



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA

Juan Manuel Elías Morales

Asesorado por el Ing. Iván René Morales Argueta

Guatemala, abril de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA
ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN MANUEL ELÍAS MORALES

ASESORADO POR EL ING. IVÁN RENÉ MORALES ARGUETA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

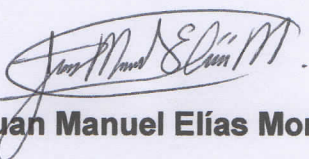
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 6 de marzo de 2014.


Juan Manuel Elías Morales

Guatemala, 06 de febrero de 2015

Ing. Carlos Guzmán
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Guzmán,

Por este medio me dirijo a usted para comunicarle que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado: "**DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA**", desarrollado por el estudiante **Juan Manuel Elías Morales**, quien se identifica con número de carnet **200819226**. Luego de comprobar su contenido final, considero que cumple con los requerimientos necesarios, y lo apruebo como trabajo de graduación.

Agradeciendo su amable colaboración, me suscribo atentamente,



Ing. Iván René Morales Argueta
Colegiado 12489

Iván René Morales Argueta
Ingeniero Electrónico
Colegiado 12489



Ref. EIME 10 2015
Guatemala, 16 de febrero 2015.

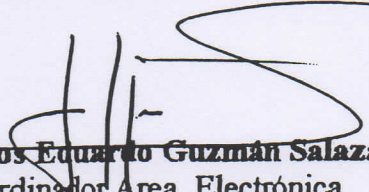
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA, del estudiante, Juan Manuel Elías Morales, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



STO



REF. EIME 10. 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JUAN MANUEL ELÍAS MORALES titulado: DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 2 DE MARZO 2015.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE MONITOR Y CONTROL PARA ENERGÍA ELÉCTRICA EN BAJA TENSIÓN VÍA REMOTA**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Manuel Elías Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Angel Roberto Sic García
Decano

Guatemala, abril de 2015



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por la paciencia, la sabiduría y la perseverancia que me ha dado a lo largo de la carrera Y que me ha permitido alcanzar mis metas. A él debo mis triunfos.

Mis padres

Que desde mi niñez siempre los he tenido a mi lado y que no solo he recibido su apoyo sino también su educación. A Félix Valladares y en especial a Olga Palmira, gracias por estar siempre a mi lado y apoyarme hasta en lo más mínimo.

Mis hermanas

Gracias por su ayuda cuando más la necesite.

Mis amigos

Luis Alejandro, Benjamín Rodríguez, Cristian Vélez y Alex Díaz, por su tiempo, paciencia y la estrecha amistad que prevalece y crece cada día.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, y el medio principal para iniciar y culminar mi formación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de formarme como ingeniero.
Ing. Iván Morales	Por asesorar este trabajo de graduación. Por su disposición, paciencia y sabios consejos que sirvieron para que me sienta satisfecho con este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por su apoyo y su dedicación en los proyectos que emprendimos juntos. En especial a Silvio Urizar, Moises Colon, Otto García, Danilo Escobar. A Cynthia Maldonado, por motivarme en momentos difíciles. A Pedro Alvizures, por ser como un hermano para mí.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. SISTEMAS DE PROTECCIÓN	1
1.1. Principios sobre los interruptores	1
1.1.1. Principios de operación del relé o relevador	3
1.2. Coordinación de protecciones	4
1.2.1. Principios de selectividad	5
1.2.2. Principios de filiación	6
2. MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	9
2.1. Términos empleados en una medición	10
2.1.1. Exactitud y precisión.....	11
2.1.2. Tipos de error	12
2.1.3. Análisis estadístico	12
2.2. Medidores de energía eléctrica	13
2.2.1. Medidor por inducción	17
2.2.2. Medidor estático	19
2.3. Medición según el tipo de energía	24
2.3.1. Medidor de energía activa	24
2.3.2. Medidor de energía reactiva	28

3.	DESARROLLO DEL DISPOSITIVO PROPUESTO	31
3.1.	Acople de la potencia al dispositivo	33
3.1.1.	Voltajes de distribución	34
3.1.2.	Transductor de energía eléctrica.....	35
3.1.3.	Filtrado de la señal	37
3.2.	Muestreo de las señales entrantes.....	39
3.3.	Aplicación de la integración numérica	44
3.3.1.	Integral de Riemann	46
3.3.2.	Método del trapecio	47
3.3.3.	Método de Simpson	48
3.3.4.	Análisis en tiempo discreto.....	50
3.4.	Módulo del microcontrolador	53
3.4.1.	Módulo para medición de voltaje.....	56
3.4.2.	Módulo para medición de corriente	57
3.4.3.	Módulo bus de control	58
3.4.4.	Programación del microcontrolador.....	59
3.4.5.	Calibración del instrumento	64
4.	COMPARACIÓN DEL DISPOSITIVO CON LOS EXISTENTES EN EL MERCADO ACTUAL	65
4.1.	Especificaciones del dispositivo con base en los resultados....	65
4.2.	Comparación técnica y de costos entre dispositivos comerciales	67
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura de un relé magnetotérmico unipolar.....	4
2.	Diagrama de un sistema selectivo	6
3.	Diagrama de una instalacion filial.....	7
4.	Resistencia patrón secundaria	15
5.	Diagrama esquemático de una derivación Ayrton	18
6.	Diagrama de configuraciones con arreglo Ayrton	18
7.	Medidor con amplificador operacional.....	21
8.	Proceso de conversión análogo–digital.....	22
9.	Cuantización y muestreo de una señal	23
10.	Circuito de un voltímetro con rectificador	26
11.	Wattorímetro, diagrama de posición.....	27
12.	Ilustración del triángulo de potencia	29
13.	Diagrama del medidor de factor de potencia.....	30
14.	Diagrama de bloques para la capa 1 y capa 2	34
15.	Ilustración del transformador de voltaje.....	36
16.	Ilustración del transformador de corriente	37
17.	Ilustración de las características de un filtro.....	38
18.	Ilustración del proceso de digitalización	40
19.	Gráfica comparativa del error de cuantización	42
20.	Gráfica comparativa de la frecuencia de muestreo	42
21.	Ilustración del área bajo la curva empleando Riemman.....	46
22.	Ilustración del área bajo la curva, método del trapecio	48
23.	Ilustración del área bajo la curva, método de Simpson	50

24.	Gráfica correspondiente al tiempo continuo y discreto	53
25.	Respuesta en frecuencia del filtro ideal	54
26.	Vista general del diseño del sistema.....	55
27.	Diagrama esquemático del circuito para medir voltaje.....	56
28.	Diagrama esquemático del circuito para medir corriente	57
29.	Diagrama esquemático del circuito para el filtro pasa bajas	58
30.	Diagrama esquemático del módulo de control	59
31.	Diagrama de flujo, pseudocódigo del programa	60
32.	Diseño de la interfaz web para gestión del dispositivo.....	66

TABLAS

I.	Las seis unidades básicas del Sistema Internacional	9
II.	Tipos comunes de transductor comercial	32
III.	Protocolo empleado en el diseño.....	33
IV.	Clasificación de las líneas de tensión	35
V.	Resultados obtenidos por el método de Simpson, variando n	51
VI.	Descripción del Pseudocódigo.....	61
VII.	Registros del microcontrolador	62
VIII.	Librería de funciones Ethernet.....	63
IX.	Resultado obtenido por el dispositivo a 110 voltios	64
X.	Comparación de características entre dispositivos	67
XI.	Listado de materiales empleados y costos	68
XII.	Comparación de costo con otros dispositivos	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
cd	Candelas
h	Constante de Planck
AC	Corriente alterna
CD	Corriente directa
dB	Decibelios
f.p.	Factor de potencia
Hz	Hertz, unidad de medida de la frecuencia
K	Kelvin
kg	Kilogramo
KVA	Kilovoltios-amperios
KVAR	Kilovoltios-amperios reactivos
KW	Kilowatts
m	Metro

GLOSARIO

Bit	Unidad empleada en la electrónica digital. Se representa matemáticamente como 1 o 0.
Byte	Unidad de medida empleada para determinar la capacidad de información que puede manipular un dispositivo electrónico; compuesto de 8 bits.
Celda capacitiva	Elemento pasivo empleado en la electrónica para almacenar una cierta cantidad de energía eléctrica.
Certificación Green House	Norma que establece ambientes verdes en edificios. Enfocado en el aprovechamiento de los recursos como espacio, energía y centralización de servicios.
Circuito combinacional	Conjunto de circuitos integrados organizados de forma sistemática con el fin de cumplir una función.
Circuito integrado	Conjunto de elementos electrónicos, pasivos y activos, acomodados de forma compleja.
Compilador	Programa computacional que traduce comandos de un programador a un lenguaje para computadora.
Derivación Ayrton	Derivación que elimina la posibilidad de llegar a tener una resistencia total del medidor ligeramente mayor.

Ethernet	Estándar para redes de área local, con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones (CSMA/CD). Su nombre viene del concepto físico de ether. Estándar de la capa de acceso a la red, definida por la IEEE 802,3.
Filtro pasa bajas	Se caracteriza por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas.
Flicker	Tipo de ruido en la señal eléctrica conocido como ruido rosa, producido por conmutación o arranque de un motor eléctrico.
Host	Refiere a un equipo de computación que posee la facultad de conectarse a una red de área local.
HTML	Lenguaje de programación empleado en documentos digitales que son presentados en internet.
HTTP	Puerto lógico de comunicación estandarizado, por el cual se envían documentos digitales e información.
Interfaz	Medio físico por el que se comunican dos aparatos o sistemas independientes.
IP	Protocolo de internet desarrollado para fines de comunicación en una red de área local.
LAN	Por sus siglas en ingles <i>Local Area Network</i> , refiere a una red local de computadoras conectadas entre si.

Lógica combinacional	Sistema digital en el que sus salidas son función exclusiva del valor de sus entradas en un momento dado, sin que intervengan en ningún caso estados anteriores de las entradas o de las salidas.
Microcontrolador	Elemento electrónico conformado por un conjunto de circuitos integrados.
PIC	Microcontrolador desarrollado con una interfaz periférica, la cual simplifica la programación y costos.
Protocolo	Conjunto de pasos organizados, su propósito es realizar una función de la mejor forma y estándar.
RAS	Usa registros de desplazamiento, se emplean en conversores A/D. Compara la entrada analógica con los resultados parciales, generando el siguiente bit.
Rectificador	Circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Utiliza diodos rectificadores hechos de semiconductores de estado sólido.
Sensor piezoeléctrico	Elemento electrónico formado por un cristal, el cual produce una pequeña cantidad de energía eléctrica cuando este vibra por las ondas de sonido.
Señal análoga	Señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético que posee una variación continua en el tiempo y de origen natural.

Señal digital	Señal de magnitudes que representan valores discretos y de origen computacional.
Seudocódigo	Descripción de alto nivel compacta e informal, del principio operativo de un programa informático u otro algoritmo. Utiliza las convenciones estructurales de un lenguaje de programación real, pero está diseñado para la lectura humana.
TCP	Por sus siglas en inglés <i>Transmission Control Protocol</i> , asegura la llegada de un paquete de datos que se envía desde un computador a otro.
Transistor	Elemento electrónico básico constituido por tres semiconductores, los cuales, al aplicarse una polarización correcta pueden funcionar como un interruptor o un amplificador
TRIAC	Dispositivo semiconductor de la familia de los tiristores. De forma coloquial podría decirse que el TRIAC es un interruptor capaz de conmutar la corriente alterna.
UDP	Por sus siglas en inglés <i>User Datagram Protocol</i> , este manda un paquete sin asegurar su llegada, ya sea total, parcial o nula.
Wattímetro	Contador eléctrico, dispositivo que mide el consumo de energía eléctrica de un servicio eléctrico.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en el diseño de un dispositivo capaz de proporcionar al usuario la facilidad de monitorear de forma remota la cantidad de kilowatts-hora que consume en un determinado lugar, ya sea para un local, un apartamento o bien un electrodoméstico en particular. El diseño se basa en un montaje fijo, con conexión cableada a una red local por medio de Ethernet. Se puede ajustar para conectarse a internet, con lo cual se obtiene la facilidad de monitorear el consumo desde su trabajo, empleando un dispositivo que pueda navegar en internet, ya sea un Smartphone o una computadora; y realizar gestiones del dispositivo.

El primer capítulo introduce los principios teóricos de protección para los aparatos eléctricos mediante relevadores, así también, estrategias como la filiación que permiten eliminar una falla sin afectar la red completa, que forma parte de calidad en una red eléctrica interna.

El segundo capítulo presenta los principios de la medición de energía eléctrica, en los cuales se menciona la precisión y exactitud, que son parámetros fundamentales en la metrología y calibración en un dispositivo de medición.

El tercer capítulo describe el desarrollo de la parte física del diseño; se inicia con los dispositivos periféricos que adaptan las señales externas a señales manipulables por el microcontrolador, le precede la técnica empleada para aproximar las muestras tomadas y finaliza con la explicación de cada

módulo, donde se incluyen ilustraciones, diagramas esquemáticos de los circuitos y los métodos numéricos empleados.

Finalmente, se hace una comparativa con otros dispositivos similares en el mercado y el coste del diseño describiendo materiales empleados.

OBJETIVOS

General

Diseñar un monitor y control para energía eléctrica en baja tensión vía remota, utilizando un conjunto de módulos y que su información sea accesible empleando como herramienta una interfaz web.

Específicos

1. Describir los principios de los sistemas de protección que forman parte de las precauciones que se deben tener en una red eléctrica interna.
2. Presentar los principios de la medición de energía eléctrica, instrumento patrón, parámetros estadísticos y sus unidades de medición.
3. Plantear el diseño para el monitor y control propuesto empleando un microcontrolador de gama alta como elemento de procesamiento de datos y control, utilizando una serie de pasos a seguir.
4. Realizar una comparación técnica y de costo entre el monitor y control diseñado y los existentes en el mercado nacional, para dar a conocer sus respectivas ventajas y beneficios.

INTRODUCCIÓN

La energía es empleada con frecuencia en sus diversas fuentes para distintas actividades; una fuente común, actualmente, es la energía eléctrica. Las grandes generadoras de energía eléctrica emplean las diversas fuentes energéticas para producir electricidad a partir del movimiento de generadores, estas pueden ser térmicas (generación por bunker o carbón), hidráulicas (generación por la fuerza del agua), solares (generación por celdas fotovoltaicas). Esta energía es llevada por medio de distribuidoras y redes de tendido eléctrico (transporte) hasta hogares, fábricas, oficinas y estadios entre otros en una línea de transmisión.

La utilización de esta tiene un costo a la cual se le carga una tarifa por kilowatt consumido en una hora; se compone de un cargo por potencia (es el costo de la planta) y un cargo por energía (es el costo del combustible). Para medir este consumo se utiliza un medidor de energía, conocido como contador. Para conocer el dato del mismo se debe estar de forma presencial y tomar lectura del instrumento.

Con el tema propuesto de trabajo de graduación, se pretende desarrollar una herramienta que permita proporcionar de forma remota, la lectura del instrumento empleando dispositivos de los cuales hará de este una herramienta de bajo costo; tomando como su principal característica su capacidad de adaptarse a un módulo de comunicación independiente del diseño, con el propósito de presentarle al usuario la información de una forma clara y accesible.

1. SISTEMAS DE PROTECCIÓN

La protección de los equipos de alimentación y los equipos de trabajo es esencial, dado que son herramientas laborales en la actividad diaria y tiene una alta importancia en todas las instalaciones, ya sean domésticas o industriales. Entre los sistemas de protección se pueden mencionar dispositivos como: el interruptor, el relé, el filtro contra armónicos, la coordinación de interruptores y el sistema de puesta a tierra, entre otros. Como parte del diseño, se describirán los temas de interruptor de relevador y los principios de coordinación entre protecciones.

1.1. Principios sobre los interruptores

Los interruptores deben prever los defectos como sobrecargas, corto circuitos, sobre voltajes y defectos de aislamiento. Se utilizan en los sistemas eléctricos de potencia para evitar el daño o pérdida de equipo por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y que pueda extenderse sin control. Otra de las aplicaciones que tiene la implementación de estos dispositivos es a nivel de seguridad industrial, donde se busca minimizar la posibilidad de un incendio, riesgos para los trabajadores y daños a los equipos electrónicos adyacentes.

Estos dispositivos pueden ir desde un simple sistema de conmutación (apagado o encendido) hasta una transferencia automática de múltiples capas, por lo cual se ha seleccionado un tipo en particular, el relé o relevador, para exponer sus características, ya que se incluye en el diseño.

Los tipos de interruptores más comunes son: el magnético, el térmico, el termomagnético, los estáticos y el relevador entre otros. En general se componen de una sección mecánica y una parte eléctrica. Los interruptores más complejos poseen una parte electrónica adicional a la estructura mencionada, la cual permite controlarlos a distancia e incluso programar la memoria interna para realizar determinadas acciones ante una falla.

Las características de un interruptor pueden variar según su construcción, aunque el objetivo general de todo interruptor es interrumpir el paso de corriente (la forma en que se accionan es distinta). A continuación se detallan dos ejemplos de estos.

- Interruptor magnético: inicia la desconexión por medio del movimiento de un núcleo de hierro dentro de un campo magnético, proporcional al valor de la intensidad que circula. Cuando la corriente es mayor al valor establecido, el campo magnético es suficientemente fuerte como para despegar el núcleo de tal forma que acciona el sistema mecánico que realiza la función de interrumpir.
- Interruptor magnetotérmico: se dispara dado dos efectos producidos por la circulación de corriente eléctrica en un circuito: el magnético y el térmico. Este consta de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga. Al ser más elevada la corriente a la establecida, la lámina se calienta lo suficiente como para separarse, y de existir un corto circuito se produce en conjunto el efecto magnético descrito anteriormente, garantizando una rápida respuesta.

