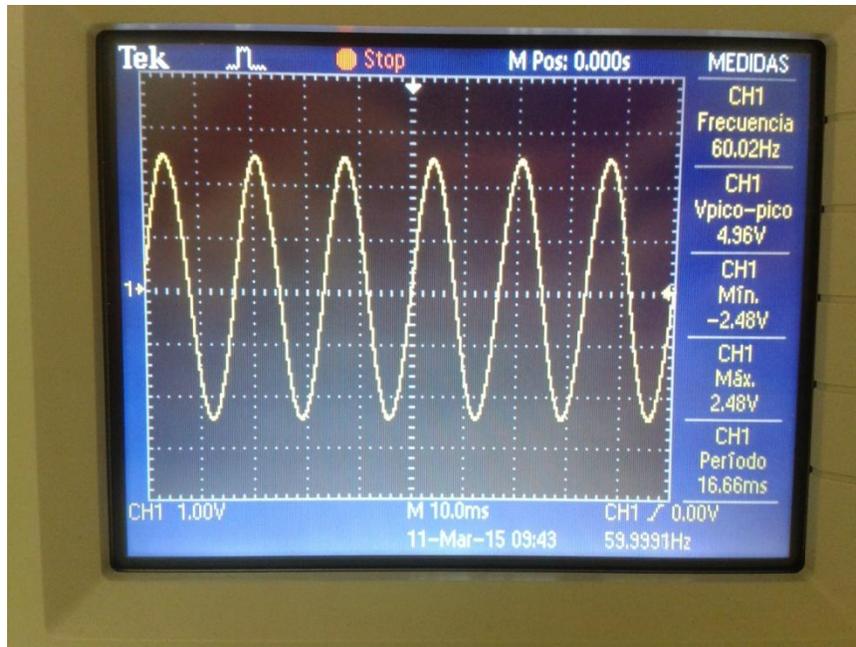


Figura 5.10 Osciloscopio digital.

Una vez que ya se acondicionaron todos los parámetros para su lectura en el Arduino MEGA, se procede a realizar las pruebas con la secuencia mencionada en la sección 4.5.1, verificando el funcionamiento de todo el controlador dependiendo los indicadores que se enciendan.

En la figura 5.11 se muestra el diagrama completo del circuito eléctrico utilizado para realizar las pruebas con condiciones simuladas.

El código del controlador diseñado considerando los valores de los parámetros con condiciones simuladas se puede observar en el ANEXO II.

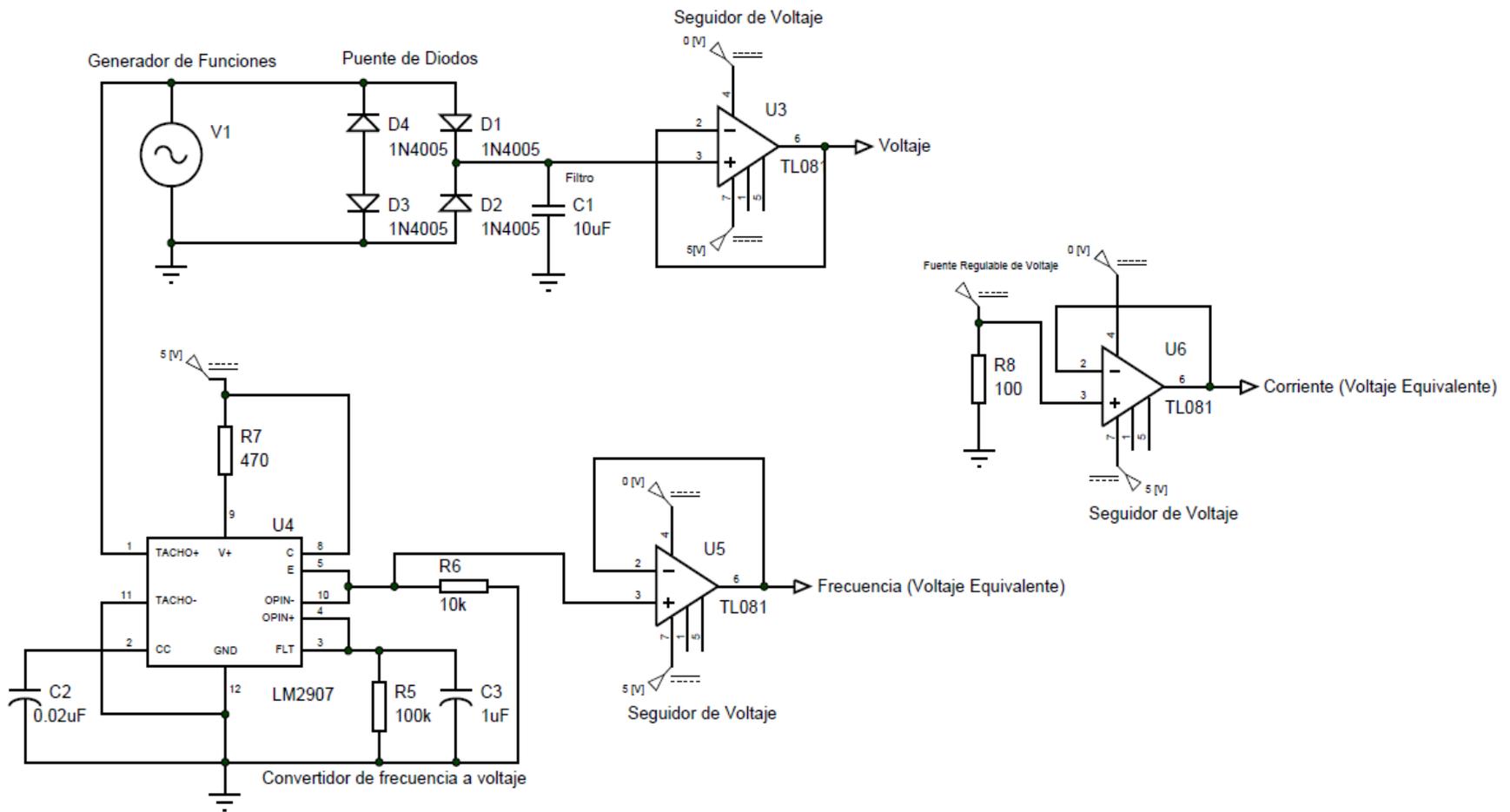


Figura 5.11 Diagrama del circuito eléctrico utilizado en las pruebas con condiciones simuladas.

5.1.2 PRUEBAS CON CONDICIONES REALES

Al igual que las pruebas anteriores, estas pruebas consisten en elegir la fuente de energía presionando uno, varios o ningún push botton del modelo funcional, de tal forma que se compruebe que el controlador diseñado cumple con la secuencia de funcionamiento del subsistema de selección, así como también de la función de verificación de presencia de energía, lo anterior mediante los indicadores de cada módulo del modelo funcional.

Además se van a generar los tres parámetros de interés y se van a variar para comprobar que se cumpla con la función de verificación de parámetros, es decir, que el controlador indique a través de los indicadores del módulo del modelo funcional si los valores medidos son iguales o diferentes a los valores deseados de cada parámetro.

Por último, si se cumple con el subsistema de verificación, se podrá visualizar que la energía es apta para suministrarse, mediante el encendido del indicador correspondiente.

La diferencia que hay entre las pruebas con condiciones simuladas y las pruebas con condiciones reales es la forma de obtención de los parámetros de interés, en este caso, para las pruebas con condiciones reales se utilizará una fuente compuesta por 6 fuentes diferentes (+5 [V], -5[V], +12 [V], -12[V], regulable positiva de 0[V] a +24 [V], regulable negativa de -24[V] a 0 [V]). Esta fuente se conecta al tomacorriente el cual por ley CFE proporciona un voltaje de 127 [Vac] y una frecuencia de 60 [Hz].

Esta fuente está conformada por un transformador de 127 [V] a 12 [V] de 2 [A] con tap central el cual se encarga de reducir el voltaje proporcionado por CFE de 127 [V] a 12 [V], posteriormente esta señal entra a un rectificador (puente de diodos) para convertir la señal de corriente alterna en una señal de corriente directa. En cada una de las salidas de voltaje del rectificador se coloca un filtro (capacitor) para mantener el voltaje positivo de corriente directa y el voltaje negativo de corriente directa que se obtiene a partir del rectificador.

El valor del capacitor que se utiliza para los filtros se obtiene a partir del tiempo de descarga del capacitor de la siguiente forma:

El tiempo de descarga de un capacitor se define de la siguiente forma:

$$td = 4\tau = 4RC \quad \dots Ec.4$$

Donde: R es una resistencia de carga.

C es el capacitor (filtro) que se muestra en el Anexo III colocado después del puente de diodos.

En la Ec. 4 se considera una constante de tiempo de 4τ para que el porcentaje de descarga del capacitor sea de aproximadamente 2%, de tal forma que el capacitor mantenga un voltaje casi constante, es decir, que el voltaje a la salida del filtro sea el voltaje máximo que se obtiene de la salida del rectificador.

Por otro lado considerando que el tiempo de descarga es igual que el periodo de onda de la señal que proporciona CFE para lograr lo anterior y considerando una resistencia de carga de 390 $[\Omega]$, el valor del capacitor que se requiere se calcula como se muestra en la Ec. 5:

$$C = \frac{td}{4R} = \frac{T}{4R} = \frac{\frac{1}{f}}{4R} = \frac{\frac{1}{60}[s]}{4(390[\Omega])} = 10.68 \times 10^{-6} [F] = 10.68 [\mu F] \quad \dots Ec. 5$$

El valor de los capacitores que se utilizarán es de 10 $[\mu F]$ ya que éste es un valor comercial, sin embargo, no se va a colocar ninguna resistencia de carga, esto porque la resistencia solo sirvió para calcular el valor del capacitor, sin embargo, la carga real serán los diferentes reguladores de voltaje para cada una de las fuentes fijas.

Posteriormente la señal positiva filtrada se conecta a la entrada de los reguladores positivos fijos y la señal negativa filtrada se conecta a los reguladores negativos fijos. Los reguladores de voltaje para cada fuente fija son los siguientes:

- Fuente de +5 [V] → Regulador LM7805
- Fuente de +12 [V] → Regulador LM7812
- Fuente de -5 [V] → Regulador LM7905
- Fuente de -12 [V] → Regulador LM7912

Entre la entrada y la salida de cada regulador se coloca un diodo 1N4005 como protección, de tal forma que si hay un regreso de corriente el diodo sea el que redireccione ésta a la entrada del regulador.

Por último entre la salida y la tierra de cada regulador se coloca un capacitor de 0.1 $[\mu F]$ de tal forma que éste ayude a mantener el valor que proporciona cada regulador lo más estable posible, es importante mencionar que el valor del capacitor es muy pequeño ya que sólo se quiere mantener el voltaje y no aumentarlo.

Para el caso de las fuentes variables se utilizó un duplicador de voltaje (figura 5.12) para cada una.

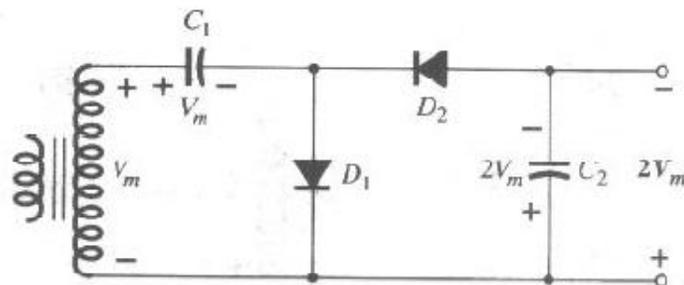


Figura 5.12 Duplicador de voltaje [21].

El valor de los capacitores que se utilizan en esta configuración es el mismo que se utiliza para el filtro de las fuentes fijas, el cual es de 10 $[\mu F]$, ya que con este valor nos proporciona un voltaje casi igual al que se tiene a las salidas del rectificador por consiguiente a la salida del duplicador de voltaje se podrán obtener los 24 [V] positivos y los 24 [V] negativos que se requieren para estas fuentes. Los diodos que se utilizan son 1N4005.

La señal de salida de los duplicadores de voltaje positivo y negativo se conectan a los reguladores ajustables positivo (LM317) y negativo (LM337) respectivamente. Al igual que con los reguladores de las fuentes fijas, se coloca entre la entrada y la salida de cada regulador ajustable un diodo 1N4005.

Ente la salida ajustable de cada regulador y la tierra se conecta un potenciómetro de 10 [kΩ] el cual variará el voltaje, se utiliza este valor de resistencia del potenciómetro para poder tener un rango mayor de variación de voltaje la salida del regulador.

Finalmente para mantener el valor que proporciona cada regulador lo más estable posible y que el valor de la salida del regulador ajustable positivo se encuentre entre 0 y +24 [V] y, el valor de la salida del regulador ajustable negativo se encuentre entre 0 y -24 [V], se conecta una resistencia de 470 [Ω] entre la salida del regulador y el potenciómetro, se conecta un capacitor de 0.1 [μF] entre el potenciómetro y la tierra, y por último la resistencia se conecta en serie con el capacitor.

Es importante mencionar que la tierra común de todas las fuentes es el tap central y está será la misma para los circuitos armados para cada parámetro. El diagrama de toda fuente se puede observar en el ANEXO III, sin embargo, para las pruebas sólo se hará uso de la fuente regulable positiva.

Para saber si la corriente suministrada es la deseada, se tomará el voltaje equivalente proporcionado por la fuente regulable positiva, el cual se variará para verificar el funcionamiento correcto del controlador.

Considerando que la corriente deseada es de $i = 0.04$ [A], utilizando una resistencia de $R = 100$ [Ω] y a partir de la Ec. 1, se puede definir que el voltaje equivalente deseado es de 4 [V], como se indica en la Ec. 6.

$$V = (100 \text{ [}\Omega\text{)})(0.04 \text{ [A]}) = 4 \text{ [V]} \dots \text{Ec. 6}$$

Considerando la resistencia $R = 100 \pm 5$ [Ω] y realizando mediciones con un multímetro para obtener el voltaje equivalente suministrado por la fuente según la corriente, se tienen los siguientes valores:

Tabla 5.4 Voltaje equivalente según la corriente.

Corriente [A]	Voltaje [V]
0.0062	1.24
0.0065	1.51
0.0070	2.04
0.0077	2.50
0.0083	3.01
0.0092	3.52
0.0171	4.02
0.0177	4.51
0.0181	5.01
0.0190	27.00

Como se puede observar en la tabla 5.4 el valor de la corriente es muy pequeño ya que el transformador que se utilizó solo proporciona 2 [A], y toda la corriente se divide entre todos los componentes de la fuente. Por lo anterior, la resistencia no se va a colocar como carga ya que el voltaje va a disminuir puesto que la resistencia demanda más corriente de la que puede ofrecer la fuente y, por consiguiente el voltaje se proporcionará directamente.

Tomando en cuenta lo anterior la corriente deseada será $i = 0.0171$ [A], y por consiguiente el rango deseado de voltaje equivalente para la corriente será de:

$$3.9 \leq V_i \leq 4.1 \text{ [V]}$$

Como se utilizará la misma fuente tanto para el voltaje como para la corriente se tomará como valor deseado de voltaje el mismo que se considera para la corriente, es decir, el voltaje equivalente de la corriente es el voltaje deseado, ya que estos dos parámetros dependen uno del otro.

