

"Versión Definitiva"



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

SENSOR OPTOELECTRÓNICO PARA LA CORRECCIÓN AUTOMÁTICA DEL FACTOR DE POTENCIA EN EQUIPOS DE INDUCCIÓN



COMO REQUERIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN
DEL GRADO DE
MAESTRO EN OPTOMECASTRONICA

Asesor: Mtro. Ricardo Valdivia Hernández

Estudiante: Ing. Eliecer Acosta Conyedo.

Abril del 2019

León, Guanajuato, México

DEDICADO A:

"Dedico esta tesis a todos mis seres amados: mis padres mi esposa y toda mi familia porque me han inspirado e impulsado a seguir adelante para realizar cada uno de mis sueños y alcanzar todas mis metas."

Agradecimientos:

Quiero agradecer ante todo al Conacyt (número de becario 611340) por el apoyo que recibí durante la etapa de mi maestría (número de apoyo 452664), lo cual fue muy importante para poder desarrollar mi investigación. Por otro lado, quiero resaltar el gran apoyo que recibí de parte de mi asesor Mtro. Ricardo Valdivia Hernández, quién me dirigió e instruyó para lograr desarrollar mi investigación exitosamente. También quiero agradecer a mi adorada madre por darme toda la fuerza para seguir siempre adelante y a mi esposa por amarme y apoyarme incondicionalmente.

Por otro lado, quiero agradecer al CIO porque me dio la oportunidad única de ser estudiante de uno de sus postgrados, lo cual me hace sentir muy orgulloso, ya que este centro tiene alto prestigio nacional e internacionalmente. El CIO marcó una pauta en mi superación personal, porque me permitió avanzar profesionalmente y me incrementó la necesidad de seguir superándome. Extiendo además mi agradecimiento a todos mis profesores porque a través de sus enseñanzas y exigencias, me ayudaron a adquirir los conocimientos necesarios para lograr desarrollar mi investigación.

Además, quiero agradecer a mis compañeros de clases y a todas las personas que directa e indirectamente me apoyaron durante toda la etapa de mi maestría, así como en el desarrollo de mi proyecto de tesis.

Resumen

El presente trabajo describe el diseño y la construcción de un sistema para la corrección automática del Factor de Potencia en equipos de inducción, para uso doméstico o en pequeños negocios.

La necesidad de descubrir nuevas fuentes de energía es cada vez más común, en cuanto al desarrollo de la sociedad, pero casi nunca nos damos cuenta que estamos desperdiciando gran parte de la energía eléctrica generada a diario, debido al rezagado Factor de Potencia en las cargas inductivas, por lo que se hace necesario reducir este desperdicio de energía. El Factor de Potencia (FP), indica que tan eficiente se está utilizando la energía eléctrica, el valor máximo de éste es la unidad, por lo tanto, mientras más cercano esté el valor del Factor de Potencia a la unidad, más eficiente será el uso de la energía eléctrica, indicando que toda o gran parte de la energía consumida se ha convertido en trabajo y las pérdidas son menores.

En términos eléctricos, el Factor de Potencia se define como la relación entre la energía activa y la energía reactiva, o también como la diferencia de fase entre la tensión y la corriente. Todas las máquinas eléctricas que operan en sistemas de corriente alterna (AC), son equipos formados por combinaciones de resistencia e inductancia, por lo que el consumo de energía se divide en Potencia Activa (P) y Potencia Reactiva (Q). Las magnitudes de estas potencias determinan a su vez la Potencia Aparente (S), la cual es la base para el dimensionamiento de los alimentadores y cableados.

La Potencia Activa es la que se puede aprovechar en el proceso de transformación como trabajo mecánico y calor. Para que esto suceda es necesario establecer campos magnéticos en las máquinas eléctricas. Estos campos están asociados de forma directa con la energía reactiva, por lo que la mayoría de los equipos de inducción que utilizamos tienen un (FP) mucho menor a la unidad, esto trae como consecuencia que tengamos que buscar métodos eficientes para acercar este factor a la unidad. Este informe propone un prototipo de bajo costo y fácil construcción para la corrección automática del Factor de Potencia, mediante el uso de bancos de condensadores conectados en paralelo con la carga, para reducir el consumo de energía reactiva y las pérdidas del sistema. Los bancos capacitivos llevan años de uso para la corrección del Factor de Potencia en redes monofásicas. En este trabajo se pretende optimizar el uso de los bancos capacitivos mediante un sistema de control basado en microprocesador. De esta manera se puede lograr que el propio sistema sea el responsable de la activación y desactivación de los bancos, siempre que sea necesario, en dependencia de la variación del Factor de Potencia en la carga.

Después de las pruebas realizadas se concluye que, el control inteligente implementado en el sistema garantiza el uso óptimo de los condensadores y minimiza el número de operaciones de conmutación. De esta manera evitamos que armónicos no deseados

puedan dañar equipos y se optimiza la corrección de Factor de Potencia en relación al banco capacitivo conectado al sistema.

Índice General

| | |
|--|-----|
| i | |
| DEDICADO A:..... | ii |
| Agradecimientos:..... | iii |
| Resumen..... | iv |
| Índice General..... | vi |
| Índice de Figuras..... | ix |
| Índice de Tablas..... | xi |
| Capítulo 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1. Objetivos de la Tesis..... | 1 |
| 1.2. Planteamiento del Problema..... | 1 |
| 1.3. Antecedentes..... | 2 |
| 1.3.1. Compensación Individual..... | 2 |
| 1.3.2. Compensación Parcial..... | 3 |
| 1.3.3. Compensación General..... | 4 |
| 1.3.4. Sensores comerciales para la corrección del Factor de Potencia..... | 6 |
| 1.4. Organización de la tesis..... | 6 |
| Capítulo 2 Fundamento Teórico..... | 8 |
| 2.1. Introducción..... | 8 |
| 2.2. Máquinas Eléctricas..... | 8 |
| 2.3. Respuesta de Inductores, Capacitores y Resistencias ante corriente alterna..... | 9 |
| 2.3.1. Inductor..... | 9 |
| 2.3.2. Capacitor..... | 10 |
| 2.3.3. Resistor..... | 11 |
| 2.4. Potencia en Corriente Alterna..... | 12 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.4.1. | Potencia Activa | 13 |
| 2.4.2. | Potencia Reactiva | 13 |
| 2.4.3. | Potencia Aparente..... | 14 |
| 2.5. | Factor de Potencia | 15 |
| 2.5.1. | Inconvenientes de un bajo Factor de Potencia..... | 15 |
| 2.5.2. | Corrección del Factor de Potencia | 16 |
| 2.5.3. | Efectos negativos de la compensación mediante bancos capacitivos.... | 18 |
| Capítulo 3 Teoría de Dispositivos y Sensores para el Desarrollo del Prototipo. | | 20 |
| 3.1. | Introducción. | 20 |
| 3.2. | Acondicionamiento de señal | 20 |
| 3.2.1. | Fundamentos de Acondicionamiento de Señales..... | 20 |
| 3.3. | Tipos de sensor de Corriente | 21 |
| 3.3.1. | Sensor de Corriente Resistivo..... | 22 |
| 3.3.2. | Transformador de corriente (TC)..... | 23 |
| 3.3.3. | Bobina de Rogowski..... | 24 |
| 3.3.4. | Sensor de Efecto Hall..... | 25 |
| 3.4. | Circuitos para la medición de energía | 26 |
| 3.4.1. | ADE7756 Analog Devices | 27 |
| 3.4.2. | CS5463 Cirrus Logic | 28 |
| 3.5. | Microcontrolador (μ C) | 30 |
| 3.6. | Actuadores..... | 30 |
| 3.6.1. | Relevadores electro-mecánicos | 30 |
| 3.6.2. | Relevador de Estado Sólido (SSR) | 32 |
| Capítulo 4 Diseño del Prototipo | | 35 |
| 4.1. | Introducción | 35 |
| 4.2. | Fuente de Alimentación | 36 |

| | |
|---|----|
| 4.3. Medidor de energía CS5463 | 37 |
| 4.4. Acondicionamiento de señal de voltaje | 41 |
| 4.5. Acondicionamiento de señal de corriente..... | 42 |
| 4.6. Microcontrolador | 44 |
| 4.7. Control de los bancos | 47 |
| Capítulo 5 Resultados | 49 |
| 5.1. Introducción | 49 |
| 5.2. Fabricación del dispositivo | 49 |
| 5.3. Pruebas del prototipo. | 51 |
| 5.4. Conclusiones del Capítulo. | 56 |
| Conclusiones | 57 |
| Bibliografía | 58 |

Índice de Figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de Compensación Individual..... | 3 |
| Figura 2. Esquema de Compensación Parcial. | 4 |
| Figura 3. Esquema de Compensación General. | 5 |
| Figura 4 a) Controlador automático de FP (VPL06N) b) Controlador automático de FP (YXM 176C) | 6 |
| Figura 5. Forma de onda de V e I para un inductor ante AC..... | 10 |
| Figura 6. Forma de Onda de V e I para un capacitor ante AC. | 11 |
| Figura 7. Forma de Onda de V e I para un Resistor ante AC | 12 |
| Figura 8. Grafica de Voltaje, Corriente y Potencia con una carga resistiva pura..... | 13 |
| Figura 9. Grafica de Voltaje, Corriente y Potencia con una carga reactiva pura. | 14 |
| Figura 10 Triángulo de potencia | 15 |
| Figura 11 Efecto da la corrección en el triángulo de potencia..... | 17 |
| Figura 12: Conexión de la Resistencia de derivación o Shunt en un circuito | 22 |
| Figura 13: Transformador de Corriente TC..... | 23 |
| Figura 14 Bobina De Rogowski | 24 |
| Figura 15: Bobina de Rogowski serie 855- Instalación Rápida | 25 |
| Figura 16 Comportamiento de los portadores de carga en ausencia de campo magnético externo | 25 |
| Figura 17: Comportamiento de portadores de carga en presencia de un campo magnético externo | 26 |
| Figura 18: Diagrama en bloque del ADE7756..... | 27 |
| Figura 19: Diagrama en bloque del CS5463 | 28 |
| Figura 20: Flujo de datos para la medición de los canales de Voltaje y Corriente | 29 |
| Figura 21: Algoritmo para el cálculo de potencia | 29 |
| Figura 22: Diagrama de un Relevador electro-mecánico | 31 |
| Figura 23: Representación eléctrica de un relevador electro-mecánico..... | 31 |
| Figura 24: Elementos Opto-aislados..... | 32 |
| Figura 25: Diagrama en bloque del prototipo | 35 |
| Figura 26: Fuente de alimentación..... | 36 |
| Figura 27: Circuito implementado para el uso del CS5463 | 38 |
| Figura 28: Acondicionamiento de la señal de voltaje | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 29: Señal a la salida del sensor con amplitud de 250mV por división | 42 |
| Figura 30: Forma de onda a la salida del capacitor con amplitud de 66.25mV por división | 43 |
| Figura 31: Circuito de acondicionamiento de la señal de corriente | 44 |
| Figura 32: Configuración de los pines del Atmega328P tomado de [35]..... | 45 |
| Figura 33: Diagrama de flujo para la corrección automática del Factor de Potencia.. | 46 |
| Figura 34: Circuito de control de los bancos capacitivos | 47 |
| Figura 35: Formas de Onda en la carga y el generador, con el disparo del triac | 48 |
| Figura 36: Diseño de la tarjeta de control del prototipo en Proteus 8..... | 50 |
| Figura 37: a) Circuito para montaje superficial del CS5463 b) circuito de potencia para el control de los bancos | 50 |
| Figura 38: Prototipo Ensamblado | 51 |
| Figura 39: Descripción del analizador de redes EXTECH 380801 tomado de [38] | 51 |
| Figura 40: Valores de energía para el caudín obtenidos por el analizador de redes.... | 52 |
| Figura 41: Valores de energía para la lámpara obtenidos por el analizador de redes | 52 |
| Figura 42: Parámetros de energía para el caudín medidos con el prototipo | 53 |
| Figura 43: Parámetros de energía para la lámpara medidos con el prototipo | 53 |
| Figura 44: Valores de energía para el motor obtenido por el analizador de redes | 53 |
| Figura 45: Valores de energía para la Bomba de Vacío obtenido por el analizador de redes | 54 |
| Figura 46: Mediciones con el Factor de Potencia corregido mediante el prototipo del sensor..... | 55 |
| Figura 47: Mediciones con el Factor de Potencia corregido mediante el prototipo del sensor..... | 55 |

Índice de Tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Tabla de Consumos | 36 |
| Tabla 2: Descripción de los pines del Integrado CS5463..... | 38 |
| Tabla 3: Características del Atmega 328P, tomado de [35] | 45 |
| Tabla 4: Componentes y Costos..... | 49 |
| Tabla 5: Análisis de parámetros eléctricos con EXTECH 380801 | 52 |
| Tabla 6: Tabla de bancos capacitivos conectados al prototipo | 54 |
| Tabla 7: Consumo de equipos con Factor de Potencia corregido | 56 |

Capítulo 1 Introducción

1.1. Objetivos de la Tesis

El objetivo general del presente trabajo se basa fundamentalmente en el desarrollo de un sistema para la corrección automática del Factor de Potencia en equipos de inducción.

Para ello se desglosa el proyecto en los siguientes objetivos específicos:

- Revisar las causas que dan origen a pérdidas de la potencia eléctrica.
- Revisar las técnicas implementadas hasta el momento y realizar un análisis comparativo
- Implementar un prototipo capaz de corregir el bajo Factor de Potencia en equipos de inducción de manera automática.

1.2. Planteamiento del Problema

La eficiencia energética es de primordial importancia para las empresas industriales y comerciales que operan en los de mercados competitivos de hoy, así como para la economía del hombre común. En la actualidad el ser humano ha buscado la manera más eficiente para transmitir la corriente eléctrica. Para reducir el menor número de perdidas lo más posible, se ha enfocado en el desarrollo de equipos de bajo consumo eléctrico y alta eficiencia energética, buscando de cierto modo el uso óptimo de las plantas de generación de energía y equipos eléctricos por razones económicas y ambientales.

A medida que la sociedad se vuelve más consciente de su impacto en el medio ambiente, el consumo reducido de energía es más deseable. Esto representa un objetivo alcanzable para todos. Una de las variantes para contribuir al ahorro de energía es mediante la corrección del Factor de Potencia, a través de la cual se puede optimizar el consumo de electricidad, principalmente en equipos con principio de funcionamiento electromagnético.

Como resultado final del proyecto de tesis, se plantea la utilización del prototipo para mantener un Factor de Potencia cercano a la unidad, en un valor promedio del 0.96, para contribuir al ahorro energético y cuidado del medio ambiente.

1.3. Antecedentes

La crisis en la generación y distribución energética trae como consecuencia una readecuación de las tarifas eléctricas. En México la empresa encargada de la distribución de energía es la Comisión Federal de Electricidad (CFE), este organismo penaliza a los usuarios industriales que tengan un Factor de Potencia menor que 0.9 o 90% con un cargo máximo del 120% (ciento veinte por ciento) del valor de su factura y bonifica a aquellos usuarios con un Factor de Potencia por encima del 90% con un máximo del 2.5% (dos punto cinco por ciento) [1]. Para la economía del usuario es gratificante mantener un Factor de Potencia mayor al 90%, ya que será bonificado por un buen uso de algo tan cotidiano y necesario como la energía eléctrica. La finalidad de la corrección del Factor de Potencia está en reducir o eliminar el costo de energía reactiva en la facturación, los métodos utilizados consisten en compensaciones a través de bancos capacitivos. La compensación puede ser General, Parcial (por sectores), o Local (Individual) [2] [3]. De manera convencional se emplea un medidor de desfase para detectar el desplazamiento entre la onda de corriente y tensión, el cual es ocasionado por la carga. Una parte lógica determina la secuencia considerando si es necesario la adición o sustracción de capacitores a través de contactores. Existen empresas dedicadas a desarrollar este tipo de dispositivos inteligentes como son ABB, Schneider Electric, Vemac, pero el elevado costo del producto lo hace inaccesible para miles de usuarios como pequeñas y medianas empresas.

1.3.1. Compensación Individual

Es el caso más simple de compensación, se instala un condensador de tamaño apropiado en paralelo con cada consumidor con carácter inductivo de manera individual, véase en la Figura 1. La energía reactiva queda confinada entre el condensador y la carga, eliminando de esta manera por completo la carga adicional en el cableado, incluido el cable que alimenta al consumidor compensado, reduciendo las penalizaciones por exceso de consumo de Potencia Reactiva

Este sistema es ideal para las aplicaciones de funcionamiento en ciclo continuo y cuyo consumo de energía reactiva es considerable. Ejemplo de esto es principalmente motores eléctricos y transformadores, en cargas con cables de alimentación largos o con conductores cuya sección transversal no permitan margen de error. Sin embargo, aunque esta configuración está recomendada para estos casos también presenta algún inconveniente como:

- ❖ El costo de varios condensadores por separados es mayor que el de uno equivalente.
- ❖ En equipos que no son utilizados con frecuencia el condensador quedaría subutilizado.
- ❖ No siempre es fácil instalar los condensadores directamente adyacentes a las máquinas que se compensan por limitaciones de espacio y costos de instalación.