El conjunto de interruptores organizado de forma jerárquica y sistematizada, constituyen un sistema de protección adecuado llamado filiación,

ésta coordinación de protecciones es la más conveniente para detectar fallas; es necesario para ello elegir adecuadamente el tipo de relé.

1.1.1. Principios de operación del relé o relevador

Este es un dispositivo mecánico, que funciona como interruptor controlado por un circuito eléctrico, aunque a veces se emplean señales adicionales como la presión o la temperatura. El interruptor es accionado por medio de un electroimán, el cual, por medio de un campo magnético abre o cierra un contacto móvil. Se clasifican por:

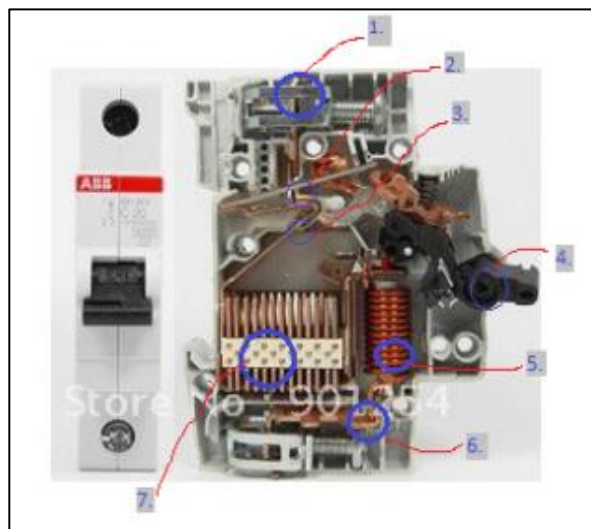
- La función que desempeñan, ya sea un relevador principal, un relevador auxiliar o bien un relevador de señal.
- Por la naturaleza con la cual responden para accionarse, ya sean parámetros de corriente, voltaje, impedancia, frecuencia e inclusive calor, entre otros.
- El modo de conexión al elemento sensor, por ejemplo: un relevador primario tendrá su elemento sensor conectado directamente al sistema que protegen.
- Los métodos por medio de los cuales se accionan, directos e indirectos. El método directo, cuando es maniobrado físicamente y el método indirecto, cuando este es maniobrado por alguna señal externa.

En la figura 1 se ilustran las partes de un relé magnetotérmico, en el cual se señalan con números lo siguiente:

- 1. Bornera para la entrada de la línea
- 2. Contacto fijo que viene de la bornera
- 3. Contacto móvil

- 4. Palanca de accionamiento manual
- 5. Bobina de disparo magnético
- 6. Bimetal de disparo térmico
- 7. Cámara de extinción de arco, cierra el paso de aire

Figura 1. **Estructura de un relé magnetotérmico unipolar**



Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1741>. Consulta: 15 de febrero de 2014.

1.2. Coordinación de protecciones

Técnica que se emplea con el fin de liberar una falla rápidamente y evitar que se propague. Es una norma internacional en una industria, en una organización, en un edificio e inclusive una instalación pequeña. Es aconsejable tener un grado de seguridad eléctrica; estas normas son estandarizadas y se conoce por NFPA 70E, atiende a las necesidades fundamentales de la seguridad eléctrica, empleando equipo de protección y métodos para crear

zonas seguras de trabajo. La cual exige un nivel de seguridad para los equipos y un grado de seguridad en instalaciones eléctricas.

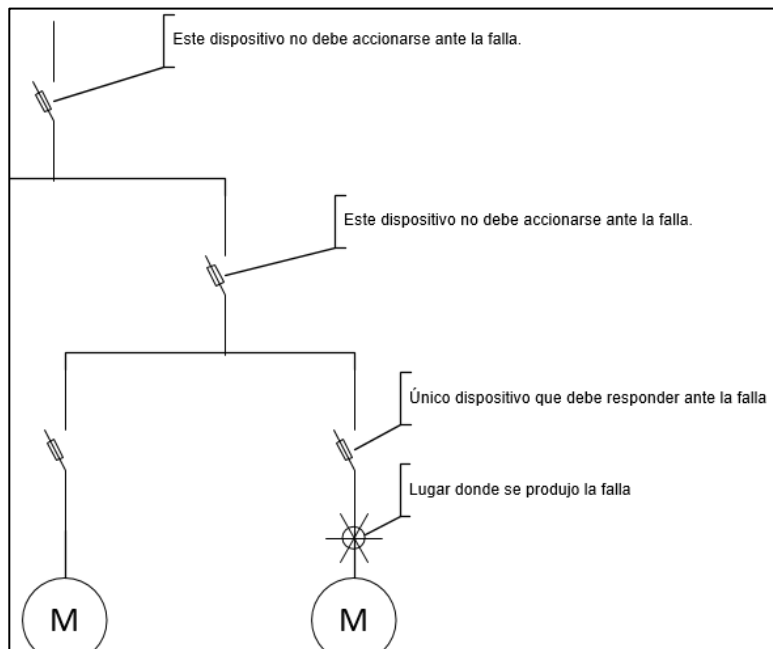
Al aplicar una coordinación de protecciones es indispensable tomar en cuenta los criterios como rangos o márgenes de aplicación, tiempo y corriente que soporta el equipo, intervalo mínimo y máximo de operación. Se debe seleccionar un equipo que sea capaz de librar una falla rápidamente, aunque esto no implica que el equipo deba ser costoso.

1.2.1. Principios de selectividad

Es una coordinación de los dispositivos de protección en la red donde al momento de que ocurra un fallo, este sea eliminado por el sistema aguas arriba del defecto. El trabajo es efectuado únicamente por solo esa protección. Entre los dispositivos se puede mencionar como ejemplo: un flipon, que es un interruptor de corte automático. Esta técnica mejora la continuidad de servicio en el sector donde se produjo la falla y la seguridad de la instalación.

Los riesgos de una instalación que no posea una protección selectiva implican riesgos como dañar la herramienta de producción, paro de un motor por problemas internos, calentamiento y desgaste del cableado, al momento de producirse una falla. Esta puede ser parcial o total, la forma en que se puede aplicar puede ser amperimétrica o cronométrica.

Figura 2. **Diagrama de un sistema selectivo**

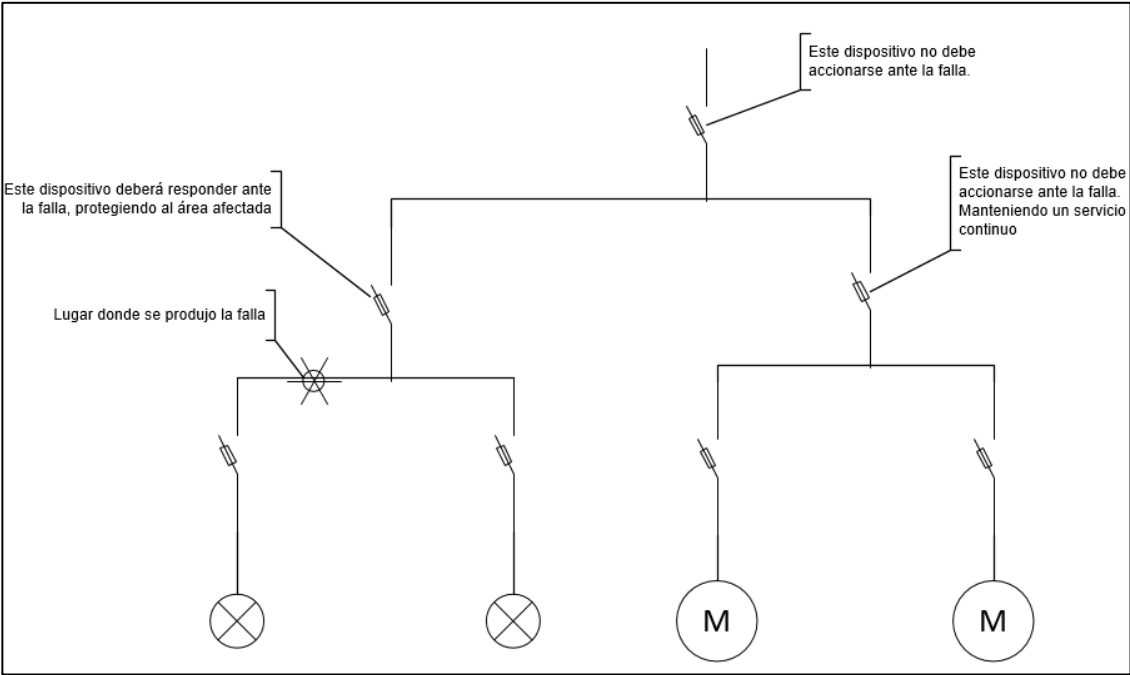


Fuente: elaboración propia.

1.2.2. **Principios de filiación**

Se refiere a la protección en serie o bien protección coordinada distinta de la selectividad. Implica un conjunto de dispositivos para protección ante cortos circuitos, ya que indica la secuencia en la que las protecciones actuarán, de tal manera que si un dispositivo falla, sea la protección de este elemento la que actúe y no la protección de otros elementos. Asimismo, de no actuar esta, deberá actuar la protección de mayor capacidad interruptiva, en forma jerárquica. Esta implica un juego de protecciones aguas arriba de un dispositivo formando ramales en la red. La filiación permite ahorrar y simplificar en instalaciones la utilización de interruptores. Al aplicar la filiación se logra tener una mejor distribución de las protecciones a implementar y lo robusto que deben ser.

Figura 3. Diagrama de una instalacion filial



Fuente: elaboración propia.

2. MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Cuando se hace referencia a una medida física se necesita de una dimensional (peso, distancia, tiempo) y una magnitud (unidades, millares) para especificar la dimensión de un objeto o bien determinar los valores de fuerza, potencia o energía. La metrología es una rama de la física que estudia la medición, estableciendo normas y su trazabilidad, para ello se presentan los principios de una medición, entre las cuales se mencionan las propiedades de exactitud, precisión, error y su análisis mediante estadística.

La metrología emplea patrones, los cuales son elementos físicos elaborados cuidadosamente que proporcionan una medida donde su uso sirve de referencia a los instrumentos que se diseñan. En la tabla I se observan las dimensiones más empleadas por el hombre, asimismo se describe, más adelante, los tipos de patrón existentes.

Tabla I. **Las seis unidades básicas del Sistema Internacional**

Cantidad	Unidad	Abreviatura
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	Kg
Tiempo	Segundo	S
Corriente eléctrica	Ampere	A
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Intensidad luminosa	Candela	Cd

Fuente: elaboración propia.

Para realizar una medición de la corriente eléctrica se requiere de un instrumento como medio físico para determinar su magnitud, por lo cual se deben emplear instrumentos que faciliten encontrar su dimensión.

Estos medidores pueden ser por inducción o estáticos, descritos en la sección 2.2.1 y 2.2.2. Estos instrumentos deben ser calibrados empleando un patrón adecuado, según su clasificación, ya sea primario, secundario o bien para un área de trabajo.

Tiempo atrás, el hombre ha venido desarrollando instrumentos más exactos, con el objetivo de optimizar costos y mejorar la calidad, reduciendo el error o bien la incerteza en una medida. Por ello, el área de la metrología es necesaria en la calibración de instrumentos donde sus términos empleados como exactitud, precisión, sensibilidad, resolución, error, tipos de medidor e identificación de los tipos de energía son puntos de interés en el diseño del dispositivo.

2.1. Términos empleados en una medición

El realizar una medición involucra un proceso en el cual se debe valer de una herramienta como una extensión de las facultades humanas. Existen distintos tipos de instrumentos como variables a medir. Al realizar una medición empleando un dispositivo, se debe tomar en cuenta parámetros que garantizaran una correcta medición, estos son: la precisión (grado con el cual un instrumento puede realizar mediciones sucesivas sin que estas difieran una de otra); exactitud (aproximación que puede lograr el instrumento de acercarse al valor real); sensibilidad (eficiencia de un instrumento de responder ante los cambios de su entrada); resolución (la certeza de una medida), y error (desviación a partir del valor real).

Se pueden emplear técnicas cuyo objetivo es minimizar los efectos de los errores producidos por defectos en el instrumento o errores humanos, por ejemplo, una serie de ensayos registrados para realizar una línea de tendencia para los datos o bien emplear técnicas de interpolación o extrapolación.

2.1.1. Exactitud y precisión

La exactitud en la ingeniería, la física y estadística se denomina como la capacidad de un instrumento de aproximarse o bien acercarse a la magnitud de un parámetro real, esto se puede ilustrar como un juego de tiro al blanco donde una persona gana si su tiro pega al centro, para este caso de forma análoga, el mejor instrumento será quien más se acerque al valor real. En un laboratorio esta se puede definir como la cercanía del valor experimental obtenido, con el valor exacto de dicha medida.

El término precisión es la tolerancia de medida o bien un error máximo que se puede obtener. Basados en el ejemplo anterior, este es análogo a qué tantas veces estuvo cerca de pegarle al centro. Esta se compone de dos características: conformidad y número de cifras significativas, que es la indicación de lo preciso de la medición.

Como ejemplo aplicado, suponga que posee un potencial eléctrico de 120 voltios en su hogar con el cual alimenta sus electrodomésticos, refiérase a él como un valor real. Por curiosidad desea medir esa magnitud, por lo cual toma un multímetro mt1 y se dispone a medir, se percata de la lectura 119,80 voltios; realiza la misma medida pero con otro multímetro mt2 y a su sorpresa, la lectura es 120,212 voltios. El más exacto será mt1, pero el más preciso (con más conformidad y mayores cifras significativas) será mt2

2.1.2. Tipos de error

Debido a que ninguna medición será perfecta o bien será suficientemente exacta, se emplean métodos para reducir el error, con el objetivo de tener la mejor exactitud. Los errores se pueden clasificar en tres categorías principales:

- Errores gruesos: son de origen humano como una mala lectura, ajuste incorrecto o aplicación inapropiada de un instrumento.
- Errores sistemáticos: se deben a defectos en los instrumentos como desgastes, efectos ambientales e inclusive en la manufacturación.
- Errores aleatorios: producidos por variaciones en los parámetros de la medición.

2.1.3. Análisis estadístico

Aplicar este tipo de análisis es común en pruebas de laboratorio y medición, permitiendo hallar la incertidumbre en un resultado final aplicándose a todas las muestras tomadas en el experimento sin tomar en cuenta todos los factores de perturbación. Los métodos comunes que se aplican son:

- Media aritmética: empleada para obtener el valor más probable de una medida, se expresa como la sumatoria de todas las muestras dividido su resultado entre el número de muestras tomas. Teóricamente un número infinito de muestras aproximaría mejor el resultado.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

- Desviación de la media: se puede expresar como la distancia que existe entre la media y una muestra del conjunto, donde la sumatoria de todas las desviaciones debe ser cero. Esta se emplea para conocer qué tan desviada está una prueba.

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

- Desviación promedio: indica qué tanta precisión posee el instrumento empleado en la medición, entre más preciso sea un instrumento menor desviación producirá. Matemáticamente se expresa como la sumatoria de los valores absolutos de desviación de la media.

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

- Desviación estándar: puede indicar la magnitud de la desviación promedio de los valores esperados. Y deriva de la desviación promedio, matemáticamente se expresa como su raíz cuadrada.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

2.2. Medidores de energía eléctrica

Es un instrumento empleado para medir el consumo de la energía eléctrica. Puede ser aplicado por motivo comercial, técnico o bien para

investigación. Para realizar la medida se debe tener un criterio de confianza en el instrumento, que fue previamente calibrado utilizando un patrón.

Para relacionar las dimensiones de un objeto a una medida se necesita de un parámetro físico de la unidad de medición, la cual consiste en una representación física de la unidad de medición a este se le llama patrón.

Existen distintos tipos de patrones de medición, clasificados por su aplicación y su función los cuales por su aplicación se dividen en:

- Patrones internacionales: representan una unidad con la mayor exactitud que permite la tecnología, los cuales son evaluados y verificados periódicamente y definidos por acuerdos internacionales. Estos no están disponibles para ser usados, ni compararse, ni calibrarse con otros.
- Patrones primarios: estos se encuentran en los laboratorios nacionales y son empleados para comparar y calibrar los patrones secundarios. Al igual que los patrones internacionales estos representan una medida.
- Patrones secundarios: empleados en los laboratorios industriales y la calibración de instrumentos.
- Patrones de trabajo: se emplean en la industria y realizan la verificación y calibración del comportamiento de medidas en aplicaciones industriales.

Los patrones eléctricos son empleados en las mediciones eléctricas y electrónicas, estos también se pueden derivar por medio de patrones como el tiempo, la masa y el volumen.

El voltaje y la resistencia son directamente proporcionales y se pueden determinar empleado la ley de ohm, donde el voltaje es proporcional a la

corriente que circula por la resistencia del medio, matemáticamente se expresa como en la siguiente ecuación:

$$V = R * I \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

El patrón de resistencia es una bobina de un alambre cuya aleación posee una resistividad elevada y de bajo coeficiente de temperatura-resistencia, esta es colocada en un recipiente que la protege de los cambios atmosféricos. La figura 4 ilustra este tipo de patrón, fabricado en Estados Unidos, a comparación de un resistor común, esta posee una magnitud exacta, la cual ronda en milésimas de ohmios.

Figura 4. **Resistencia patrón secundaria**



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/rcd-components-inc/>. Consulta: 20 de febrero de 2014.