Sin embargo, al realizar mediciones con el Arduino MEGA para verificar el rango de voltaje deseado, por cuestiones de la digitalización de éste, el rango de voltaje deseado será de:

$$3.90 \leq V_i \leq 4.30 \text{ [V]}$$

Para que se mantenga el voltaje proporcionado por la fuente se utilizará un seguidor de voltaje con un amplificador operacional alimentado con 0 [V] y 5 [V], para posteriormente mandar la señal a la entrada analógica designada en el microcontrolador Arduino MEGA, como se muestra en el diagrama de la figura 5.13.

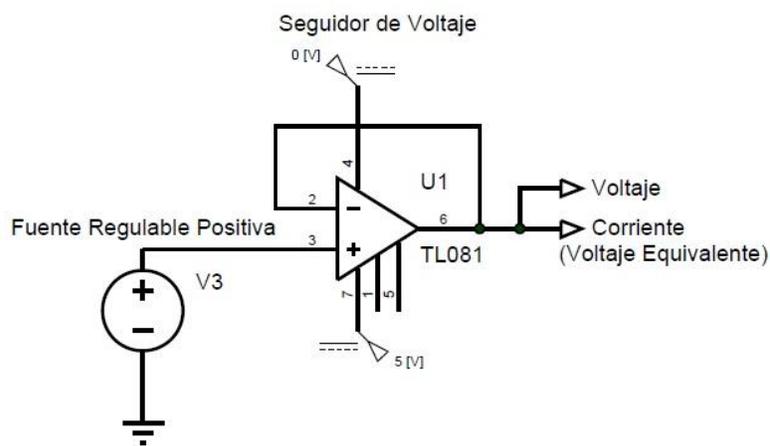


Figura 5.13 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la corriente (voltaje equivalente).

Por último para saber si la frecuencia que se tiene en la señal proporcionada por el transformador antes de entrar al puente de diodos es la deseada, se utilizará solo un tap y el tap central para posteriormente enviar esta señal al convertidor de frecuencia a voltaje (LM2907) alimentado con 5 [V] y utilizando la configuración típica que se encuentra en la hoja de especificaciones del LM2907,

esto con el objetivo de poder trabajar con la señal equivalente y poder realizar la comparación con el valor deseado.

Como se sabe, la frecuencia que proporciona CFE es de 60 ± 0.05 [Hz] por lo que al realizar mediciones con un multímetro se tiene que el voltaje deseado equivalente se encuentra en un rango de:

$$0.30 \leq V_f \leq 0.34 \text{ [V]}$$

Sin embargo, al realizar mediciones con el Arduino MEGA para verificar el rango de voltaje equivalente deseado para la frecuencia, por cuestiones de la digitalización de éste, el rango de voltaje asociado a la frecuencia deseada será de:

$$0.25 \leq V_f \leq 0.50 \text{ [V]}$$

Finalmente para que el valor equivalente de voltaje proporcionado se mantenga se coloca un seguidor de voltaje (amplificador operacional alimentado con 0 [V] y 5 [V]) y se envía la señal a la entrada designada en el Arduino MEGA, como se muestra en la figura 5.14.

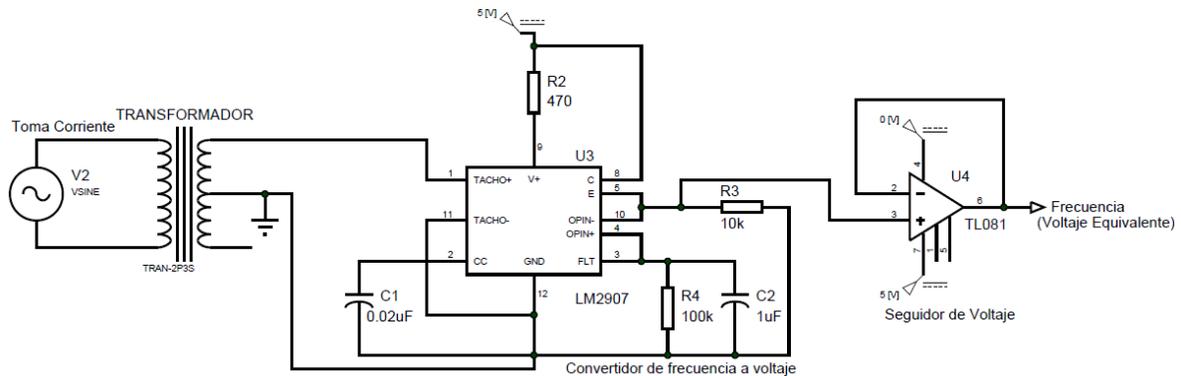


Figura 5.14 Diagrama del circuito eléctrico para la lectura de la frecuencia (voltaje equivalente).

Al igual que en las pruebas con condiciones simuladas, se utilizará un osciloscopio digital para observar los valores tanto del voltaje como de la frecuencia.

Una vez que ya se acondicionaron todos los parámetros para su lectura en el Arduino MEGA, se realizarán las pruebas con la secuencia mencionada en la sección 4.5.1, verificando el funcionamiento de todo el controlador dependiendo los indicadores que se enciendan.

En la figura 5.15 se muestra el diagrama completo del circuito eléctrico utilizado para realizar las pruebas con condiciones reales.

El código del controlador diseñado considerando los valores de los parámetros con condiciones reales se puede observar en el ANEXO IV.

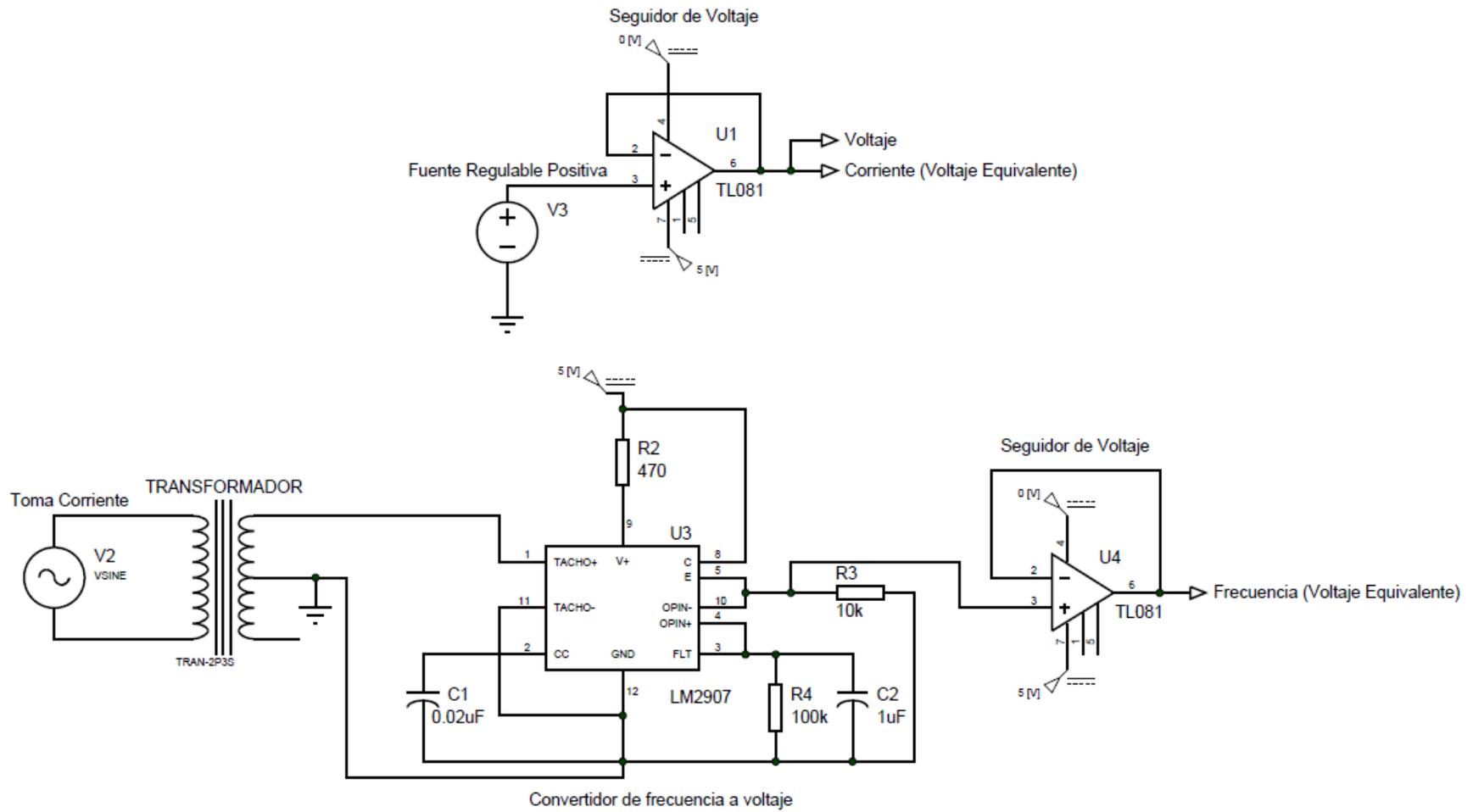


Figura 5.15 Diagrama del circuito eléctrico utilizado en las pruebas con condiciones reales.

5.2 RESULTADOS

Primero se probó que el subsistema de verificación de presencia de energía identificará si existía o no energía. En paralelo se verificó el subsistema de selección en donde se presionaron los push botton siguiendo los casos mencionados en la sección 4.5.1.

Posteriormente se probó el subsistema de verificación de parámetros, esto se logró proporcionando los valores deseados y valores diferentes a los deseados, de tal forma que se identificará que parámetro o parámetros estaban fuera de rango.

Finalmente si el subsistema de verificación de presencia de energía y el subsistema de verificación de parámetros cumplían con las condiciones deseadas, el indicador de suministrar se encendía simulando que la energía era apta para suministrarse.

5.2.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON CONDICIONES SIMULADAS

a) Combinaciones del subsistema de selección presionando los push botton para verificar el subsistema de selección y la función de verificación de presencia de energía.

1. **No se selecciona ninguna fuente.** Ningún indicador del módulo de selección se enciende y el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía se enciende. Como no hay energía no se puede ni acondicionar ni medir ningún parámetro puesto que no existen, por consiguiente todos los indicadores del módulo de acondicionamiento permanecen apagados y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro.

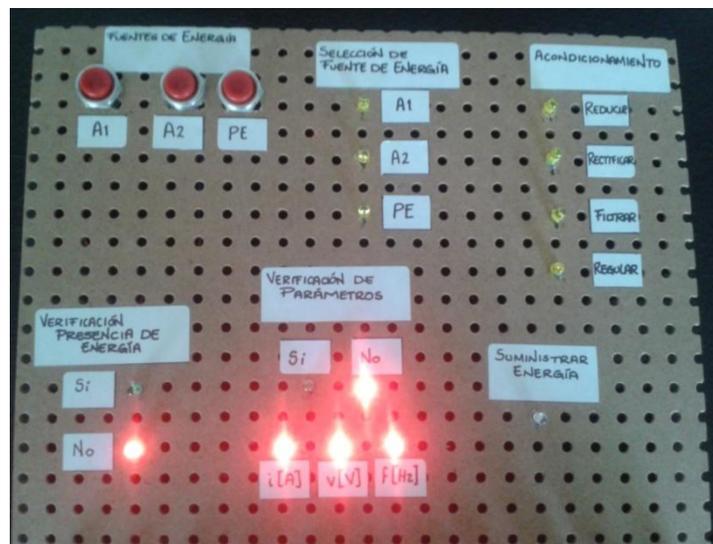


Figura 5.16 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando no se presiona ningún push button (no se selecciona ninguna fuente).

2. **Se selecciona la Acometida 1 como fuente de energía.** El indicador de la Acometida 1 del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

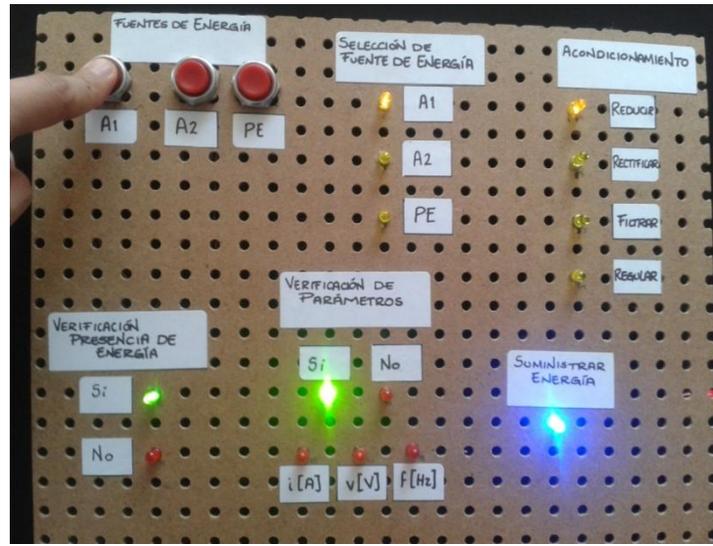


Figura 5.17 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 1.

3. **Se selecciona la Acometida 2 como fuente de energía.** En este caso, el indicador de la Acometida 2 del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

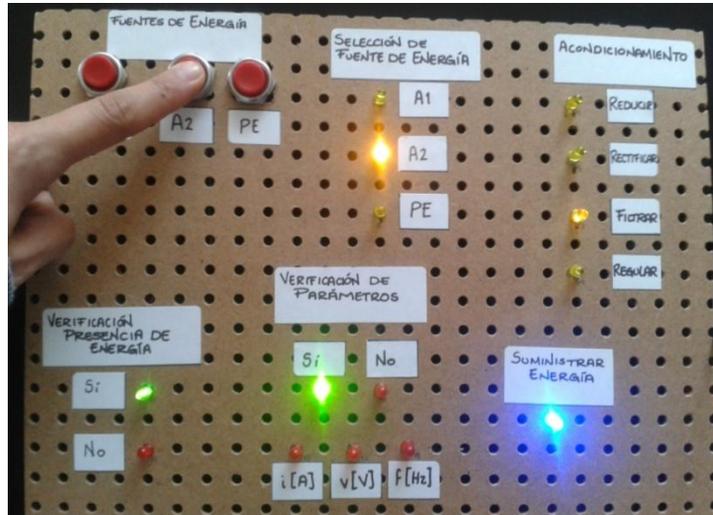


Figura 5.18 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 2.

4. **Se selecciona la Planta de Emergencia como fuente de energía.** Para este caso, el indicador de la Planta de Emergencia del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como existe energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

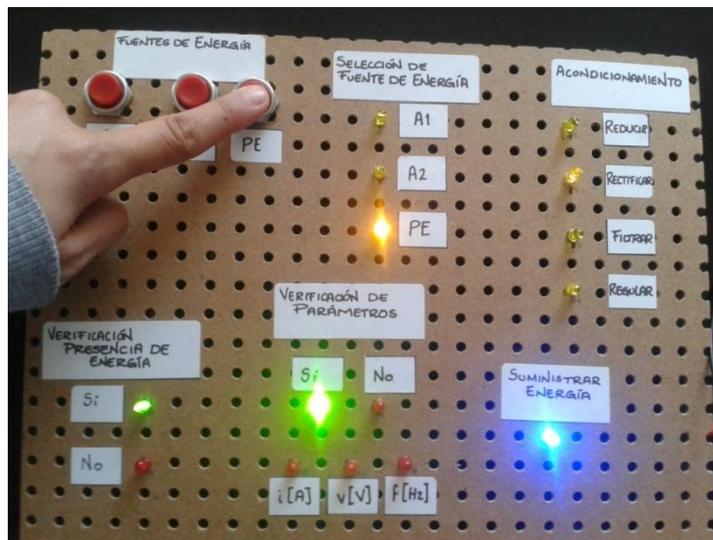


Figura 5.19 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Planta de Emergencia.

b) Comprobación del correcto funcionamiento de la función de verificación de parámetros.