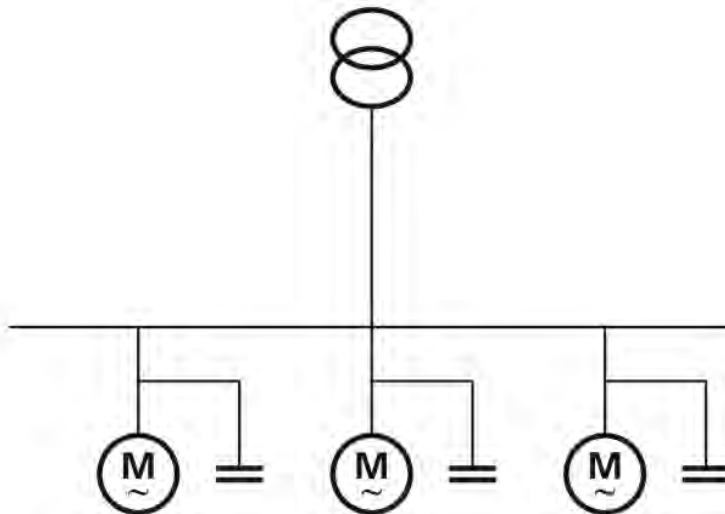


Figura 1. Esquema de Compensación Individual

1.3.2. Compensación Parcial

La configuración se recomienda cuando un grupo de cargas, ya sean iguales o diferentes, se conectan simultáneamente y demandan una cantidad constante de energía reactiva. En máquinas eléctricas que comparten el mismo ciclo de trabajo, se pueden combinar como un grupo y compartir de esta manera el banco de compensación, véase en la Figura 2. Por lo tanto, se puede instalar una unidad de compensación conjunta del tamaño apropiado, en lugar de condensadores pequeños de manera individual.

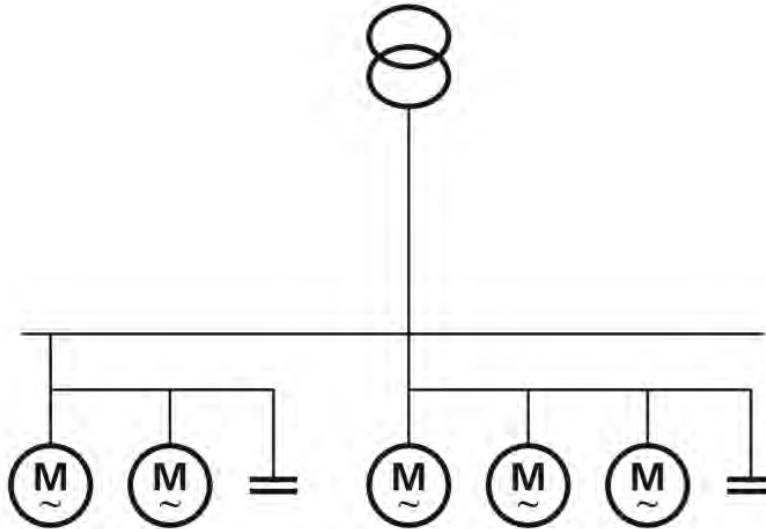


Figura 2. Esquema de Compensación Parcial.

A continuación, se muestran algunas de las ventajas que presenta esta configuración:

- ❖ La batería de condensadores puede ser instalada en el centro de control de las cargas
- ❖ El costo de los condensadores y la instalación es menor en comparación al costo de la compensación individual
- ❖ Se elimina la Potencia Reactiva de las líneas de distribución secundarias
- ❖ Los condensadores sólo se utilizan cuando las cargas trabajan.

Una de las desventajas que se presentan es que, en las líneas de compensación, siguen apareciendo potencias reactivas entre las cargas y el centro de control de los motores. Además, esta configuración sólo se puede usar para compensar grupos de cargas.

1.3.3. Compensación General

Este sistema cubre la demanda total de Potencia Reactiva. El banco capacitivo para la compensación se instala en el ducto principal de distribución de energía, véase en la Figura 3. Esto trae consigo la necesidad de dividir la capacitancia en secciones o escalones y conectar o desconectar de manera automática cada una de ellas en

dependencia de la demanda del sistema. Este método es usado hoy en día en un gran número de instalaciones.

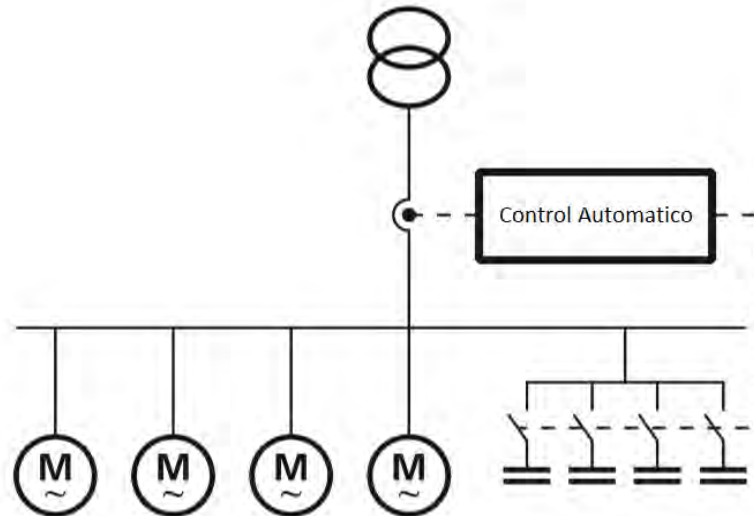


Figura 3. Esquema de Compensación General.

Gracias a los modernos sistemas de control de Potencia Reactiva que permiten el continuo control del estado de los bancos capacitivos, y monitoreo constante de variables como $\cos(\varphi)$, armónicos, corrientes activas y reactivas, el sistema de compensación general es fácil de monitorear

Las capacitancias totales instaladas para esta aplicación suelen ser menores que en las demás configuraciones, ya que el factor de coincidencia de los equipos instalados puede ser tomado en cuenta para el diseño del sistema.

Algunas de las ventajas que presenta el uso de esta configuración son las siguientes:

- ❖ Mayor aprovechamiento de la capacidad de los condensadores.
- ❖ Mejor regulación de voltaje en el sistema eléctrico.
- ❖ Adecuación de los bancos de condensadores según el requerimiento del sistema.
- ❖ Instalación relativamente simple con respecto a las demás configuraciones
- ❖ Menor capacitancia general, si se tiene en cuenta el factor de coincidencia

Entre las desventajas que se pueden encontrar está el aumento del costo por parte del sistema automático utilizado para el control de los bancos capacitivos. Además, las líneas de distribución en esta configuración no son descargadas de la Potencia Reactiva.

1.3.4. Sensores comerciales para la corrección del Factor de Potencia

En el mercado actual existen una serie de dispositivos comerciales que se utilizan para la corrección del Factor de Potencia. Entre los fabricantes más confiables se encuentra ABB y Schneider Electric, los cuales proporcionan todos los elementos para el sistema de compensación, desde el sensor hasta los bancos capacitivos necesarios para la corrección. También existe una serie de empresas que se dedican a brindar servicios para la mejora continua de los indicadores de energía como es el caso de Vogar [4].



Figura 4 a) Controlador automático de FP (VPL06N) b) Controlador automático de FP (YXM 176C)

Los dispositivos mostrados en la Figura 4, monitorean de manera continua el Factor de Potencia en la red eléctrica a la cual están conectados, y a través de la conexión o desconexión de bancos capacitivos son capaces de controlar dicho parámetro.

1.4. Organización de la tesis.

El capítulo 1 muestra una revisión del estado del arte, relacionado con las principales técnicas de compensación del Factor de Potencia y un nuevo enfoque para abordar el problema de la corrección. El capítulo 2 presenta los fundamentos teóricos, así como una revisión de las principales causas por la que se ve afectado el Factor de Potencia y las afectaciones que este implica en la red eléctrica. El capítulo 3 estará referido a una breve explicación acerca de la teoría de los sensores y dispositivos que

se verán involucrado en el prototipo, para de esta manera hacer la selección de los más adecuados para el proyecto. En el capítulo 4 se llevará a cabo el desarrollo del prototipo, así como las simulaciones correspondientes para las señales a medir. El capítulo 5 mostrará los resultados experimentales y un análisis comparativo de los mismos.

Capítulo 2 Fundamento Teórico

2.1. Introducción.

En este capítulo se presenta el concepto teórico de Factor de Potencia, así como las razones por las que puede afectarse. Se realiza un análisis del comportamiento de los equipos conectados a la red eléctrica, los cuales pueden tener carácter inductivo, capacitivo o resistivo. También, se hace una descripción de los efectos negativos de un bajo Factor de Potencia. Finalmente, se analizan los dos métodos que pueden emplearse para corregirlo, de modo que permita mejorar el rendimiento en las instalaciones eléctricas y evitar el pago de cantidades suplementarias en la facturación.

2.2. Máquinas Eléctricas.

En la actualidad es conocido que las máquinas eléctricas se fundamentan en el principio del campo giratorio. El surgimiento de estas máquinas tuvo un antecedente teórico inicial en el año 1885 con Galileo Ferraris en la universidad de Turín. Sin embargo, los primeros motores de inducción, con diseños cercanos a los motores de corriente alterna actuales fueron presentados en 1887 y 1889 por Nikola Tesla y Von Dolivo-Dobrowolsky respectivamente.

Las máquinas eléctricas son básicamente convertidores de potencia que funcionan transformando energía eléctrica en mecánica o energía mecánica en eléctrica, a través de la generación de campos magnéticos [5] [6]. Los dispositivos que convierten energía mecánica en eléctrica son denominados generadores y los que convierten la energía eléctrica en mecánica son los llamados motores. También existen las máquinas que convierten la energía eléctrica en eléctrica y son denominadas transformadores. Por esta razón todas las máquinas eléctricas cuentan con un núcleo ferromagnético y un bobinado con carácter inductivo, para lograr la generación de campos electromagnéticos para su funcionamiento.

2.3. Respuesta de Inductores, Capacitores y Resistencias ante corriente alterna (AC).

2.3.1. Inductor.

Los inductores son bobinas de diversas dimensiones, diseñadas para introducir cantidades específicas de inductancia dentro de un circuito. Son elementos capaces de almacenar energía magnética. La inductancia de la bobina varía directamente con las propiedades magnéticas de ésta y se mide en Henrios (H) , por ende, se emplean con frecuencia materiales ferromagnéticos que incrementan la inductancia mediante el aumento de la permeabilidad del inductor [7].

Cuando el inductor trabaja bajo un régimen de corriente continua (DC) constante éste se comporta como un corto circuito, permitiendo el paso de la corriente y el voltaje en fase. Sin embargo al trabajar ante corriente alterna (AC), el inductor se opone al paso de la corriente retrasando ésta 90° [8], con respecto al voltaje, véase en la Figura 5.

Para realizar el análisis del comportamiento del inductor ante corriente alterna, si se conoce que el voltaje en el inductor se calcula a través de la siguiente ecuación (1):

$$v_l = L \frac{di_L}{dt}, \quad (1)$$

donde se observa que el voltaje en el inductor es proporcional al cambio de la corriente que pasa por éste y la corriente en el inductor está dada por:

$$i_L = I_m \text{ sen}(\omega t). \quad (2)$$

Sustituyendo 2 en 1 se obtiene:

$$v_l = L \frac{di_L}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t), \quad (3)$$

o bien que:

$$v_l = L\omega I_m \text{ sen}(\omega t + 90^\circ). \quad (4)$$

Por lo tanto, para una onda senoidal se incluye el ángulo de fase en la ecuación (2), quedando la expresión anterior de la siguiente manera:

$$v_l = \omega L I_m \text{ sen}(\omega t \pm \Phi + 90^\circ) \quad (5)$$

El valor (ωL) , se conoce como reactancia de un inductor y se representa por (X_L) , la reactancia inductiva es la capacidad que tiene el inductor de oponerse al flujo de la corriente o al cambio instantáneo de la misma, y es la causante del intercambio continuo de energía entre la fuente y el campo magnético del inductor.

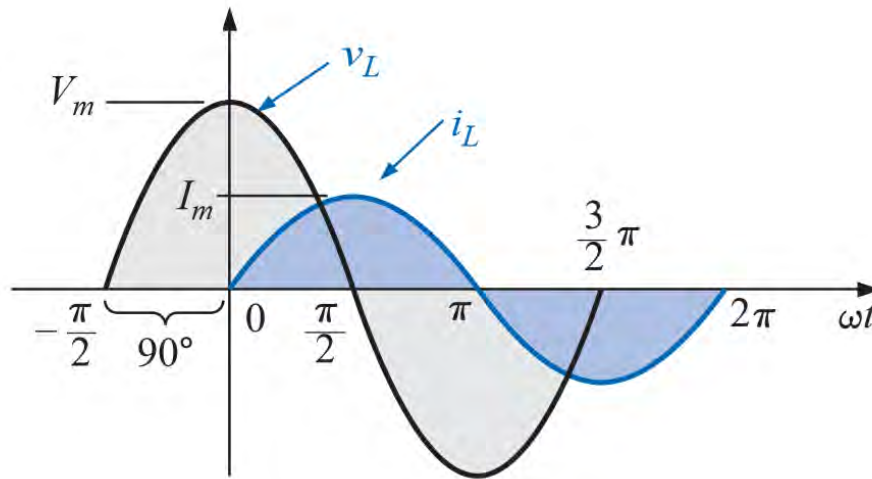


Figura 5. Forma de onda de V e I para un inductor ante AC.

2.3.2. Capacitor.

Un capacitor o condensador es un elemento construido con dos placas conductoras paralelas separadas por un dieléctrico. Este dispositivo tiene la cualidad de almacenar energía eléctrica y la medida de esta cualidad de almacenamiento se denomina capacitancia, cuyas unidades se expresan en Faradios (F), en honor al físico-químico inglés Faraday que lo descubrió [9].

Cuando el capacitor trabaja ante corriente directa, éste se comporta como un circuito abierto, al analizar su comportamiento ante señal o corriente alterna se nota que para un elemento capacitivo puro, la corriente se adelanta al voltaje 90° [8], véase en la Figura 6.

Al igual que con el inductor, el resultado de la figura se obtiene a partir del análisis del capacitor ante corriente alterna. Si se conoce que la corriente en el capacitor está dada por la expresión:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (6)$$

y el voltaje es

$$v_c = V_m \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

Sustituyendo (7) en (6) se tiene:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} = C \omega V_m \cos(\omega t) \quad (8)$$

o bien se puede expresar que:

$$i_c = C\omega V_m \text{sen}(\omega t + 90) \quad (9)$$

Al incluir el ángulo de fase en la ecuación (7) se tiene:

$$i_c = C\omega V_m \text{sen}(\omega t \pm \Phi + 90) \quad (10)$$

Un parámetro importante es la reactancia capacitiva, se expresa como X_c , y representa la capacidad del capacitor a oponerse al flujo de carga, y está dada por el intercambio continuo del flujo de energía entre la fuente y el campo eléctrico del capacitor

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

Donde $\omega = 2\pi f$ y C es el valor del capacitor en faradios.

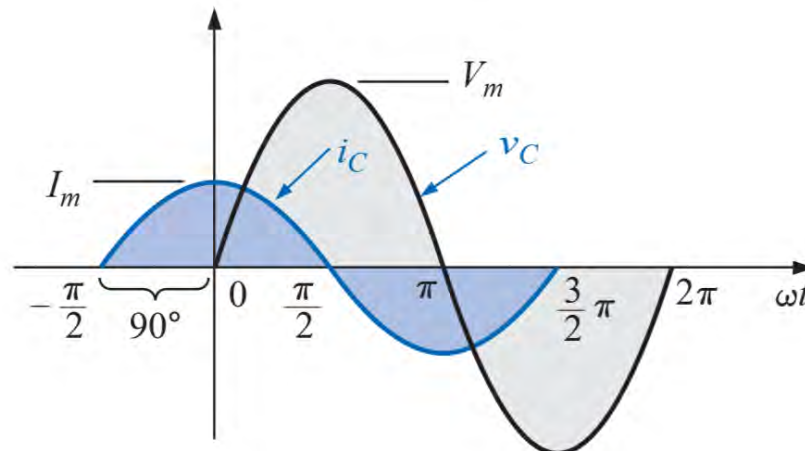


Figura 6. Forma de Onda de V e I para un capacitor ante AC.

2.3.3. Resistor.

Los componentes diseñados para tener cierta cantidad de resistencia entre sus terminales se llaman resistores. Son usados principalmente para limitar la corriente en un circuito, como divisor de voltaje y en ciertos casos para general calor. El valor de resistencia se expresa en Ohms y se identifica por la letra griega omega (Ω).

El resistor muestra el mismo comportamiento cuando trabaja en corriente alterna (AC) o corriente directa (DC), ya que no es un componente que se pueda ver afectado por la frecuencia del voltaje o la corriente senoidal que se le aplica. El resistor se puede

manejar como una constante (R), por lo que se puede aplicar directamente la ley de Ohm para una señal senoidal, donde el voltaje es expresado de la siguiente manera

$$v = V_m \text{sen}(\omega t), \quad (12)$$

y la corriente es

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_m \text{sen}(\omega t)}{R} = I_m \text{sen}(\omega t). \quad (13)$$

Haciendo uso de la ley de Ohm, tenemos que:

$$V_m = I_m R \quad (14)$$

Donde se puede observar que para un elemento resistivo puro la corriente y el voltaje que circulan a través del elemento se encuentran en fase, y sus valores picos están relacionados mediante la ley de Ohm.