El patrón primario de voltaje o potencial diseñado por Josephson, el cual lleva su nombre. Es un fenómeno cuántico que ocurre al situar dos materiales superconductores separados por capa de material aislante de unos pocos nanómetros de espesor. Esto permite que el patrón se valga de la siguiente expresión desarrollada por Brian Josephson, en 1962.

$$V = h * e * \frac{f}{2} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

V = potencial eléctrico.

h = constante de Planck.

e = carga del electrón.

f = frecuencia generada por un reloj atómico, que es la única variable.

Para obtener el patrón secundario se emplea la celda patrón, calibrado con el mencionado patrón primario. Se le conoce como celda saturada o Weston. Constituida por un electrodo de mercurio (de potencial positivo) y un electrodo de amalgama de cadmio (de potencial negativo), se sumergen en una solución de sulfato de cadmio (electrolito) contenido por un envase de vidrio con forma de H.

Los patrones de trabajo para laboratorio son prácticos, manejables y adaptables a la mayoría de condiciones ambientales, trabajan en temperaturas de 0 a 50 °C; estos se basan en un diodo zener con una fuente de voltaje regulada. Estos, al igual que el resto de patrones, se deben calibrar con el patrón secundario. La exactitud y precisión de estos es menor, con una resolución de un micro voltio (δ).

Entre las aplicaciones de los patrones está el desarrollar dispositivos comerciales para el uso técnico e instrumentista, los cuales pueden ser elementos medidores para banco de trabajo, entre los que se pueden mencionar a los multímetros (instrumentos dedicados a una sola tarea), como medidores de potencial, de corriente, de frecuencia y medidores de energía, entre otros. La clasificación de los medidores según su construcción se dividen en dos ramas: Tipo inductivo y estático.

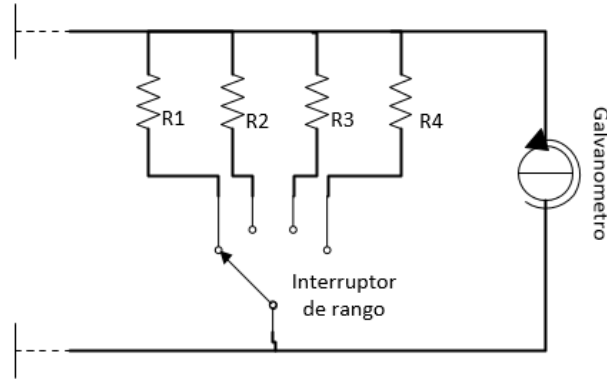
2.2.1. Medidor por inducción

Este tipo de medidor emplea bobinas hechas de un alambre fino, ubicadas en un elemento giratorio, en las cuales al circular una corriente eléctrica se produce un campo magnético, que a su vez genera el movimiento rotacional sobre un eje, empleado la fuerza de un campo magnético opuesto producido por un imán permanente y contrarrestado por el par mecánico de los resortes de control, este dispositivo se conoce como galvanómetro. Dado este efecto, también se le llaman indicadores electromagnéticos y son constituidos por el galvanómetro y un conjunto de elementos pasivos.

En un principio, los medidores que emplean galvanómetro no son prácticos, ni portátiles; por ello se diseñaron versiones más modernas de mecanismos de bobina móvil e imán permanente (PMMC) con capacidad de medir las magnitudes de voltaje, corriente o resistencia, según fuese el arreglo pasivo aplicado a las terminales del mismo. Con la resistencia en serie al galvanómetro, se emplea para mediciones de voltaje; la resistencia debe ser una impedancia mayor a la impedancia del galvanómetro. Con la resistencia en paralelo al galvanómetro, se emplea para mediciones de corriente; la resistencia debe ser de una impedancia menor a la del galvanómetro.

La exactitud y precisión de estos depende de la tolerancia de sus componentes, e incluyendo la escala empleada a lo largo de la deflexión de la aguja, por lo cual la lectura podía contener varios errores. Existen diferentes tipos de PMMC: estos se diferencian por su construcción; al igual que los arreglos pasivos, los cuales emplean distintas técnicas para lograr múltiples escalas, métodos como la derivación de Ayrton; empleando un interruptor de rango para múltiples escalas en la medición, estos son llamados multirango.

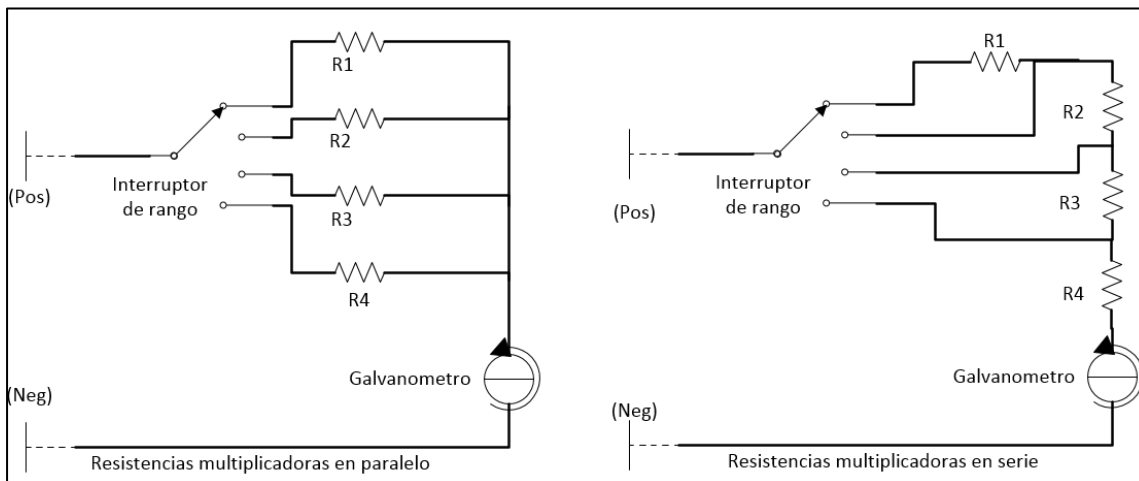
Figura 5. **Diagrama esquemático de una derivación Ayrton**



Fuete: elaboración propia.

La medición de voltaje se logra por medio de resistores en serie, los cuales son múltiplos del resistor de menor valor y se le llama voltímetro a este tipo de instrumentos; este tipo de arreglo puede ser de resistores en serie o bien resistores en paralelo, de los cuales en ambos se aplica un interruptor de rango.

Figura 6. **Diagrama de configuraciones con arreglo Ayrton**



Fuete: elaboración propia.

La sensibilidad de estos instrumentos se determina por la máxima deflexión del galvanómetro, de acuerdo a la cantidad de voltaje en sus terminales; sus dimensionales se dan en ohmios/voltio.

Para un galvanómetro con baja sensibilidad se pueden obtener lecturas correctas en circuitos de baja impedancia, pero se obtienen lecturas incorrectas cuando este mide en circuitos de alta impedancia. Por lo cual, en un galvanómetro con mayor sensibilidad se obtendrá una lectura confiable, fenómeno que se le denomina efecto de carga.

Se debe considerar en este tipo de instrumentos la existencia d un error humano o error grave resultado de la lectura del instrumento. Este se produce al momento de visualizar la ubicación de la aguja en la escala, ya que depende del ángulo de inclinación visual. La figura 6 ilustra los dos tipos de configuración con arreglo Arynton.

2.2.2. Medidor estático

Los medidores estáticos funcionan por medio de elementos de estado sólido, generalmente son de mayor precisión que uno de inducción debido a que el elemento de estado sólido, como el amplificador, incrementa la sensibilidad de un instrumento. Con la implementación del elemento amplificador se logra disminuir la cantidad de potencia drenada

Los elementos de estado sólido que pueden funcionar como amplificadores son los transistores bipolares, transistores FET y MOSFET, así como el amplificador operacional (OP). La aplicación de un transistor bipolar, como elemento amplificador implica emplear una corriente de polarización base-emisor o bien base-colector, dependiendo de la configuración empleada,

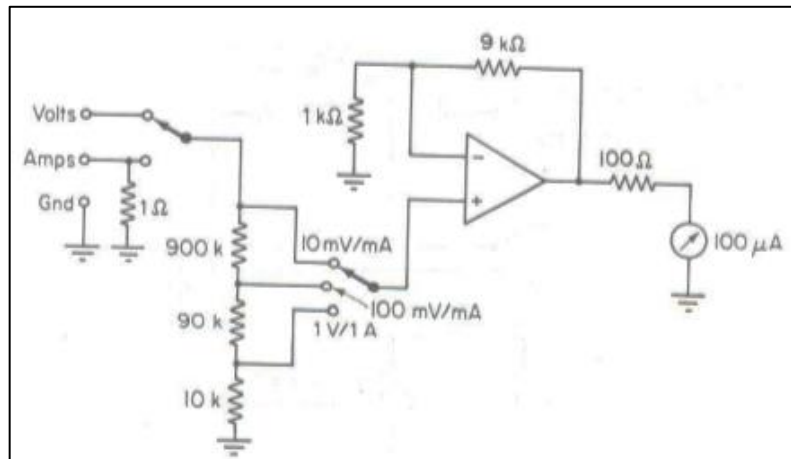
en este la ganancia del amplificador se ve afectada por los parámetros de construcción y ganancia del transistor. Por ser componentes de estado sólido dependen de una fuente externa para su alimentación, la cual permite que estos entren en su estado activo.

Por ello es necesario colocarle un ajuste a la salida, ya que poseen una corriente en sus terminales que puede afectar la medida del galvanómetro, esta corriente puede surgir de la polarización necesaria en la unión base-emisor. Si se emplea un componente como el FET, se necesita una corriente menor para la polarización y una ganancia mayor, aunque siempre es necesario un elemento de ajuste y calibración.

El amplificador operacional, por sus características posee una alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida, ganancia ajustable y de comportamiento lineal, sin embargo, se ve afectado por la temperatura y bajos niveles de alimentación.

Para minimizar estos efectos los fabricantes de semiconductores desarrollaron los amplificadores de instrumentación, esta clase de OP permite mayores niveles de ganancia con menor incerteza y mejor rechazo a los cambios de la fuente de alimentación (PSRR).

Figura 7. **Medidor con amplificador operacional**



Fuente: COOPER, W.D.; HELFRICK, Albert D. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p. 146.

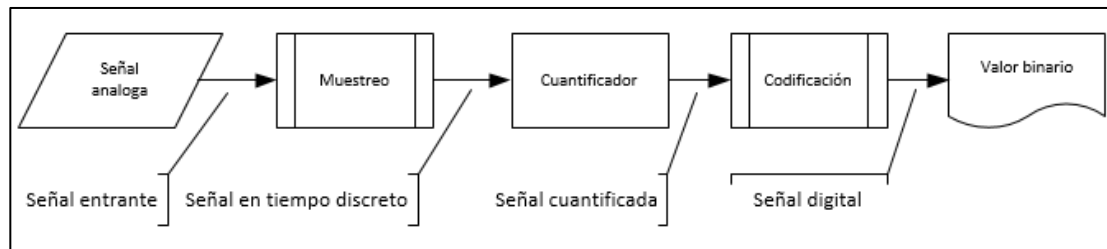
Con este tipo de instrumentos se obtiene una mayor sensibilidad y precisión sin tener que drenar una parte de la potencia medida, dada la impedancia de entrada, aunque el error grave que se produce en la lectura tiende a prevalecer, como solución a esto se sustituye el galvanómetro por un sistema digital.

El sistema digital consiste en convertir la salida del OP en valores binarios, donde un valor conformado por cifras digitales representa una magnitud análoga de voltaje, el resultado se presenta en números naturales mediante una pantalla donde se emplea una matriz digital la cual procesa el valor binario obtenido.

La pantalla puede estar hecha de material semiconductor o bien cristal líquido, aunque componentes más complejos pueden presentar su resultado en una pantalla; como el osciloscopio, e incluso por medio de una computadora.

El proceso de convertir una señal análoga a una señal digital se le llama digitalización, está compuesto de varias etapas y según sea el requerimiento puede ser más complejo, por lo común se compone de las etapas de entrada de señal, muestreo, cuantificador, codificación y salida digital. Este proceso se muestra en su forma general en la figura 8.

Figura 8. **Proceso de conversión análogo–digital**



Fuente: elaboración propia.

La señal entrante llega a una etapa de muestreo, esta compone de un circuito de red escalera o de circuito de aproximación sucesiva e inclusive puede ser un circuito de registro por aproximaciones sucesivas (RAS), como también un conversor Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$).

Estos circuitos toman una parte de la señal, la cual retienen por un pequeño período de tiempo mientras una circuitería lógica compara la señal. La etapa de cuantificación se da cuando el comparador se detiene, el valor que está a su salida es un valor discreto, este puede ser procesado y analizado, esto se conoce como procesamiento de señales en tiempo discreto.

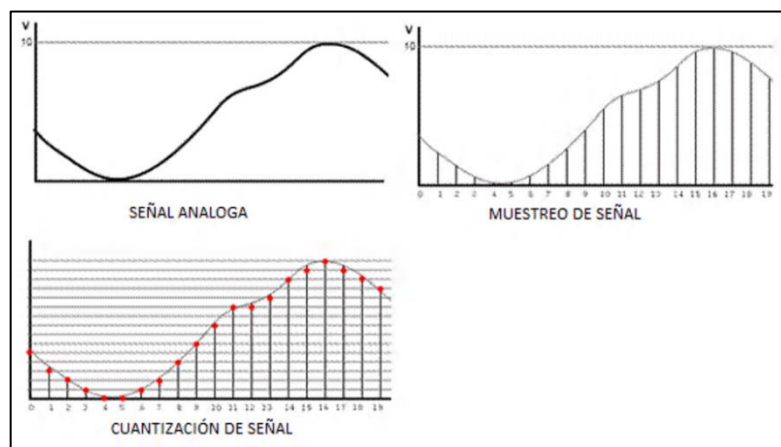
La etapa de cuantificación se ve restringida por la cantidad de registros o bien los bits que la circuitería lógica del circuito contenga, entre más bits tenga el circuito, mayor resolución se podrá obtener, el registro puede ser un contador

el cual tiene a su salida el número de saltos o bien pasos que tuvo que dar el comparador para detenerse. La etapa de codificación consiste en tomar el resultado del contador o registros y presentarlos como un valor binario. La resolución de este procedimiento puede demostrarse matemáticamente como:

$$\text{Resolución} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^N - 1} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua, a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda, aunque en la práctica es aconsejable que sea mayor a seis veces su ancho de banda. La figura 9 ilustra la cuantificación y muestreo de una señal.

Figura 9. **Cuantización y muestreo de una señal**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Medición según el tipo de energía

Se pasará a describir los conceptos básicos relacionados con los temas de la medición de energía eléctrica alterna, la cual es una señal análoga a la forma de onda sinusoidal, aunque puede variar en un tren de pulsos cuadrados o en diente de sierra según sea la aplicación. Otra de las propiedades de esta señal es que se repite cada cierto tiempo formando un ciclo; esta energía por sus características puede ser activa (de potencia real) y reactiva (de potencia aparente), para ello se detallará puntualmente estos dos conceptos.

La medición de este tipo de energía, el aplicar un instrumento de galvanómetro provocaría que el instrumento se dañe; esto se debe a que la aguja se moviliza en dos sentidos, una deflexión se daría cuando se alcance el pico positivo y un sentido contrario de deflexión cuando se alcance un pico negativo. Para ello se añade un circuito adicional que promedia la energía, ya que existe un momento en el cual se tiene un valor pico y uno donde es nulo, si el circuito no promediara para el caso de un mecanismo giratorio existirá un momento de inercia cuando la aguja se mueva de un punto crítico a otro.

2.3.1. Medidor de energía activa

La potencia activa es la componente capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo, los dispositivos que miden este consumo de energía real lo hacen en kilowatts, que es la potencia disipada por un elemento resistivo. El promedio de esta energía es equivalente a la potencia disipada por una resistencia, descrita por la ecuación:

$$P(w) = i^2 * r$$

Donde r es el valor en ohmios de la resistencia, i la corriente en función del tiempo, T el periodo de tiempo que dura el ciclo., dado que varían en un periodo de tiempo se debe describir como se describe en la ecuación 2.8:

$$P(w) = i^2 * r = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 * r dt \quad (2.8)$$

La serie de Fourier es una herramienta que contribuye con el estudio de una señal periódica; es una serie infinita convergente, la cual a través de su descomposición en una función de la suma infinita de funciones sinusoidales contribuye en áreas de análisis vibratorio, óptica, procesamiento de imágenes y al procesamiento de señales en el dominio de la frecuencia, entre otras aplicaciones, esta se describe en la ecuación (2.9)

$$f(t) \approx a_0/2 + \sum_{n=0}^N a_n \cos(nwt) + b_n \sin(nwt) \quad (2.9)$$

Los coeficientes de la serie de Fourier se evalúan al utilizar la integración en el dominio del tiempo, aplicando la propiedad de ortogonalidad, en los cuales la variable “ n ” describe los n -ésimos armónicos de la ecuación.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.10)$$

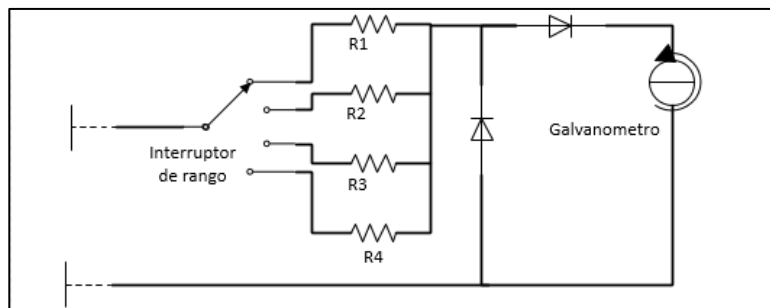
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(nwt) dt \quad (2.11)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(nwt) dt \quad (2.12)$$

En algunos textos el primer término de (2.10) lo representan como $n=0$ para la ecuación (2.11), la cual demuestra la ecuación de valor medio presentado como el valor eficaz de la energía eléctrica alterna equivalente a valor aproximado de $V_e=0,636624 |f(t)|$. Su aplicación se explica en la sección 3.3

Los instrumentos rectificadores son el circuito adicional que permite obtener de forma eficaz el valor promedio de la energía eléctrica, el emplear este método permite obtener el medio ciclo de una onda sinusoidal, la cual se inyecta al PMMC. El aplicar un rectificador para un instrumento de galvanómetro implica un ahorro en diseño, ya que es dificultoso construir una bobina que promedie la energía y que soporte más de 100 mA de corriente en su embobinado, por construcción este instrumento podría ser más pesado y poseer menor movilidad. La figura 10 ejemplifica un circuito común para AC.