1. **Proporcionando los valores deseados de cada parámetro.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

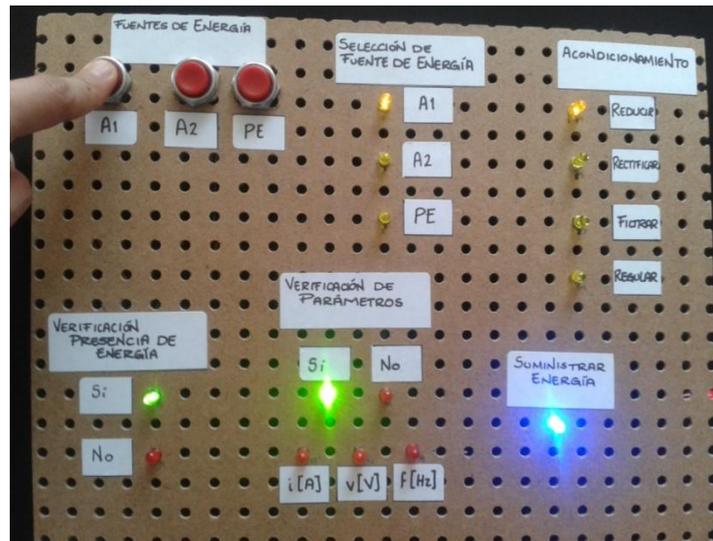


Figura 5.20 Módulo de verificación de parámetros cuando se proporcionan los valores deseados.

2. **Proporcionando valores diferentes a los deseados.**

- **Todos los parámetros son incorrectos.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como ninguno de los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen prendidos. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

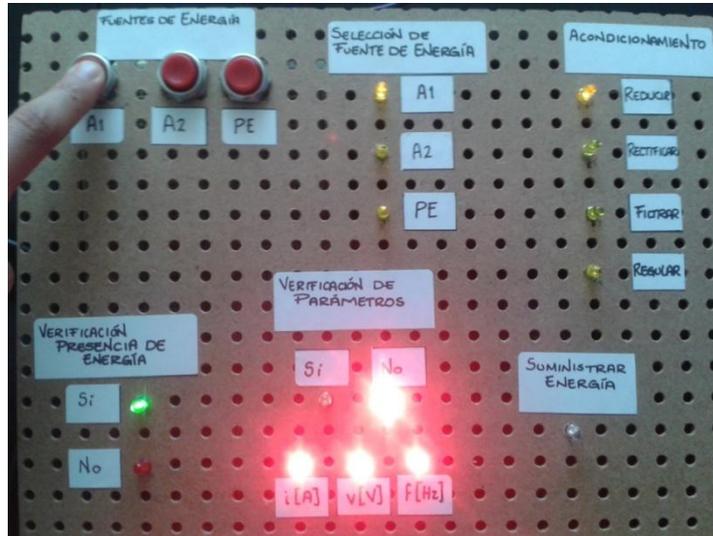


Figura 5.21 Módulo de verificación de parámetros con parámetros incorrectos.

- Voltaje diferente al deseado.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Si" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. En este caso, el único parámetro que está fuera de rango es el voltaje, por consiguiente su indicador se enciende así como el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros. Finalmente, como el indicador "Si" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

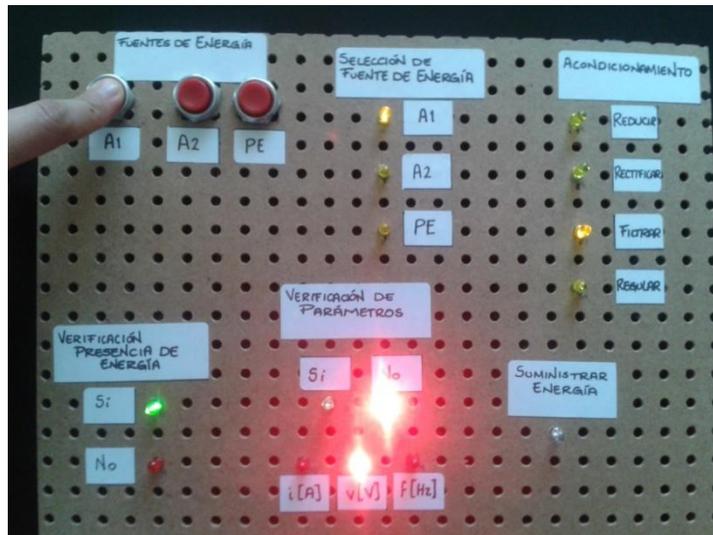


Figura 5.22 Módulo de verificación de parámetros cuando el voltaje no es el deseado.

- Corriente diferente a la deseada.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. Para este caso, el único parámetro que está fuera de rango es la corriente (voltaje equivalente), por consiguiente su indicador se enciende y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros también. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

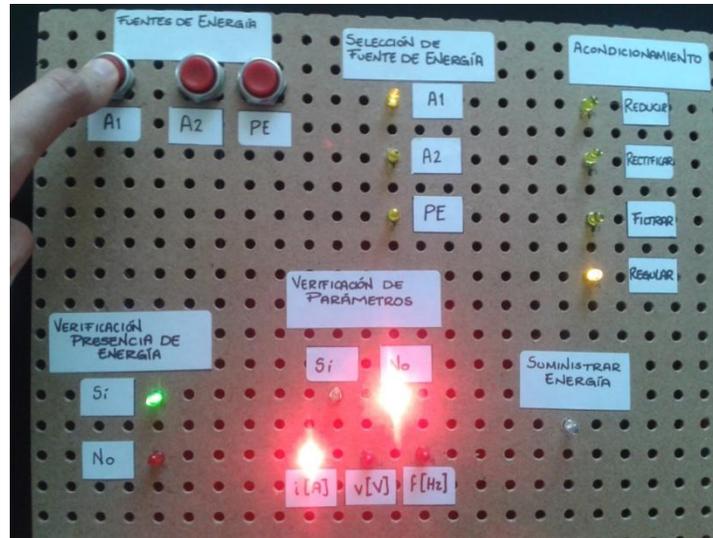


Figura 5.23 Módulo de verificación de parámetros cuando la corriente no es la deseada.

- Frecuencia diferente a la deseada.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. En este caso, el único parámetro que está fuera de rango es la frecuencia (voltaje equivalente), por consiguiente su indicador se enciende al igual que el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

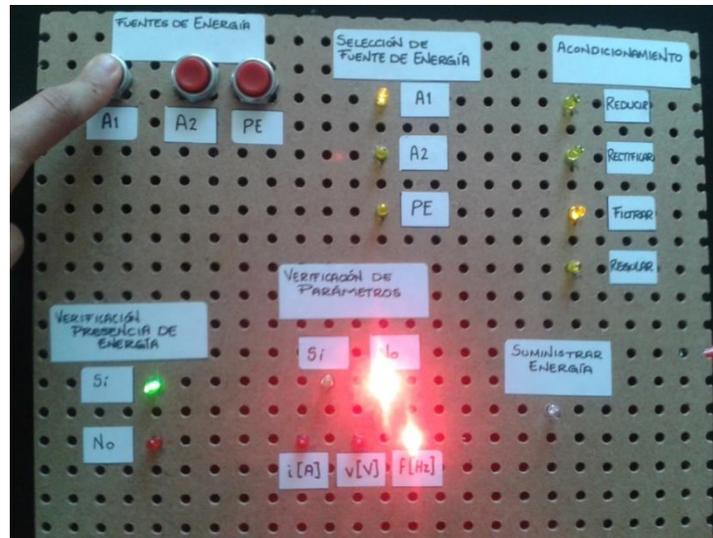


Figura 5.24 Módulo de verificación de parámetros cuando la frecuencia no es la deseada.

c) Verificación de que se cumplan las condiciones para que el indicador de suministrar se prenda, indicando que la energía proporcionada y acondicionada es la adecuada.

1. **Se cumplen las condiciones (función de verificación de presencia de energía y función de verificación de parámetros están correctos).** Considerando como fuente de energía a la Acometida 1, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

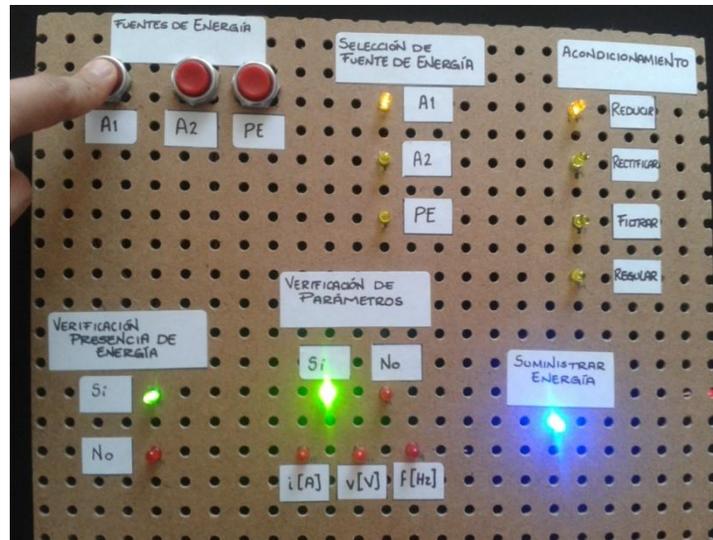


Figura 5.25 Módulo de suministrar cuando se cumplen las condiciones.

2. **No se cumplen las condiciones (función de verificación de presencia de energía y función de verificación de parámetros no están correctas).** En este caso, ningún indicador del módulo de selección se enciende ya que no se selecciona ninguna fuente de energía y por consiguiente el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía se enciende. Como no hay energía no se puede ni acondicionar ni medir ningún parámetro puesto que no existen, por consiguiente todos los indicadores del módulo de acondicionamiento permanecen apagados y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro. Finalmente, como el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

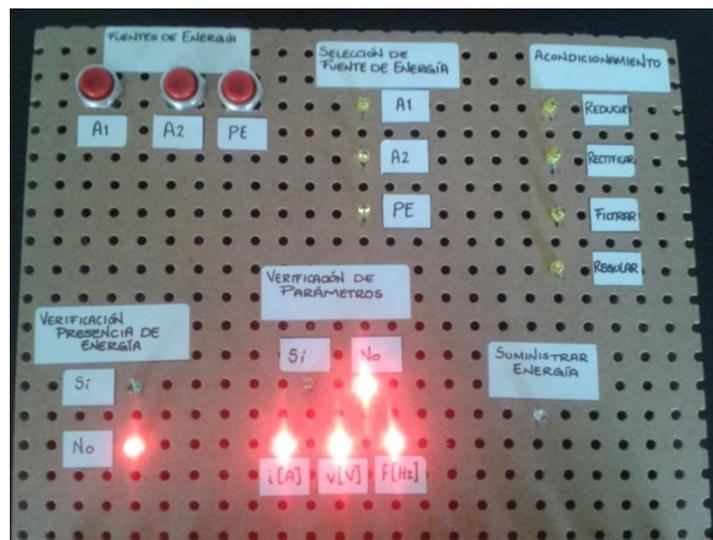


Figura 5.26 Módulo de suministrar cuando no se cumplen ninguna de las condiciones.

3. **No se cumplen alguna de las condiciones (función verificación de presencia de energía o función de verificación de parámetros está incorrecta).** Considerando como fuente de energía a la Acometida 1, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores y, como ninguno de los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen prendidos. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

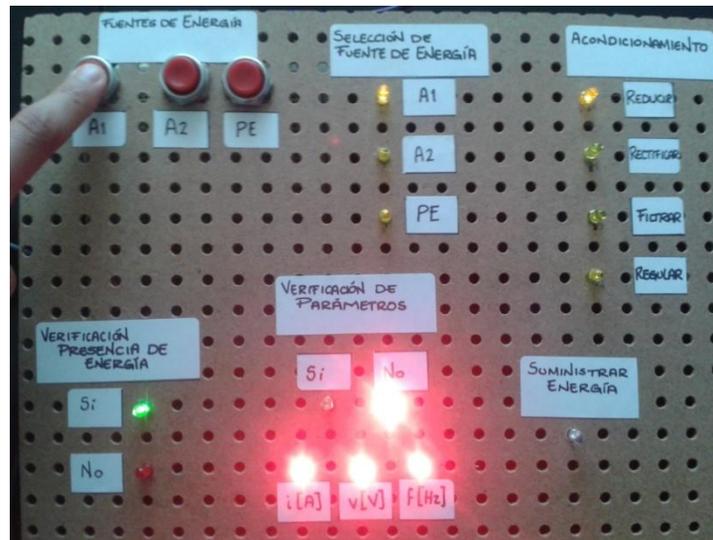


Figura 5.27 Módulo de suministrar cuando no se cumple alguna de las condiciones.

5.2.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON CONDICIONES REALES

a) Combinaciones del subsistema de selección presionando los push botton para verificar el subsistema de selección y la función de verificación de presencia de energía.

1. **No se selecciona ninguna fuente.** Ningún indicador del módulo de selección se enciende y el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía se enciende. Como no hay energía no se puede ni acondicionar ni medir ningún parámetro puesto que no existen, por consiguiente todos los indiciadores del módulo de acondicionamiento permanecen apagados y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro.

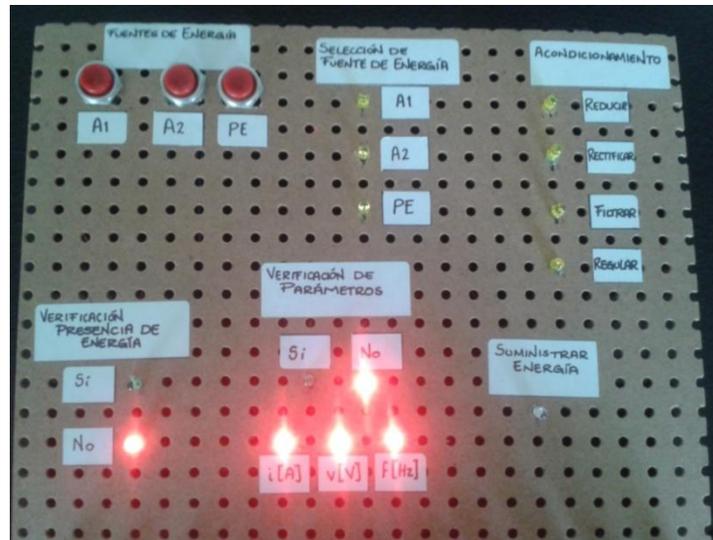


Figura 5.28 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando no se presiona ningún push button (no se selecciona ninguna fuente).