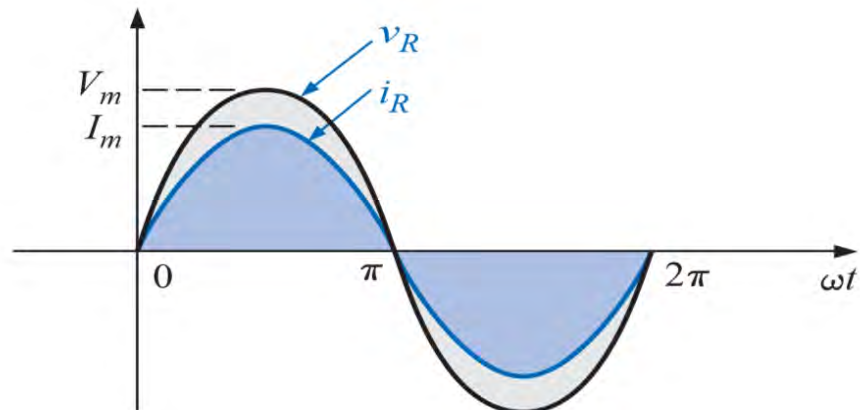


Figura 7. Forma de Onda de V e I para un Resistor ante AC

2.4. Potencia en Corriente Alterna

Para todo sistema, la Potencia entregada a la carga en cualquier instante (Potencia Instantánea), está definida por el producto del voltaje aplicado y la corriente resultante. Esto está descrito por la siguiente ecuación:

$$P = v * i. \quad (15)$$

Para el análisis ante corriente alterna v e i son magnitudes senoidales por lo que cada expresión puede escribirse como:

$$v = V_m \cos(\omega t + \varphi_v), \quad (16)$$

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi_i), \quad (17)$$

donde V_m e I_m son las amplitudes y φ son los ángulos de fase de la tensión y la corriente. Estas funciones de v e i seleccionadas cubren todos los casos vistos en la sección 2.3 (ya que si la carga es inductiva $\varphi = 90^\circ$, si es capacitiva $\varphi = -90^\circ$ y para una resistiva $\varphi = 0^\circ$).

2.4.1. Potencia Activa.

La Potencia Activa es la cantidad de energía útil que puede ser aprovechada en trabajo. Se define como el valor promedio de la Potencia Instantánea y se expresa por la letra (P), su valor se expresa en Watts (W) y se calcula por la ecuación siguiente:

$$P = V * I * \cos(\varphi), \quad (18)$$

donde V e I son los valores cuadráticos medios (rms por sus siglas en inglés) de tensión y corriente, siendo φ el ángulo de desfase entre ambas señales. En cargas resistivas puras donde el voltaje y la corriente están en fase, la curva de Potencia Activa (P) se calcula a partir del producto de los valores rms de tensión (V) y corriente (I). Esta curva tiene el doble de la frecuencia de la fuente de voltaje, y se encuentra en el área positiva de la gráfica, ya que el producto de los valores negativos de V e I es positivo [10] [11].

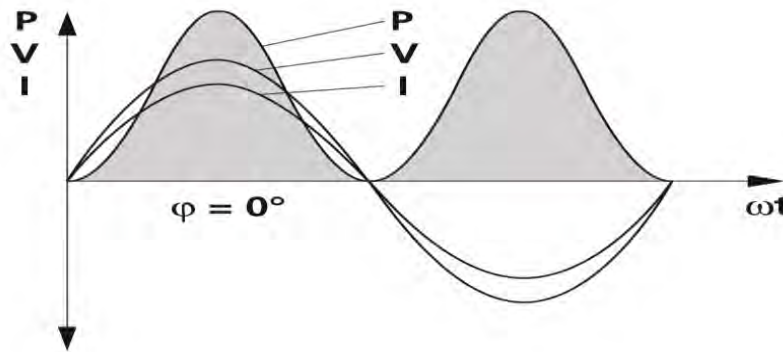


Figura 8. Gráfica de Voltaje, Corriente y Potencia con una carga resistiva pura.

2.4.2. Potencia Reactiva

La Potencia Reactiva es la Potencia que necesitan los inductores y condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos. Esta Potencia no se transforma en trabajo, sino que fluctúa en la red entre el generador y la carga. La Potencia Reactiva se representa por la letra (Q) y su valor se expresa en Volts-Amperes-Reactivos (VAR)

$$Q = V * I * \text{sen}(\Phi). \quad (19)$$

Si se considera una carga inductiva pura donde V e I , tienen un desfase de 90° , la Potencia puede alcanzar valores negativos que corresponden al momento en que la energía regresa al generador. La frecuencia de la Potencia es la misma que la de la fuente de alimentación, véase en la Figura 9, de manera que el campo magnético puede crecer y decrecer [10] [11].

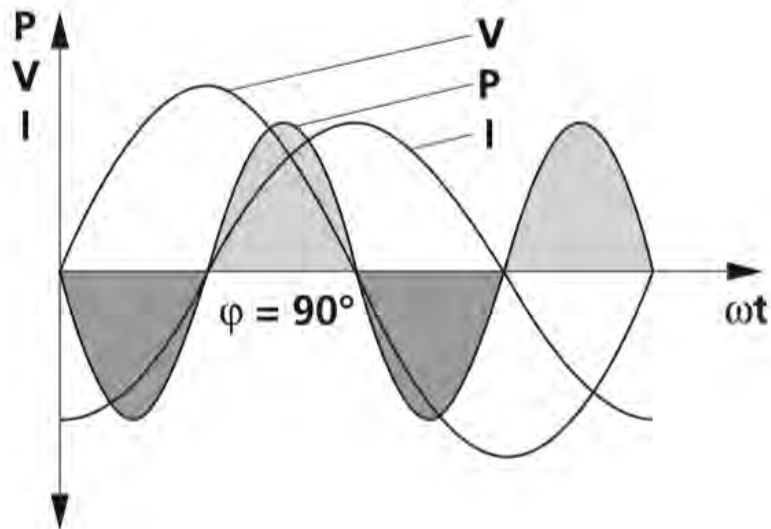


Figura 9. Grafica de Voltaje, Corriente y Potencia con una carga reactiva pura.

2.4.3. Potencia Aparente

La Potencia Aparente (S), es la Potencia total consumida por el sistema y es producto de los valores eficaces de voltaje y corriente de la ecuación (20). Ésta puede ser calculada como la suma vectorial de la Potencia Real y la Potencia Reactiva

$$S = V * I. \quad (20)$$

Esta Potencia es crítica para el diseño de las redes de energía eléctrica. Los generadores, transformadores, interruptores, fusibles, interruptores automáticos y secciones transversales del conductor deben estar dimensionados adecuadamente para la Potencia Aparente que resulta en el sistema [11] [10].

2.5. Factor de Potencia

Se denomina Factor de Potencia (FP), al coseno del ángulo de desplazamiento de fase entre la corriente y la tensión [12] [11] [10], también se define como el cociente entre la Potencia Activa y la Aparente de la red

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S}. \quad (21)$$

El Factor de Potencia es una medida de cuan eficiente se está utilizando la energía eléctrica en el sistema. Esto se puede visualizar a través del triángulo de Potencias de la Figura 10,

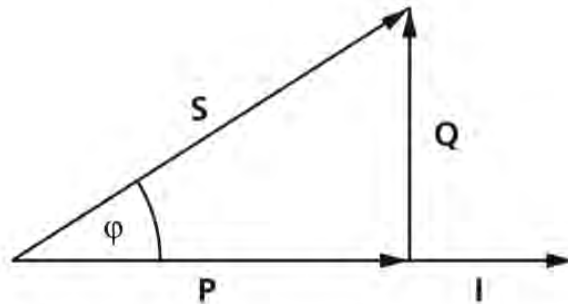


Figura 10 Triángulo de potencia

donde se observa que mientras mayor sea el ángulo φ , existirá mayor Potencia Reactiva Q y por ende mayor Potencia Aparente S. El Factor de Potencia ideal es cuando el ángulo $\varphi = 0$, ya que su coseno sería la unidad indicando que toda la Potencia entregada está siendo utilizada de manera óptima.

2.5.1. Inconvenientes de un bajo Factor de Potencia

Por lo descrito con anterioridad podemos decir que el Factor de Potencia es una medida de cuan eficiente es el sistema eléctrico, (demostrado por la relación entre la Potencia Activa y la Potencia Aparente en la ecuación (21)). El mantener una instalación eléctrica trabajando a un bajo Factor de Potencia (FP) es perjudicial ya que la corriente en la red se incrementa a medida que el $\cos(\varphi)$ disminuye. Como consecuencia de esto, para un bajo (FP) los transformadores y los cables de distribución pueden sobrecargarse, aumentando las pérdidas en ellos por efecto Joule [13] [14] en proporción con el cuadrado de la corriente. Otros factores a los que afecta el bajo FP son principalmente:

- ❖ Incremento en la caída de voltaje dando lugar al suministro inadecuado en las cargas.

- ❖ Incremento en la Potencia Aparente reduciendo la capacidad de carga instalada.
- ❖ Penalizaciones al usuario por parte del distribuidor de Energía Eléctrica.

2.5.2. Corrección del Factor de Potencia

La corrección del FP se realiza con el objetivo de mejorar el rendimiento en las instalaciones eléctricas y evitar el pago de cantidades suplementarias en la facturación. La corrección se puede hacer mediante el uso de condensadores, que compensen la cantidad de energía reactiva generada por las máquinas eléctricas o a través de máquinas síncronas.

2.5.2.1 Corrección con Máquinas Síncronas

Las máquinas síncronas son equipos eléctricos, en las que la velocidad de rotación está directamente vinculada con la frecuencia de la red a la cual están conectadas. Como cualquier otro convertidor electromagnético está sometido al principio de reciprocidad electromagnética, por lo que pueden funcionar como motor o generador. Sin embargo, en las instalaciones es más común que trabajen como generadores eléctricos, los cuales pueden ser utilizados para inyectar energía reactiva a la red eléctrica mejorando el (FP) [8]. Aunque este sistema es efectivo es poco común su uso en instalaciones para corrección del Factor de Potencia.

2.5.2.2 Corrección con Bancos Capacitivos

La corrección mediante bancos capacitivos consiste en la utilización de condensadores en paralelo con la carga para inyectar energía reactiva. Esto resulta una solución económica ya que implica un bajo costo, fácil manejo y mantenimiento casi inexistente.

El factor de corrección (Q_c), está dado por la cantidad de Potencia Reactiva que puede suministrar el capacitor Figura 11,

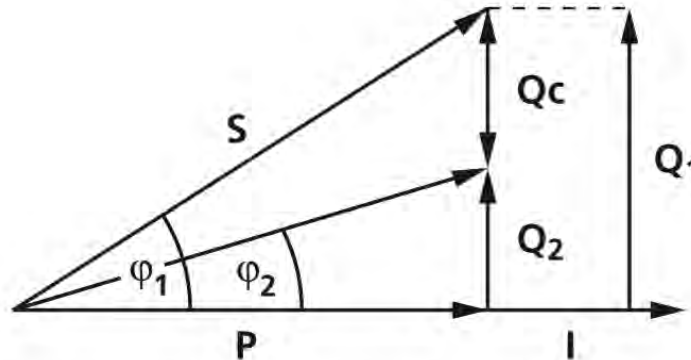


Figura 11 Efecto de la corrección en el triángulo de potencia

donde Q_c es la diferencia entre la Potencia Reactiva anterior Q_1 y la Potencia Reactiva deseada Q_2 ,

$$Q_c = Q_1 - Q_2. \quad (22)$$

Para calcular el valor del capacitor a utilizar es necesario plantearse un nuevo valor para el $\cos(\varphi)$ deseado φ_2 . Mediante la ecuación (21) se calcula la Potencia Aparente correspondiente al nuevo valor del FP

$$S = \frac{P}{\cos(\varphi_2)}. \quad (23)$$

Una vez obtenido el nuevo valor de S , a través del triángulo de potencia y haciendo uso del teorema de Pitágoras se obtiene el valor para Q_2

$$Q_2 = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (24)$$

Luego se puede calcular a través de la ecuación (22) el valor de Potencia Reactiva del capacitor Q_c [15]. Sustituyendo el mismo en la siguiente ecuación se puede calcular la reactancia capacitiva

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c}. \quad (25)$$

Con el valor obtenido de X_c y haciendo uso de la ecuación (11), se puede encontrar el valor del capacitor necesario para realizar la corrección del Factor de Potencia al valor previamente propuesto

$$C = \frac{1}{\omega X_c}. \quad (26)$$

De esta manera se pueden obtener los valores de los bancos capacitivos para la adecuada corrección. También debe de tenerse en cuenta que no es aconsejable realizar una corrección del Factor de Potencia a la unidad, ya que se podrían generar armónicos no deseados en la red.

2.5.3. Efectos negativos de la compensación mediante bancos capacitivos

A pesar de que el uso de bancos capacitivos para la corrección del $\cos(\varphi)$ en instalaciones es efectivo y de bajo costo, en ocasiones se omite el hecho de que esto implica un cambio en las características del sistema. Estos cambios pueden ocasionar efectos negativos si no se utilizan de manera correcta los bancos de capacitores. Por esta razón, cualquier acción de compensación de energía reactiva debe ser estudiada en detalle, para así asegurar el cumplimiento de normas y requerimientos de la aplicación, lo cual garantiza que la operación del banco sea óptima y adecuada

2.5.3.1 Sobrecompensación de energía reactiva.

La sobre compensación de energía reactiva ocurre cuando la energía reactiva entregada por el banco capacitivo de compensación es mayor que la Potencia Reactiva de carácter inductivo consumida por la carga. Esto puede producir una serie de efectos adversos como son [14] [13]:

- ❖ Aumento de la tensión por encima del valor nominal.
- ❖ Incremento en pérdidas de energía.
- ❖ Daño a equipos conectados a la red.
- ❖ Calentamiento en motores

2.5.3.2 Transitorios.

Los transitorios involucran un cambio repentino de gran magnitud del nivel de voltaje, son de muy poca duración y en términos de compensación estos se dan cuando la conexión de los condensadores a la red eléctrica no es controlada. Los condensadores pueden descargarse o cargarse muy rápidamente al nivel de tensión

de la red, provocando un aumento de la corriente y generando a su vez considerables caídas de tensión donde se pueden ver afectados la carga o equipos conectados a la red eléctrica [5] [14].

2.5.3.3 Resonancia

El efecto de resonancia se da cuando la reactancia capacitiva (X_c) y la reactancia inductiva se igualan a determinada frecuencia. Si este efecto ocurre a una frecuencia cercana a la de uno de los armónicos característicos generados por las cargas no lineales por la corriente armónica, éste excitará el circuito tanque creado por la conexión paralela de la carga y el banco capacitivo. Esto da lugar a una corriente amplificada generada por el flujo de energía intercambiado entre la carga y el capacitor. [10]

Capítulo 3 Teoría de Dispositivos y Sensores para el Desarrollo del Prototipo.

3.1. Introducción.

Debido a que las tensiones nominales en las redes de distribución varían entre 127 Vac y 220 Vac en dependencia de la necesidad del usuario, se hace conveniente realizar un acondicionamiento de la señal de voltaje y corriente para el posterior procesamiento de las mismas. Por esta razón debemos seleccionar adecuadamente el sistema de acondicionamiento que mejor se adapte a las necesidades, así como cuales son los circuitos más confiables para el cálculo de los parámetros de la red eléctrica, el procesamiento de los algoritmos y el control de los bancos capacitivos.

De esta manera realizamos una revisión de cada parámetro a tener en cuenta para el diseño del prototipo.

3.2. Acondicionamiento de señal

Cuando se hace necesario procesar una señal en un sistema de medición, en general se debe adecuar la señal obtenida de manera correcta para la etapa de procesamiento, cumpliendo con parámetros como son: amplitud, nivel de ruido, linealidad. A todas estas modificaciones que se le realiza a la señal se les designa en general con el término acondicionamiento de señal.

3.2.1. Fundamentos de Acondicionamiento de Señales

Las necesidades de acondicionamiento de las señales varían ampliamente dependiendo de la funcionalidad del sensor, por lo que ningún instrumento puede proporcionar todo tipo de acondicionamiento para todos los sensores. Por ejemplo, los termopares producen señales de muy baja tensión, lo cual requiere linealización, amplificación y filtrado. Otras señales pueden no necesitar ninguna de ellas, sino que se basan en gran medida en el aislamiento de alta tensión. La clave para lograr un exitoso sistema de acondicionamiento de señales es entender los circuitos que son necesarios para garantizar una medida precisa, cualquiera que sea la combinación de canales [16] [17].

3.2.1.1 Amplificación

Esta acción se hace necesaria cuando el nivel de señal obtenida mediante el sensor es demasiado pequeña para ser procesada. Los amplificadores incrementan el nivel de tensión para de esta manera lograr una mejor adaptación al rango del convertidor analógico-digital (ADC), mejorando también la relación de la señal con

respecto al ruido. Mediante esta técnica se puede incrementar la resolución de la medida, así como la sensibilidad.