Figura 10. **Circuito de un voltímetro con rectificador**



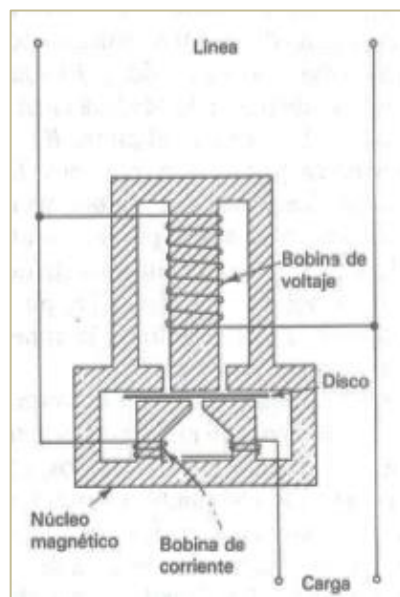
Fuente: elaboración propia.

Los instrumentos electrodinamómetros se emplean en las mediciones de potencia, sirven para indicar tanto la potencia en corriente directa (CD) como en corriente alterna (CA). Estos poseen bobinas fijas y móviles conectadas en serie, forma en la que responden al efecto de corriente al cuadrado. Las bobinas del instrumento tienen distintas funciones, las bobinas

fijas son dos elementos conectados en serie y se encuentran en serie a la carga, limitando la corriente que circula por ellas. La bobina móvil se encuentra conectada en paralelo a la carga y limitada por una resistencia; la deflexión de esta es proporcional al producto de la corriente de ambas bobinas; potencia promedio.

El vatímetro electrodinamómetro consume una porción de energía para mantener su campo magnético, aunque despreciable a comparación del consumo de la carga, la dificultad de este instrumento se presenta en la selección correcta de sus terminales para tomar la medición correcta; si se colocara un disco giratorio de tal forma que los campos magnéticos realizaran el movimiento de otros discos como se ejemplifica en la figura 11, a este tipo se le conoce como vatímetro o bien wathorímetro, el cual generalmente se emplea para la medición comercial de energía eléctrica domiciliar.

Figura 11. **Wathorímetro, diagrama de posición**



Fuente: COOPER, William D. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p. 90.

Los instrumentos de medición digitales para potencia emplean la combinación de los instrumentos para corriente y voltaje con los cuales multiplican sus resultados mediante matemática binaria y así presentarlos en una pantalla digital.

Estos instrumentos son complejos e inclusive necesitan una instalación adecuada con el fin de evitar daños al equipo, como sobre voltajes, corrientes estáticas, golpes externos y humedad entre otros riesgos.

2.3.2. Medidor de energía reactiva

La energía que entrega una generadora se considera como una fuente ideal, las características ideales de esta deberían ser voltaje constante y estable, sin picos o *flickers* de tensión, sin armónicos o frecuencias que provoquen distorsión en la forma ideal de onda, corriente infinita y puramente real. Términos que se consideran en la calidad de la energía, aunque la energía entregada al usuario puede ser ideal, un posible problema surge cuando el receptor o consumidor no es perfecto, que no cumple con los parámetros como carga ideal, que son: elemento puramente resistivo, con protección ante fallas y equipo que no produzca armónicos entre otros.

Dado que no cumple con estas características no se puede considerar que la energía circulante en el circuito sea puramente ideal e implica que no sea del todo una energía activa, puesto que la carga no es un elemento puramente resistivo; para ello se considera un ángulo o bien un factor de potencia. Estos instrumentos miden la energía reactiva en kilovares; dado que la red se caracteriza por una impedancia, suponiendo que la fuente es ideal, la carga total se denota por:

$$Carga(L) = Z(j\omega) = R + jX = |Z|e^{j\phi} \quad (2.13)$$

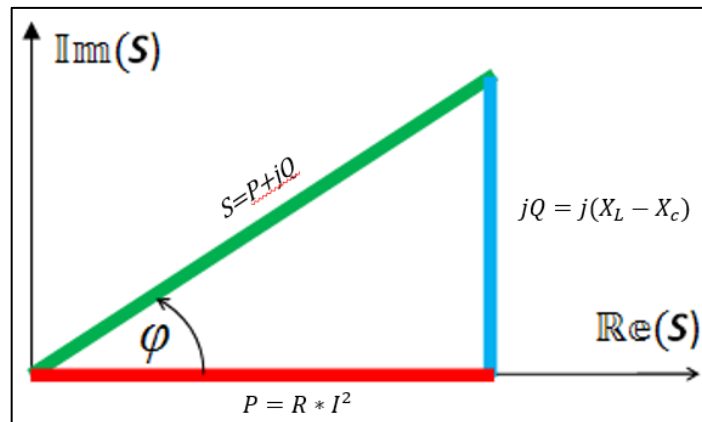
La ecuación (2.13) describe el comportamiento de la carga en términos del ángulo de fase. Se puede emplear la ecuación (2.8) para hallar a partir de la impedancia, la potencia consumida, con lo cual se obtiene:

$$P(kvar) = \frac{i^2}{\sqrt{2}} * |Z| \cos(\omega t - \phi) = V_{rms} * I_{rms} \sin(\phi) \quad (2.14)$$

Esta potencia se conoce como reactiva y expresada matemáticamente, posee componentes complejas, por lo cual la potencia total se denota como la suma vectorial de la potencia real y compleja de dimensionales volt-amperio.

El resultado de dicha suma se conoce como potencia aparente denotada por la letra "S", esta puede darse al momento de existir una carga inductiva, una carga capacitiva o bien la existencia de ambas. La figura 12 ilustra esta ecuación en el plano complejo.

Figura 12. **Ilustración del triángulo de potencia**

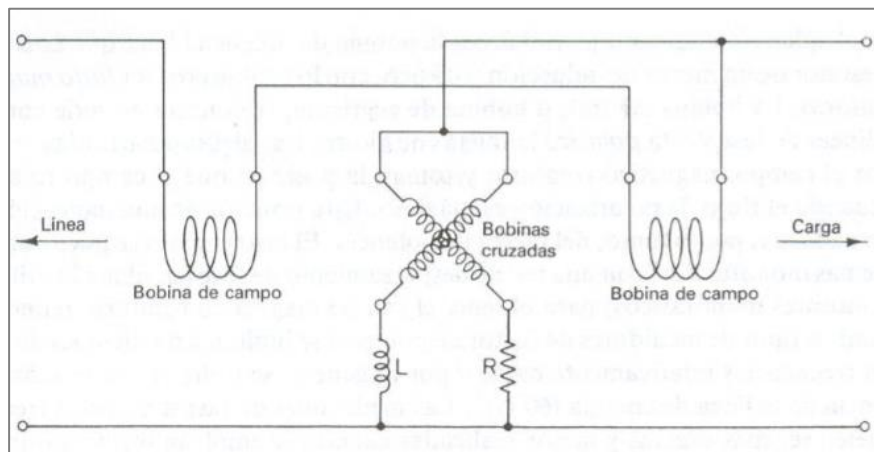


Fuente: elaboración propia.

En la mayor parte de los casos y por lo común en la zona industrial se encontrarán cargas inductivas, esto se debe a la cantidad de motores, transformadores y circuitos de control que abren o cierran paso a enormes cantidades de corriente empleados para realizar un trabajo.

El instrumento que se emplea para medir este desfase entre la energía activa y reactiva producido por adelantos o atrasos de corriente es el medidor de bobinas cruzadas: consiste en dos bobinas móviles colocadas en ángulo recto sobre una pieza móvil, una bobina de campo se conecta en serie a la carga, el par de bobinas se conectan en paralelo a la carga, para crear un efecto de torsión una de las bobinas se conecta a un resistor en serie y la otra a una bobina en serie; como se presenta en la figura 13. El movimiento electrodinámico está dado por el desplazamiento angular provocado por las bobinas de campo y el campo generado en las bobinas móviles.

Figura 13. **Diagrama del medidor de factor de potencia**



Fuente: COOPER, William D. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p. 93.

3. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO PROPUESTO

En este capítulo se emplean los conceptos y principios redactados en los capítulos anteriores, para implementar la ingeniería en el diseño del instrumento con el fin de cumplir con la capacidad de monitorear el consumo de energía, poder apagar o encender un dispositivo y que sea accesible via web, pudiendo emplear cualquier componente electrónico que tenga un explorador web (Smartphone, Tablet, Laptop, Desktop), se exponen los principios de la digitalización empleando microcontroladores y métodos numéricos.

Los primeros instrumentos empleados por el hombre para medir contienen errores, como la falta de exactitud, depender de una lectura con grandes rangos y depender de factores ambientales, entre otros. Aunque esos instrumentos fueron útiles para perfeccionar la técnica de medición, el avance de la electrónica dio un gran empuje a estos, la digitalización ha contribuido con realizar mediciones mucho más exactas y cuentan con instrumentos que proporcionan hasta 10 cifras significativas, tal y como se explica en el inciso 2.1.

En los instrumentos digitales existen múltiples factores que limitan las capacidades de un instrumento digital: temperatura, frecuencia de la señal, rango dinámico, memoria, niveles de ruido (rosa, blanco, cuantización, entre otros.), pueden ser producidos por amplificadores y transductores.

Transductor: constituido por una parte mecánica o física y una parte electrónica que convierte la energía del mecanismo físico en energía eléctrica. Entre ellos el sensor de luz, su parte física consiste en una rejilla fotovoltaica en los fotones de un haz de luz crean una diferencia de potencial, esta a su vez es

conducida por hilos conductores hasta el dispositivo electrónico que amplifica la señal. La tabla II describe los tipos de transductor comunes en el mercado.

Tabla II. **Tipos comunes de transductor comercial**

Tipo de sensor	Descripción	Dispositivo.
Fotoeléctrico	Convierte la luz incidente en una diferencia de potencial con una baja cantidad de corriente	Fotocelda
Electroacústico	Convierte energía acústica captada por una membrana, en decibelios, es convertido en energía eléctrica.	Celda capacitiva Piezoeléctrico Electrodinámico
Ultrasónico	Convierte el sonido de altas frecuencias, el cual es emitido por el mismo dispositivo a energía eléctrica.	Celda capacitiva Piezoeléctrico
Térmico	Convierte la energía térmica en energía eléctrica.	Termistor
Inductivo	Reacciona ante la presencia de metales, incrementando su inductancia.	Solenoides
Capacitivo	Reacciona ante la presencia de dieléctricos, incrementando su capacitancia.	Placas circulares Placas paralelas Semiconductor
Magnético	Conocido como de efecto Hall, reacciona ante la presencia de campo magnético, produciendo una diferencia de potencial.	Sensor de efecto Hall
Corriente	Convierte la cantidad de corriente a un potencial o corriente de menor valor que la circulante.	Toroide Laminar

Fuente: elaboración propia.

El diseño se basa en la estructura que muestra la tabla III, un esquema que detalla las capas que conforman el diseño, el cual se realiza con base a un protocolo propio con el fin de comprender con facilidad el mismo.

Cada una de las capas empleadas expone un segmento del diseño físico, en cada una se amplía el tema por función, añadiendo principios y finalizando

con el diseño de los módulos acorde a las capas planteadas en el protocolo. El protocolo elaborado muestra un orden en la elaboración del diseño.

Tabla III. **Protocolo empleado en el diseño**

CAPA	TIPO	DESCRIPCIÓN	FUNCIÓN
1	FÍSICA	Medición de la energía por medio de transductor.	Acople de potencia
2	FILTRO	Eliminar las frecuencias no deseadas.	Obtención de señal
3	DIGITAL	Digitalización de la señal acoplada y filtrada.	Muestreo de señal
4	ANÁLISIS	Métodos matemáticos para aproximación y conversión	Aplicación numérica

Fuente: elaboración propia.

Aunque el microcontrolador necesita de un conjunto de instrucciones, el mismo no se plantea en el protocolo, dado que este puede variar por motivos como: optimización, mejoras, velocidad, dispositivo microcontrolador de modelo más reciente. En el apéndice de anexos se ha colocado el código base con el fin de que se pueda comprender la estructura.

Por tanto, lo que no cambió es la estructura tanto física como lógica que se debe seguir para funcionar adecuadamente; por ejemplo, el sistema operativo de una computadora.

3.1. Acople de la potencia al dispositivo

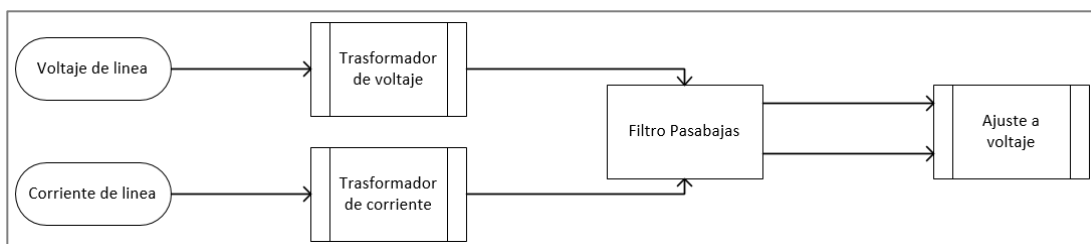
La potencia en la línea de energía, generalmente es elevada, aunque no exista corriente en ella, el voltaje es constante, por lo cual puede suministrar cierta cantidad de energía al dispositivo que se conecte. Ciertamente se puede

conectar cualquier dispositivo a la línea, pero dicho artefacto debe estar capacitado para manejar cantidades elevadas de voltaje.

Para el desarrollo del diseño, la importancia de medir la energía es poder determinar dos variables, voltaje y corriente, tales variables podrán ayudar a determinar la cantidad de energía consumida por un abonado. Para ello es indispensable poder acoplar estas dos señales; paso importante dado que las etapas subsiguientes no están diseñadas para manipular grandes cantidades de energía.

La primera y segunda capa del protocolo a seguir consiste en la estructura física que une la señal análoga con las siguientes capas. Las características de la misma; debe tener la capacidad de soportar corrientes y voltajes elevados, así como la capacidad de transformar la magnitud de la misma. La figura 14 ilustra los pasos a seguir en el acople y filtrado de la señal.

Figura 14. **Diagrama de bloques para la capa 1 y capa 2**



Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Voltajes de distribución

Una limitante es la consideración a la potencia, ya que los voltajes de distribución en las líneas de tensión pueden tener valores de voltajes mayores a

13KV, por lo que se considera trabajar con valores de baja tensión. Estos valores ya han sido estandarizados; tal y como se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. **Clasificación de las líneas de tensión**

Clasificación	Descripción
Muy alta tensión o	$\geq 220\text{KV}$
Alta tensión categoría 1	$66\text{ KV} < \text{tensión} < 220\text{ KV}$
Alta tensión categoría 2	$30\text{KV} < \text{tensión} < 66\text{KV}$
Alta tensión categoría 3 o media tensión	$1\text{KV} < \text{tensión} < 30\text{KV}$
Baja tensión	$120\text{V} < \text{tensión} < 1\text{KV}$

Fuente: elaboración propia.

La clasificación de estas se debe por la consideración a pérdidas en la transmisión de energía dada las largas distancias a recorrer. Estas líneas están hechas de un material conductor que no es perfecto (conductor no ideal), por lo cual tiene una pérdida considerable por kilómetro, ocasionada por la resistividad de conductor, capacitancias e inductancias, dada la condición climática del lugar e inclusive los objetos que estén en su trayecto.

El empleo por su clasificación puede ser para transmisión de la energía desde una generadora a una central de distribución, transportar energía a un área metropolitana como a un poblado. Aunque la aplicación del dispositivo puede ser para cualquier categoría, este se ha enfocado para la línea de baja tensión, por costo y facilidad. La línea de baja tensión es distribuida de un transformador a un abonado que puede ser un hogar, un edificio o una fábrica.

3.1.2. **Transductor de energía eléctrica**

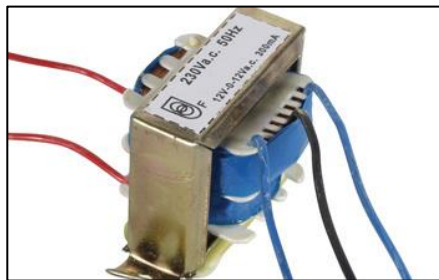
Los fenómenos físicos transforman una cantidad de energía al realizar una acción, ya sea por movimiento, temperatura, campos electromagnéticos u

ondas mecánicas, las cuales pueden ser de magnitud mayor la que puede ser manipulada; por ello se emplean estos componentes, que convierten un tipo de energía a una señal análoga de menor magnitud, que suele ser eléctrica.