2. **Se selecciona la Acometida 1 como fuente de energía.** En este caso, el indicador de la Acometida 1 del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

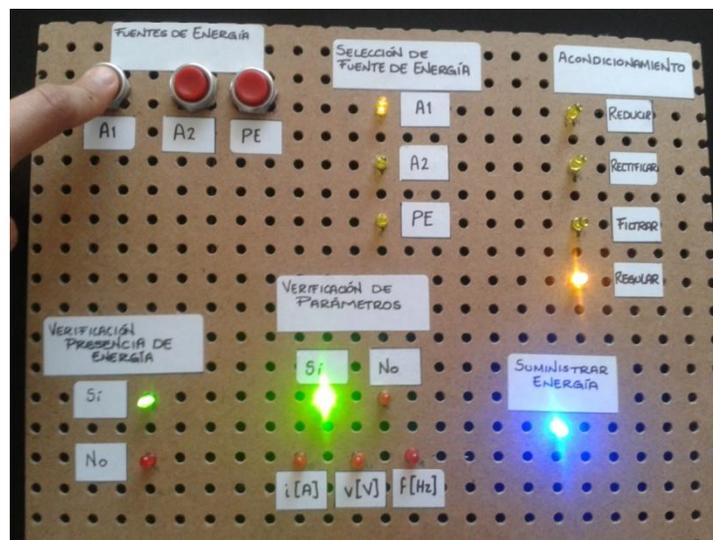


Figura 5.29 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 1.

3. **Se selecciona la Acometida 2 como fuente de energía.** Para este caso, el indicador de la Acometida 2 del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

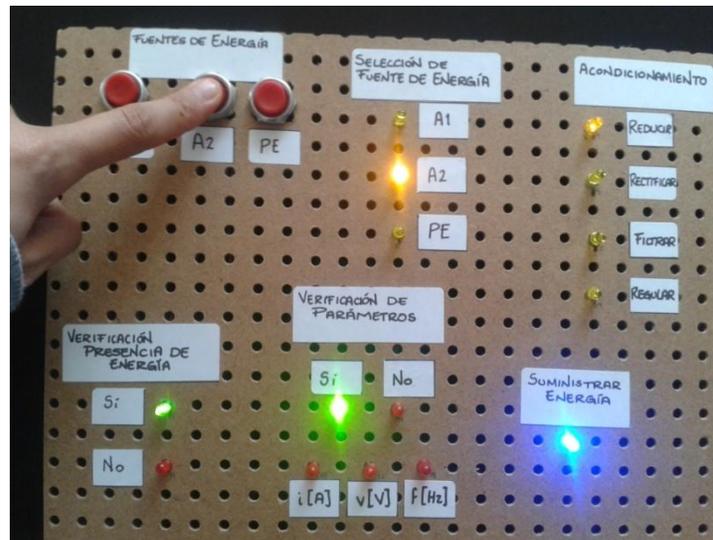


Figura 5.30 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Acometida 2.

4. **Se selecciona la Planta de Emergencia como fuente de energía.** En este caso, el indicador de la Planta de Emergencia del módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como existe energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y considerando que los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

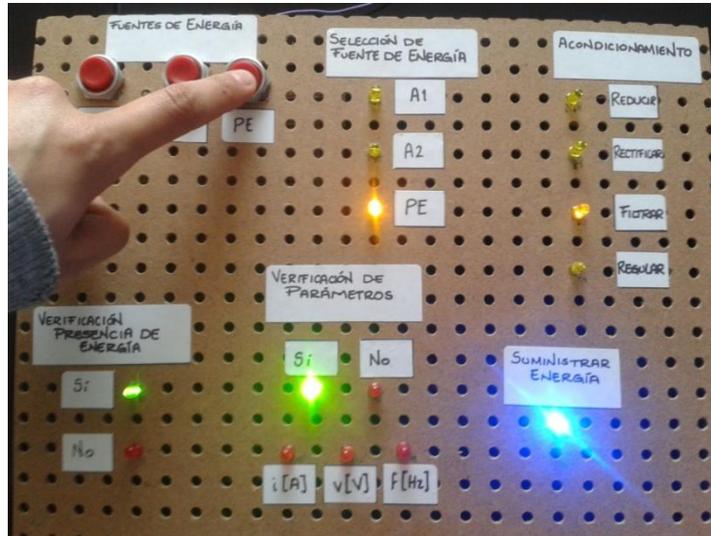


Figura 5.31 Módulos de selección y verificación de presencia de energía cuando se selecciona la Planta de Emergencia.

b) Comprobación del correcto funcionamiento de la función de verificación de parámetros.

1. **Proporcionando los valores deseados de cada parámetro.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

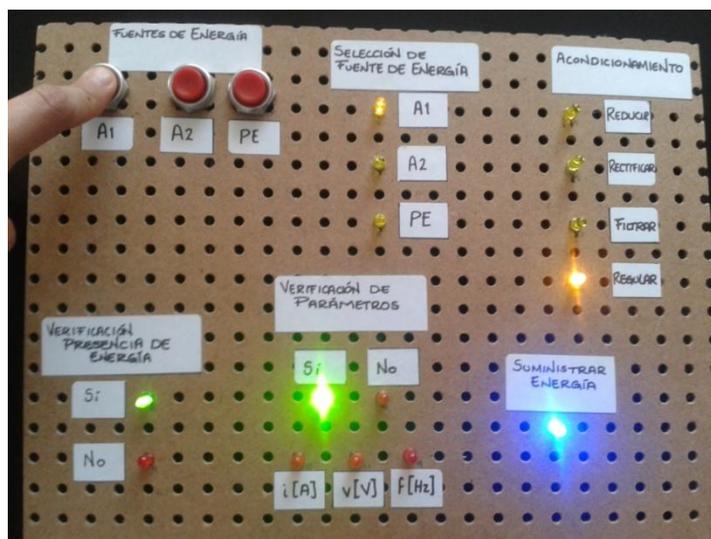


Figura 5.32 Módulo de verificación de parámetros cuando se proporcionan los valores deseados.

2. Proporcionando valores diferentes a los deseados.

- **Todos los parámetros son incorrectos.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como ninguno de los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

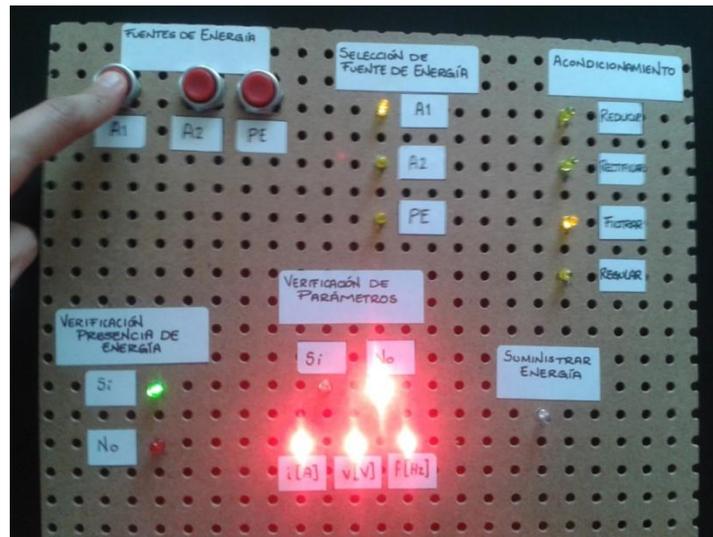


Figura 5.33 Módulo de verificación de parámetros con parámetros incorrectos.

- **Voltaje diferente al deseado.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. En este caso, el único parámetro que está fuera de rango es el voltaje, por consiguiente su indicador se enciende al igual que el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

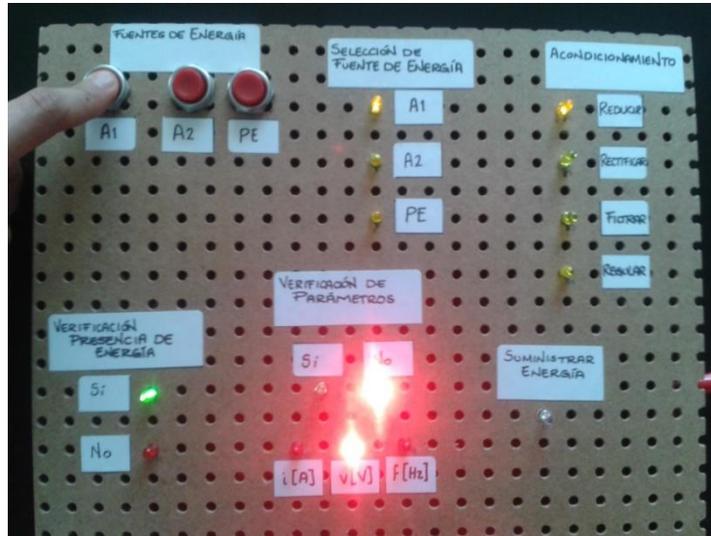


Figura 5.34 Módulo de verificación de parámetros cuando el voltaje no es el deseado.

- Corriente diferente a la deseada.** Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. Para este caso, el único parámetro que está fuera de rango es la corriente (voltaje equivalente), por consiguiente su indicador y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se encienden. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

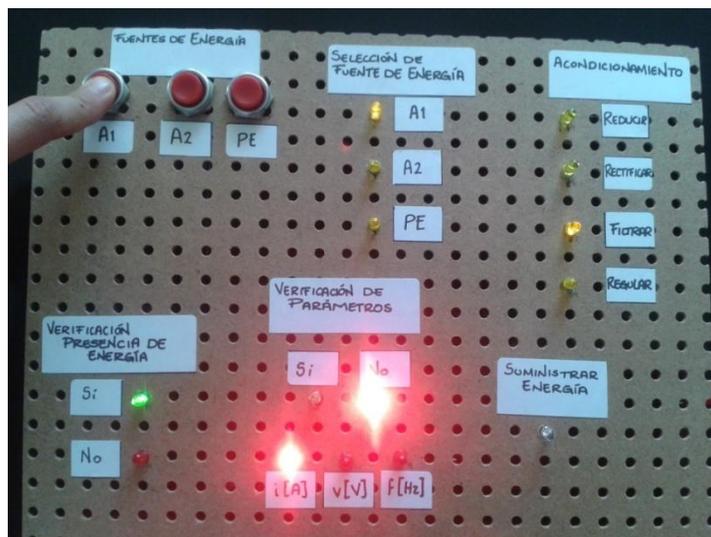


Figura 5.35 Módulo de verificación de parámetros cuando la corriente no es la deseada.

- **Frecuencia diferente a la deseada.** Como se ha ido mencionando, la frecuencia en estas condiciones es un valor fijo de 60 [Hz] por lo que para verificar el funcionamiento del controlador, lo que se realizó fue conectar y desconectar de la entrada analógica del Arduino la lectura de la frecuencia. Considerando la Acometida 1 como fuente de energía, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores. En este caso, el único parámetro que está fuera de rango es la frecuencia (voltaje equivalente), por consiguiente su indicador y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se encienden. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

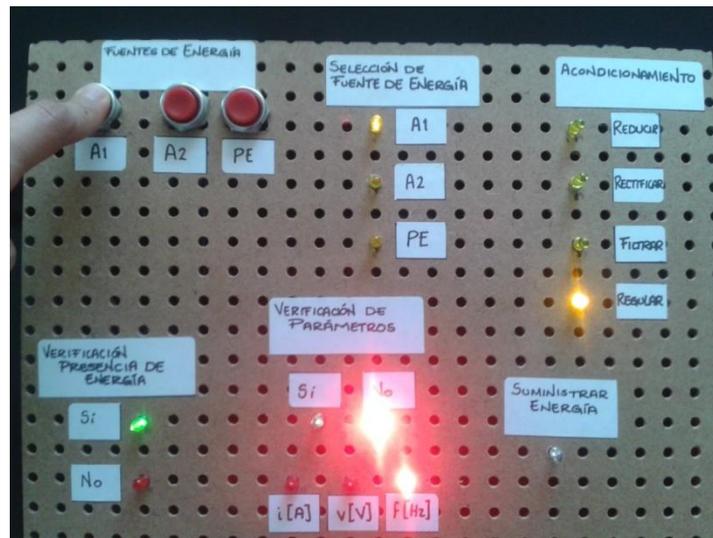


Figura 5.36 Módulo de verificación de parámetros cuando la frecuencia no es la deseada.

- c) Verificación que se cumplan las condiciones para que el indicador de suministrar se prenda, indicando que la energía proporcionada y acondicionada es la adecuada.

1. **Se cumplen las condiciones (función de verificación de presencia de energía y función de verificación de parámetros están correctos).** Para este caso, considerando como fuente de energía a la Acometida 1, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores, y como los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros se enciende y los indicadores de cada parámetro permanecen apagados. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "Sí" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar se enciende.

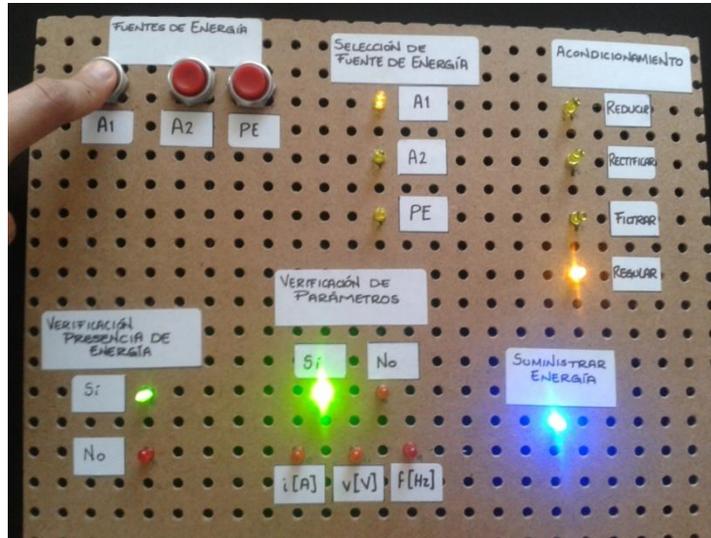


Figura 5.37 Módulo de suministrar cuando se cumplen las condiciones.

2. **No se cumplen las condiciones (función de verificación de presencia de energía y función de verificación de parámetros están incorrectas).** En este caso, ningún indicador del módulo de selección se enciende ya que no se selecciona ninguna fuente de energía y por consiguiente el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía se enciende. Como no hay energía no se puede ni acondicionar ni medir ningún parámetro puesto que no existen, por consiguiente todos los indicadores del módulo de acondicionamiento permanecen apagados y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro. Finalmente, como el indicador "No" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

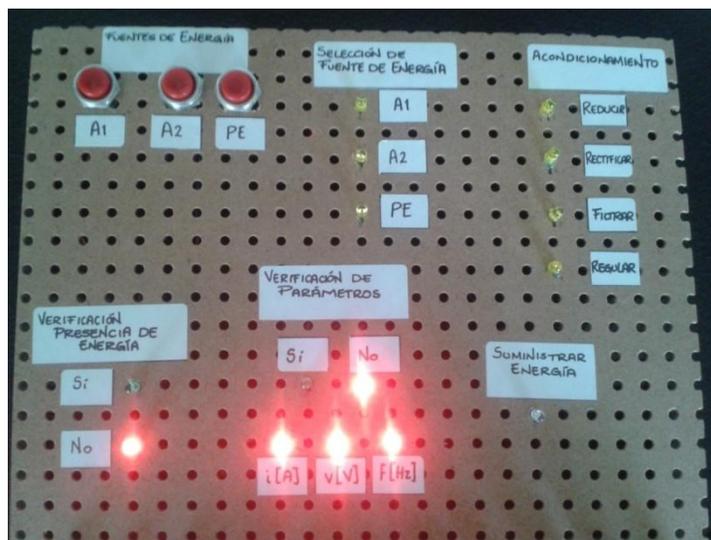


Figura 5.38 Módulo de suministrar cuando no se cumplen ninguna de las condiciones.