3.2.1.2 Atenuación

La atenuación es la acción contraria a la amplificación, y se hace necesaria cuando la amplitud de la señal a medir está fuera del rango del (ADC). Esta forma de acondicionamiento disminuye la amplitud de la señal de entrada, de manera tal que la señal quede dentro del rango del (ADC). En la práctica la atenuación generalmente se utiliza para señales con amplitudes mayores a los 10V. [16]

3.2.1.3 Filtrado

Los filtros se utilizan para rechazar el ruido en los sistemas de medición dentro de un rango de frecuencias determinado. A menudo se utilizan filtros paso-bajo para eliminar el ruido procedente de los 50/60 Hz de la red eléctrica. Otro uso común de los filtros es eliminar el “enmascaramiento” [17] [16] de las señales de alta frecuencia.

3.2.1.4 Aislamiento

Cuando las señales de tensión se encuentran muy por encima del rango del digitalizador y puedan dañar al sistema de medición y al operador, es necesario utilizar aislamiento junto con atenuación para proteger al sistema y al usuario de las altas tensiones. También es de utilidad el aislamiento cuando el sensor no comparte la misma referencia o se encuentra en un plano de tierra diferente al de la medida.

3.2.1.5 Linealización

La linealización se hace necesaria cuando los sensores producen señales de tensión que no están relacionadas de manera lineal con las medidas físicas. Ésta consiste en el proceso de interpretación de la señal del sensor con relación al valor real de la variable a medir, la Linealización se puede hacer mediante el acondicionamiento de señal o por medio de software.

3.3. Tipos de sensor de Corriente

Los sistemas de medición de energía, deben de contar con sensores de corriente para su funcionamiento. Estos sensores deben de convertir la magnitud de la variable a medir de la línea de distribución, a valores equivalentes. Los sensores requieren de un rango dinámico extenso de medición y de un rango de frecuencia de acuerdo al sistema de medición desarrollado.

3.3.1. Sensor de Corriente Resistivo.

Los sensores de corriente del tipo resistivo que tienen un valor de precisión óhmico, se les conoce con el nombre de resistencias de derivación de corriente o Shunt [18]

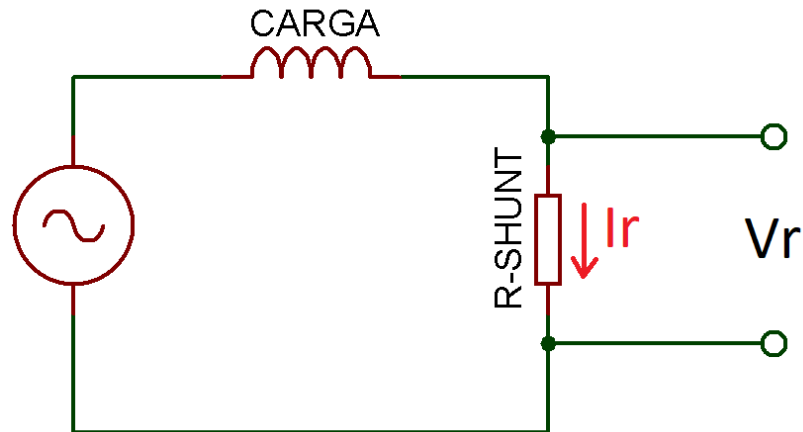


Figura 12: Conexión de la Resistencia de derivación o Shunt en un circuito

Como se puede observar en la (Figura 12) la resistencia de derivación se conecta en serie con la carga, por lo que la corriente (I_r) que circula a través de la resistencia es la misma en todo el circuito. Esta corriente permite que un voltaje proporcional a la misma (V_r) caiga en los terminales de la resistencia [19]. El valor de la corriente se puede encontrar a través de la ley de Ohm

$$V_r = I_r * R_{Shunt}. \quad (27)$$

Despejando (I_r) de la ecuación anterior obtenemos el valor de la corriente:

$$I_r = \frac{V_r}{R_{Shunt}}. \quad (28)$$

A pesar de ser esta la variable más económica para el sensado de la corriente eléctrica y no introducir cambio de fase de la señal, haciendo a las resistencias de derivación una elección popular para medidores de energía, se tienen varios inconvenientes que limitan su uso como son:

- Falta de aislamiento galvánico de la red eléctrica.

- El valor de la resistencia debe de ser muy pequeño para minimizar la disipación de potencia, ya que el calor generado por la resistencia es proporcional a la corriente que circula por ella, por lo que rara vez son utilizadas para la medición de corrientes altas.
- Voltaje de salida muy pequeño en relación al ruido.

3.3.2. Transformador de corriente (TC)

El transformador de corriente se puede diferenciar de los transformadores de potencia o de voltaje, ya que su devanado primario consiste por lo general en una sola espira o están contruidos en núcleos divididos o toroides que cuentan solamente con el devanado secundario

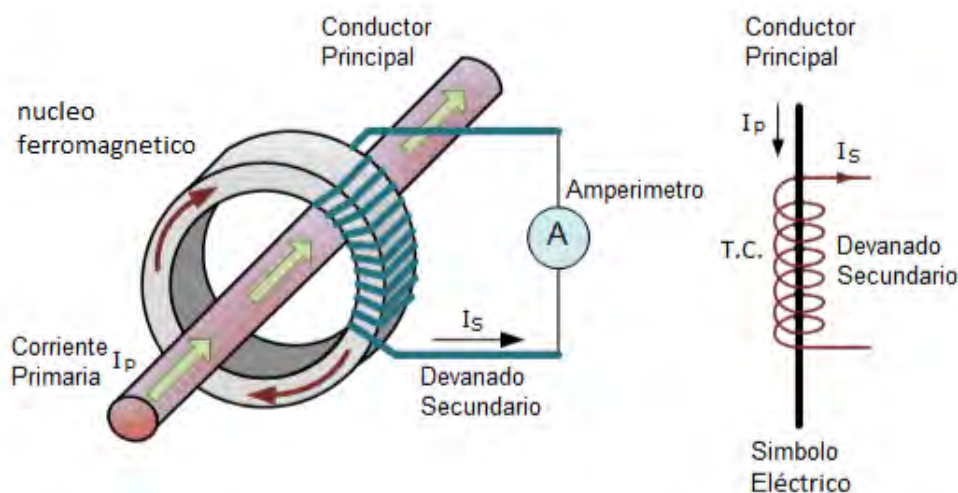


Figura 13: Transformador de Corriente TC.

El devanado secundario puede tener un mayor número de vueltas alrededor de un núcleo laminado de material magnético, el cual cuenta con un área de sección transversal mayor, por lo que la densidad de flujo magnético es bajo empleando alambre con una sección transversal mucho menor, esto depende de que tanto se desee reducir la corriente. Los fabricantes de los TC manejan estándares para el secundario como son 1 y 5 Amperes a máximo rango [19] [20].

Las ventajas que ofrecen el uso de TC para la medición de corriente es que poseen un bajo consumo en potencia, ofrecen aislamiento galvánico de la red. Existe una gran variedad de aplicaciones y usos para medición con TC's como conectarlos a: medidores de Watts, medidores de Factor de Potencia, relevadores de protección o como bobinas de disparo en interruptores magnéticos [21].

Para la selección de los TC en aplicaciones se deben de considerar algunos parámetros como son [22]:

- Garantizar el rango dinámico para la detección de corriente, ya que los TC se pueden saturar bajo corriente continua o altas corrientes.
- Los Transformadores de corriente pueden introducir cambio de fase o retardo
- Tener en cuenta que la hoja de datos del fabricante, ya que algunos pueden introducir un error de escala

3.3.3. Bobina de Rogowski

El principio de funcionamiento de la bobina de Rogowski es medir la corriente en un conductor a través de la inductancia mutua.

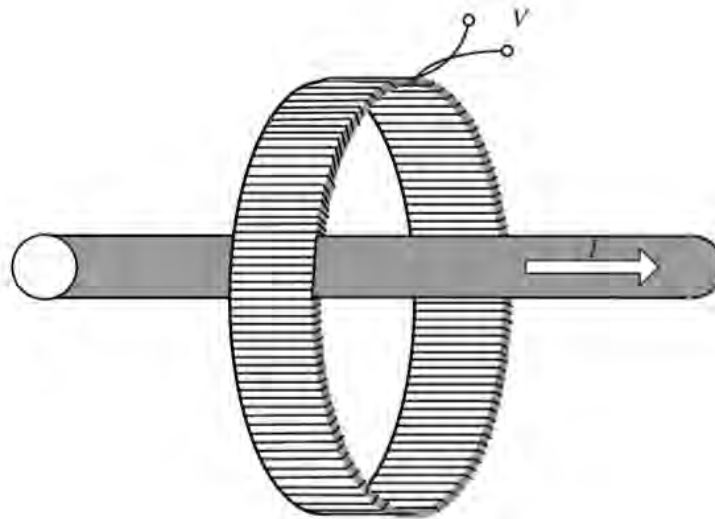


Figura 14 Bobina De Rogowski

Cuando la corriente pasa a través de un conductor, se induce un campo magnético alrededor del conductor. La magnitud del campo magnético es directamente proporcional a la corriente que circula por el conductor. Los cambios en el campo magnético inducen una fuerza electromotriz (FEM) dentro de un bucle de cable. La FEM es una señal de voltaje y es proporcional a los cambios en el campo magnético dentro del bucle. La tensión de salida del bucle es, por lo tanto, proporcional a la derivada en el tiempo (di / dt) de la corriente. Una bobina de Rogowski se hace típicamente con un núcleo de aire, por lo que no hay histéresis, saturación o no linealidad. Debido a que la bobina de Rogowski se basa en la medición del campo magnético, hace que este tipo de sensor de corriente sea más susceptible a la

interferencia del campo magnético externo que los transformadores de corriente (TC). [23] [24]

Este dispositivo es utilizado para la medición de corriente alterna sin necesidad de hacer contacto con el conductor, por lo que representa un procedimiento no invasivo como se puede observar en la siguiente figura



Figura 15: Bobina de Rogowski serie 855- Instalación Rápida

3.3.4. Sensor de Efecto Hall

El efecto lleva el nombre del físico estadounidense Edwin H. Hall, quien lo descubrió en 1879. Hall, estaba tratando de demostrar que un imán afecta directamente a la corriente y no a un cable que tenga la corriente, como se creía en ese momento [25].

Edwin H. Hall notó que, al hacer fluir una corriente por la sección longitudinal de un material semiconductor, cuando no existe la presencia de campos magnéticos externos, la corriente atravesará el material de manera uniforme. Por esta razón al colocar un voltímetro en la sección transversal del semiconductor no existirá variación de voltaje.

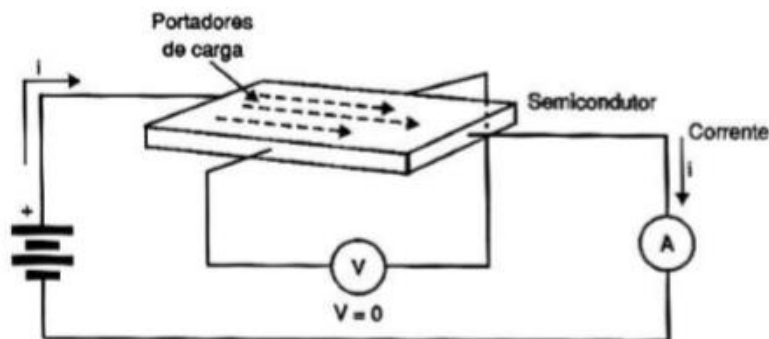


Figura 16 Comportamiento de los portadores de carga en ausencia de campo magnético externo

Sin embargo, cuando interactúa un campo magnético externo sobre el material semiconductor, surge una fuerza perpendicular al desplazamiento de las cargas, modificando de esta manera la distribución de las cargas, acumulándose éstas en una de las caras laterales del material. Como consecuencia de esta nueva distribución de las cargas sobre el material semiconductor, aparece una tensión en el voltímetro proporcional a la intensidad del campo magnético.

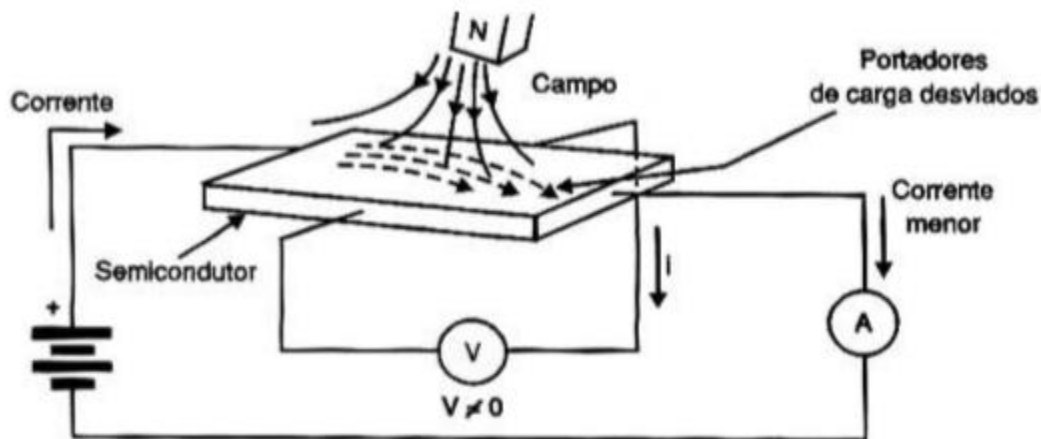


Figura 17: Comportamiento de portadores de carga en presencia de un campo magnético externo

En 1819 el físico danés Hans Cristian Oersted descubrió que todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, genera un campo magnético proporcional a esta corriente. Teniendo en cuenta este fenómeno, si se coloca un sensor de Efecto Hall acoplado a un conductor, al medir la variación de tensión en el sensor, obtendremos una tensión que será directamente proporcional a la corriente que circula en el conductor.

Los sensores de Efecto Hall tienen una respuesta de frecuencia excepcional y son capaces de medir corrientes muy grandes. Los inconvenientes que esta tecnología posee son las variaciones de la salida con el aumento de la temperatura. Además, generalmente requieren de una fuente de corriente externa estable para su funcionamiento.

3.4. Circuitos para la medición de energía

En el mercado actual existe una amplia gama de circuitos integrados diseñados con el fin específico de medir los parámetros de energía. Entre estos circuitos los más usados corresponden a los fabricantes:

- Analog Devices con la serie ADE77XX
- Cirrus Logic. con la serie CS546XX

3.4.1. ADE7756 Analog Devices

El circuito integrado ADE7756 es un medidor de energía de alta precisión con interface de comunicación serie y pulsos de salida. Este incorpora dos convertidores análogo-digital (ADC) de segundo orden, circuito de referencia, sensor de temperatura y todo el procesamiento de señal requerido para obtener los valores de energía [26].

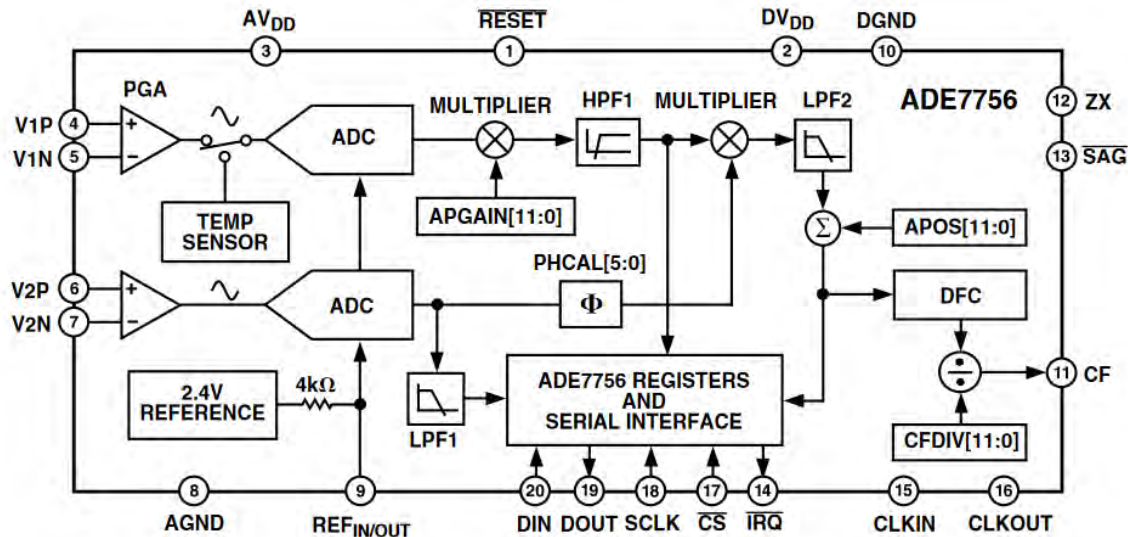


Figura 18: Diagrama en bloque del ADE7756

A través de la comunicación serie se puede acceder a los registros del circuito y obtener los valores de Potencia Real, Potencia Reactiva, Potencia Aparente, voltaje y corriente, así como hacer la calibración de los parámetros del integrado [27].

El ADE7756 puede conectarse a una gran variedad de transductores de corriente como las resistencias shunt y transformador de corriente. Adicionalmente posee un integrador digital, el cual provee una interface directa para la Bobina de Rogowski. Esta opción elimina la necesidad de un integrador externo, que puede ser activado o desactivado a través de los registros, dependiendo del sensor de corriente seleccionado.