Un transformador de potencial conocido como PT, transforma un potencial de voltaje alterno de un valor mayor a un valor menor de potencial, este dispositivo está formado por dos bobinas, una primaria y una secundaria, donde la bobina primaria es de calibre menor respecto a la secundaria, como también de un número mayor de espiras, poseen un núcleo común de material ferromagnético donde el primario induce un campo electromagnético generando un voltaje inducido en el secundario. Un transformador ideal convertiría la potencia del primario a una misma potencia en el secundario, pero este posee una pérdida. La relación de voltaje convertido se puede determinar con la ecuación 3.1.

$$N_1 / N_2 = V_1 / V_2 = m \quad (3.1)$$

Figura 15. **Ilustración del transformador de voltaje**



Fuente: elaboración propia, imagen tomada de perfil.

El transformador de corriente conocido como CT, transforma una intensidad de corriente que circula por el conductor sin tener contacto físico, al igual que el PT se basan la inducción, consta de una bobina que tiene un

núcleo de material ferromagnético en forma de toroide. El campo magnético generado por la corriente induce una corriente en la bobina, a diferencia del PT que induce un potencial. Su relación se puede determinar por la ecuación 3.2

$$A_f/A_i = m \quad (3.2)$$

Figura 16. **Ilustración del transformador de corriente**



Fuente: elaboración propia, imagen tomada de perfil.

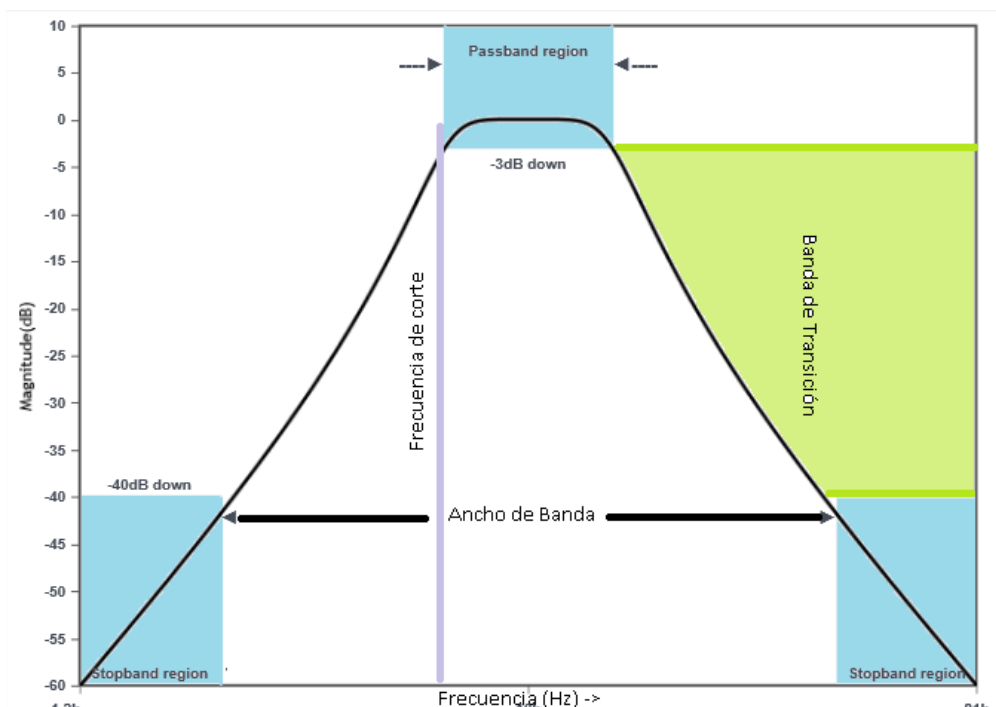
3.1.3. **Filtrado de la señal**

El principio de un filtro es eliminar o bien atenuar un componente no deseado, o el cual puede ser un elemento químico, un sonido o una señal eléctrica. Para propósitos de diseño se aplicó un filtro analógico, el cual atenúa los componentes espectrales no deseados de la señal que proviene de los transformadores. Las características de un filtro son:

- Banda permitida (*band pass*): región en la cual el filtro no atenúa.
- Banda de transición: región en la que actúa el filtro, atenúa una señal de forma progresiva a partir de la frecuencia de corte (límite permitido).

- Banda de rechazo (*stop band*): región en la cual el filtro a atenuado una señal a un nivel donde esta ya no es significativa. Comúnmente -40dB.
- Frecuencia de corte: límite de la banda permitida donde la señal decae el 50 por ciento de su potencia. Equivalente a 3dB.
- Ancho de banda: comprende la frecuencia de corte inferior a una frecuencia de corte superior. Región permitida por el filtro.
- Potencia: en señales analógicas es la medida dada en dB, no en watts.

Figura 17. Ilustración de las características de un filtro



Fuente: elaboración propia, empleando software Analog Device.

Entre los tipos de filtro se pueden mencionar:

- Según su clase

- Filtros pasivos: los dispositivos que emplea son pasivos
- Filtros activos: los dispositivos que emplea son activos y pasivos
- Según su función
 - Filtro pasa bajo: atenúa las frecuencias superiores a la de corte
 - Filtro pasa alto: atenúa las frecuencias inferiores a la de corte
 - Filtro pasa banda: no atenúa la frecuencia seleccionada. Poseen una frecuencia de corte superior y una inferior
 - Filtro rechaza banda: atenúa solo la frecuencia seleccionada
 - Filtro pasa-todo: solamente genera un desfase, sin atenuar la señal

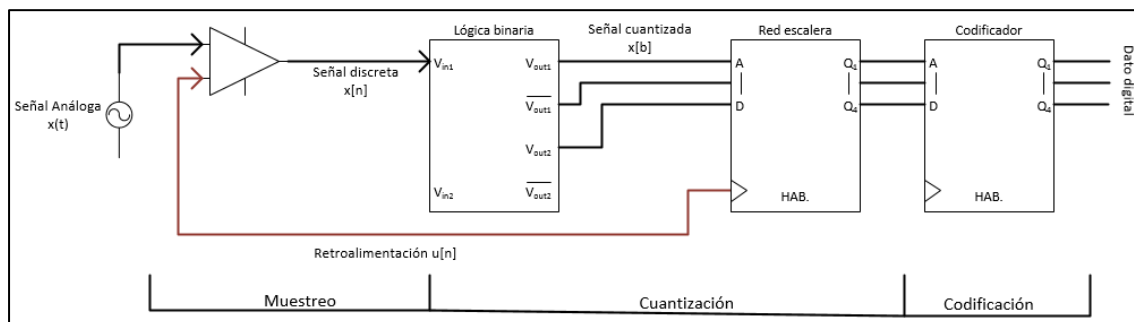
3.2. Muestreo de las señales entrantes

Las señales análogas se pueden filtrar, seleccionar, modular y transformar de una forma de energía a otra, pero estas difícilmente se podrán almacenar, regenerar, detectar un error y poder procesar o bien analizar usando dicha representación. Por lo cual se emplea la digitalización técnica que consiste en convertir una señal análoga a digital, aunque realmente se transcribe una señal proveniente de un transductor, dado que se toman medidas de amplitud de la misma en forma de muestras.

El método de digitalización envuelve tres procesos dependientes, estos forman un sistema de control de lazo cerrado. Aunque teóricamente estos procesos son independientes en la práctica, cada uno necesita de una retroalimentación para obtener la mejor precisión en la conversión. Tales procesos inician desde la entrada de la señal análoga hasta su salida binaria:

- **Muestreo:** consiste en tomar muestras de voltaje a una frecuencia constante, la señal análoga ingresa a dicha etapa en la cual es multiplicada por un tren de impulsos. Al resultado se le conoce como señal en tiempo discreto, tiene una amplitud equivalente a la señal análoga, que es equivalente al de un impulso, por lo cual no es una señal continua en el tiempo, a ello debe su nombre de discreto.
- **Cuantización:** proceso en el cual la señal discreta ingresa y toma valores de voltaje discreto, este equivale a recortar la señal en un escalón unitario de determinada amplitud, lleva consigo un margen de error (error de cuantización o bien ruido de cuantización). Mientras más niveles de cuantización existan, mayor será la resolución de la conversión.
- **Codificación:** etapa final donde la señal cuantificada adquiere un valor binario, este depende directamente de la cantidad de bits del dispositivo el cual entre mayor sea su cantidad más exacto es y se conoce como resolución.

Figura 18. **Ilustración del proceso de digitalización**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2013.

El proceso de digitalización de una señal envuelve parámetros físicos tales como: voltaje máximo, frecuencia máxima y resolución mínima, entre otros parámetros que puede especificar algún fabricante. Matemáticamente se puede determinar la resolución de un dispositivo a partir de la ecuación 3.3. La figura 15 ilustra de forma general un conversor (CAD), que corresponde al diagrama de bloques de la figura 18.

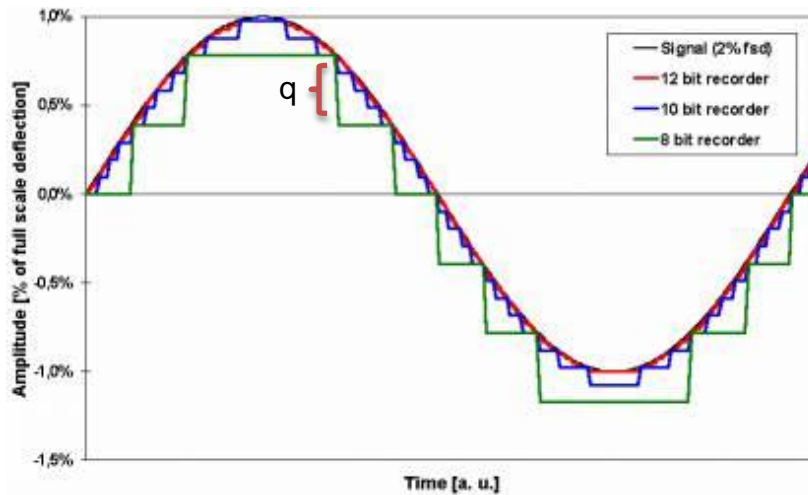
$$Resolución = \frac{(V_{max} - V_{min})}{2^n - 1} \quad (3.3)$$

Un parámetro más es la frecuencia de muestreo, si dicha frecuencia es menor al doble de la frecuencia perteneciente a la señal análoga, se obtendrá como resultado una señal distinta a la muestreada (indistinguible) e inclusive no se podría reconstruir y analizar correctamente, esto se le conoce como Aliasing. Relación que se expresa matemáticamente en la ecuación 3.4, la cual aplica únicamente en casos ideales. En la práctica se debe aplicar como mínimo una frecuencia de muestreo mayor a seis veces la frecuencia fundamental.

$$F_m \geq 2 f_o \quad (3.4)$$

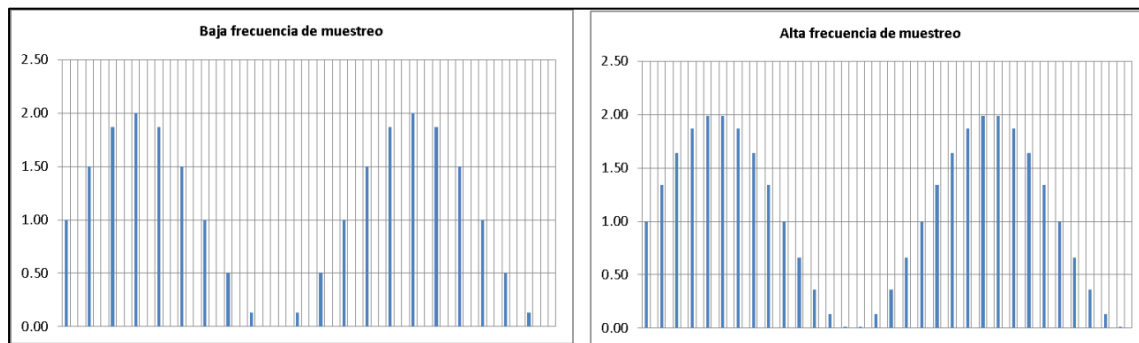
El ruido de cuantización se puede determinar con el voltaje de resolución que es el tamaño de paso (q) que dará el convertidor de un valor a otro. Entre menor sea este voltaje mejor será la fidelidad respecto a la señal análoga, por lo tanto contendrá menos ruido. Equivalente a $\pm \frac{1}{2} q$

Figura 19. Gráfica comparativa del error de cuantización



Fuente: <http://www.digineff.cz/obrazkydg/cojeto/vicebit/vicebit.jpg>. Consulta: 26 de mayo de 2014.

Figura 20. Gráfica comparativa de la frecuencia de muestreo



Fuente: elaboración propia.

La figura 19 ilustra el error de cuantización a través de una gráfica donde se muestra el paso de 8 bit a comparación del paso de 12 bit. La figura 20 ilustra la diferencia entre un muestreo de baja frecuencia (gráfico izquierdo) a un muestreo a una frecuencia mayor (gráfico derecho). Los dispositivos que

realizan la tarea de digitalización varían según la capacidad en bits, frecuencia de muestreo y el método que se emplea.

El tiempo de retardo: parámetro que surge cuando se emplean registros, ya que una señal análoga cambia constantemente, por lo cual se hace necesario retener por un tiempo muy corto un valor de la muestra mientras una muestra anterior se almacena, este se le conoce como *latch*.

Tiempo de conversión: este valor no es parte del *latch*, ya que este no retiene ningún valor, este es el tiempo que tarda en digitalizarse una muestra desde que sale de la etapa de muestreo hasta la salida binaria. Surge de la frecuencia del reloj que se emplea en los circuitos lógicos y se emplea para determinar la frecuencia máxima de muestreo. Se puede expresar matemáticamente según la ecuación 3.5

$$f_{max} \approx (2\pi * f_{reloj} * 2^N)^{-1} \quad (3.5)$$

Donde n es el número de bits que posee el cuantificador. Entre los tipos de digitalizador se pueden mencionar:

- Conversión directa: compuesto por un conjunto de amplificadores operacionales (OP), los cuales comparan la señal análoga con una escala. Su salida es llevada a una lógica combinatorial que despliega el resultado. Su tiempo de conversión es limitado por el ancho de banda de sus componentes, este tiempo puede ser menor a 1µs. Su resolución dependerá del número de OP, comúnmente no mayor a 8 bits y la complejidad de los circuitos lógicos son propensos a fallos en su salida.

- Aproximaciones sucesivas: por medio de un comparador indica a un registro la dirección de la pendiente de aproximación, de los circuitos lógicos combinacionales despliegan el valor codificado. Su ancho de banda depende de la velocidad de conversión determinada por la frecuencia de reloj y la cantidad de bits, su resolución dependerá de los registros en su circuitería lógica. El tiempo de conversión es mayor a $1\mu\text{s}$.
- Rampa: se valen de un circuito integrador donde la pendiente de carga determinará por medio de un comparador, cuándo el reloj se debe detener, se caracterizan por el tiempo que le toma llegar al valor del voltaje de entrada empleando una señal de diente de sierra.
- Frecuencia: convierte el voltaje de entrada en un tren de impulsos los cuales sirven de reloj a un circuito secuencial, cuando los pulsos se cortan el sistema se detiene y luego se reinicia para así retomar el ciclo.
- Conversor delta-sigma ($\Delta\Sigma$): se deriva de otro tipo de conversión conocida como modulación delta, con la ventaja que emplea un integrador y su estructura completa es más simple.

3.3. Aplicación de la integración numérica

Anteriormente se han expuesto los principios que se relacionan con el diseño del dispositivo, a partir de esta sección se expone el cálculo y la ingeniería necesaria para el diseño del mismo.

Los componentes electrónicos se han diseñado con base en cálculos previos con el objetivo de satisfacer la necesidad que se desea cubrir, entre ellos se puede mencionar al microcontrolador.

Los circuitos análogos son económicos y en gran parte simples, aunque ello implica un problema dado que no se puede analizar con precisión, como se indicó en el capítulo 2. Emplear instrumentos de mecanismos giratorios lleva consigo un margen de tolerancia y error.

Los circuitos digitales pueden ser precisos y poseen la ventaja de reproducir las muestras que se toman, pero llegan a ser muy complejos y no poseen la capacidad de analizar señales análogas, para ello usan los digitalizadores, dispositivos a expensas de errores.

Cualquier tipo de conversor de digital análogo posee un error que surge de la cuantización. Dado que la conversión es una codificación, es indispensable realizar un análisis de la señal, esto puede implicar varios procesos hasta llegar a una interpretación del resultado.

La tercera capa del protocolo es la digitalización de la señal, el resultado obtenido es procesado con el fin de obtener la medida de la señal análoga, la cual ha sido reducida, filtrada y digitalizada. Durante ese trayecto la señal sufrió cambios esto necesitó un ajuste de corrección.

Las muestras tomadas y digitalizadas pertenecen a la señal análoga, pero vistas desde el dominio discreto y no del dominio del tiempo, por lo cual reconstruirlas desde su forma codificada se puede realizar mediante una integración, que es la suma de todas las muestras durante un período de tiempo. Esta se aplicó tanto a la señal proveniente del voltaje y la proveniente de la corriente.

El método a aplicar debe ser veloz con el fin de ocupar el menor tiempo posible en la reconstrucción de la señal y así poder analizarla para ello se

empleó un método numérico. Utilizar una solución como esta implica posteriormente realizar una interpolación de datos dado que existirán puntos donde se desconoce un cierto valor, para ello se necesita que la señal sea continua, lo cual se cumple dado que si esta fuese una señal no continua en el tiempo difícilmente se podrá determinar un valor dentro de un rango.