3. **No se cumplen alguna de las condiciones (función de verificación de presencia de energía o función de verificación de parámetros está incorrecta).** Considerando como fuente de energía a la Acometida 1, el indicador de ésta en el módulo de selección se enciende al igual que el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía. Como hay energía, en el módulo de acondicionamiento se encienden los indicadores y, como ninguno de los parámetros están dentro del rango permitido, el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros se enciende al igual que los indicadores de cada parámetro. Finalmente, como el indicador "Sí" del módulo de verificación de presencia de energía y el indicador "No" del módulo de verificación de parámetros están encendidos entonces el indicador del módulo de suministrar no se enciende.

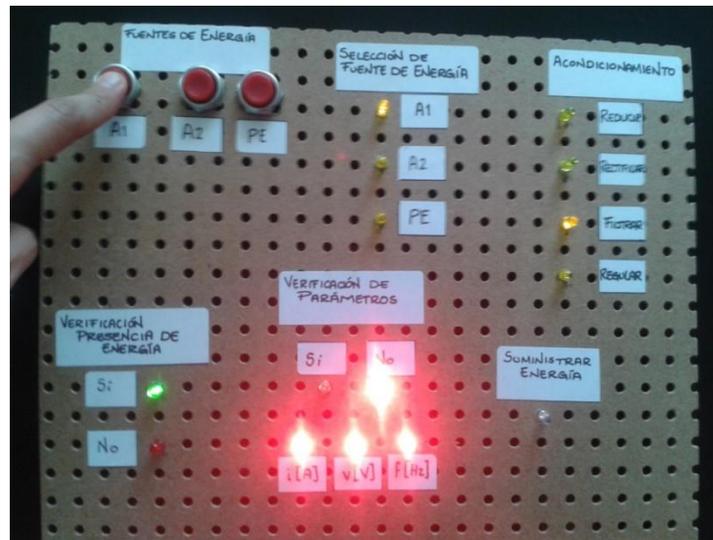


Figura 5.39 Módulo de suministrar cuando no se cumple alguna de las condiciones.

Como se puede observar, tanto en las pruebas con condiciones simuladas como en las pruebas con condiciones reales, se logró comprobar el funcionamiento correcto del controlador diseñado mediante el encendido y apagado de los indicadores (leds) de cada módulo, cumpliéndose la secuencia de funcionamiento definida en la sección 4.5.1.

6 CONDICIONES PARA ESCALAMIENTO

Una vez comprobado el funcionamiento del controlador en el modelo funcional se pueden determinar las consideraciones necesarias para poder realizar el escalamiento de éste con los parámetros reales de la fábrica.

Primero es importante tener presente que los parámetros considerados y generados para las pruebas con el modelo funcional son mucho menores que con los que se trabajarán en la subestación eléctrica. Por lo anterior, para el escalamiento industrial se recomienda utilizar los dispositivos propuestos en la sección 4.4, ya que éstos soportan los voltajes y corrientes de trabajo que se requieren. Por otro lado, es importante tomar en consideración los parámetros de trabajo para que con base en ello se definan las capacidades de cada uno de los dispositivos y se puedan cumplir con las funciones del sistema de control.

Al utilizar los dispositivos propuestos en la sección 4.4 en conjunto con el controlador diseñado se podrá automatizar la subestación eléctrica, de tal forma que se obtendrá una mayor eficiencia eléctrica en el sistema, es decir, se logrará tener una mayor calidad en la energía, además de lograr incrementar la disponibilidad de los equipos conectados.

El abastecimiento continuo de energía se logra gracias a que se tienen tres fuentes diferentes, sin embargo, en este caso lo que faltaría definir sería el tiempo de respuesta de los interruptores para que cuando se presente una falla en alguna de las fuentes de energía el cambio entre una fuente y otra sea el mínimo como se solicita en los requerimientos, garantizando así que siempre se tendrá energía para suministrar a los equipos de producción.

Partiendo de los requerimientos, otro aspecto importante es tener calidad en la energía que se va a proporcionar, la cual se lograría a partir de los componentes que se utilizarán en el subsistema de acondicionamiento, los cuales ayudan a minimizar los disturbios eléctricos que se lleguen a presentar, como son los armónicos, transitorios o ruidos en la señal además de que se corrigen las distorsiones en la forma de la onda y fluctuaciones de voltaje en la corriente eléctrica. Por otro lado, se podrá corregir el factor de potencia de tal forma que la energía que se esté proporcionando sea aprovechada al máximo para su administración, esta corrección se lograría gracias al banco de capacitores que se propone en el capítulo 4.4.

Por otro lado, es fundamental considerar las protecciones de todo el sistema de control y de cada uno de los dispositivos para evitar que ocurra un daño por cortocircuito, sobrevoltaje o algún otro disturbio eléctrico en éstos, además de garantizar la seguridad tanto de las instalaciones como del personal. Algunas de las protecciones más comunes y que se recomiendan considerar en la implementación son los fusibles, los apartarrayos, pararrayos, sistema de tierras, interruptores y relés de protección. Las protecciones anteriores se seleccionarán considerando los máximos y mínimos admisibles de voltaje y de corriente para la administración de energía. En el caso de los interruptores y los relés de protección también se debe de considerar otro factor de selección que

es el tiempo de respuesta ante un disturbio eléctrico. Algunos de los dispositivos que se propusieron en la sección 4.4, además de cumplir con la función por la cual se eligió también pueden tener la función de ser protección para la subestación eléctrica.

Con la automatización de la subestación eléctrica se lograría entonces reducir pérdidas de energía, un alto nivel de productividad, mayor eficiencia y calidad en el servicio de energía eléctrica y, por consiguiente se evitaría el deterioro prematuro de los equipos y con ello se minimizarían los costos de mantenimiento de éstos.

Finalmente, para monitorear vía remota el funcionamiento del controlador diseñado se recomienda tener un bus de comunicación (transferencia de datos entre varios equipos) compatible con el PLC que se utilizará, de tal forma que se tenga información en tiempo real visualizando ésta en una interface amigable para el usuario, es decir, que sea fácil de navegar, de entender y de obtener los valores de voltaje, corriente, potencia y frecuencia tanto de la energía que se está recibiendo desde las acometidas por CFE y el generador como de la energía que se está suministrando a los diferentes equipos de producción. Para poder obtener los valores mencionados lo que se recomienda hacer es transformar primero los valores originales a valores equivalentes para su lectura, es decir, si mi voltaje suministrado es de 220 [V] tendría que transformarlo a un voltaje equivalente, por ejemplo, 12 [V] y posteriormente convertir este valor a un valor digital para enviar la señal al PLC para que finalmente se pueda realizar la comparativa con los parámetros deseados.

7 CONCLUSIONES

Con base en las pruebas realizadas en el modelo funcional a escala, se logró visualizar a través de los indicadores (leds) el funcionamiento completo del controlador diseñado, siguiendo la secuencia de funcionamiento planteada, de tal forma que el controlador cumple con su objetivo, que es automatizar la subestación eléctrica considerada en este proyecto, es decir, que su funcionamiento sea autónomo.

A partir de la identificación de las necesidades y los requerimientos del proyecto en el proceso de diseño se pudo definir las funciones que la subestación eléctrica tiene que cumplir para su adecuado funcionamiento y, una vez definido lo anterior se logró diseñar el controlador. Mediante el correcto funcionamiento del controlador diseñado se comprobó que el proceso de diseño que se siguió fue el adecuado ya que se cumple con cada una de las funciones definidas.

Con el análisis realizado durante el proyecto y considerando los parámetros deseados, es decir, los parámetros que requieren los equipos de producción de la fábrica "X", se logró determinar los dispositivos que cumplen con las funciones del sistema de control y con ello se verificó también que los dispositivos que componen a la subestación eléctrica son los adecuados.

A pesar de que en las pruebas se utilizaron voltajes y corrientes mucho menores a las que se requieren, el controlador diseñado permite visualizar mediante el modelo funcional el correcto monitoreo y funcionamiento de la subestación eléctrica y con ello se demuestra que ésta se puede automatizar, de tal forma que al utilizar los dispositivos propuestos en conjunto con el controlador, se logrará que la energía que se suministrará a los diferentes equipos de producción tenga la mejor calidad posible para que la eficiencia de la fábrica sea mayor.

Por otro lado, se puede lograr reducir la intervención del personal en el control del abastecimiento de energía en la fábrica "X", ya que el controlador diseñado permite el funcionamiento autónomo de la subestación eléctrica, logrando así tener mayor seguridad tanto de sus instalaciones como de su personal, ya que sólo requiere monitoreo remoto y realizar mantenimientos preventivos.

Es importante mencionar que el alcance de este proyecto fue una demostración del funcionamiento del sistema de control, sin embargo, para aplicarlo a nivel industrial se tiene que tomar en cuenta las consideraciones mencionadas para el escalamiento, ya que se tienen que considerar ciertos elementos para que a nivel industrial el sistema de control siga operando con la teoría con la que se diseñó.

Finalmente es importante tomar en cuenta las consideraciones para el escalamiento mencionadas, en especial el uso de las protecciones, ya que si en algún momento alguno de los dispositivos que componen el sistema llegará a fallar la energía simplemente dejaría de suministrarse pero si llegará a fallar una de las protecciones podría causar daños a todo el sistema, a los equipos de producción y pondría en riesgo las instalaciones y la seguridad del personal, lo que implicaría que el costo por una falla en una protección sea mucho mayor al costo por una falla en alguno de los dispositivos que componen el sistema.

ANEXOS

ANEXO I. SOLUCIONES PARA LAS DIFERENTES FUNCIONES

Para cada una de las funciones (subsistemas) del sistema de control se realiza una búsqueda de las posibles soluciones que cumplirían con éstas y los requerimientos del proyecto. En cada una de las funciones se realiza una comparación entre las soluciones de la siguiente manera:

SUBSISTEMA DE SELECCIÓN

- Interruptor de Transferencia automática con contactores: Dependiendo el voltaje detectado suministrado puede conmutar entre una u otra fuente de alimentación, puede ser manejada de forma manual o automática y tiene un sistema de protección para prevenir cortocircuito entre todas las fuentes.
- Interruptor-Conmutador Motorizado: Funciona como un sistema de transferencia que conmuta de forma automática o manual entre dos o más sistemas de alimentación, en aplicaciones de distribución de energía; asegura el aislamiento de las fuentes de alimentación asíncronas y puede trabajar con corrientes muy altas.
- Interruptor Automático de media tensión: Es utilizado en la distribución de energía para control y protección de líneas, en subestaciones de transformación y distribución, motores, transformadores, bancos de condensadores, etc.; utiliza el gas de hexafluoruro de azufre (SF6) como medio de extinción del arco eléctrico y también como medio aislante, utiliza también un motor de mando.

Tabla A.1 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función seleccionar [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].

SELECCIONAR	SOLUCIÓN		
PARÁMETRO	INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA AUTOMÁTICA CON CONTACTORES	INTERRUPTOR-CONMUTADOR MOTORIZADO	INTERRUPTOR AUTOMÁTICO DE MEDIA TENSIÓN
Capacidades	40-1600 [A]	125-3200 [A]	630-3600 [A]
Modo de funcionamiento	Trifásico, monofásico	Trifásico/Monofásico	Trifásico
Tipo de transferencia	Transición abierta/cerrada	Transición abierta/cerrada	Transición abierta/cerrada
Frecuencia	50/60 [Hz]	50/60 [Hz]	50/60 [Hz]
Voltaje máximo de los contactores/motor soportado	600 [Vac]	110-240 [Vac]	12-36 [kVac]
Número de posiciones de los contactores/interruptor	2/3	2/3	-
Corriente que soporta los contactores/interruptor	40-400 A, 40-1200 [A]	40-125 [A]	-
Temperatura máxima	90 [°C]	70 [°C]	40 [°C]
Protección	Mini breakers	Fusible	-
Tiempo de respuesta	100 [ms]	15 [ms]	10-80 [ms]

SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO

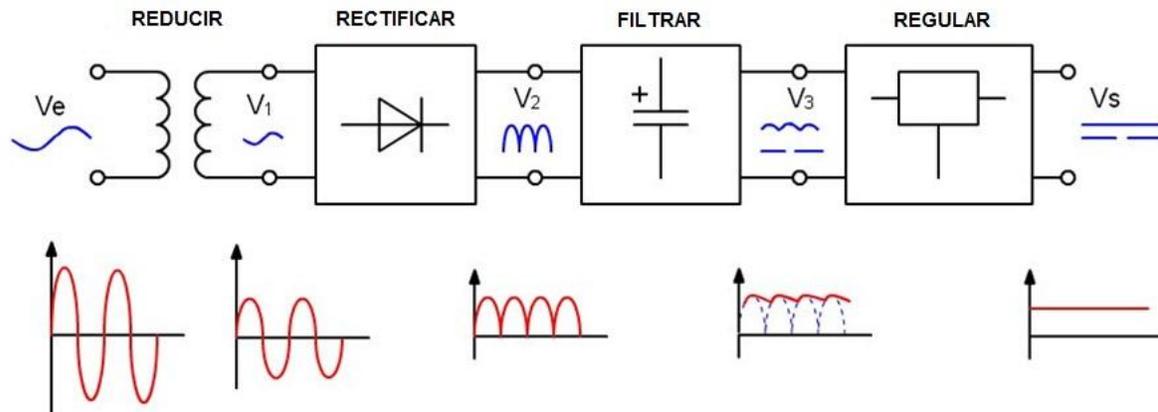


Figura A.1 Proceso de acondicionamiento de la energía.

FUNCIÓN REDUCIR

- Transformador trifásico tipo seco: Se utiliza para reducir las tensiones de distribución suministradas por las compañías eléctricas a niveles de baja tensión para la distribución de potencia principalmente en áreas metropolitanas (edificios públicos, oficinas, subestaciones de distribución) y para aplicaciones industriales. Los transformadores secos son

ideales para tales aplicaciones porque pueden ser ubicados cerca del punto de utilización de la potencia lo cual permite optimizar el sistema de diseño minimizando los circuitos de baja tensión y alta intensidad con los correspondientes ahorros en pérdidas y conexiones de baja tensión. Los transformadores secos son medio ambientalmente seguros, tienen una alta resistencia frente a cortocircuitos, una alta capacidad para soportar sobrecargas y una gran robustez mecánica, evitando fugas de líquidos, peligro de fuego o de explosión y son apropiados para aplicaciones interiores o exteriores. Son equipos diseñados para colocarse cerca de los centros de carga para mejorar la regulación del voltaje en instalaciones industriales, comerciales y residenciales; y obtener los más altos niveles de eficiencia.

- Transformador de potencia sumergido en aceite: Son dispositivos que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Pueden trabajar con voltajes muy altos de hasta 24 [kV] y convertir esa energía en voltajes menores manteniendo la potencia. En estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque que tiene paredes lisas o corrugadas o bien provistos con tubos radiadores.

Tabla A.2 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función reducir [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39].