El ADE7756 también proporciona una salida de pulsos (CF), con una frecuencia que es proporcional a la Potencia Activa. Además, éste incorpora un circuito de detección para variaciones de baja tensión o caídas de corta duración. El pin (ZX) produce una salida que está sincronizada con el punto de cruce por cero del voltaje de línea. Esta salida se puede utilizar para extraer información de tiempo o frecuencia de la línea. La señal también se utiliza internamente para el chip en el modo de calibración. Esto permite una calibración más rápida y precisa del cálculo de Potencia Real. Esta señal también es útil para la sincronización de la conmutación de relé con un cruce de voltaje cero, lo que mejora la vida útil del relé al reducir el riesgo de formación de arco.

3.4.2. CS5463 Cirrus Logic

El CS5463 es un dispositivo integrado de medición de potencia que combina dos convertidores analógico-digital, cálculo de potencia, convertidor de energía a frecuencia y una interfaz en serie. Este está diseñado para medir con precisión la corriente y el voltaje instantáneos, y calcular V_{rms} , I_{rms} , Potencia Instantánea, Potencia Aparente, Potencia Activa, Potencia Reactiva y Factor de Potencia para aplicaciones de medición de potencia monofásica [28].

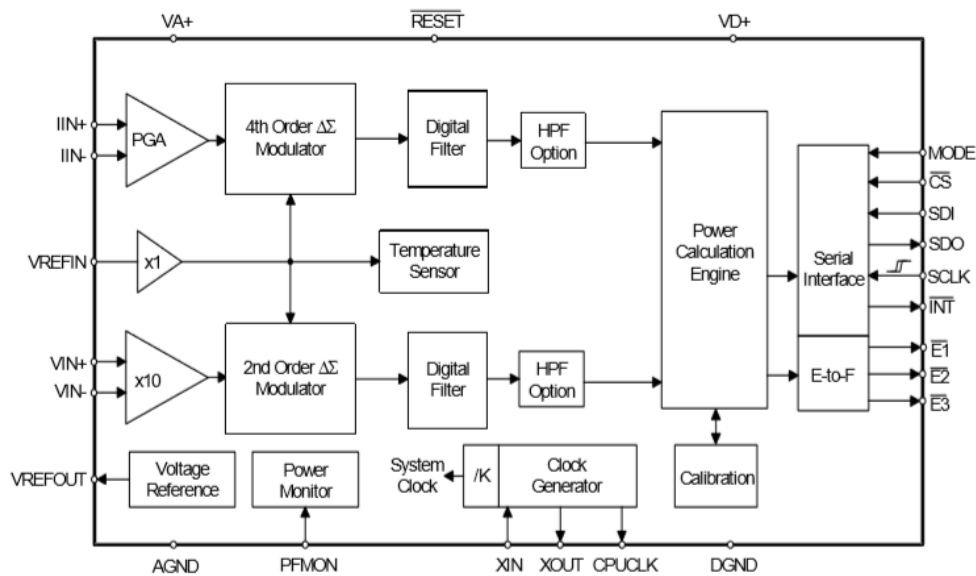


Figura 19: Diagrama en bloque del CS5463

El CS5463 está optimizado para interactuar con resistencias de derivación o transformadores de corriente para la medición de corriente, y divisores resistivos o transformadores de tensión para la medición de voltaje. El CS5463 cuenta con una interfaz serial bidireccional para la comunicación con un procesador y una función programable de salida de energía a pulsos. Las características adicionales incluyen la funcionalidad en chip para facilitar la calibración a nivel del sistema como sensor de temperatura, la detección de caída de voltaje y la compensación de fase.

El flujo de datos para la medición del canal de voltaje y corriente y los algoritmos de cálculo de potencia se muestran en las Figura 20 y Figura 21 respectivamente. Las entradas analógicas están estructuradas con dos canales dedicados a Voltaje y Corriente. El elemento sensor de voltaje introduce una forma de onda de voltaje en la entrada del canal de voltaje $VIN \pm$ y está sujeto a una ganancia de 10x. Un modulador delta-sigma de segundo orden muestrea la señal amplificada para la digitalización. Simultáneamente, el elemento sensor de corriente introduce una forma de onda de voltaje en la entrada del canal actual $IIN \pm$ y está sujeto a dos ganancias seleccionables del amplificador de ganancia programable (PGA). La señal amplificada se muestrea

mediante un modulador delta-sigma de cuarto orden para la digitalización. Ambos convertidores muestrean a una tasa de $MCLK / 8$. El muestreo excesivo proporciona un amplio rango dinámico y un diseño de filtro anti-alias simplificado.

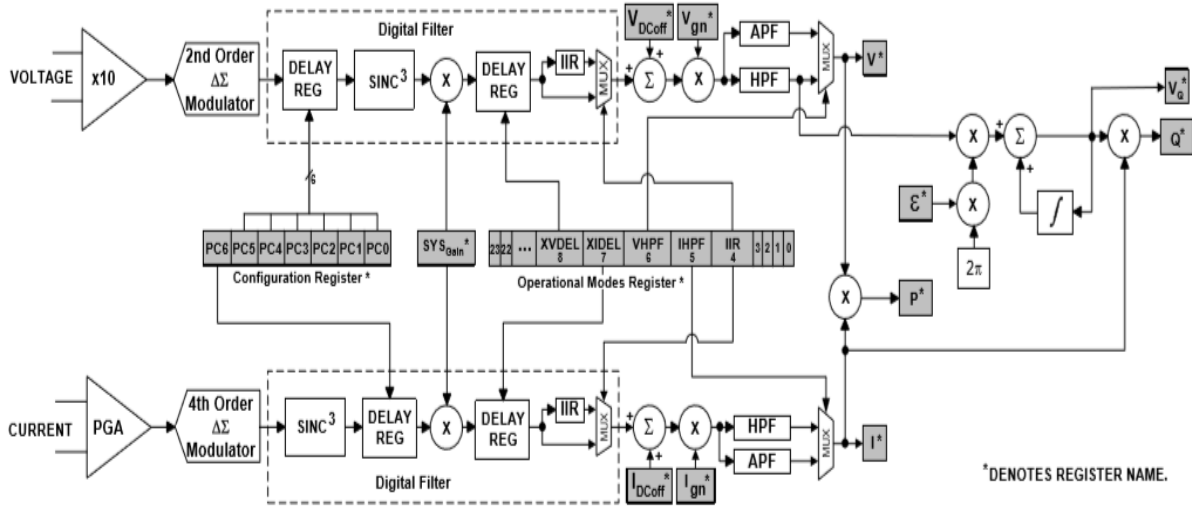


Figura 20: Flujo de datos para la medición de los canales de Voltaje y Corriente

Mediante la comunicación serie entre el CS5463 y un microprocesador, se puede obtener los valores de energía calculados y almacenados en los registros correspondientes facilitando el procesamiento de los datos.

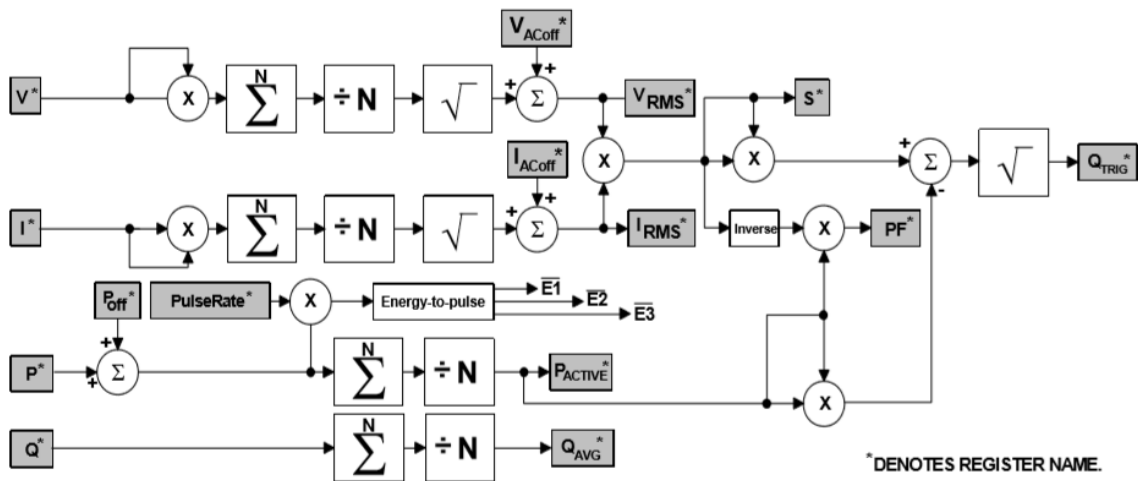


Figura 21: Algoritmo para el cálculo de potencia

3.5. Microcontrolador (μC)

Uno de los desarrollos más importantes en el ámbito de la electrónica es el microcontrolador, el cual no es más que una computadora en un chip. Este es esencial para el funcionamiento de dispositivos como teléfonos móviles, reproductores de DVD, cámaras de video y la mayoría de los sistemas electrónicos autónomos que se usan en la actualidad [29].

Un microcontrolador se diferencia de un microprocesador en varios aspectos importantes. La gran diferencia entre un microprocesador y microcontrolador es la integridad de la máquina que cada uno representa. Un microprocesador era simplemente el "corazón" de una computadora. Para poner en uso un microprocesador y hacer una computadora completamente funcional, el diseñador requería memoria, chips periféricos, puertos serie y puerto paralelo. Por el contrario, el microcontrolador fue diseñado para ser una computadora completa en un solo chip. La memoria necesaria y los componentes periféricos se integraron en el chip, para que se pudiese construir un sistema completo basado en computadora con un mínimo de componentes externos [30].

En la actualidad son muy utilizados los microprocesadores PIC y ARDUINO, ya que son fáciles de programar y adquirir en el mercado. Estos microprocesadores manejan una amplia gama de modelos y es posible adquirir una serie de sensores y periféricos existentes en el mercado para dichos dispositivos, lo cual facilita el desarrollo de proyectos y prototipos.

3.6. Actuadores

Cuando se quiere controlar o accionar componentes eléctricos que actúan sobre la red eléctrica, como lo son motores, lámparas, equipos resistivos o capacitivos, se hace necesario aislar la etapa de control de la de potencia, para evitar daños no deseados, ya que por lo general la etapa de control trabaja con voltajes comprendidos entre 5 y 24 Volts de corriente directa. Para esta acción se utilizan elementos como:

- Relevadores electro-mecánicos
- Relevadores de estado solido

3.6.1. Relevadores electro-mecánicos

Los relevadores electro-mecánicos fueron inventados por el científico estadounidense Joseph Henry, quien descubrió el fenómeno electromagnético de auto-inductancia e inductancia mutua. Esto permitió crear un electroimán que al activarse pueda controlar un interruptor.

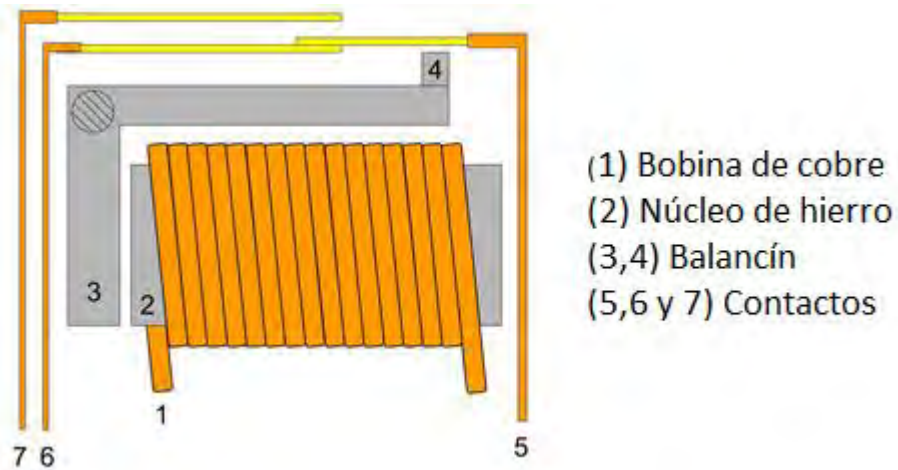


Figura 22: Diagrama de un Relevador electro-mecánico

En la Figura 22, se muestra un relevador que contiene una bobina enrollada sobre un núcleo de hierro, al hacer fluir una corriente a través de la bobina, ésta se comporta como un electroimán generando un campo magnético, que actúa sobre el balancín haciendo que este abra o cierre los contactos [31].

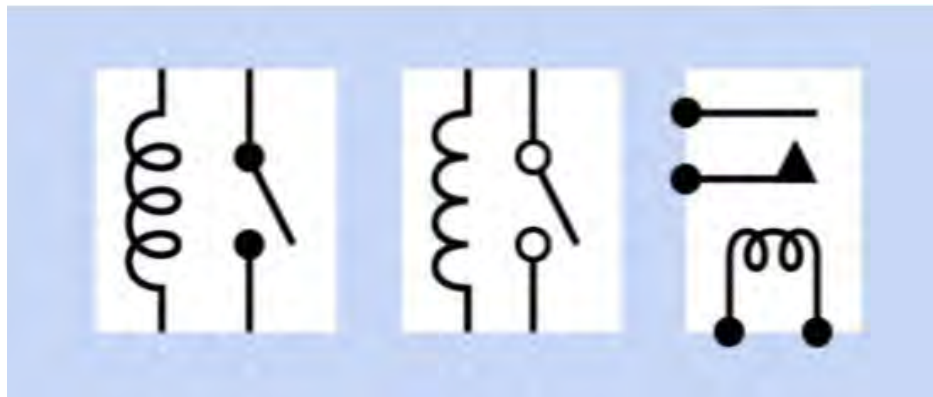


Figura 23: Representación eléctrica de un relevador electro-mecánico

Las ventajas que presentan los relevadores electromecánicos son:

- ❖ Económicos en consumo
- ❖ Reducción de dimensiones en aplicaciones de conmutación a baja potencia
- ❖ Gran diversidad en encapsulados
- ❖ Gran número de contactos
- ❖ Control indistinto CA/CC
- ❖ Tecnológica y conceptualmente muy evidentes

En cuanto a las desventajas se tiene:

- ❖ Ruido
- ❖ Dimensiones considerables en aplicaciones de control de potencia
- ❖ Presencia de chispas, arco y rebotes
- ❖ Más lento en la maniobra en comparación con los de estado sólido
- ❖ Presentan una vida útil limitada por desgastes en los contactos y mecánicos.

3.6.2. Relevador de Estado Sólido (SSR)

Un relevador de estado sólido (SSR) por sus siglas en inglés, se compone por una serie de semiconductores que emula un relevador electro-mecánico. Este es capaz de permitir o interrumpir la alimentación en sus terminales de salida, por la acción de una corriente y voltaje menor en sus terminales de entrada. Las variantes pueden cambiar para manejar equipos en corriente alterna (AC) o corriente directa (DC) y de igual manera pueden ser controlados por AC o DC [32]. El SSR nos permite aislar eléctricamente el circuito de entrada y el circuito de salida. Las diferentes partes que forman un relevador de estado sólido son:

Circuito de Entrada: es el circuito por el cual se controla, mediante una señal, el funcionamiento del relevador

Aislamiento: el aislamiento se realiza generalmente por un acoplamiento óptico con semiconductor como (opto-acoplador, opto-triac, opto-diodos)

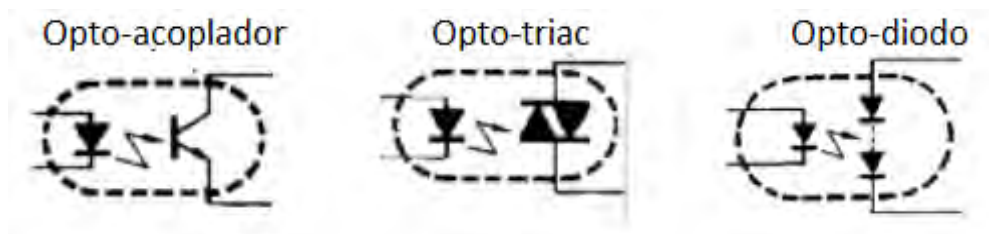


Figura 24: Elementos Opto-aislados

Detector de cruce por cero: Esta opción está equipada en algunos modelos que operan en corriente alterna y permite al dispositivo activarse o desactivarse, cuando la onda de tensión en la carga pasa por el punto cero. Los relevadores con detección de cruce por cero son adecuados para manejar cargas resistivas, capacitivas e inductivas con un Factor de Potencia entre 0.7 y 1.

Circuito de Salida: El circuito de salida es el que interactúa directamente con la carga a controlar, dependiendo del dispositivo puede estar diseñado para trabajar en AC o DC, para el trabajo en DC se utilizan circuitos con transistores bipolar o Mosfets y para AC se suelen utilizar tiristores conectados anti paralelos o Triacs.

Protección frente a transitorios: En algunos modelos se implementan protecciones contra transitorios, las más usadas son redes Snuber, RC, o con diodos.

Estos dispositivos presentan algunas ventajas en comparación con los relevadores electromecánicos.