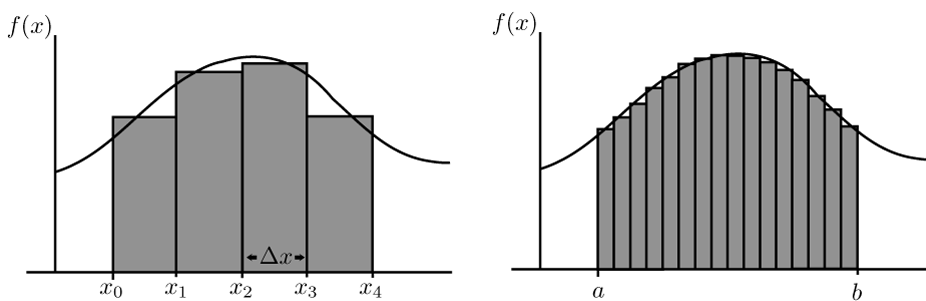
3.3.1. Integral de Riemann

Esta integral numérica es la más simple pero contiene un margen de error mayor a comparación de otras técnicas, geométricamente se define como la suma de intervalos de área bajo la curva de una función, siempre que la función esté definida en un intervalo, sea continua y posea valores reales. Para lo cual se describe cada intervalo de $a < f(t) < b$ como n y su profundidad $y \geq f(t)$ como h .

$$\int_a^b f(t) dt \approx \sum_{k=0}^N f(x_k) \Delta x \quad (3.6)$$

Para obtener una mejor aproximación de esta función se debe crear en el rango $[a,b]$ intervalos más pequeños. Dado que los rectángulos del área bajo la curva de la función se hacen más pequeños.

Figura 21. Ilustración del área bajo la curva empleando Riemman



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Integraci3n_de_Riemann. Consulta: 30 de mayo de 2014.

Estos intervalos en Δx son equivalentes a las muestras tomadas en intervalos de tiempo, por lo tanto entre más muestras se tengan mejor será la aproximación a la función.

3.3.2. Método del trapecio

El método consiste en formar aproximaciones a la curva por medio de pendientes, las cuales en combinación del área segmentada bajo la curva forman trapecios, distinta al método de Riemann que es la suma de rectángulos, empleando el polinomio de Lagrange para aproximar los puntos internos en el segmento $[a, b]$, lo cual produce una serie de interpolaciones n tal que, a más interpolaciones se tengan mejor será la aproximación a la función. El polinomio de Lagrange queda expresado en la ecuación 3.7:

$$\int_a^b f(t) dt \approx \int_{x_2}^{x_1} \left[\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} f(x_0) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1) \right] dx \quad (3.7)$$

Al realizar la integral y simplificar su resultado se obtiene la ecuación 3.8

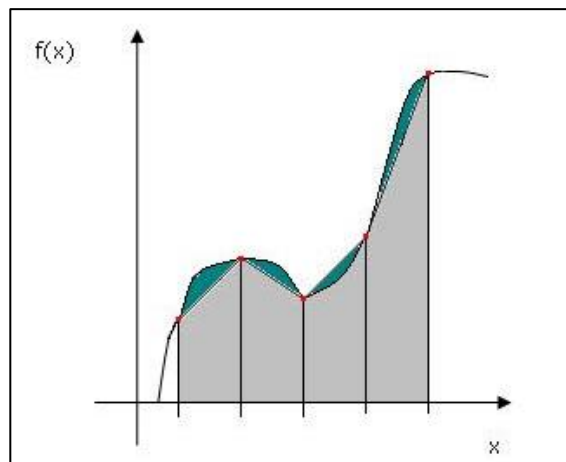
$$\int_a^b f(t) dt \approx \frac{h}{2} [f(a) + 2 f(a + h) + 2 f(a + 2h) + f(b)] \quad (3.8)$$

Si se desean agregar más intervalos la ecuación crece llegando a obtenerse en forma simplificada una sumatoria dado su patrón secuencial. Como se aprecia en la ecuación 3.9

$$\int_a^b f(t) dt \approx h * \frac{f(a) - f(b)}{2} * \sum_{k=0}^n (2 f(a + k h)) \quad (3.9)$$

Tanto este método como el anterior poseen un error por aproximación, aunque por fines prácticos este se considera despreciable, dado que se emplean valores discretos y enteros. En este caso ninguna cantidad decimal podría ser considerada, ya que manejar cantidades decimales en un sistema volvería muy largo el procedimiento, también se debe considerar que el mismo implicaría más recursos en el microcontrolador o cualquier sistema digital.

Figura 22. **Ilustración del área bajo la curva, método del trapecio**



Fuente: http://www.tonahtiu.com/notas/metodos/trapecio_archivos/. Consulta: 30 de mayo de 2014.

3.3.3. Método de Simpson

Para deducir el método de Simpson se trabaja con el polinomio de Lagrange, con la diferencia de un tercer polinomio, en este caso la integral de la ecuación 3.7 toma la forma de la ecuación 3.10. Esta última también puede explicarse por medio del polinomio de Taylor desarrollando la ecuación alrededor de $X1$ que es una forma alternativa.

$$F(t) \approx \int_{x_0}^{x_2} \left[\frac{x-x_1}{x_0-x_1} \frac{x-x_2}{x_0-x_2} f(x_0) + \frac{x-x_0}{x_1-x_0} \frac{x-x_2}{x_1-x_2} f(x_1) + \frac{x-x_0}{x_2-x_0} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} f(x_2) \right] dx \quad (3.10)$$

La ventaja de este método es que se aproxima mejor a la tendencia de la curva, puesto que posee un tercer punto, reduciendo el error, el resultado de la integración y de su simplificación se asemeja a la ecuación 3.8 y 3.9

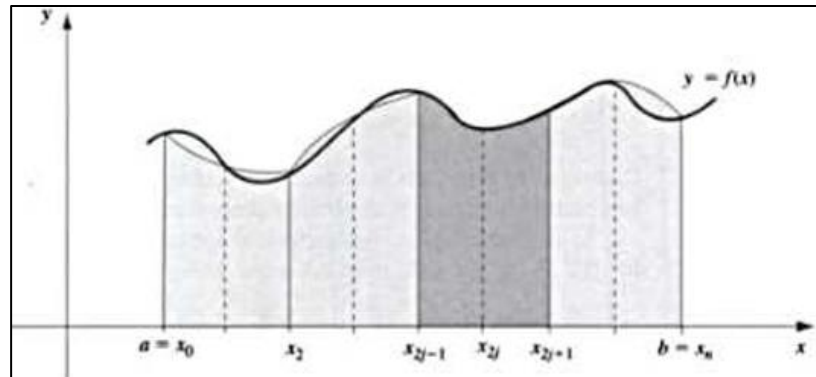
$$\int_a^b f(t) dt \approx \frac{h}{6} [f(a) + 2f(a+h) + 4f(a+2h) + 2f(a+3h) + f(b)] \quad (3.11)$$

$$\int_a^b f(t) dt \approx \frac{h}{3} [f(a) + f(b)] + 2 \sum_{k=1}^n f(a_{2k-1}) + 4 \sum_{k=1}^n f(a_{2k}) \quad (3.12)$$

El error en este método es menor y su matemática no es tan compleja, en la figura 23 se ilustra mediante una gráfica donde se logra apreciar su comportamiento mediante el área bajo la curva de una función dada. Para este diseño se empleó el modelo matemático, por lo cual resulta necesario crear un algoritmo para su procesamiento.

Un parámetro indispensable es el número de muestras necesarias para obtener un resultado confiable, para esto se toman las ecuaciones del análisis de sistemas en tiempo discreto.

Figura 23. Ilustración del área bajo la curva, método de Simpson



Fuente: BURDEN, Richard L. *Análisis numérico*. p. 198.

3.3.4. Análisis en tiempo discreto

La cuarta etapa del protocolo consiste en aplicar la integración numérica, se requiere de una analogía entre la señal análoga y la señal en tiempo discreto, con el fin de crear una función $f(t)$ a $f[n]$ que sea integrable, para ello se emplea la ecuación 3.13, donde una señal continua se dispone a discreta.

$$\sin(\omega t) = \sin[\Omega n] \quad (3.13)$$

Ecuación donde se puede hacer la relación que se expresa en la ecuación 3.14.

$$2\pi f n T = \Omega n \quad (3.14)$$

En la ecuación 3.14, las variables corresponden a f (frecuencia), t (variable tiempo), n (variable discreta) y T el parámetro a determinar; debe cumplir con la relación de la ecuación 3.4. Empleando la ecuación 2.3 se aplica la integración por el método de Simpson, expresado en la ecuación 3.16

$$a_0 = \frac{1}{T} * \int_0^T \sin(240\pi t) dt \quad (3.15)$$

$$a_0 = \frac{T}{6} \left[\sin(\pi) - \sin(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \sin\left(w k \frac{T}{n}\right) + 4 \sum_{k=1}^{2n} \sin\left(w T k * \frac{T}{n}\right) \right] \quad (3.16)$$

Sustituyendo T y simplificando la ecuación 3.16, se obtiene como resultado una ecuación con la suma de las sumatorias, ecuación a transformar al dominio de tiempo discreto. Dado que 3.4 representa un valor efectivo se expresa como V_e para los “n” pasos de la sumatoria, como se expresa en la ecuación 3.17

$$V_e(t) = \frac{1}{3n} \left[\sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \sin\left(\pi \frac{K}{n}\right) + 2 \sum_{k=1}^{2n} \sin\left(\pi \frac{K}{n}\right) \right] \quad (3.17)$$

De esta ecuación se necesita un punto de truncamiento para “n”, con el fin de determinar la óptima tasa de muestreo, y de esta forma no saturar la memoria, no tomando tiempo procesando la información y obtener un error mínimo o bien un resultado factible. Realizando dicha operatoria, los resultados se presentan en la tabla V.

Tabla V. **Resultados obtenidos por el método de Simpson, variando n**

n	$V_e(t)$	f(t)	Error
10	0,636655	0,6366197	3.49E-05
20	0,636622	0,6366197	2.2E-06
30	0,636620	0,6366197	5E-07

Fuente: elaboración propia.

Con los datos mostrados en la tabla V se logra tener un buen resultado obteniendo 20 muestras, error de 2.2 microunidades o bien se puede interpretar como un posible error a los 6 decimales. Por lo cual se transforma la ecuación 3.17 a una expresión discreta, tomando en cuenta que el número de muestras mínimas es de 20, esto conlleva al tiempo de muestreo.

$$T_s = \left(\frac{1}{f_s}\right)/2 N \quad (3.18)$$

Considerando la ecuación 3.18, que implica la tasa mínima de muestreo y la cantidad mínima de muestras se obtiene $T_s = 2400$, donde se obtienen las ecuaciones 3.19 y 3.20, esta última es la ecuación de aplicación para este diseño.

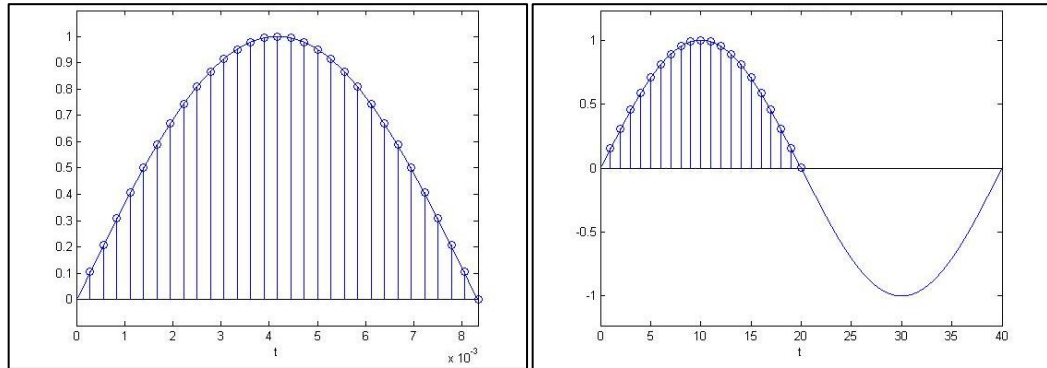
$$f[n] = \text{sen} \left[\frac{\pi}{20} n \right] \quad (3.19)$$

$$Ve = \frac{1}{3n} \left(2 * \sum_{k=0}^{\frac{n}{2}} \text{sen} \left[\frac{\pi k}{5} \right] + 4 \sum_{k=0}^{\frac{n}{2}} \text{sen} \left[\frac{\pi k}{5} - \frac{\pi}{10} \right] \right) \quad (3.20)$$

Al momento de tomar las muestras, la función seno corresponderá a la muestra tomada y cuantificada, por lo que en su forma codificada se obtuvo un valor según la amplitud de la muestra. Como se ilustra en la figura 24.

Las muestras tomadas provienen del conversor analógico-digital (CAD) que viene integrado en el microcontrolador, por lo tanto, la frecuencia de muestreo se ve restringida por la velocidad de respuesta de ese periférico. La frecuencia de muestreo puede provenir de un reloj externo o bien del interno, para fines económicos se empleara el reloj interno, la resolución del CAD está dada por la capacidad del periférico y el tamaño del registro.

Figura 24. **Gráfica correspondiente al tiempo continuo y discreto**



Fuente: elaboración propia, empleando el software Matlab.

3.4. **Módulo del microcontrolador**

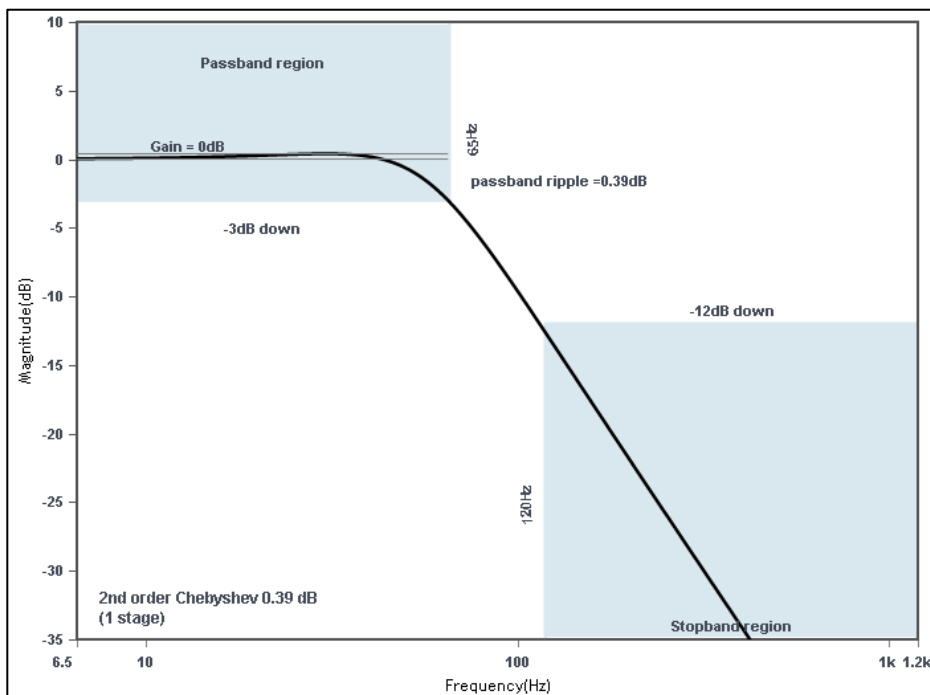
En esta sección se presentan los diagramas que componen cada módulo del sistema, los cuales se presentan por una subsección. Siguiendo el esquema del protocolo, la capa 1 del sistema son los módulos de medición de voltaje y corriente, capas que consisten en transformar la energía eléctrica de cantidades por arriba de las centenas a cantidades por debajo de las unidades.

El diseño de los módulos para medición de voltaje, así como la de corriente, implica los parámetros donde se asumió que se emplearían voltajes no mayores al límite establecido. Se debe tener en cuenta un transformador de relación 240:5, entrada de 240 Vrms y salida de 5 Vrms, a lo sumo 12 Vrms; como también un transformador de corriente que convierte el valor de amperios que circula en el conductor a un valor de corriente menor. Para la corriente se asumió que no excedería a 100 amperios, por lo que se consideró un transformador de relación 100:5, entrada de 100 amperios y salida de 5 amperios, con esto se establecieron 5 voltios pico-pico y 5 amperios como parámetro de mayor valor.

Segunda capa del protocolo: se aplicó un filtro para asegurar que la señal a analizar fuera la correcta, empleando un filtro que permita el paso de frecuencias menores a la frecuencia de corte, aproximadamente a 72 Hz en la aplicación práctica. Este filtro se aplicó en ambas tarjetas, por lo que se incluye en cada subsección.

El voltaje de la frecuencia fundamental que, para su efecto será la misma que la frecuencia de referencia, el voltaje que se desea para 120Hz que es la frecuencia del primer armónico, es la cuarta parte o bien el 25 por ciento de la señal entrante, y se obtienen 12 dB. Por lo cual el ancho de banda queda definido para el 70 por ciento de pérdida de la señal; el ancho de banda ideal +/- 5Hz. El resultado se presenta en la figura 25.