REDUCIR PARÁMETRO	SOLUCIÓN	
	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO SECO	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA SUMERGIDO EN ACEITE
Potencia	30-3000 [kVA]	250-2500 [kVA]
Tensión Primaria	22 [kVac]	24 [kVac]
Tensión Secundaria	220 [Vac]	220 [Vac]
Frecuencia	60 [Hz]	50/60 [Hz]
Temperatura máxima	65 [°C]	60 [°C]
Tipo de Aislamiento	Encapsulado en resina epóxica	Aceite mineral
Pérdidas en vacío	500-2300 [W]	650-3800 [W]
Pérdidas a plena carga	8000-10000 [W]	3250-26500 [W]
Regulación sin Tensión	2.5%	2.5%
Tipo de conexión	Delta-Estrella	Delta-Estrella Estrella-Delta
Eficiencia	99.5%	98.5%
Costo	22,000 dólares	15,000 dólares

FUNCIÓN RECTIFICAR

- Convertidor de corriente (AC a DC): Rectifica la señal de entrada de tal forma que a la salida se obtenga una señal con voltaje constante. Éste se diseña y fabrica para los valores de entrada y salida en específico.
- Rectificador Trifásico: Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias como diodos, tiristores, válvulas de mercurio (usados hace más

de 100 años), entre otros. El rectificador trifásico cumple con la misma función que un rectificador monofásico, con la diferencia que estos rectificadores son alimentados por fuentes trifásicas, por lo que son más eficientes y pueden manejar grandes potencias, ya que en su salida presentan menor rizado de la señal. Son utilizados principalmente en la industria para producir voltajes y corrientes continuos que generalmente impulsan cargas de gran potencia, como motores DC.

Tabla A.3 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función rectificar [40], [41], [42], [43], [44].

RECTIFICAR	SOLUCIÓN	
	CONVERTIDOR DE CORRIENTE (AC A DC)	RECTIFICADOR TRIFÁSICO
Voltaje de Entrada	200-240 [Vac]	400 [Vac]
Voltaje de Salida	200-240 [Vdc]	240 [Vdc]
Potencia continua a la salida	1000 [W]	-
Regulación	±5%	-
Corriente de salida máxima	100 [A]	600 [A]
Tiempo de Transferencia	16 [ms]	10 [ms]
Eficiencia	86%	95%
Frecuencia	50/60 [Hz]	50/60 [Hz]
Temperatura Máxima	40 [°C]	45 [°C]

FUNCIÓN FILTRAR

- Filtro: Elimina ruido y corrige distorsiones en la forma de la onda y fluctuaciones de voltaje en la corriente eléctrica.
- UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida): Mejora la calidad de la energía eléctrica que llega a las cargas, filtrando subidas y bajadas de tensión y eliminando armónicos de la red en el caso de usar corriente alterna. Eleva o disminuye la corriente para que el voltaje sea estable, es decir, para que el flujo de voltaje llegue a un aparato sin irregularidades, y cuenta con baterías lo que permite un apagado correcto a pesar de la falta de energía.

Tabla A.4 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función filtrar [45], [46].

FILTRAR	SOLUCIÓN	
	FILTRO	UPS
Voltaje de Entrada	200-480 [Vac]	160-280 [V]
Voltaje de Salida	200-480 [Vdc]	208/220 [V]
Capacidad de potencia a la salida	1000 [W]	3500 [W]
Corriente de salida máxima	300 [A]	60 [A]
Frecuencia	50/60 [Hz]	45-65 [Hz]
Temperatura máxima	40 [°C]	45 [°C]

FUNCIÓN REGULAR

- Supresor de Picos: Tiene la función de eliminar los transitorios de tensión (picos de voltaje) que debido a su corta duración no son detectados fácilmente por otros equipos de calidad de energía, es decir, evita los sobrevoltajes repentinos.
- UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida): ÍDEM.
- Banco de capacitores: Es un sistema que ofrece la opción de compensar potencia reactiva, con un diseño que le permite altos grados de adaptabilidad para cubrir los requerimientos específicos del usuario o la carga en particular a la que va a suministrar potencia reactiva. Tiene las funciones de medición de voltaje, corriente, potencia aparente, potencia reactiva, temperatura, entre otros. También pasos programables, así como la posibilidad de comunicarse con una PC. Mejora la regulación de voltaje y por ende la calidad de la energía, además de lograr incrementar la capacidad disponible de los equipos conectados.

Tabla A.5 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función regular [46], [47], [48], [49].

REGULAR	SOLUCIÓN		
PARÁMETRO	SUPRESOR DE PICOS	UPS	BANCO DE CAPACITORES
Voltaje de Entrada	-	160-280 [V]	-
Voltaje de Salida	-	208/220 [V]	-
Voltaje Máximo	320 [V]	-	230 [V]
Corriente de salida máxima	15 [A]	60 [A]	60-900 [A]
Capacidad de Potencia a la Salida	-	3500 [W]	500 [kVA]
Frecuencia	50/60 [Hz]	45-65 [Hz]	50/60 [Hz]
Temperatura de trabajo	-40 hasta 85 [°C]	45 [°C]	55 [°C]
Tiempo de Respuesta	Menos de 15 [ns]	-	-

SUBSISTEMA DE VERIFICACIÓN

FUNCIÓN VERIFICAR PRESENCIA DE ENERGÍA

- Interruptor Electromagnético: Detecta el paso o presencia de la energía. Son altamente precisos y su funcionamiento es seguro, ya que tiene protecciones contra cortocircuitos y sobrecargas. Se utilizan en variedad de aplicaciones debido a sus numerosas cualidades, puede funcionar como interruptor de alimentación, distribución, acoplamiento y salida para instalaciones eléctricas; como equipo de protección y maniobra para motores, condensadores, generadores, transformadores, barras colectoras y cables; o como interruptor principal y de desconexión de emergencia en combinación con un dispositivo de desconexión de emergencia.

- Voltímetro: Mide la diferencia de potencial entre dos terminales de tal forma que se puede cotejar con el valor deseado con ayuda de un comparador. Puede medir voltajes muy altos de hasta 600 [V] tanto en corriente directa como corriente alterna.
- Amperímetro: Mide la intensidad de corriente que circula en un circuito de tal forma que se puede cotejar con el valor deseado con ayuda de un comparador. Puede medir corrientes muy altas de hasta 999 [A], ya se trate de corriente directa o corriente alterna.

Tabla A.6 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función verificar presencia de energía [28], [31], [50], [51], [52].

VERIFICAR PRESENCIA DE ENERGÍA	SOLUCIÓN		
PARÁMETRO	INTERRUPTOR ELECTROMAGNÉTICO	VOLTÍMETRO	AMPERÍMETRO
Rango de voltaje	600 [V]	0-600 [V]	-
Rango de corriente	630-6300 [A]	-	0-999 [A]
Frecuencia	50/60 [Hz]	15-100 [Hz]	15-100 [Hz]
Número de polos	3/4	-	-
Temperatura	50 [°C]	20 [°C]	20 [°C]
Tiempo de respuesta	35-80 [ms]	-	-
Precisión de medida	-	±0.3%	±0.2%
Número de entradas	1 analógica	1 digital	1 digital
Número de salidas	1 analógica	1 digital	1 digital

FUNCIÓN VERIFICAR PARÁMETROS

- PLC: A partir de las señales de entrada leídas genera señales de salida según lo programado. Trabaja en tiempo real, el tiempo de respuesta es pequeño (de 3 a 10 [ms]) y se puede incrementar su memoria a través de módulos. Los PLC's son diseñados para aplicaciones industriales de control secuencial y reglamentario de mayor tamaño con requisitos de entradas y salidas especiales.
- Microcontrolador: Contiene un convertidor analógico-digital y un convertidor digital-analógico, tiene una memoria expandible de hasta 16 [KB], es un dispositivo barato sin embargo el procesamiento de los datos no es muy rápido ya que tiene un tiempo de respuesta de 50 [ms]. Los microcontroladores se utilizan para realizar tareas muy específicas en el control de procesos a nivel industrial, en sistemas de comunicación, en aplicaciones de consumo (electrodomésticos) y en instrumentación.

Tabla A.7 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función verificar parámetros [53], [54], [55], [56], [57], [58].

VERIFICAR PARÁMETROS	SOLUCIÓN	
	PLC	MICROCONTROLADOR (PIC)
Memoria expandible a través de módulos	64-4096 [KB]	16 [KB]
Número de entradas/salidas expandibles a través de módulos	512-3072	21
Número de entradas/salidas remotas expandible a través de módulos	5-125	-
Tipo de comunicación	Ethernet, Modbus, CS31, CANopen, ProfibusPD, DeviceNet, EtherCat, PROFINET IO	I2C, RS232
Voltaje de entrada/salida	24 [V]	5 [V]
Tiempo de respuesta	3-10 [ms]	50 [ms]
Voltaje de Trabajo	1-5 [V]	2.3-3.6 [V]
Corriente de Trabajo	2.3-3.3 [A]	25 [mA]
Frecuencia	10 [kHz]	32 [kHz]

SUBSISTEMA DE SUMINISTRACIÓN

- Contactor (Electromagnético): Este dispositivo está diseñado para manejar corrientes en un rango de 25 a 120 [A] y un voltaje de 220 [V]. Se pueden utilizar para control y automatización de equipos y máquinas con procesos complejos, el cual tiene por objetivo establecer o interrumpir la alimentación a los receptores de manera automática.
- Interruptor Termomagnético: Se utiliza para permitir o interrumpir la alimentación de dispositivos. Puede manejar diferentes voltajes y corrientes. Es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa los valores máximos del interruptor (de 5 a 10 [kA]).
- Tablero de distribución en baja tensión: Son gabinetes que permiten distribuir la energía eléctrica de manera segura y eficiente, es decir, cuenta con barras y conectores metálicos que permiten conducir la corriente eléctrica a las diversas cargas de la instalación, pero que también cuentan con aislantes y cubiertas que permiten resguardar las partes energizadas para así permitir la segura operación de seccionadores o interruptores. Algunos consideran equipos para la medición, monitoreo y comunicación de parámetros eléctricos. Se emplean para uso industrial, residencial, etc.

Tabla A.8 Tabla comparativa de las diferentes soluciones para la función suministrar [24], [28], [29], [31], [59], [60], [61], [62].

SUMINISTRAR	SOLUCIÓN		
PARÁMETRO	CONTACTOR ELECTROMAGNÉTICO	INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN
Voltaje nominal	220 [V]	220 [V]	690 [V]
Corriente nominal	25-120 [A]	15-100 [A]	Hasta 4000 [A]
Número de polos/particiones internas	1-3	1-3	1-4
Frecuencia	60 [Hz]	60 [Hz]	60 [Hz]
Temperatura	75 [°C]	-20 a 55 [°C]	35 a 40 [°C]
Capacidad interruptiva	-	10 [kA]	-

ANEXO II. CÓDIGO EN ARDUINO PARA PRUEBAS CON CONDICIONES SIMULADAS

BOTONES

```
const int botonA1=2; //Botón Acometida 1
const int botonA2=3; //Botón Acometida 2
const int botonPE=4; //Botón Planta de Emergencia
```

Definición de los botones
(variables enteras constantes)
con su respectivo pin digital.

PARÁMETROS

```
int v=A1; //Voltaje
int i=A2; //Corriente
int f=A3; //Frecuencia
```

Definición de los parámetros
(variables enteras) con su
respectivo pin analógico.

INDICADORES (LEDS)

```
int led1=22; //Reducir
int led2=24; //Rectificar
int led3=26; //Filtrar
int led4=28; //Regular
int led5=30; //Suministrar
int led6=32; //Acometida 1
int led7=34; //Acometida 2
int led8=36; //Planta de Emergencia
int led9=38; //Voltaje
int led10=40; //Corriente
int led11=42; //Frecuencia
int led12=44; //Sí (Verificación de parámetros)
int led13=47; //No (Verificación de parámetros)
int led14=48; //Sí (Verificación presencia de energía)
int led15=50; //No (Verificación presencia de energía)
```

Definición de los indicadores
(variables enteras) con su
respectivo pin digital.

VARIABLES AUXILIARES

```
int bSA1=0; //Variable para la Acometida 1
int bSA2=0; //Variable para la Acometida 2
int bSPE=0; //Variable para la Planta de Emergencia
int seleccionar=0; //Variable para la sección Seleccionar
int parametro1=0; //Variable para el voltaje
int parametro2=0; //Variable para la corriente
int parametro3=0; //Variable para la frecuencia
int verificar=0; //Variable para la sección Verificar
```

Definición e inicialización de
variables auxiliares enteras
en cero.

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(botonA1, INPUT);
  pinMode(botonA2, INPUT);
  pinMode(botonPE, INPUT);
  pinMode(v, INPUT);
  pinMode(i, INPUT);
  pinMode(f, INPUT);
  pinMode(led1, OUTPUT);
  pinMode(led2, OUTPUT);
  pinMode(led3, OUTPUT);
  pinMode(led4, OUTPUT);
  pinMode(led5, OUTPUT);
  pinMode(led6, OUTPUT);
  pinMode(led7, OUTPUT);
  pinMode(led8, OUTPUT);
  pinMode(led9, OUTPUT);
  pinMode(led10, OUTPUT);
  pinMode(led11, OUTPUT);
  pinMode(led12, OUTPUT);
  pinMode(led13, OUTPUT);
  pinMode(led14, OUTPUT);
  pinMode(led15, OUTPUT);
} //Termina setup

```

Configuración del puerto serial a una velocidad de 9600 bits por segundo.
Definición de los pines analógicos y digitales como entradas y salidas.

```

void loop()
{
LECTURA DE LOS BOTONES
  bSA1=digitalRead(botonA1);
  bSA2=digitalRead(botonA2);
  bSPE=digitalRead(botonPE);

```

Lectura digital de los botones.