- ❖ Gran fiabilidad y larga vida.
- ❖ No hay contactos físicos que sean vulnerables a los arcos y la erosión o (en condiciones extremas) que puedan soldarse entre sí.
- ❖ Respuesta muy rápida, normalmente $1\mu\text{s}$ activado y $0.5\mu\text{s}$ desactivado.
- ❖ Muy bajo consumo de energía en el lado de entrada, tan bajo como 5 mA a 5 VCC. Muchos relés de estado sólido pueden ser controlados directamente desde chips lógicos.
- ❖ Libre de ruido mecánico.
- ❖ Sin rebote de contacto. Una señal de salida limpia.
- ❖ No existe la presencia de bobinas que puedan introducir ruido electromagnético en el circuito.
- ❖ Seguro contra vapores inflamables, ya que no hay chispas de los contactos.
- ❖ A menudo más pequeño que un relé electromagnético comparable.
- ❖ Insensible a la vibración.
- ❖ Más seguro para la conmutación de altos voltajes, ya que existe una separación interna completa entre la entrada y la salida.
- ❖ Algunas variantes funcionan con voltajes de control de entrada tan bajos como 1.5VDC. Los relés electromagnéticos típicamente requieren al menos 3VDC (o más, donde se requieren relés más grandes para conmutar corrientes más altas).

Como desventajas tenemos las siguientes:

- ❖ Menos eficiente: su impedancia interna introduce una caída de voltaje de valor fijo en el lado de salida (aunque esto puede ser despreciable cuando se conmutan voltajes más altos).
- ❖ Genera calor residual en su modo "encendido", de acuerdo con la caída de voltaje.
- ❖ Pasa algo de corriente de fuga (generalmente medida en microamperios) en el lado de salida cuando se supone que el relé está "apagado".
- ❖ Un relé de estado sólido de CD generalmente requiere la observación de la polaridad en el lado de salida. Un relé electromagnético no lo hace

- ❖ Los breves picos de voltaje en el lado de entrada, que serían ignorados por un relé electromagnético más lento, pueden disparar un relé de estado sólido.
- ❖ Más vulnerable que un relé electromagnético a sobretensiones y picos en la corriente que se conmuta en el lado de la salida.

Capítulo 4 Diseño del Prototipo

4.1. Introducción

Para entender el funcionamiento del dispositivo, en la Figura 25 se muestra el diagrama de bloques con las diferentes etapas que conforman el prototipo propuesto para la corrección automática del Factor de Potencia,

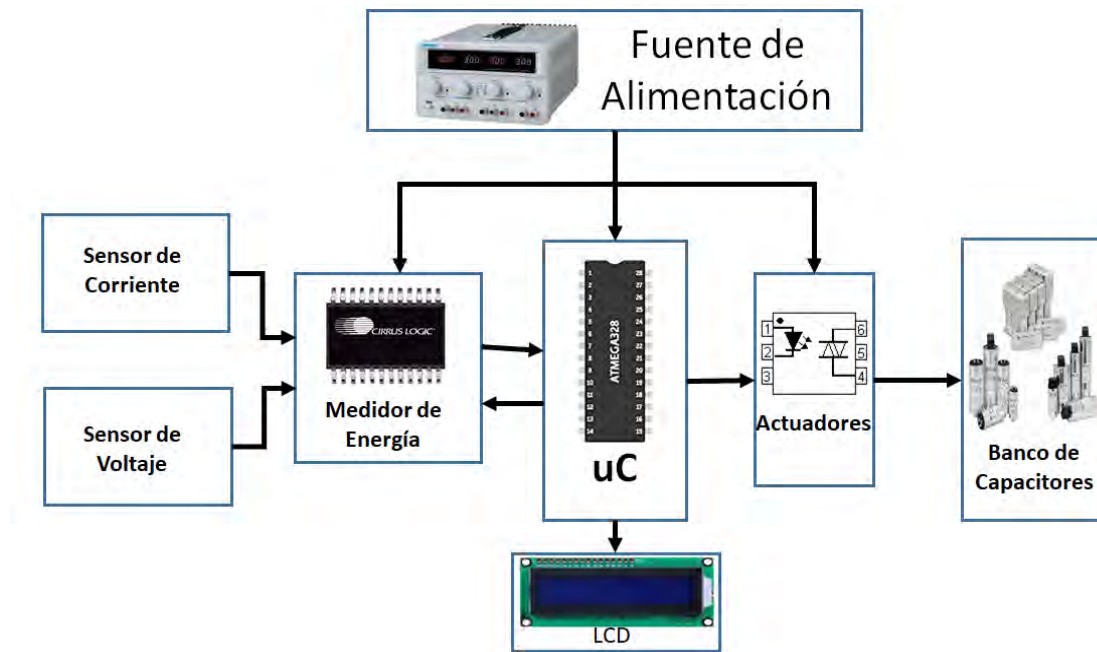


Figura 25: Diagrama en bloque del prototipo

De la Figura 25 se puede observar que la fuente de alimentación es la encargada de convertir la corriente alterna de la red eléctrica en corriente directa, con la amplitud necesaria para el funcionamiento de los bloques del sistema. Los sensores de corriente y voltaje detectan las formas de ondas de las señales correspondientes de la red eléctrica y las acondicionan a un nivel adecuado para que el medidor de energía pueda obtener los parámetros requeridos. El microcontrolador mediante comunicación serie obtiene las lecturas de los parámetros almacenados en los registros del medidor de energía. A su vez el microcontrolador realiza el cálculo del valor de capacitancia necesaria para compensar el Factor de Potencia por encima de 0.90. De esta manera se pueden activar mediante los actuadores los capacitores correspondientes para la compensación. La pantalla LCD permite visualizar los parámetros de la red eléctrica en tiempo real, así como la capacitancia conectada al sistema.

4.2. Fuente de Alimentación

Para calcular la potencia de la fuente de alimentación, que cumpla con las necesidades del circuito, es necesario hacer un análisis del consumo de cada bloque mostrado en la Figura 25.

| Dispositivo | Voltaje | Corriente |
|-------------|---------|-----------|
| CS5463 | 5 V | 2.9 mA |
| Atmega328 | 5 V | 2.0 mA |
| LCD 16X2 | 5 V | 40 mA |
| ACS 712 | 5 V | 10 mA |
| 4 Optotriac | 5 V | 30 mA |

Tabla 1: Tabla de Consumos

A partir de la Tabla 1, se puede observar que los voltajes de alimentación son los mismos para cada bloque del circuito y la suma de las corrientes no excede los 500mA. Debido al bajo costo y facilidad de diseño se optó por implementar una fuente lineal regulada como la que se muestra en la Figura 26.

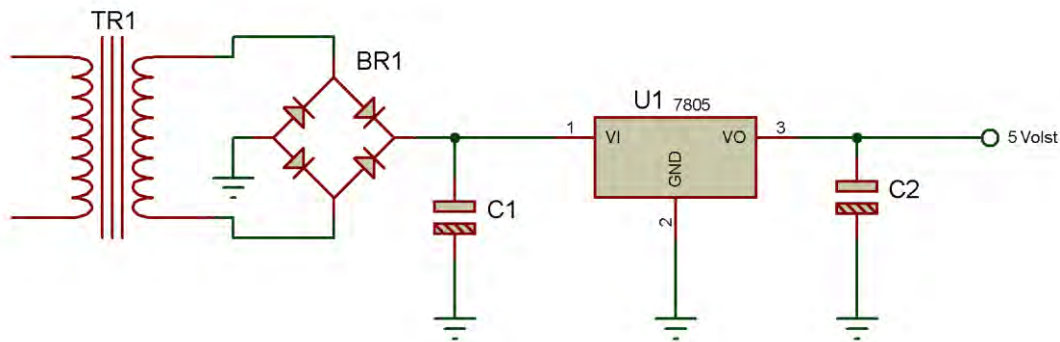


Figura 26: Fuente de alimentación

El transformador que se utilizó para la fuente de alimentación fue de un devanado primario con dos devanados secundarios, uno a 5 Vac a 100 mA, y el otro a 12Vac 500mA. El devanado de 12 Vac/0.5 Ampere se utiliza para la fuente de alimentación donde el voltaje DC a la salida del puente está dado por la ecuación (29).

$$V_{dc} = 12 * \sqrt{2} = 16.97 \quad (29)$$

La elección del transformador se debe a que el regulador 7805, necesita un voltaje mínimo de operación de 8 Vdc para poder mantener una salida regulada de 5 volts. Como el regulador necesita de una diferencia mínima de voltaje de 3 volts entre sus terminales de entrada y salida, por motivos de seguridad se decide utilizar un voltaje a la entrada en los terminales del regulador de aproximadamente 17 Vdc. De esta

manera se garantiza que la regulación no se verá afectada por pequeñas variaciones de voltaje. Para seleccionar el capacitor C1, se asume un factor de rizo (r) a la salida del puente rectificador del 10%, por lo que el voltaje de rizo (V_r) se puede calcular por la ecuación (30)

$$V_r = \frac{r * V_{dc}}{100}. \quad (30)$$

Desarrollando la ecuación se obtiene:

$$V_r = \frac{10 * 16.97}{100} \approx 1,7 V_{pp}.$$

Una vez calculado el voltaje de rizo se puede obtener el valor del capacitor para filtrar el rizado mediante la ecuación

$$C = \frac{I_L}{F * V_r}, \quad (31)$$

donde I_L , es la corriente en la carga y F , representa la frecuencia de la onda. Se puede notar que al ser un rectificador de onda completa la frecuencia es el doble de la frecuencia de la red. Asumiendo el caso crítico donde la carga consume 500 mA, el valor del capacitor necesario para filtrar el rizado lo obtenemos sustituyendo los valores de frecuencia y corriente en la ecuación (31)

$$C = \frac{0.5}{2 * 60 * 1.7} = 2450 * 10^{-6} \text{Faradios},$$

$$C=2450 \mu F$$

Para el propósito del prototipo se eligió el valor comercial más cercano existente en el mercado de 2500 μ F/25V.

El puente rectificador elegido fue el 2W005G, este puente tiene una capacidad de corriente directa de 2 Amperes [33], que representa el doble de lo requerido para la fuente de alimentación.

4.3. Medidor de energía CS5463

De los circuitos propuestos para la medición de energía en el apéndice 3.4, se decidió utilizar el medidor de energía CS5463. Como puede verse en la sección 3.4.2 el CS5463, es un circuito integrado, diseñado con la finalidad de medir los parámetros de la red eléctrica. A diferencia del ADE7756, el CS5463 nos brinda un valor directo del Factor de Potencia en sus registros. La ventaja de poder tomar lecturas directamente de los parámetros de interés de los registros del medidor, se tiene en el

ahorro de tiempo de procesamiento y espacio de memoria en el microcontrolador, dando un tiempo de respuesta menor para las funciones del mismo.

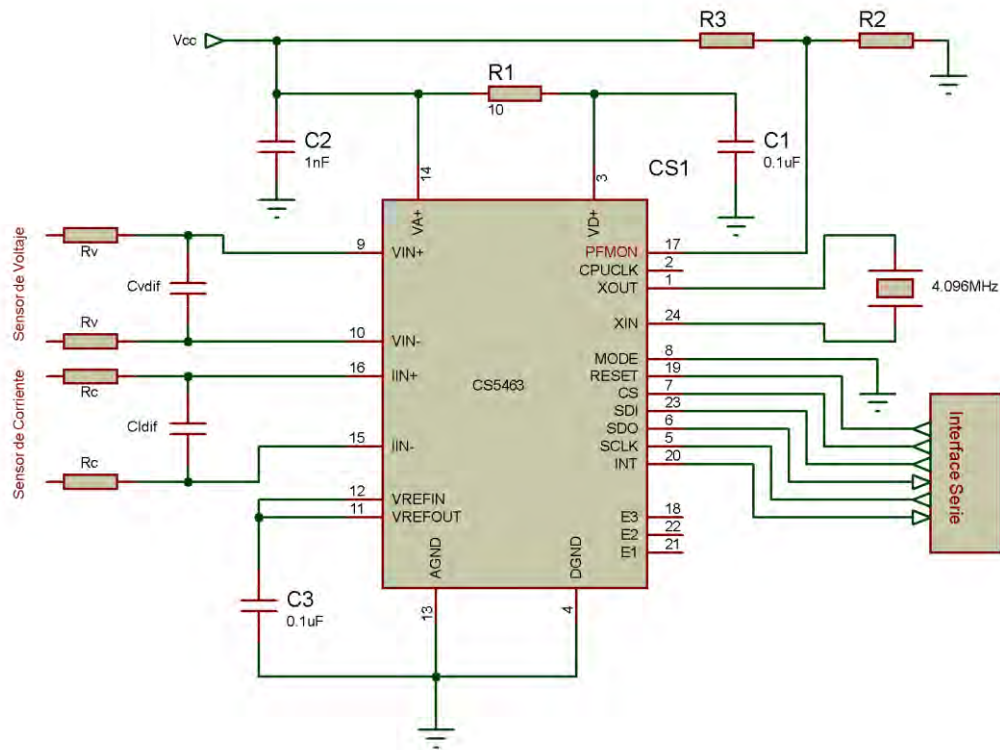


Figura 27: Circuito implementado para el uso del CS5463

En la Figura 27 se muestra el circuito implementado para el uso del medidor de energía CS 5463. Este circuito es una variante del mostrado en la Figura 19 en la página 41 de la hoja de datos del integrado [28]. En la Tabla 2 se puede encontrar la descripción de los pines del integrado.

Tabla 2: Descripción de los pines del Integrado CS5463

| Nombre | Pin | Descripción |
|-----------|-------|--|
| XOUT, XIN | 1, 24 | Estos pines normalmente van conectados a un cristal de cuarzo que actúa como reloj para el microchip. Alternativamente, se puede suministrar un reloj externo al pin XIN para proporcionar el reloj del sistema para el dispositivo. |
| CPUCLK | 2 | Este pin es una salida del oscilador en el chip que puede ser usada para sincronizar una carga CMOS estándar |
| SCLK | 5 | Una señal de reloj en este pin determina la velocidad de entrada y salida de los datos para los pines SDI y |

Diseño del Prototipo

| | | |
|------------|------------|--|
| | | SDO respectivamente. SCLK reconocerá los pulsos de reloj solo cuando el pin CS esté en nivel bajo. |
| SDO | 6 | SDO es el pin de salida del puerto de datos en serie. Su salida estará en estado de alta impedancia cuando CS este en un nivel alto. |
| CS | 7 | Cuando está en nivel bajo, el pin SCLK reconocerá los pulsos de reloj. Y un nivel alto en este pin obliga al pin SDO a un estado de alta impedancia. |
| MODE | 8 | Cuando este pin está en un nivel alto, el CS5463 puede realizar la secuencia de arranque automático con la ayuda de una EEPROM serie externa para recibir comandos y configuraciones. Cuando está a un nivel bajo lógico, CS5463 asume la operación normal del "modo host". Este pin posee una resistencia interna que lo mantiene en nivel bajo cuando no se conecta. |
| E3,E1,E2 | 18, 21, 22 | El pin de salida de energía emite una salida de frecuencia de pulso de ancho fijo con una velocidad (programable) proporcional a la energía real (facturable). Pulsos activos-bajos con una frecuencia de salida proporcional a la potencia seleccionada. Salidas configurables para Potencia Activa, Aparente y Reactiva, indicación de energía negativa, detección de cruce de cero y monitoreo de falla de energía. Las salidas E1, E2, E3 se configuran en el modo de funcionamiento operativo. |
| RESET | 19 | Este pin tiene la capacidad de reiniciar todos los registros del microchip a los estados predeterminados de fábrica |
| INT | 20 | Cuando INT está en un nivel bajo, indica que se ha producido un evento habilitado. |
| SDI | 23 | Corresponde al pin de entrada del puerto de datos serie. Los datos se ingresarán a una tasa determinada por SCLK. |
| VIN+, VIN- | 9, 10 | Pines de entrada diferencial analógica para canal de tensión. |
| IIN+, IIN- | 15,16 | Pines de entrada diferencial analógica para canal de corriente. |
| VREFOUT | 11 | Es el pin de la salida del voltaje de referencia, el cual tiene una magnitud nominal de 2.5 V con respecto al pin AGND |
| VREFIN | 12 | Este pin es la entrada al voltaje de referencia |

| | | |
|-------|----|---|
| VD+ | 3 | Es el pin de alimentación digital positiva de manera nominal maneja una tensión de $\pm 10\%$ en relación con DGND. |
| DGND | 4 | Es el pin correspondiente a la tierra digital, El potencial en modo común de la tierra digital debe ser igual o superior al potencial en modo común de AGND. |
| VA+ | 14 | Este pin corresponde a la alimentación analógica positiva: El suministro analógico positivo es nominalmente $+5\text{ V} \pm 10\%$ en relación con AGND. |
| AGND | 13 | Es el pin correspondiente a la tierra analógica. El pin de suministro analógico negativo debe estar en el potencial más bajo. |
| PFMON | 17 | El pin de monitor de falla de alimentación supervisa la fuente analógica. El nivel de umbral típico es de 2.45 V con respecto al pin AGND. Si se dispara el umbral de voltaje PFMON, el bit LSD (detección de baja alimentación) se establece en el registro de estado. Una vez que se haya establecido el bit LSD, no podrá restablecerse hasta que la tensión PFMON aumente en $\sim 100\text{ mV}$ por encima de la tensión umbral |

Como se puede observar en la Tabla 2, el pin 17 se encarga de monitorear el voltaje de la fuente de alimentación. El voltaje en este pin puede variar desde 2.3 Volts hasta 2.7 Volts, en el caso de que este voltaje éste fuera de ese rango de valores le indica al integrado que existe un problema con la fuente de alimentación. Para garantizar el correcto funcionamiento del circuito se establece un voltaje en el pin 17 de 2.5 volts, esto se logra a través del divisor resistivo compuesto por R3 y R2 en la Figura 27: Circuito implementado para el uso del CS5463 Figura 27. Como vimos en la sección 4.2, el voltaje regulado a la salida de la Fuente es de 5 Vdc, por lo tanto haciendo uso de la ecuación (32) obtenemos que $R3=R2$, por lo que les asignamos un valor de 10 kOhm.

$$R3=R2=10\text{kOhm},$$

Los pines 9 y 10, que corresponden a las entradas de voltaje pueden tener un voltaje diferencial máximo de 500 mVpp. De igual manera cuando el amplificador de ganancia programable (PGA) del canal de corriente trabaja con una ganancia de 10, el voltaje a la entrada del canal es de 500 mVpp. Para estos valores de entrada en los canales de corriente y voltaje, se recomienda en la hoja de datos utilizar los valores de C_{Idif} y C_{Vdif} de 32pF y 0.2pF respectivamente.