Figura 25. **Respuesta en frecuencia del filtro ideal**

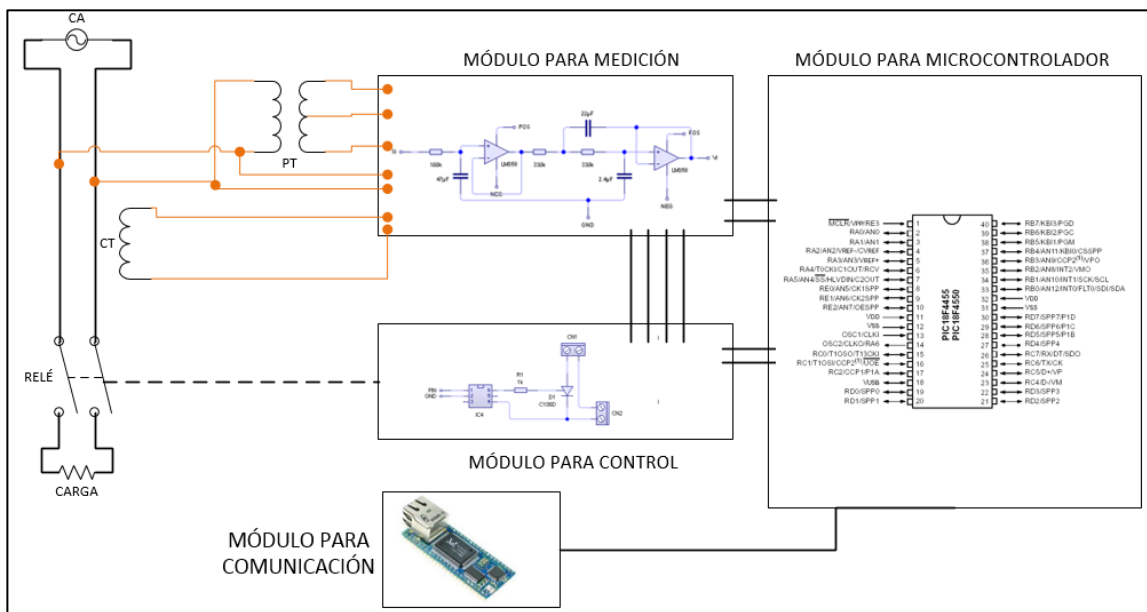


Fuente: elaboración propia, empleando el software Analog Devices.

El resultado teórico envuelve una condición ideal, aunque prácticamente resulta dificultoso lograr resultados tan exactos. Realizando un análisis el tener un margen de tolerancia resulta factible para determinar la existencia de errores en la línea, como fluctuaciones de voltaje.

La tercer capa del protocolo esta constituida en un conversor análogo a digital donde la señal proveniente del filtro se muestrea, realizar tal diseño se hizo un previo ajuste al voltaje necesario para que estas señales pudieran analizarse en el margen de 0 a 5 voltios pico. Esta etapa se encuentra como parte de un módulo independiente en la subsección para control, tarjeta que consiste en la unión de los módulos existentes a uno central. La figura 26 describe de forma general el diseño del sistema. El módulo para medición contiene los transductores de voltaje y corriente, el módulo de control contiene el ajuste y control de las señales y el módulo de comunicación independiente.

Figura 26. Vista general del diseño del sistema



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2013.

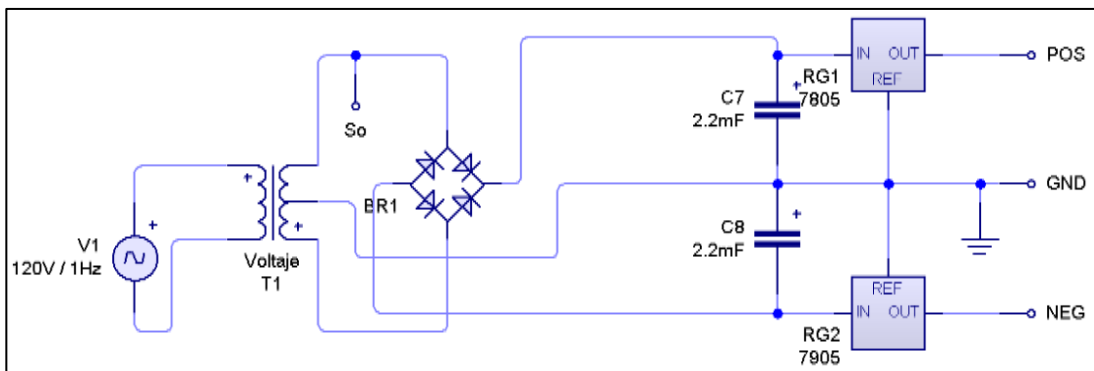
3.4.1. Módulo para medición de voltaje

El voltaje de línea de baja tensión para las residencias puede ser de 110 voltios o 220 voltios y con un factor de potencia de 1, suponiendo un caso ideal. Tanto la corriente que circula como el potencial presente se han aplicado transductores, los cuales transforman esta energía a valores más pequeños. Para ello se empleó un circuito el cual se expresa en la ecuación 3.21. La salida de este es por la terminal S_o ; que pasa a una siguiente etapa para su filtrado y procesamiento, el circuito restante es para propósitos de alimentación.

$$S_o = \frac{V_i}{2N} \quad (3.21)$$

La figura 27 ilustra el diagrama esquemático del circuito para la medición de voltaje, donde el transformador de voltaje es externo al circuito. El circuito adicional lo constituye un rectificador, un par de filtros y reguladores de voltaje los cuales alimentarán al sistema del módulo para medición, únicamente, dado que se necesitan de voltajes simétricos (+/- 5V) para alimentar los filtros activos.

Figura 27. Diagrama esquemático del circuito para medir voltaje



Fuente: elaboración propia, empleando el software Circuit Wizard.

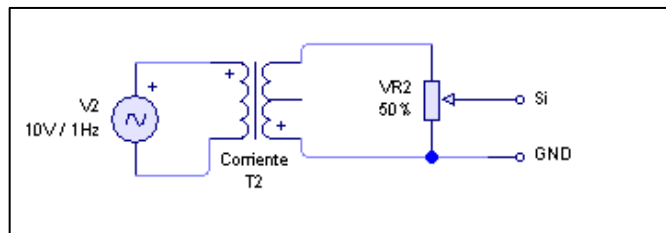
3.4.2. Módulo para medición de corriente

La corriente que circula en la línea puede ser medida empleando un transductor, como la bobina de Faraday. La corriente proveniente de su embobinado es convertida en voltaje empleando un circuito serie. Matemáticamente este se puede expresar como en la ecuación 3.22, donde M es la relación del transformador de corriente (CT).

$$Si = \frac{I}{M} * VR2 \quad (3.22)$$

La figura 28 ilustra el diagrama esquemático del circuito para medición de corriente, donde el transductor de corriente, al igual que el transformador de voltaje es externo al circuito. Se emplea un potenciómetro VR2 para propósitos de calibración.

Figura 28. Diagrama esquemático del circuito para medir corriente

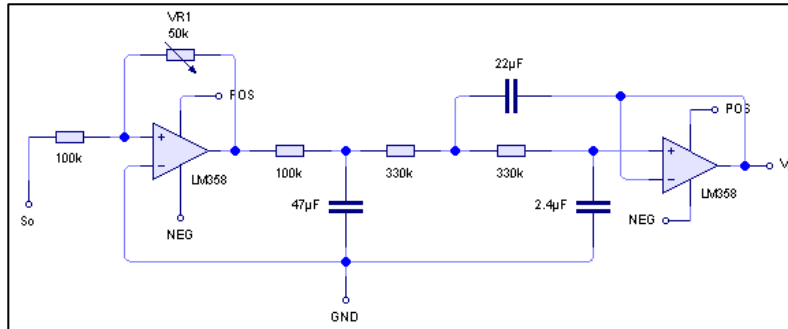


Fuente: elaboración propia, empleando el software Circuit Wizard.

El módulo contiene ambas tarjetas en una misma placa, esta incluye un filtro para cada etapa, voltaje y corriente. El propósito del filtro es obtener la señal sinusoidal con características como el menor ruido posible y evitar armónicos, de tal forma que la medición sea lo más exacta posible.

El circuito del filtro se ilustra en la figura 29, el cual se describió anteriormente en la sección 3.1.3.

Figura 29. **Diagrama esquemático del circuito para el filtro pasa bajas**



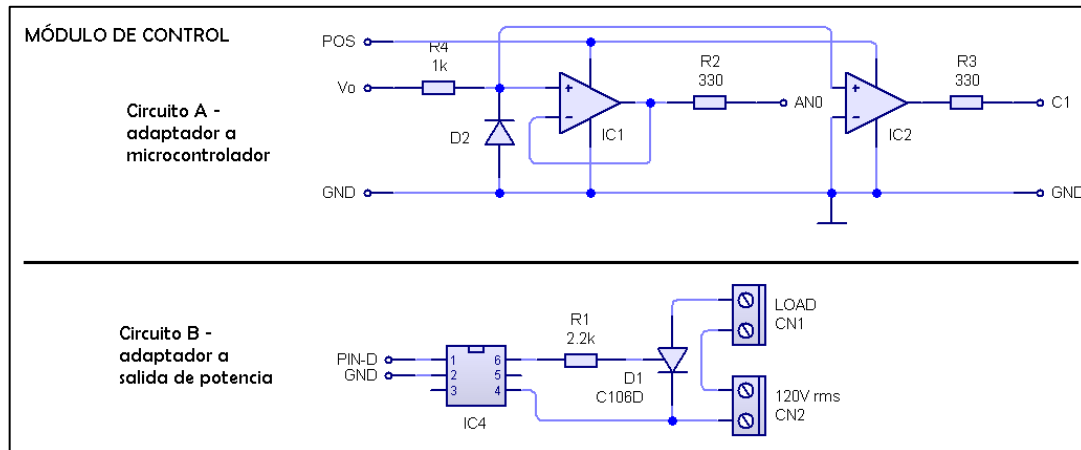
Fuente: elaboración propia, empleando el software Circuit Wizard.

3.4.3. Módulo bus de control

El sistema contiene una etapa de control que pertenece a la tercera capa del protocolo, esta consiste en ajustar la señal pico-pico a una pico no mayor a 5 voltios; voltaje máximo admitido por el microcontrolador. Como parte del diseño se incluye en este mismo un circuito de control, el cual podrá maniobrar potencias mayores empleando mecanismos de protección como relés, que se describen en la sección 1.1. Dicho módulo se ilustra en la figura 30.

El circuito-B activa un TRIAC por medio de la señal proveniente del PIN-D, de un pin digital del microcontrolador, hacia el integrado opto-triac, el cual energiza el gate del TRIAC, con capacidad de manejar voltajes de hasta 480 VAC y 1A. El circuito-A adapta la señal de los filtros, compuesto por amplificadores operacionales los cuales están configurados como seguidor de voltaje positivo, estos recortarán la señal de pico-pico a pico y comparadores para detectar los cruces cero. Las gráficas se encuentran en la sección anexos.

Figura 30. Diagrama esquemático del módulo de control



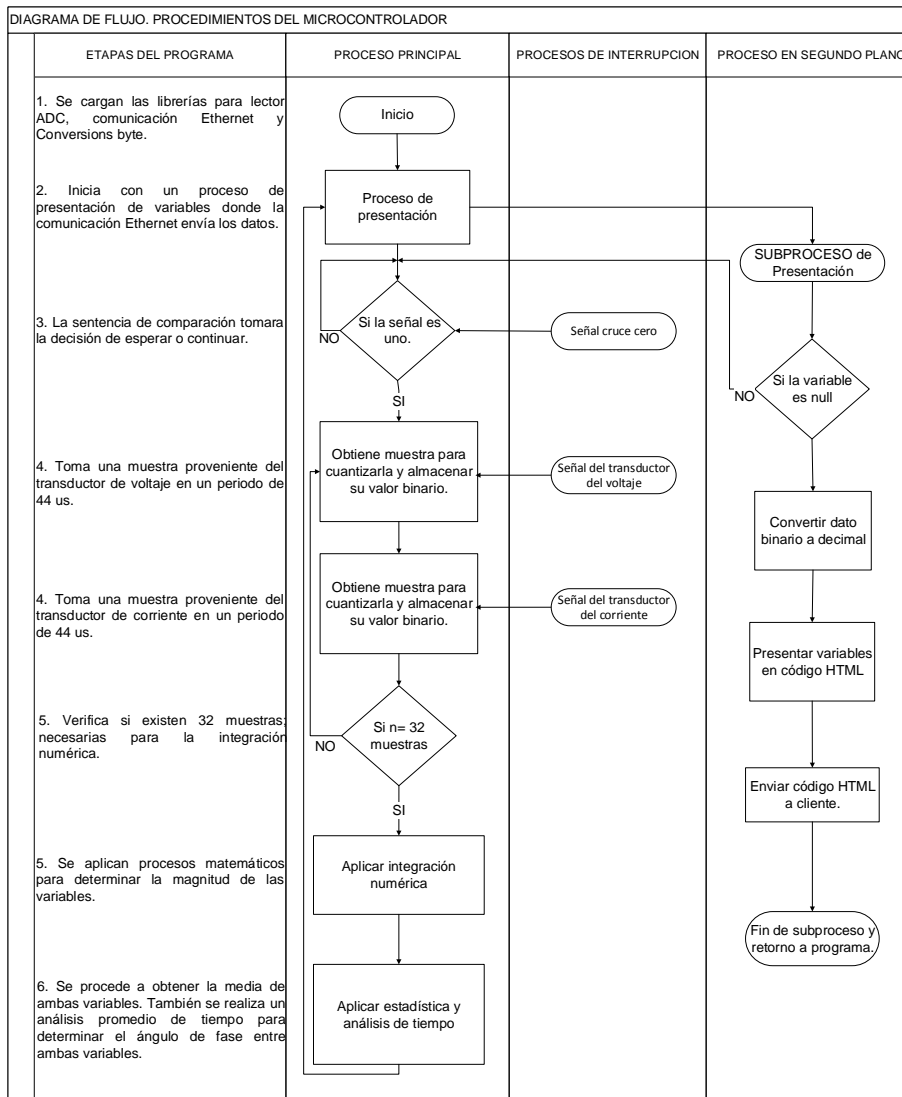
Fuente: elaboración propia, empleando el software Circuit Wizard.

3.4.4. Programación del microcontrolador

Los cambios constantes en la electrónica surgen para mejora o bien para optimización de las herramientas, por ejemplo: procesadores de capacidad y desempeño superior a sus predecesores, instrumentos con mayor número de funciones. También se puede mencionar que el tamaño de estos se ha ido reduciendo. En el área de los microcontroladores se ha mejorado la capacidad de procesamiento, la cantidad de memoria RAM y FLASH, así como el número de periféricos que van integrados. Escribir un código de programación limitaría este trabajo a emplearse con un solo tipo de microcontrolador, por lo que se extiende a desarrollar un pseudocódigo el cual será válido para cualquier tipo de microcontrolador.

Para aplicar el código se estructura un diagrama de bloques el cual detalla los pasos y lógica a seguir. Esta se ilustra en la figura 31 que inicia desde la entrada de las señales de corriente, voltaje y cruce cero.

Figura 31. Diagrama de flujo, pseudocódigo del programa



Fuente: elaboración propia.

El pseudocódigo del programa se realizó con base a parámetros fundamentales para el buen desempeño del sistema. Cada parámetro fue calculado según lo expuesto anteriormente como la frecuencia de muestreo, cantidad de muestras a tomar, método de integración a emplear y la resolución empleada en el convertido análogo a digital.

- Frecuencia de muestreo para las señales, de 2 400 Hz a 3 600 Hz
- Resolución de la muestra no menor a 10 bits
- Voltaje máximo para muestreo 5 voltios pico, valor mínimo 0 voltios
- Tiempo necesario para enviar el dato al módulo de comunicación 2 seg
- Indicador de señal activa, la señal de cruce cero

La descripción del pseudocódigo se encuentra en la tabla VI, donde cada fila de la tabla contiene un paso o proceso del diagrama de la figura 31.

Tabla VI. **Descripción del Pseudocódigo**

Núm.	Contenido	Descripción
1	Inicio y carga de librerías	Proceso en el cual inicia el microcontrolador, cargando el programa a su memoria.
2	Proceso de presentación	Subrutina dentro del código del programa la cual no está cargada dentro de una interrupción dado que reiniciaría el proceso.
3	Si la señal es uno	Condición en la cual se procederá a continuar si la señal de cruce cero está activa, la cual indicará que hay voltaje, de lo contrario esperará. Se colocó como interrupción.
4	Tomar muestra	Proceso que se colocó dentro de una interrupción y consiste en tomar una muestra de la señal de voltaje.
5	Tomar muestra	Semejante al proceso (4) con la diferencia que es milésimas de segundo atrasada. La cual se aprovecha para análisis del ángulo de fase.
6	Si hay 32 muestras	Número de muestras necesarias para la integración numérica. De 20 a 32.
7	Aplicar integración-	Se aplica el método de Simpson para realizar la integración.
8	Aplicar estadística	Paso final donde se aplica un teorema para determinar el ángulo de fase.

Fuente: elaboración propia.

La configuración aplicada en el microcontrolador, se realizó por medio de los registros descritos en la tabla VII. Esto no limita el diseño a emplear únicamente este tipo de microcontrolador, sino que se exponen como referencia a configuraciones apropiadas.

Tabla VII. **Registros del microcontrolador**

Registro	Descripción del registro	Valor establecido
ADCON0	Control del conversor ADC. Se establece AN0 como canal predeterminado. El conversor habilitado y detenido.	%0000001
ADCON1	Control de voltaje y selector ADC Se establecen voltajes del microcontrolador. Se seleccionan tres puertos como análogos.	%00001100
ADCON2	Control de frecuencia y tiempo del ADC Formato justificado a la derecha. Tiempo de adquisición en 20TAD. Selección del reloj. (Ecuación 3.18 y 3.21)	%10111001
T0CON	Control del temporizador número 0. Reloj inicialmente detenido. Contador ajustado a 16bits. Seleccionado la fuente de reloj. Preescalador deshabilitado. Escalador ajustado a relación 1:256	%00000111
INTCON	Control global de interrupciones. Inicialmente en pasivo. Interrupción del temporizador 0 activo.	%10100000

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de conversión como la presentación de los datos, son aspectos secundarios de la elaboración del diseño y que pertenecen a la última capa del protocolo estructurado, estos se introducen en este último apartado donde se emplean las ecuaciones 3.3, 3.5 y 3.18. La presentación de los datos se realiza empleando el protocolo HTTP, soportado por la mayoría de los dispositivos que posean un navegador web y que se encuentra en el módulo de comunicación.