```

LECTURA DE PARÁMETROS
  float voltaje=(analogRead(A1))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("voltaje"); Serial.println(voltaje);
  delay(1000);
  float corriente=(analogRead(A2))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("corriente"); Serial.println(corriente);
  delay(1000);
  float frecuencia=(analogRead(A3))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("frecuencia"); Serial.println(frecuencia);
  delay(1000);

```

Lectura analógica de los parámetros, conversión del valor de la lectura analógica a digital y visualización de la lectura cada segundo.

SELECCIONAR FUENTE Y VERIFICACIÓN PRESENCIA DE ENERGÍA

```
if(bSA1==HIGH || bSA1==HIGH && bSA2==HIGH && bSPE==HIGH
|| bSA1==HIGH && bSA2==HIGH || bSA1==HIGH && bSPE==HIGH)
{
    digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
    digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
    digitalWrite(led6,HIGH); //A1 prendido
    digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
    digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
    seleccionar=1;
} //Termina if A1
else
{
    if (bSA2==HIGH && bSPE==HIGH || bSA2==HIGH)
    {
        digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
        digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
        digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
        digitalWrite(led7,HIGH); //A2 prendido
        digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
        seleccionar=1;
    } //Termina if A2
    else
    {
        if (bSPE==HIGH)
        {
            digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
            digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
            digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
            digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
            digitalWrite(led8,HIGH); //PE prendido
            seleccionar=1;
        } //Termina if PE
        else
        {
            digitalWrite(led14,LOW); //Sí (Verificación energía) apagado
            digitalWrite(led15,HIGH); //No (Verificación energía) prendido
            digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
            digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
            digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
            seleccionar=0;
        } //Termina else PE
    } //Termina else A2
} // Termina else A1
```

Condición para que el indicador de la **Acometida 1** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

Condición para que el indicador de la **Acometida 2** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

Condición para que el indicador de la **Planta de Emergencia** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

En caso contrario los indicadores de la Acometida 1, Acometida 2, Planta de Emergencia y Sí de verificación de energía se apagan, pero el **No** de verificación energía se prende.

ACONDICIONAMIENTO

```
if(seleccionar==1)
{
  digitalWrite(led1,HIGH); //Reducir prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led1,LOW); //Reducir apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led2,HIGH); //Rectificar prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led2,LOW); //Rectificar apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led3,HIGH); //Filtrar prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led3,LOW); //Filtrar apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led4,HIGH); //Regular prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led4,LOW); //Regular apagado
  delay(100);
} //Termina if seleccionar
else
{
  digitalWrite(led1,LOW); //Reducir apagado
  digitalWrite(led2,LOW); //Rectificar apagado
  digitalWrite(led3,LOW); //Filtrar apagado
  digitalWrite(led4,LOW); //Regular apagado
} //Termina else seleccionar
```

Si hay presencia de energía entonces se realiza la simulación del acondicionamiento de ésta por medio de indicadores que se encienden y se apagan cada 100 [ms].

En caso contrario los indicadores de reducir, rectificar, filtrar y regular se apagan.

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS

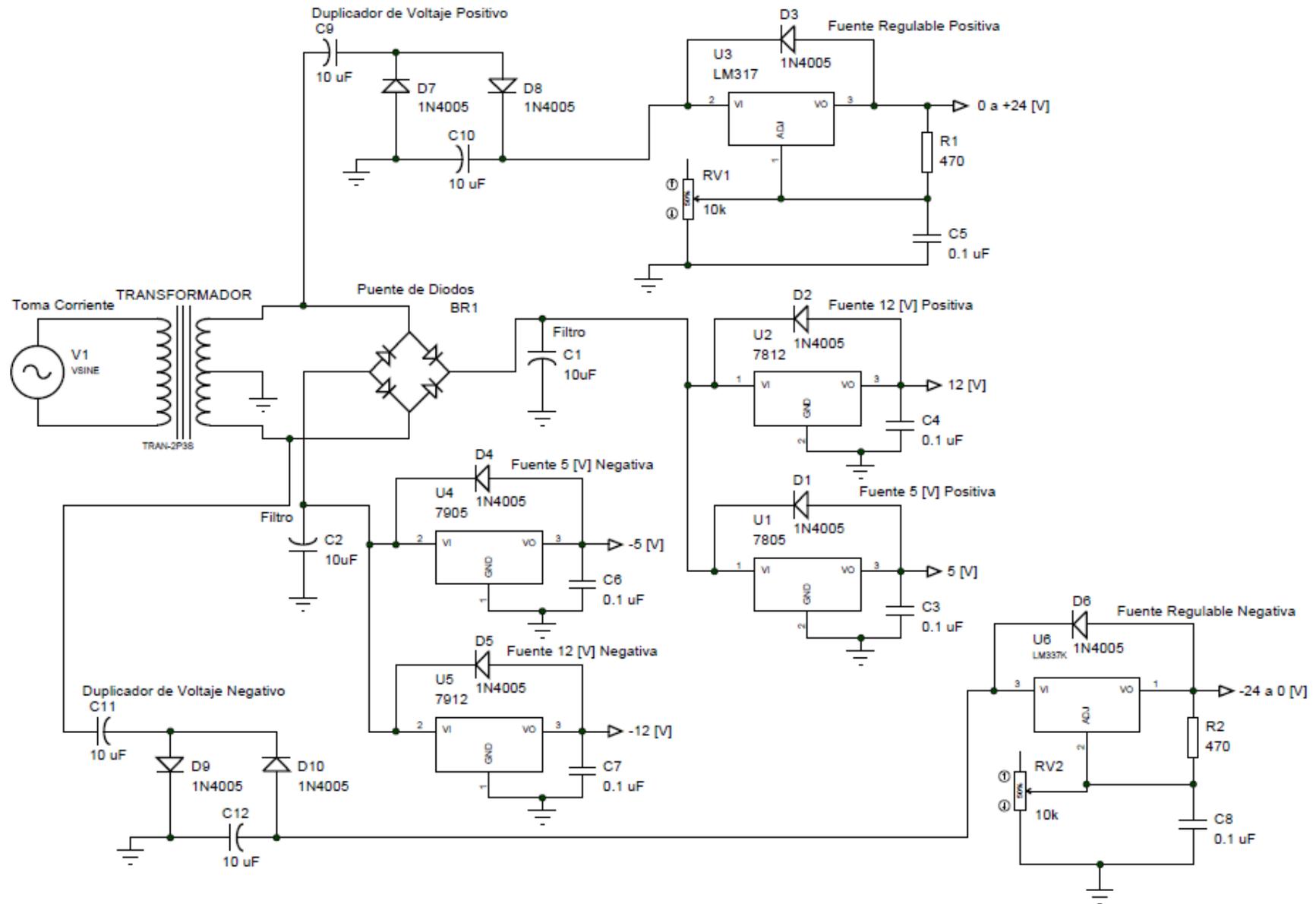
```
if (voltaje<2.15 && voltaje>1.85)
{
  digitalWrite(led9,LOW); //Voltaje apagado
  parametro1=1;
} //Termina if voltaje
else
{
  digitalWrite(led9,HIGH); //Voltaje prendido
  parametro1=0;
} //Termina else voltaje
```

Si la lectura del voltaje está dentro del rango, su indicador se queda apagado.

Si la lectura del voltaje está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.

<pre> if(corriente<4.30 && corriente>3.90) { digitalWrite(led10,LOW); //Corriente apagado parametro2=1; } //Termina if corriente else { digitalWrite(led10,HIGH); //Corriente prendido parametro2=0; } //Termina else corriente if(frecuencia<0.45 && frecuencia>0.30) { digitalWrite(led11,LOW); //Frecuencia apagado parametro3=1; } //Termina if frecuencia else { digitalWrite(led11,HIGH); //Frecuencia prendido parametro3=0; } //Termina else frecuencia if(parametro1==1 && parametro2==1 && parametro3==1) { digitalWrite(led12,HIGH); //Sí (Verificación de parámetros) prendido digitalWrite(led13,LOW); //No (Verificación de parámetros) apagado verificar=1; } //Termina if verificación de parámetros else { digitalWrite(led12,LOW); //Sí (Verificación de parámetros) apagado digitalWrite(led13,HIGH); //No (Verificación de parámetros) prendido verificar=0; } //Termina else verificación de parámetros </pre>	<p>} Si la lectura de la corriente está dentro del rango, su indicador se queda apagado.</p> <p>} Si la lectura de la corriente está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.</p> <p>} Si la lectura de la frecuencia está dentro del rango, su indicador se queda apagado.</p> <p>} Si la lectura de la frecuencia está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.</p> <p>} Si el voltaje, la corriente y la frecuencia están dentro de sus rangos, el indicador de verificación de parámetros se enciende.</p> <p>} En caso contrario el indicador de verificación de parámetros se apaga.</p>
<p>SUMINISTRAR</p> <pre> if (seleccionar==1 && verificar==1) { digitalWrite(led5,HIGH); //Suministrar prendido } //Termina if suministrar else { digitalWrite(led5,LOW); //Suministrar apagado } //Termina else suministrar } //Termina loop </pre>	<p>} Si hay presencia de energía y los parámetros están dentro de sus rangos establecidos, el indicador de suministrar se enciende.</p> <p>} En caso contrario el indicador de suministrar se apaga.</p>

ANEXO III. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA FUENTE DE VOLTAJE UTILIZADA.



BOTONES

```
const int botonA1=2; //Botón Acometida 1
const int botonA2=3; //Botón Acometida 2
const int botonPE=4; //Botón Planta de Emergencia
```

Definición de los botones
(variables enteras constantes)
con su respectivo pin digital.

PARÁMETROS

```
int v=A1; //Voltaje
int i=A2; //Corriente
int f=A3; //Frecuencia
```

Definición de los parámetros
(variables enteras) con su
respectivo pin analógico.

INDICADORES (LEDS)

```
int led1=22; //Reducir
int led2=24; //Rectificar
int led3=26; //Filtrar
int led4=28; //Regular
int led5=30; //Suministrar
int led6=32; //Acometida 1
int led7=34; //Acometida 2
int led8=36; //Planta de Emergencia
int led9=38; //Voltaje
int led10=40; //Corriente
int led11=42; //Frecuencia
int led12=44; //Sí (Verificación de parámetros)
int led13=47; //No (Verificación de parámetros)
int led14=48; //Sí (Verificación presencia de energía)
int led15=50; //No (Verificación presencia de energía)
```

Definición de los indicadores
(variables enteras) con su
respectivo pin digital.

VARIABLES AUXILIARES

```
int bSA1=0; //Variable para la Acometida 1
int bSA2=0; //Variable para la Acometida 2
int bSPE=0; //Variable para la Planta de Emergencia
int seleccionar=0; //Variable para la sección Seleccionar
int parametro1=0; //Variable para el voltaje
int parametro2=0; //Variable para la corriente
int parametro3=0; //Variable para la frecuencia
int verificar=0; //Variable para la sección Verificar
```

Definición e inicialización de
variables auxiliares enteras
en cero.

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(botonA1, INPUT);
  pinMode(botonA2, INPUT);
  pinMode(botonPE, INPUT);
  pinMode(v, INPUT);
  pinMode(i, INPUT);
  pinMode(f, INPUT);
  pinMode(led1, OUTPUT);
  pinMode(led2, OUTPUT);
  pinMode(led3, OUTPUT);
  pinMode(led4, OUTPUT);
  pinMode(led5, OUTPUT);
  pinMode(led6, OUTPUT);
  pinMode(led7, OUTPUT);
  pinMode(led8, OUTPUT);
  pinMode(led9, OUTPUT);
  pinMode(led10, OUTPUT);
  pinMode(led11, OUTPUT);
  pinMode(led12, OUTPUT);
  pinMode(led13, OUTPUT);
  pinMode(led14, OUTPUT);
  pinMode(led15, OUTPUT);
} //Termina setup

```

Configuración del puerto serial a una velocidad de 9600 bits por segundo.

Definición de los pines analógicos y digitales como entradas y salidas.

```

void loop()
{
LECTURA DE LOS BOTONES
  bSA1=digitalRead(botonA1);
  bSA2=digitalRead(botonA2);
  bSPE=digitalRead(botonPE);

```

Lectura digital de los botones.

```

LECTURA DE PARÁMETROS
  float voltaje=(analogRead(A1))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("voltaje"); Serial.println(voltaje);
  delay(1000);
  float corriente=(analogRead(A2))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("corriente"); Serial.println(corriente);
  delay(1000);
  float frecuencia=(analogRead(A3))*(5.0/1023.0);
  Serial.println("frecuencia"); Serial.println(frecuencia);
  delay(1000);

```

Lectura analógica de los parámetros, conversión del valor de la lectura analógica a digital y visualización de la lectura cada segundo.

SELECCIONAR FUENTE Y VERIFICACIÓN PRESENCIA DE ENERGÍA

```
if(bSA1==HIGH || bSA1==HIGH && bSA2==HIGH && bSPE==HIGH
|| bSA1==HIGH && bSA2==HIGH || bSA1==HIGH && bSPE==HIGH)
{
    digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
    digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
    digitalWrite(led6,HIGH); //A1 prendido
    digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
    digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
    seleccionar=1;
} //Termina if A1
else
{
    if (bSA2==HIGH && bSPE==HIGH || bSA2==HIGH)
    {
        digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
        digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
        digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
        digitalWrite(led7,HIGH); //A2 prendido
        digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
        seleccionar=1;
    } //Termina if A2
    else
    {
        if (bSPE==HIGH)
        {
            digitalWrite(led14,HIGH); //Sí (Verificación energía) prendido
            digitalWrite(led15,LOW); //No (Verificación energía) apagado
            digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
            digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
            digitalWrite(led8,HIGH); //PE prendido
            seleccionar=1;
        } //Termina if PE
        else
        {
            digitalWrite(led14,LOW); //Sí (Verificación energía) apagado
            digitalWrite(led15,HIGH); //No (Verificación energía) prendido
            digitalWrite(led6,LOW); //A1 apagado
            digitalWrite(led7,LOW); //A2 apagado
            digitalWrite(led8,LOW); //PE apagado
            seleccionar=0;
        } //Termina else PE
    } //Termina else A2
} // Termina else A1
```

Condición para que el indicador de la **Acometida 1** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

Condición para que el indicador de la **Acometida 2** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

Condición para que el indicador de la **Planta de Emergencia** encienda, así como el indicador **Sí** de verificación de energía.

En caso contrario los indicadores de la Acometida 1, Acometida 2, Planta de Emergencia y Sí de verificación de energía se apagan, pero el **No** de verificación energía se prende.

ACONDICIONAMIENTO

```
if(seleccionar==1)
{
  digitalWrite(led1,HIGH); //Reducir prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led1,LOW); //Reducir apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led2,HIGH); //Rectificar prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led2,LOW); //Rectificar apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led3,HIGH); //Filtrar prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led3,LOW); //Filtrar apagado
  delay(100);
  digitalWrite(led4,HIGH); //Regular prendido
  delay(100);
  digitalWrite(led4,LOW); //Regular apagado
  delay(100);
} //Termina if seleccionar
else
{
  digitalWrite(led1,LOW); //Reducir apagado
  digitalWrite(led2,LOW); //Rectificar apagado
  digitalWrite(led3,LOW); //Filtrar apagado
  digitalWrite(led4,LOW); //Regular apagado
} //Termina else seleccionar
```

Si hay presencia de energía entonces se realiza la simulación del acondicionamiento de ésta por medio de indicadores que se encienden y se apagan cada 100 [ms].

En caso contrario los indicadores de reducir, rectificar, filtrar y regular se apagan.

VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS

```
if (voltaje<4.15 && voltaje>3.85)
{
  digitalWrite(led9,LOW); //Voltaje apagado
  parametro1=1;
} //Termina if voltaje
else
{
  digitalWrite(led9,HIGH); //Voltaje prendido
  parametro1=0;
} //Termina else voltaje
```

Si la lectura del voltaje está dentro del rango, su indicador se queda apagado.

Si la lectura del voltaje está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.