4.4. Acondicionamiento de señal de voltaje

El acondicionamiento de la señal de voltaje se realiza a través de un devanado auxiliar, en el transformador de la fuente de alimentación con una amplitud de 5 Vpp. El uso de un transformador de potencia para el sensado de la señal, a diferencia del divisor resistivo garantiza que exista aislamiento galvánico entre la red eléctrica y el circuito de medición. Como se mostró en el apéndice 4.3 el circuito integrado CS5463 puede tener un voltaje diferencial máximo en los terminales del canal de voltaje de 500 mVpp. Para garantizar la integridad del circuito de medición y proteger el canal de voltaje de pequeñas variaciones que puedan existir en la red eléctrica, se decide utilizar un divisor resistivo para establecer un voltaje de 200 mVp a la entrada del canal. En la Figura 28 se puede observar el circuito propuesto para el acondicionamiento de la señal de voltaje.

Los valores de R_1 y R_2 se pueden calcular mediante la ecuación (32),

$$V_x = \frac{V_{cc} * R_2}{R_1 + R_2}, \quad (32)$$

donde V_x , es el voltaje deseado a la salida del divisor, V_{cc} es el voltaje a la salida del transformador,

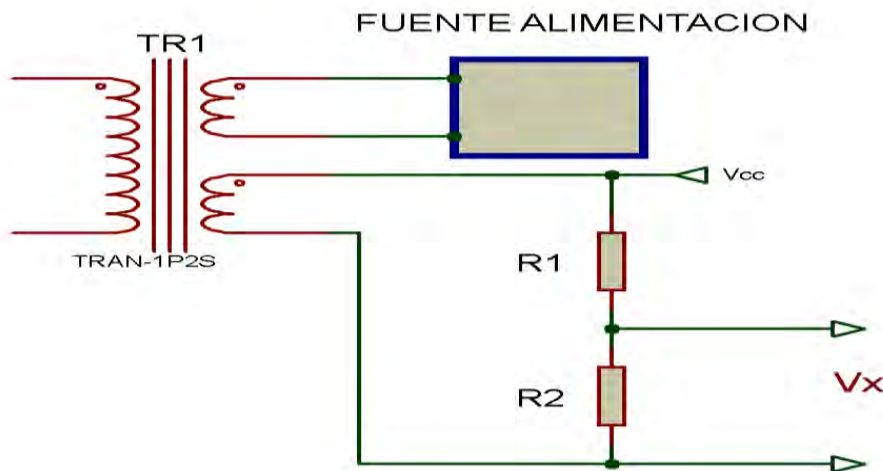


Figura 28: Acondicionamiento de la señal de voltaje

Desarrollando la ecuación (32) y haciendo $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ tenemos que:

$$200 * 10^{-3} = \frac{5 * R_2}{10 * 10^3 + R_2} \quad (33)$$

despejando R_2

$$200 * 10^{-3} * 10 * 10^3 = (5 * R_2) - (200 * 10^{-3} R_2)$$

$$R_2 = \frac{2000}{4.8}$$

$$R_2 \approx 416 \text{ Ohm}$$

Para fines prácticos se utilizó una resistencia variable de precisión de 1kOhm para ajustar el valor a la salida de una manera más precisa.

4.5. Acondicionamiento de señal de corriente

Para el acondicionamiento de la señal de corriente del prototipo, se decidió utilizar un sensor de efecto Hall ACS712-30A. Este sensor alcanza a medir una magnitud de hasta 30 Amperes, brindando una salida de 66mV/Amp [34]. El ASC712 tiene un voltaje de alimentación de 5 Vdc y posee un voltaje de offset a la salida de 2.5 Vdc, por lo que la señal de salida sinusoidal de 66mV/Amperes, estará encima del voltaje de offset como se puede observar en la simulación de la Figura 29.

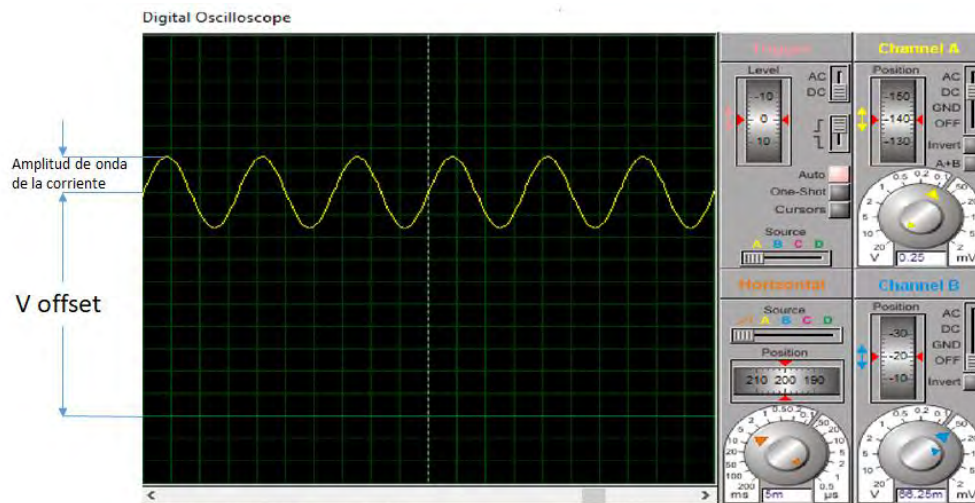


Figura 29: Señal a la salida del sensor con amplitud de 250mV por división

Para eliminar el voltaje de offset DC de la señal de salida se utilizó un capacitor ya que como vimos en la sección 2.3.2, los capacitores ante corriente directa se comportan como un circuito abierto y ante corriente alterna se comportan como un corto circuito, permitiendo de esta manera el filtrado de la señal offset, véase en la Figura 30.

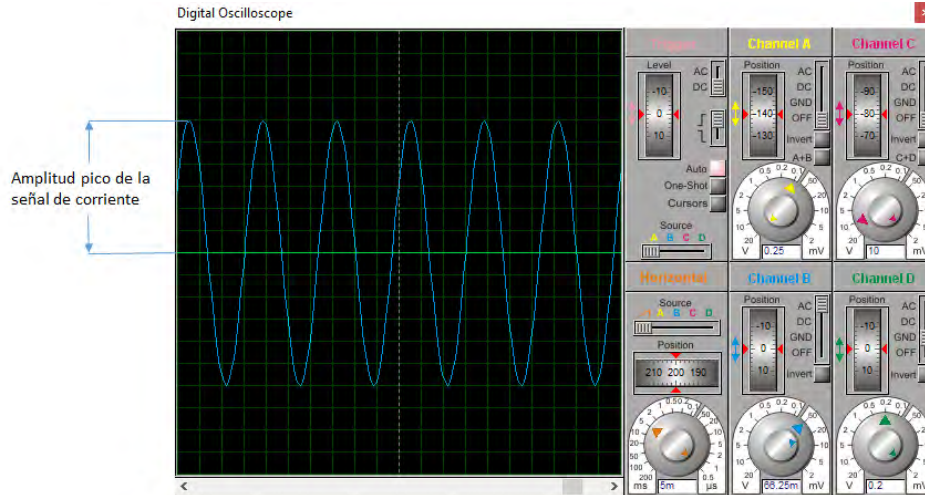


Figura 30: Forma de onda a la salida del capacitor con amplitud de 66.25mV por división

Las imágenes que se muestran en las Figura 29 y Figura 30 fueron obtenidas de la simulación del circuito mostrado en la Figura 31, haciendo uso del software Proteus 8. La simulación consiste en una resistencia de carga R_L con un valor de 20 Ohms, conectada en serie con el ACS 712 y un generador de corriente alterna con una amplitud de 120V/60Hz. La corriente simulada al generador se puede obtener mediante la ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120}{20} = 6 A$$

Como se puede observar en la

Figura 30, la forma de onda a la salida del capacitor tiene una amplitud pico de 397,5 mVp. Teniendo en cuenta que la resolución del sensor es de 66 mV/A, podemos obtener la corriente en la carga mediante la ecuación (34)

$$I = \frac{V_{out}}{\text{resolución del sensor}} = \frac{397,5 mV}{66 mV/A} = 6.02 A \quad (34)$$

Se puede notar que los valores de corriente calculados son similares, por lo que no existe inconveniente en el uso de este sensor para la señal de corriente. Se debe tener en cuenta que el CS5463 puede tener una amplitud máxima en la entrada del canal de corriente de 250mVp. Al igual que en la sección 4.4 se hace necesario implementar un divisor resistivo que permita adecuar el rango máximo del sensor de 1.98 Vp cuando circula una corriente de 30 Amperes por la carga, al voltaje de entrada del canal. Haciendo uso de la ecuación (32), conociendo que $V_{cc} = 1.98V$, $V_x = 200 * 10^{-3}V$ y asignándole un valor a $R_1 = 2.2kOhm$, podemos calcular el valor de R_2 quedando .

$$200 * 10^{-3} * 2.2 * 10^3 = (1.98R_2) - (200 * 10^{-3}R_2)$$

$$R_2 = \frac{440}{1.78}$$

$$R_2 = 247 \text{ Ohm}$$

Para lograr un ajuste más exacto de la señal de corriente se utiliza un potenciómetro de precisión de 330 ohm en el lugar de R_2 .

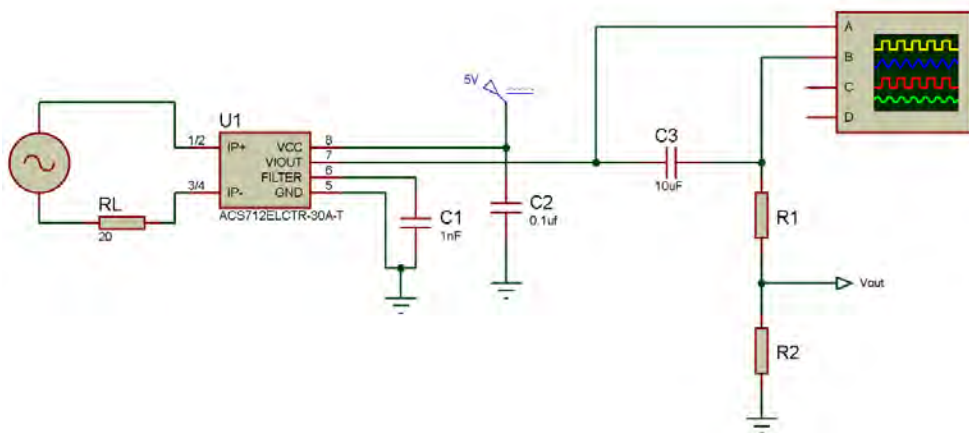


Figura 31: Circuito de acondicionamiento de la señal de corriente

4.6. Microcontrolador

El microcontrolador que se utilizó para el prototipo es el Atmega 328P de Atmel, este microcontrolador posee un núcleo AVR® con 32 registros de propósito general conectados a una unidad lógica aritmética (ALU). Las características del atmega 328P se pueden observar en la Tabla 3: Características del Atmega 328P, tomado de Tabla 3.

Tabla 3: Características del Atmega 328P, tomado de [35]

| Features | ATmega328/P |
|---|---------------|
| Pin Count | 28/32 |
| Flash (Bytes) | 32K |
| SRAM (Bytes) | 2K |
| EEPROM (Bytes) | 1K |
| Interrupt Vector Size (instruction word/vector) | 1/1/2 |
| General Purpose I/O Lines | 23 |
| SPI | 2 |
| TWI (I ² C) | 1 |
| USART | 1 |
| ADC | 10-bit 15kSPS |
| ADC Channels | 8 |
| 8-bit Timer/Counters | 2 |
| 16-bit Timer/Counters | 1 |

El ATmega328 P [35] es compatible con un conjunto completo de herramientas de desarrollo de programas y sistemas que incluyen: compiladores C, ensambladores de macros, depuradores y simuladores de programas, emuladores en circuito y kits de evaluación. Este microcontrolador es uno de los más utilizados en la actualidad, ya que vienen incorporados en los dispositivos Arduino. Esta característica brinda gran versatilidad para la programación y desarrollo del prototipo, debido a que existen en el mercado una serie de sensores, periféricos y librerías para su uso. En la Figura 32 se muestra la configuración de los pines del microcontrolador.

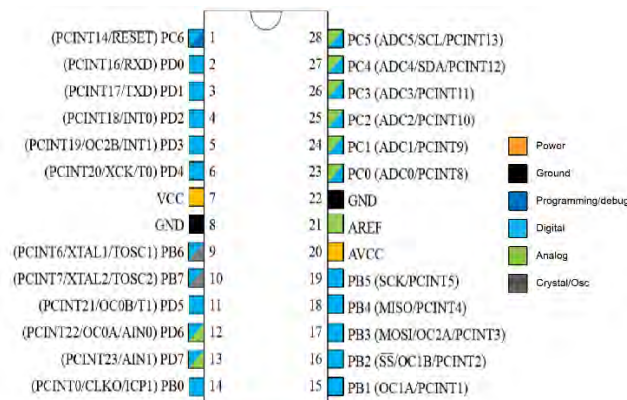


Figura 32: Configuración de los pines del Atmega328P tomado de [35]

El diagrama de flujo correspondiente al algoritmo implementado en el microcontrolador para la corrección del Factor de Potencia se puede observar en la Figura 33.

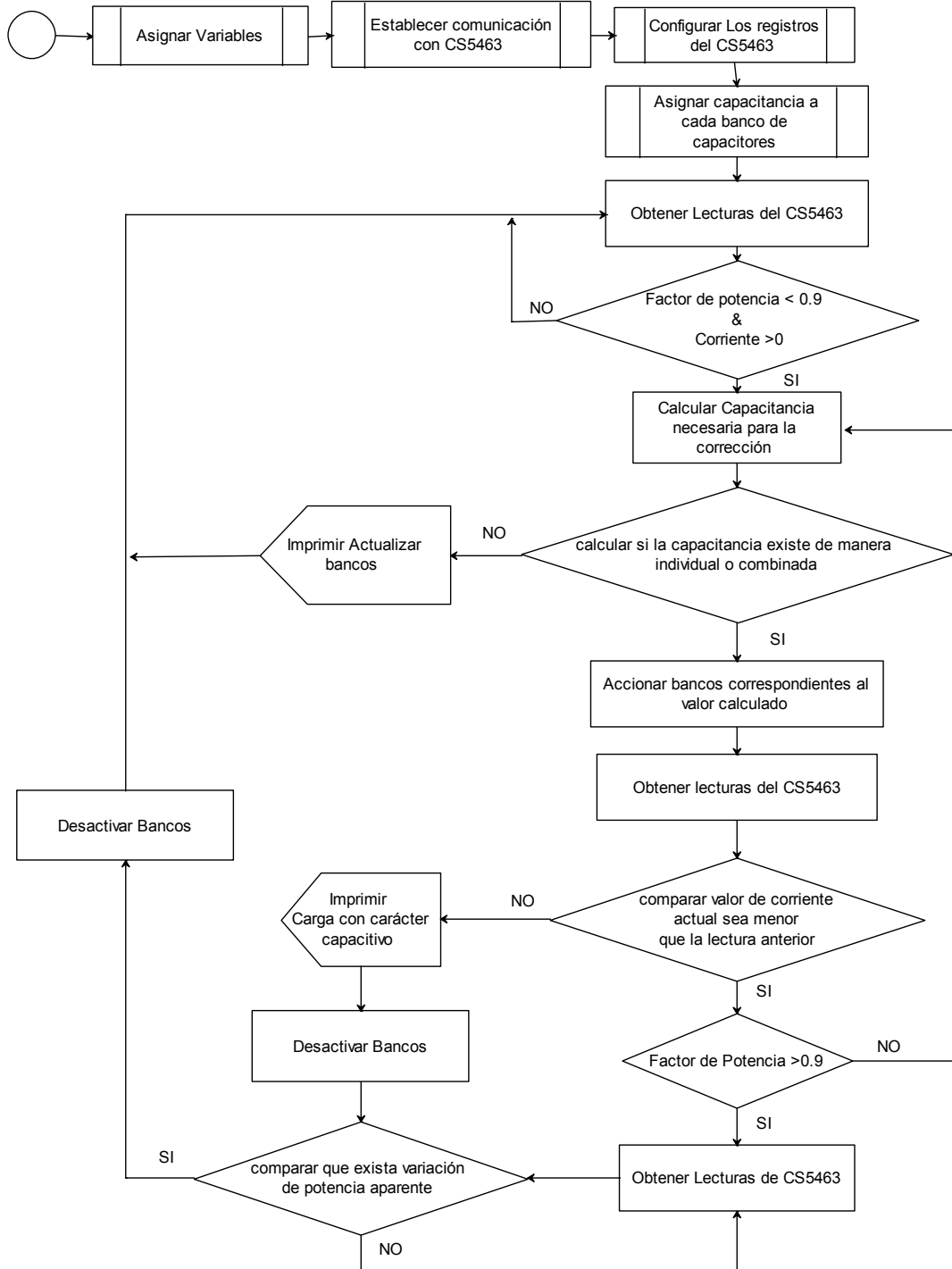


Figura 33: Diagrama de flujo para la corrección automática del Factor de Potencia

Como se puede apreciar en el diagrama de flujo, luego de inicializar la comunicación entre el microcontrolador y el CS5463, se toman las lecturas de los registros del medidor. Para saber si existe una carga conectada al sistema se compara que la

corriente sea diferente de cero y que el Factor de Potencia sea menor de 0.9. Si esta condición se cumple mediante las fórmulas vistas en la sección 2.5.2.2, se calcula la capacitancia necesaria para corregir el Factor de Potencia por encima de 0.9. Cuando el valor de capacitancia es calculado, se busca que en los bancos capacitivos exista el valor aplicando todas las combinaciones posibles, en base a la cantidad de bancos conectados con una tolerancia de $\pm 2\mu F$. En caso de que este valor no exista, se le indica al usuario que no es posible corregir el Factor de Potencia, de lo contrario se activan los bancos correspondientes para la corrección. Si al conectar los bancos la corriente del circuito aumenta en comparación con la lectura anterior, entonces la carga tiene carácter capacitivo, por lo que no es necesario aplicar la corrección. Si la corriente disminuye, entonces la carga tiene carácter inductivo y la corrección está haciendo efecto en el sistema. Para determinar si es necesario aplicar una nueva corrección o desactivar los bancos, se monitorea la Potencia Aparente del sistema, en caso de existir variación en esta de $\pm 6VA$, se desactivan los bancos y se procede a realizar un nuevo cálculo para la corrección.