El módulo de comunicación debe emplear un lenguaje común de comunicación entre el microcontrolador, para ello en el compilador empleado se utilizaron las librerías de comunicación Ethernet, las cuales son un conjunto de instrucciones que permiten enviar y recibir datos entre los dos dispositivos. Estas instrucciones se encuentran en la tabla VIII, junto con una descripción.

Tabla VIII. **Librería de funciones Ethernet**

Instrucción	Descripción
SPI1_Init()	Activa la interfaz de comunicación periférica serial (SPI)
SPI_Ethernet_Init	Inicia la operación de comunicación con el módulo Ethernet.
SPI_Ethernet_setUserHandlers	Permite la comunicación mediante la interacción del protocolo TCP/UDP.
SPI_Ethernet_doPacket.	Procesa los paquetes recibidos y devuelve un valor si el dato es correcto o erróneo.
SPI_Ethernet_sendUDP	Sentencia que envía datos por protocolo UDP hacia la red.

Fuente: elaboración propia.

La programación del módulo consiste en un código de lenguaje de marcas de hipertexto o bien Hiper Text Markup Lenguaje (HTML), dado que el módulo no contiene una memoria interna se empleó la memoria del microcontrolador para enviar las líneas de hipertexto con el fin de que este último las procese.

Los datos que se envían son voltaje, corriente y fase. Se aprovecha la lógica computacional para integrar en el código matemática simple y de esta forma el microcontrolador no tomará tiempo en convertir el dato binario a decimal. Con esto se puede aprovechar la memoria para agregar funciones que el usuario podría emplear. Para fines ilustrativos se coloca el código HTML en la sección de anexos.

3.4.5. Calibración del instrumento

La calibración de un instrumento se realizó con base a un patrón de trabajo, expuesto en la sección 2.2 y se ha comparado con instrumentos de laboratorio. La tabla IX muestra los resultados.

Tabla IX. Resultado obtenido por el dispositivo a 110 voltios

Patrón de trabajo.		Dispositivo diseñado.	
Corriente (A)	Potencia (W/h)	Corriente (A)	Potencia (W/h)
1	110	0,99	108,9
2	221	2,01	221,1
3	330	3,02	332,2
4	441	4,02	442,2
5	549	5,01	551,1
10	1200	10,03	1103,3
11	1210	11,99	1318,9
12	1320	12,01	1321,1
13	1432	13,01	1431,1
14	1540	13,98	1537,8
15	1650	14,99	1648,9
16	1758	16,01	1761,1
17	1871	17,01	1871,1
18	1979	18,00	1980,0
19	2092	19,01	2090,0
20	2201	20,01	2201,1
21	2309	21,02	2311,1
22	2423	22,01	2421,1
23	2527	22,99	2528,9
24	2639	24,00	2640,0
25	2751	25,01	2751,1
30	3304	30,02	3302,2

Fuente: elaboración propia.

4. COMPARACIÓN DEL DISPOSITIVO CON LOS EXISTENTES EN EL MERCADO ACTUAL

El dispositivo se diseñó con el objetivo de medir la corriente en amperios, el voltaje en voltios, la energía en kilowatts-hora y con capacidad de medir el factor de potencia, aunque por su estructura física permite realizar más funciones como medir el nivel *flickers*, las variaciones de voltaje y obtener un registro histórico entre otras cualidades. Por ello el diseño se basa en cuatro capas que pertenecen únicamente al diseño físico y no a la programación, ya que esto limitaría su capacidad cuando realmente se puede ampliar en funciones, dependiendo del microcontrolador a usar.

Basado en el diseño propuesto se hace una comparativa en la cual se pueden observar sus ventajas y beneficios. Para lo cual, una subsección describe las especificaciones del dispositivo y otra subsección destinada a la comparación técnica del dispositivo con otros, tales como: watihorímetros análogos e instrumentos dedicados a la medición de calidad de energía.

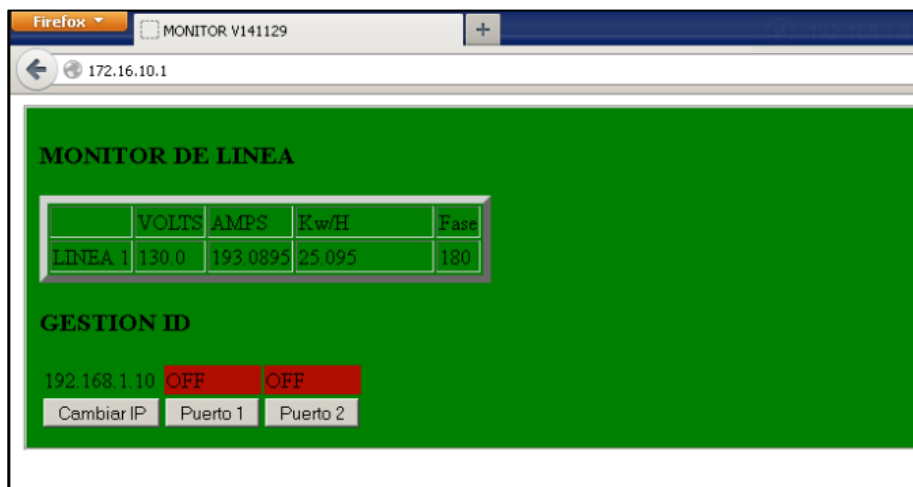
4.1. Especificaciones del dispositivo con base en los resultados

Las especificaciones se obtienen con base en los objetivos del diseño según sus funciones y los resultados finales que se describen en la sección 3.4.5, como forma de acceder y administrar el dispositivo, las características de diseño y características técnicas.

- Administración del dispositivo.

- Esta cumple con el objetivo de ser accesible vía web, entonces, por defecto este tendrá la dirección IP 192.168.1.250, en la cual se visualizar las mediciones. La figura 32 detalla la interfaz web.

Figura 32. **Diseño de la interfaz web para gestión del dispositivo**



Fuente: <http://172.16.10.1>. Consulta: 15 de noviembre de 2014.

- Características técnicas.
 - Voltaje máximo 120V, con borneras para conexión a PT
 - Corriente máxima 95 A, con borneras para conexión a CT
 - Frecuencia de trabajo, únicamente 60Hz
 - Alimentación 5V o 12V. DC
 - Resolución +/- 0.015 KW/h
 - Resolución de corriente +/- 0.013 A
 - Resolución de voltaje +/- 0.20 V
 - Intervalo de presentación de datos 2 segundos
 - Máxima corriente soportada por el interruptor, 5A

- Características de diseño
 - Visualización de datos vía web, empleando cualquier explorador
 - Conexión de datos por adaptador RJ45, protocolo Ethernet
 - Dispositivo de montaje fijo, ya sea caja metálica o plástica
 - Conexión a línea por CT y PT. Se usa bornera y terminales
 - Control opcional de energía y *jumpers* para selección

4.2. Comparación técnica y de costos entre dispositivos comerciales

La comparación se realizó con base a las especificaciones técnicas de seis tipos de dispositivos, haciendo un consolidado general. Esta comparativa se ilustra en la tabla X donde en cada columna corresponde al tipo de dispositivo y en las filas las características generales de tipo técnico.

Tabla X. **Comparación de características entre dispositivos**

Función	Análogo	Digital	Diseño	Gama baja	Gama media	Gama alta
Watts/hora	si	si	si	si	si	si
Trifásico	no	no	si	si	si	si
Conectividad	no	IR	no	si	no	no
I/O control	no	no	si	no	si	si
Visualización	Agujas	Display	Web	Display	Display/Web	Web/App/Pp
Montaje	Fijo	Fijo	Fijo	Portatil	Portatil	Fijo
Desbalance	no	no	si	si	si	si
Flickers	no	no	no	no	si	si
Sobrevoltaje	no	no	si	si	si	si
Amperios	no	no	si	si	si	si
Voltios	no	no	si	si	si	si
Frecuencia	no	no	si	si	si	si
Factor potencia	no	no	si	si	si	si
Resolución bits	N.A	12	12	16	16	16

Fuente: elaboración propia.

Los dispositivos comparados con el diseño son: medidor análogo marca General Electric, medidor digital modelo DSSE26E, monitor gama baja modelo Sharck 100, monitor de gama media Power Xpert 4000 y el monitor gama alta Nexus 1252; clasificados así según su desempeño.

La tabla XI presenta el coste del diseño, contiene precios en dólares, consultados en el mercado internacional. Se consultó en las tiendas de National Instruments, Amazon y Shark. En la tabla XII se hace una comparativa del costo de los dispositivos antes mencionados. Se colocaron los valores en dólares debido a que el valor de la moneda nacional puede variar.

Tabla XI. **Listado de materiales empleados y costos**

Componente	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Microcontrolador PIC 18F4550	1	5,75	5,75
Amplificador operacional LM324	1	0,50	0,50
Amplificador operacional LM358	2	0,40	0,80
Resistencias de valores varios 1/4W	10	0,08	0,75
Capacitores electrolíticos 220uF 25V	2	0,15	0,30
Puente rectificador de 2A	1	0,63	0,63
Conector SIL macho (fila de 40 unidades)	1	0,44	0,44
Bornera de 2 terminales	4	0,25	1,00
Alambre de cobre calibre 16, en metros	2	0,19	0,38
Libra de estaño 40%	1	3,50	3,50
Módulo Ethernet SPI ENC28J60	1	28,37	28,37
Placa de cobre 8"x7"	1	1,88	1,88
Potenciómetros de precisión, 10Kohm	2	0,45	0,90
Caja plástica 6x8x4 pulg	1	17,50	17,50
Transformador de corriente 100:5 A	1	15,00	15,00
Transformador de voltaje 120-6V	1	5,63	5,63
Costo total			83,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Comparación de costo con otros dispositivos**

Dispositivo	Sotware adicional	Licencia	Fuente de poder externa	Costo \$
Analogo	no	no	no	44
Digital	no	no	no	62,5
Diseño	no	no	si	83,31
Gama baja	no	si	si	292,5
Gama media	si	si	si	440
Gama alta	si	si	si	1 210

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas de protección en las instalaciones eléctricas tienen la capacidad de proteger los equipos finales, ya sean electromecánicos, de luminaria y electrónicos; un adecuado arreglo de estos como la filiación ayuda a determinar el punto de fallo sin afectar al resto de dispositivos conectados en la red eléctrica interna.
2. La medición de energía eléctrica ha mejorado con el paso de las distintas tecnologías, logrando así medidas más exactas, lo cual reduce el margen de error en el cobro de la tarifa por kilowatt consumido por hora.
3. El diseño del dispositivo no posee un hardware complejo, sin embargo, la circuitería produce niveles de ruido de 8mV pico dado los AMP-OPs empleados, lo cual es un factor limitante; es posible utilizarlo para aplicaciones más complejas si se emplea una circuitería con menor ruido y un microcontrolador con un CAD de mayor resolución.
4. La comparación técnica muestra cómo bajo una investigación adecuada se puede elaborar un dispositivo de bajo costo. Sin embargo, es de notar que el empleo de dispositivos que pueden ser controlados vía remota es la tendencia del mercado internacional para emplearse en domótica y certificaciones Green House.

RECOMENDACIONES

1. El dispositivo puede ser configurado para que pueda ser visto desde un sitio remoto, siempre y cuando el router o punto de acceso al cual se conectó tenga el puerto 80 abierto y se conozca la IP pública que proporciona su proveedor de internet o bien emplear NAT.
2. El sistema puede funcionar empleando *sockets* para conectarse a un servidor en caso se desee tener más de un dispositivo.
3. Es indispensable que por seguridad este sea colocado con montaje fijo, en un lugar fuera de riesgos de incendios, sitios húmedos o con mucho polvo.
4. Se puede emplear el monitor y control únicamente para obtener un mejor control del consumo de energía dado que no sustituye el medidor que coloca la empresa suministradora de energía.

BIBLIOGRAFÍA

1. COOPER, W. D.; HELFRICK, Albert D. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1991. 460 p.
2. *Conversión analógica-digital, digitalización de la señal*. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Conversi%C3%B3n_anal%C3%B3gica_a_digital> [Consulta: 20 de marzo de 2014].
3. FAIRES, J, Douglas.; BURDEN, Richard L. *Análisis numérico*. 7a ed. México: Thomson Learning, 2007. 850 p.
4. *Interruptores electrodinámicos*. [en línea]. <<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1741>> [Consulta: 5 de marzo de 2014].
5. *Patrones nacionales*. [en línea]. <http://www.inti.gob.ar/patrones_nacionales/> [Consulta: 07 de marzo de 2014].
6. RAVINDRANATH, B.; CHANDER, M. *Protección de sistemas de potencia e interruptores*. México. Limusa, 1980. 590 p.
7. VAN VALKENBURG, M.E. *Análisis de redes*. México: Limusa, 1999. 639 p.

ANEXOS

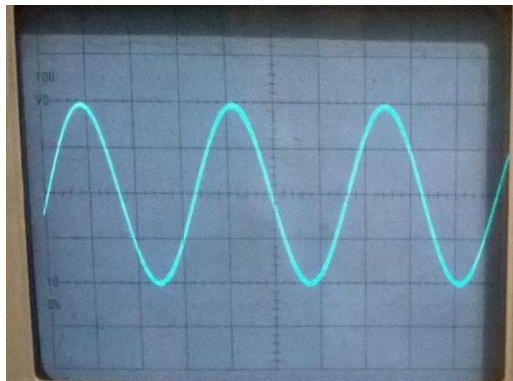
Las siguientes imágenes son obtenidas de un osciloscopio BK PRECISION 2190B de 100Mhz.

Señal de voltaje obtenida a la salida del módulo para medir voltaje



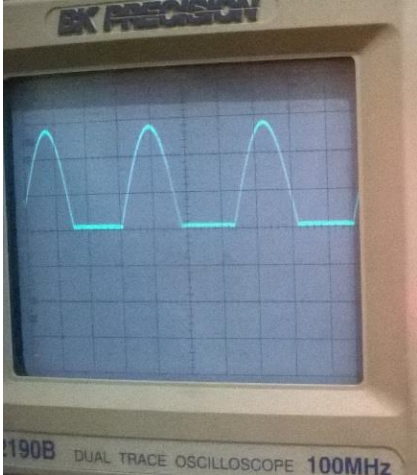
Fuente: elaboración propia, señal obtenida desde el módulo para medir voltaje.

Señal de voltaje obtenida a la salida del filtro



Fuente: elaboración propia, señal obtenida desde filtro pasa bajo.

Señal de voltaje obtenida a la salida del amplificador de voltaje



Fuente: elaboración propia

Parámetros empleados para la medición



Fuente: elaboración propia, ajustes colocados en osciloscopio.

Las siguientes imágenes muestran la programación empleada para el microcontrolador.

Configuración de registros

```
' ***** Cuerpo del programa *****  
main:  
LATA = 0x00  
LATB = 0x00  
LATC = 0x00  
LATD = 0x00  
LATE = 0x00  
TRISA =0x0F  
TRISB =0xFF  
TRISC =0x80  
TRISD =0x00  
TRISE =0x00  
INTCON = 0xE0  
RCON.IPEN = 0 'Disable priority interrupt  
TOCON = 0x07  
TICON = 0x64  
ADCON1 = 0x0B 'AN1, 2, 3, 4,  
CMCON = 0x3E  
CVRCON = 0xA7
```

Fuente: elaboración propia.

Método de Simpson

```
for j=0 to 9  
    Ve[20]=Ve[20]+2*Ve[2*j]+4*Ve[2*j+1]  
    Ie[20]=Ie[20]+2*Ie[2*j]+4*Ie[2*j+1]  
next j  
volt=Ve[20]/60  
amps=Ie[20]/60
```

Fuente: elaboración propia.

Código HTML que se presenta al usuario

```
<html>
  <head>
    <meta http-equiv="content-type" content="text/html; charset=windows-1252"></meta>
    <title>MONITOR V141129</title>
  </head>
  <body onload="TimedRefresh(10000);">
    <script src="MONITOR%20V141129_files/s.txt"></script>
    <fieldset style="width: auto; background-color: green;">
      <div align="left">
        <h3>MONITOR DE LINEA</h3>
        <table bordercolor="#999999" border="6">...</table>
      </div>
      <div align="left">
        <h3>GESTION ID</h3>
        <form action="" method="get">...</form>
      </div>
      <script>

        var volt=(b0*180*Math.PI)/(1023*2*Math.SQRT2);
        var amps=(b1*180*Math.PI)/(1023*2*Math.SQRT2);
        document.getElementById('vt').innerHTML = volt.toFixed(1);
        document.getElementById('it').innerHTML = amps.toFixed(4);
        document.getElementById('wt').innerHTML =
        (volt*amps/1000).toFixed(3);
        document.getElementById('af').innerHTML = fp*3;
        function TimedRefresh(t){setTimeout('window.location.assign
        ("/")',t);}
        function ipDir(){up=prompt('Ip a cambiar:\n'+cad,'');
        if(up!=null){document.write('<a href=/i='+up+'>APLICAR
        CAMBIO</a>');
        cad=up;
        }
        else alert('Sin Cambio IP');}
      </script>
    </body>
</html>
```

Fuente: elaboración propia. Captura obtenida desde DOM explorer.