<pre> if(corriente<4.15 && corriente>3.85) { digitalWrite(led10,LOW); //Corriente apagado parametro2=1; } //Termina if corriente else { digitalWrite(led10,HIGH); //Corriente prendido parametro2=0; } //Termina else corriente if(frecuencia<0.50 && frecuencia>0.25) { digitalWrite(led11,LOW); //Frecuencia apagado parametro3=1; } //Termina if frecuencia else { digitalWrite(led11,HIGH); //Frecuencia prendido parametro3=0; } //Termina else frecuencia if(parametro1==1 && parametro2==1 && parametro3==1) { digitalWrite(led12,HIGH); //Sí (Verificación de parámetros) prendido digitalWrite(led13,LOW); //No (Verificación de parámetros) apagado verificar=1; } //Termina if verificación de parámetros else { digitalWrite(led12,LOW); //Sí (Verificación de parámetros) apagado digitalWrite(led13,HIGH); //No (Verificación de parámetros) prendido verificar=0; } //Termina else verificación de parámetros </pre>	<p>} Si la lectura de la corriente está dentro del rango, su indicador se queda apagado.</p> <p>} Si la lectura de la corriente está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.</p> <p>} Si la lectura de la frecuencia está dentro del rango, su indicador se queda apagado.</p> <p>} Si la lectura de la frecuencia está fuera del rango, el indicador del voltaje se enciende.</p> <p>} Si el voltaje, la corriente y la frecuencia están dentro de sus rangos, el indicador de verificación de parámetros se enciende.</p> <p>} En caso contrario el indicador de verificación de parámetros se apaga.</p>
---	--

SUMINISTRAR

<pre> if (seleccionar==1 && verificar==1) { digitalWrite(led5,HIGH); //Suministrar prendido } //Termina if suministrar else { digitalWrite(led5,LOW); //Suministrar apagado } //Termina else suministrar } //Termina loop </pre>	<p>} Si hay presencia de energía y los parámetros están dentro de sus rangos establecidos, el indicador de suministrar se enciende.</p> <p>} En caso contrario el indicador de suministrar se apaga.</p>
--	--

REFERENCIAS

- [1] G. Enríquez Harper, *Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas*, 2a. ed., México: Editorial Limusa, 2005.
- [2] G. Enríquez Harper, *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*, 2a. ed., México: Editorial Limusa, 2005.
- [3] J. Raúll Martín, *Diseño de Subestaciones Eléctricas*, 2a. ed., México: Editorial McGraw-Hill, 2000.
- [4] G. Enríquez Harper, *Elementos de diseño de las instalaciones eléctricas industriales*, 2a. ed., México: Editorial Limusa, 2004.
- [5] (2014) Subestación Elevadora, Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. [Online]. Disponible en: http://www.cerpch.unifei.edu.br/sp/sub_elevadora.php Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [6] (2008) Obras Ejecutadas, INSACRUZ. [Online]. Disponible en: http://insacruz.com/obras_ejecutadas.php Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [7] (2011) Transporte y Distribución, LOGITEK. [Online]. Disponible en: <http://logitek.es/soluciones/transporte-y-distribuci%C3%B3n> Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [8] (2012) Subestaciones eléctricas, EyM Instalaciones Grupo OHL. [Online]. Disponible en: <http://www.eyinstalaciones.es/plantillas/sp.aspx?ida=1&idf=181&idm=277&nvl=1> Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [9] (2012) Subestación Eléctrica, Blog Spot Claudio Puma Fuentes. [Online]. Disponible en: <http://claudio-puma.blogspot.mx/2012/05/electricidad-subestaciones-electricas.html> Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [10] (2010) Subestaciones Eléctricas tipo metal enclosed con Sw. Power Con, en 600A, 1200A, en 5 Kv, 13.8 Kv, 23 Kv y 34.5 Kv. Servicio Interior Nema 1, y servicio intemperie Nema 3R, con acoplamiento a transformadores secos o de aceite, Allbiz. [Online]. Disponible en: <http://mexico-df.all.biz/subestaciones-elctricas-tipo-metal-enclosed-con-sw-g6037> Fecha de Consulta: 1 de Diciembre de 2014.
- [11] G. Enríquez Harper, *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*, 2a. ed., México: Editorial Limusa, 2003.
- [12] (2014) Banco automático de capacitores en baja tensión, Inelap S.A. de C.V. [Online]. Disponible en: http://www.powertecingenieria.com.mx/capacitores/1banco_automatico_de_capacitores_en_bt.pdf Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.

- [13] A. Rodríguez Aburto, *Instrumentos para tableros*, Perú, 2012. [Online]. Disponible en: http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_DI_CIEMBRE_2012/IF_RODRIGUEZ%20ABURTO_FIEE/LIBRO%20INSTRUMENTOS%20PARA%20TABLEROS.pdf Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.
- [14] *Especificación CFE V6700-62 Tableros de protección, control y medición especificación para subestaciones eléctricas*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), México, D.F., 2014. [Online]. Disponible en: <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/d/V6700-62.pdf> Fecha de Consulta: 27 de Marzo de 2015.
- [15] *Cargador y Banco de Baterías*, Norma de Referencia NRF-196-PEMEX-2013, 2013. [Online]. Disponible en: <http://www.pemex.com/proveedores-y-suministros/normas-referencia/Normas%20vigentes/NRF-196-PEMEX-2013.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.
- [16] *Especificación CFE DCSET01 Diseño de subestaciones de transmisión*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), México, D.F., 2014. [Online]. Disponible en: <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/construccion/pdfs/1/DCSET01.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.
- [17] *Cables de potencia monopares de 5 KV a 35 KV*, Norma de Referencia NRF-024-CFE, 2003. [Online]. Disponible en: <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/nrf/pdfs/f/NRF-024.pdf> Fecha de Consulta: 27 de Marzo de 2015.
- [18] Latincasa, "Cables de control Controlat", 2011. [Online]. Disponible en: <http://www.latincasa.com.mx/ES/Productos/Cables%20control/02%20Control%20PVC-PVC%20600%20V%2075C%20RPI.pdf> Fecha de Consulta: 27 de Marzo de 2015.
- [19] *Sistema de tierra para plantas y subestaciones eléctricas*, Norma de Referencia NRF-011-CFE, 2005. [Online]. Disponible en: http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas_y_Subestaciones.pdf Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.
- [20] *Manual CFE DCSEBPE Diseño de subestaciones eléctricas de distribución en bajo perfil y encapsuladas en SF₆*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), México, D.F., 2014. [Online]. Disponible en: <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/construccion/pdfs/E/DCSEBPE.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Febrero de 2015.
- [21] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, 10a. ed., México: Pearson Education, 2009.
- [22] Catálogo No. 1VCP000004 2013.07, HD4 - Interruptores de M.T. aislados en gas, ABB, Dalmine, Italia. [Online]. Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/895676dbcbda7f5ec1257bb7003a602a/\\$file/CA_HD4\(ES\)O_1VCP000004-1306.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/895676dbcbda7f5ec1257bb7003a602a/$file/CA_HD4(ES)O_1VCP000004-1306.pdf) Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.

- [23] Catálogo General 2009-2010, Sistemas de Corte y Protección, Conmutadores Motorizados de Potencia, SOCOMEC, Benfeld, Francia. [Online]. Disponible en: http://www.socomec.com/webdav/site/Socomec/shared/SCP/pdf_catalogue/ESP/cat_ATyS-esp.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [24] CAT, "ATC contactor-based automatic transfer switch", 2014 [Online]. Disponible en: http://www.cat.com/es_MX/power-systems/electric-power-generation/ats-atc-breaker-contactor/18505862.html Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [25] Grupo ABB, "Interruptor-conmutador motorizado OTM40...125_C", 2014. [Online]. Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/7c7f7a6d1046fa74c1257989002c772c/\\$file/Interruptor-conmutador%20motorizado%20OTM140_125C_1TXA303443B0701-001111.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/7c7f7a6d1046fa74c1257989002c772c/$file/Interruptor-conmutador%20motorizado%20OTM140_125C_1TXA303443B0701-001111.pdf) Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [26] Catálogo General 2009-2010, Conmutadores motorizados de potencia de 125 a 3200 A, SOCOMEC, Benfeld, Francia. [Online]. Disponible en: http://www.socomec.com/webdav/site/Socomec/shared/SCP/pdf_catalogue/ESP/cat_ATyS-esp.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [27] Grupo ABB, "Manual de instrucciones de instalación y operación de Interruptores-conmutadores motorizados", 2014. [Online]. Disponible en: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/e5736de1dabc69e2c12575dd003c4da1/\\$file/1scc303002m0701_manual%20otm_c.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/e5736de1dabc69e2c12575dd003c4da1/$file/1scc303002m0701_manual%20otm_c.pdf) Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [28] Catálogo Interruptor electromagnético SENTRON 3WL, Siemens, Baviera, Alemania. [Online]. Disponible en: <http://electricaeinoder.com.ve/site/wp-content/uploads/2013/02/3WL.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [29] Catálogo de Productos, Transferencia automática con contactores, VELASQUEZ INGENIEROS ASOCIADOS, Cali, Colombia. [Online]. Disponible en: http://www.velasquez.com.co/catalogo/transferencia_automatica_con_contactores.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [30] Catálogo Aparatos para distribución de energía, Interruptores automáticos para corriente alterna hasta 6300 A, Siemens, Baviera, Alemania. [Online]. Disponible en: http://www.siemens.com.ar/sites/internet/legacy/sie-pe/pe/pdf_catalogos/Interruptores%20Compactos%20y%20Abiertos_NSK11_2002_es.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [31] Catálogo SENTRON 3WL Air circuit breakers, Siemens, Baviera, Alemania. [Online]. Disponible en: http://w3.siemens.com/market-specific/global/en/data-centers/Documents/Sentron_Air_Circuit_Breakers.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [32] A. Bustos, "Tecnologías de Transformadores Secos Encapsulados" en Jornadas de Seguridad Power EMEAS, Brasil, Junio 2011, pp. 3-10. [Online]. Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-conecta/Seguridad/tecnologias-transf-secos-encapsulados.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.

- [33] Catálogo No. TRPD3F-0609-02, Transformador Pedestal Trifásico, General Electric, Monterrey, México. [Online]. Disponible en: https://www.prolecge.com/internet/sp/upload/Pedestal_3PP.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [34] Grupo ABB, "Transformadores de Tipo Seco", 2012. [Online]. Disponible en: [http://www02.abb.com/global/clabb/clabb151.nsf/0/80ce7f7df4b7a35dc1257a0f004af8fa/\\$file/Prese%ntaci%C3%B3n+CL.pdf](http://www02.abb.com/global/clabb/clabb151.nsf/0/80ce7f7df4b7a35dc1257a0f004af8fa/$file/Prese%ntaci%C3%B3n+CL.pdf) Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [35] Catálogo Transformadores Eléctricos de Distribución, Transformadores Sumergidos en Dieléctrico Líquido, Cotradis, Loeches, Madrid. [Online]. Disponible en: http://personal.us.es/pedroj/ASInfo_Comun/Trafo_LlenadoIntegral.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [36] Hidro Cantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U., " Transformadores trifásicos sumergidos en aceite para distribución en BT", HC Energía, Oviedo, España, Especificación Técnica, ET/5024, 2008. [Online]. Disponible en: http://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Electricidad/Ingenieria/2059745967_21200992020.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [37] (2009), Transformadores secos, Blog Ingeniería Eléctrica Explicada. [Online]. Disponible en: <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.mx/2009/11/transformadores-secos.html> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [38] Schneider Electric, "Tecnologías de Transformadores Secos Encapsulados", 2011. [Online]. Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-conecta/Seguridad/tecnologias-transf-secos-encapsulados.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [39] (2009) Transformador en baño de aceite vs transformador seco, Blog Ingeniería Eléctrica Explicada. [Online]. Disponible en: <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.mx/2009/11/transformador-en-bano-de-aceite-vs.html> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [40] I. Moyaho Lozano, "Cargador de batería inalámbrico en aplicaciones de baja potencia", tesis, Universidad de las Américas de Puebla, Cholula, Puebla, 2008. [Online]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/moyaho_l_i/capitulo1.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [41] S. Hernández Flores, "Diseño e implementación de un corrector de factor de potencia trifásico con salida asimétrica de CD para aplicaciones automotrices", tesis, Universidad de las Américas de Puebla, Cholula, Puebla, 2007. [Online]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_f_s/capitulo2.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [42] L. C. García Alfaro, "Diseño y construcción de un convertidor controlado CA-CD monofásico", tesis, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2005. [Online]. Disponible en: <http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0532t.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [43] WEG, "Manual del convertidor CA/CC", 2006. [Online]. Disponible en: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-17081.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.

- [44] Semikron, "Power Bridge Rectifiers SKD 83", 2004. [Online]. Disponible en: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKD_83_07232870.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [45] Schneider Electric, "AccuSine Filtro activo de armónicos", 2012. [Online]. Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-tecnicas-ecoestruxure/AccuSine/Accusine-Filtro-activo-de-armonicos.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [46] Ficha Técnica SURTD5000XLT "Smart-UPS RT APC Smart-UPS RT 5000VA 208V", Schneider Electric. [Online]. Disponible en: http://www.schneider-electric.com.mx/documents/productos-servicios/servicios/Ficha_tecnica_SURTD5000XLT-APC.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [47] C. Gómez Llamas, "Conoce la diferencia entre un UPS y un supresor de picos para proteger mejor tus equipos eléctricos", PC World México, Noviembre 2012. [Online]. Disponible en: <http://www.pcworld.com.mx/Articulos/26358.htm> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [48] ElectroJAR, "Supresores de Picos", 2010. [Online]. Disponible en: <http://www.electrojar.com.mx/supresores.htm> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [49] Artech, "Banco automático de capacitores", 2014. [Online]. Disponible en: <http://artech.com/es/productos/banco-autom%C3%A1tico-de-capacitores> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [50] Siemens, "Voltímetros y amperímetros digitales", 1996-2015. [Online]. Disponible en: <http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/es/lv/portfolio/sentron/measuring-devices-energy-monitoring/measuring-devices/other-measuring-devices/pages/digital-voltmeters-and-ammeters.aspx> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [51] PCE Ibérica S.L., "Medidor de energía Siemens Sentron PAC3200", 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/sistemas/medidor-multifuncion-pac3200.htm> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [52] Siemens, "Manual de producto SENTRON Multímetro SENTRON PAC3200", 2008. [Online]. Disponible en: <http://www.caroligualada.es/Documentos/manual%20sentron.pdf> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [53] L. Congote. (2010, Octubre 5), Microcontroladores VS PLCs en la industria. [Online]. Disponible en: <http://www.ingeniosolido.com/blog/2010/10/microcontroladores-vs-plcs-en-la-industria/> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [54] Toboso. (2013, Enero 4), Microcontroladores. [Online]. Disponible en: http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm#aplicaciones_de_los_microcontroladores Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.

- [55] (2001) El PLC, Autómatas programables. [Online]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica/WebCQMH1/PAGINA%20PRINCIPAL/PLC/plc.htm> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [56] Rockwell Automation, "Sistema de Control PLC-5", 2014. [Online]. Disponible en: <http://ab.rockwellautomation.com/es/programmable-controllers/plc-5> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [57] Rockwell Automation, "PLC-5 Processors", 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/1239760/1551229/PLC-5-Processors.html> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [58] Microchip, "PIC32MX110F016B", 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en555989> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014
- [59] G. Hernández, "Tableros de distribución eléctrica tipo panel", ElectricQO, Vol. 4, pp. 12-16, Agosto 2009. [Online]. Disponible en: http://www.schneider-electric.com.mx/documents/soporte/electriqo-magazine/electriqo_vol04_ebook.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [60] Catálogo Control y Distribución, Baja Tensión, Siemens, Baviera, Alemania. [Online]. Disponible en: http://siemensmexico.com.mx/descargables/Control_y_Distribucion-Baja_Tension.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [61] Moeller Electric S.A. de C.V., "XBoard Tableros y gabinetes para el control de la energía", 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.moeller.com.mx/> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.
- [62] Siemens, "Aparatos para distribución de energía", 2002. [Online]. Disponible en: http://www.siemens.com.ar/sites/internet/legacy/sie-pe/pe/pdf_catalogos/Interruptores%20Compactos%20y%20Abiertos_NSK11_2002_es.pdf Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2014.