La aplicación de este algoritmo disminuye la cantidad de actividades de conmutación de los bancos de capacitores, eliminando de esta manera armónicos y transitorios no deseados que se puedan crear por el acople de los capacitores en la red eléctrica.

4.7. Control de los bancos

Para el control de los bancos capacitivos se decidió que se deben accionar mediante un optotriac. en combinación con un Triac como se muestra en la Figura 34,

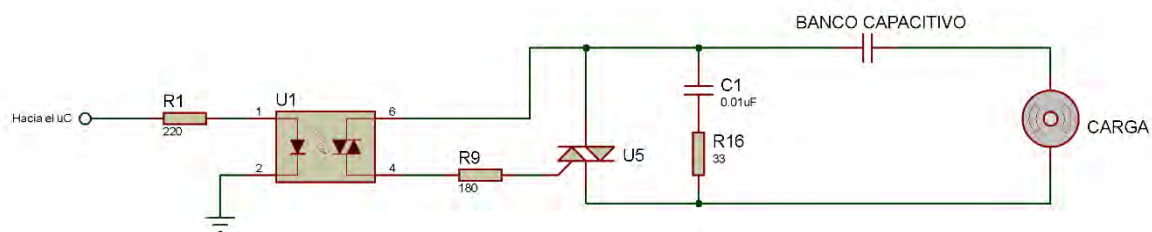


Figura 34: Circuito de control de los bancos capacitivos

En la sección 2.3.2 vimos que el capacitor ante corriente alterna se comporta como un cortocircuito, de manera que en el momento en que se activa el Triac la corriente que circula por éste puede dañar al mismo. Para evitar este problema y garantizar la integridad del circuito de control y del Triac, se utiliza un optotriac con detección de cruce por cero como lo es el MOC3042 [36]. Este semiconductor brinda aislamiento de la red eléctrica para el circuito de control y al realizar el disparo del Triac cuando la onda de corriente realiza el cruce por cero, evita que circule en el capacitor una corriente excesiva que pueda dañar al Triac. En la Figura 35 se puede observar en el

instante que se envía la señal al optotriac, haciendo que el Triac conecte al capacitor en un punto cercano al cruce por cero.

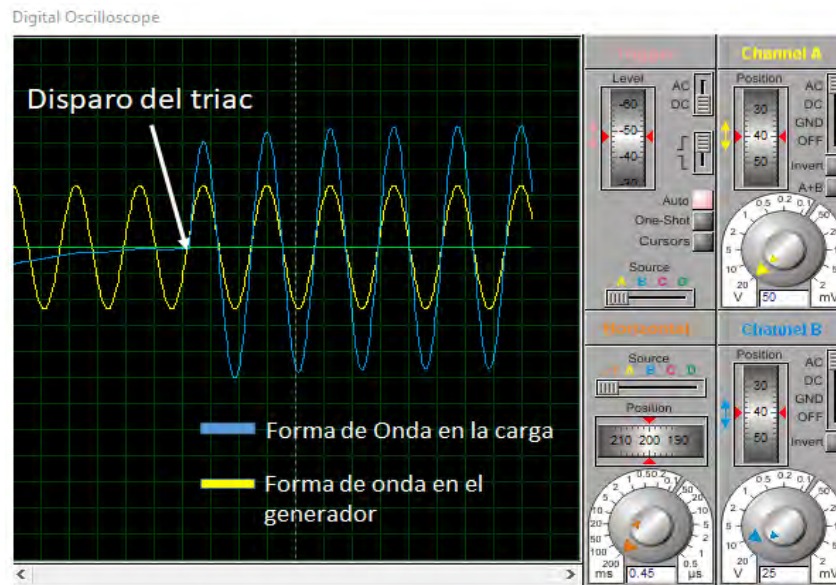


Figura 35: Formas de Onda en la carga y el generador, con el disparo del triac

La red snuber formada por la resistencia y el condensador, R16 y C1 respectivamente, se utiliza para proteger el Triac de sobretensiones y transitorios, los valores de estos componentes son los aconsejados en la hoja de datos del Triac [37].

Como se ha visto hasta el momento, en este capítulo se realizaron las simulaciones y los cálculos necesarios para el correcto funcionamiento del dispositivo. Teniendo en cuenta resguardar la integridad del circuito diseñado, se mantuvo la etapa de control aislada de la red eléctrica. También se implementó un algoritmo para el control de los bancos de capacitores, capaz de reducir el número de conmutaciones de los mismos, alargando así la vida útil de los bancos. Teniendo en cuenta estos parámetros para el diseño del prototipo, en el capítulo siguiente se llevará a cabo la implementación práctica y se mostrarán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al dispositivo.

Capítulo 5 Resultados

5.1. Introducción

Teniendo en cuenta las pautas presentadas para el diseño, se procede a la construcción en el laboratorio del primer prototipo, con el cual se realizaron las primeras pruebas para la corrección del Factor de Potencia. En breve se dará una exhaustiva explicación del proceso de fabricación de los primeros prototipos y las pruebas que se llevaron a cabo haciendo uso de los mismos. Finalmente culminamos con un análisis detallado de los resultados obtenidos.

5.2. Fabricación del dispositivo

Una vez realizados los estudios previos necesarios para el diseño del dispositivo, nos enfocamos en la fabricación del prototipo para demostrar su funcionalidad y eficiencia. En la Tabla 4, se muestran algunos ejemplos de los componentes utilizados para la fabricación, teniendo en cuenta la perspectiva financiera.

Tabla 4: Componentes y Costos

| Componente | Características | Cantidad utilizada | Costo/Unidad | Costo unidad /decena |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------|----------------------|
| Atmega 328P | Microcontrolador | 1 | \$ 53.43 | \$ 44.60 |
| CS5463 | CI Potencia/Energía | 1 | \$ 80.00 | \$ 70.00 |
| Acs712-30A | Sensor Efecto Hall | 1 | \$ 93.43 | \$ 69.00 |
| Resistencias | 1/4Watts | 20 | \$ 0.50 | \$ 0.30 |
| Capacitores | Varios | 15 | \$ 4.00 | \$ 0.32 |
| Transformador | 12V – 500mA | 1 | \$ 97.50 | \$ 80.30 |
| Triac | BT138 | 4 | \$25.40 | \$19.60 |
| Optotriac | MOC 3042 | 4 | \$ 19.60 | \$ 17.20 |
| Placa Fenólica | 30cm x 30cm | 1 | \$130.00 | \$115.40 |
| LCD | 16x2 | 1 | \$ 56.26 | \$ 48.50 |
| Gabinete | | 1 | \$130.00 | \$123.54 |
| Puente Rectificador | KBP2046 | 1 | \$ 9.41 | \$ 5.32 |
| Regulador | LM7805 | 1 | \$ 7.53 | \$ 5.54 |

Para el diseño del dispositivo y la construcción de la tarjeta impresa se hizo uso del software de diseño electrónico Proteus 8, en la Figura 36 y Figura 37 se puede observar el diseño realizado

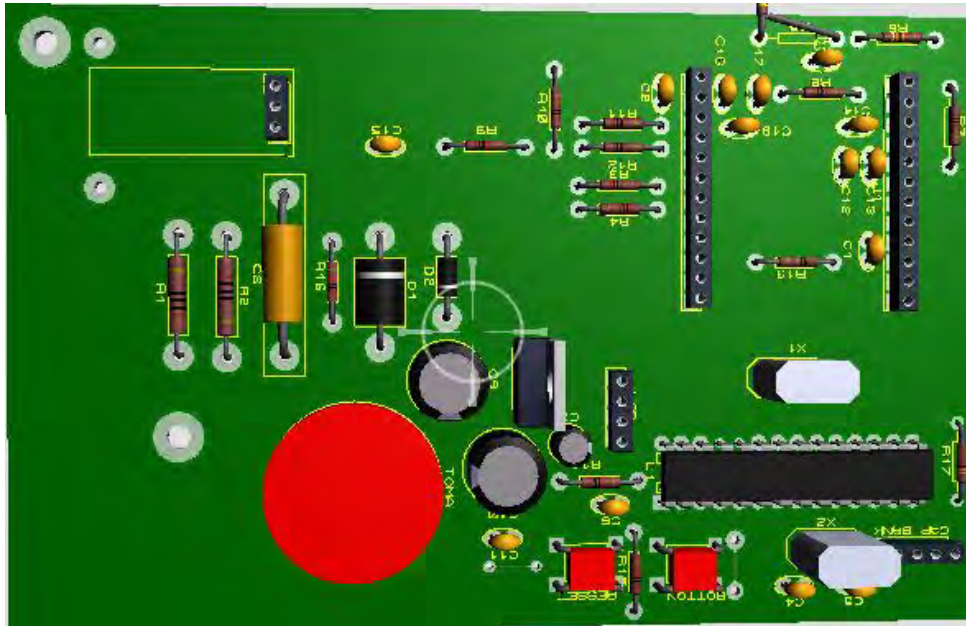


Figura 36: Diseño de la tarjeta de control del prototipo en Proteus 8

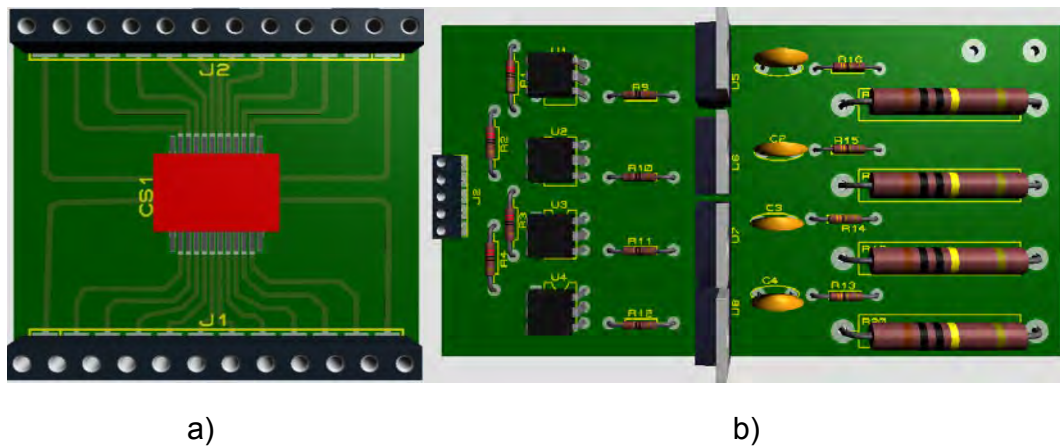


Figura 37: a) Circuito para montaje superficial del CS5463 b) circuito de potencia para el control de los bancos

Realizado el diseño con el software se procedió a la construcción del mismo. En la Figura 38, se puede observar el prototipo terminado y listo para realizar las pruebas de funcionamiento.

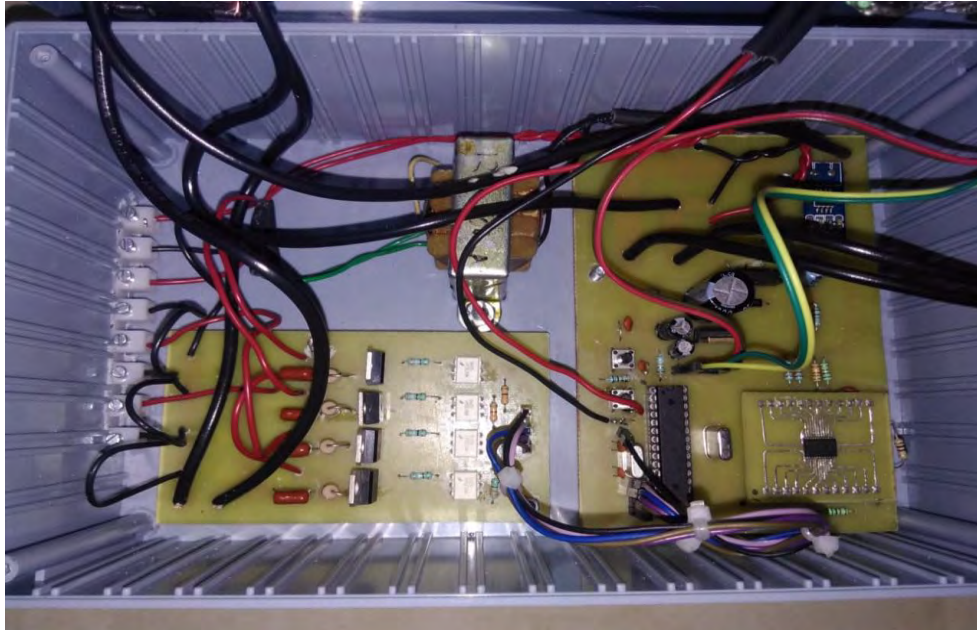


Figura 38: Prototipo Ensamblado

5.3. Pruebas del prototipo.

Para la calibración y comprobación del dispositivo se utilizó como patrón el analizador de redes (Power Analyzer EXTECH 380801) [38]. El cual permite medir una potencia máxima de 2000VA, lo cual hace posible poder usar cargas que consuman hasta 16 Amperes, cuando trabajamos en la red de 120 Vac.

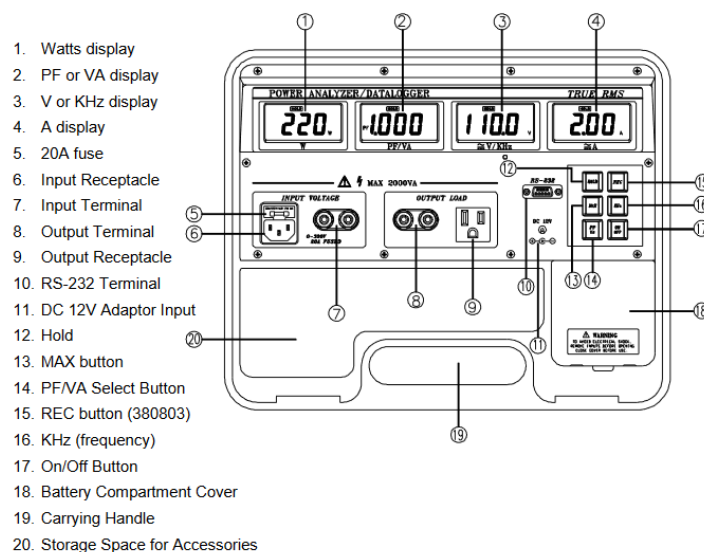


Figura 39: Descripción del analizador de redes EXTECH 380801 tomado de [38]

Haciendo uso del analizador de redes es posible realizar un análisis de energía sobre distintos equipos. Los resultados arrojados por estas pruebas se pueden observar en la Tabla 5

Tabla 5: Análisis de parámetros eléctricos con EXTECH 380801

| Equipo | Potencia Real | Potencia Aparente | Voltaje | Corriente | Factor de Potencia |
|----------------|---------------|-------------------|---------|-----------|--------------------|
| Cautín | 37 | 37.1 | 123.9 | 0.3 | 0.99 |
| Lámpara | 68 | 67.7 | 122.3 | 0.55 | 1.00 |
| Bomba de vacío | 163.2 | 434 | 122.3 | 3.49 | 0.39 |
| Motor | 16.4 | 28.9 | 122.7 | 0.23 | 0.56 |

De la Tabla 5 se puede observar que para las cargas resistivas (Cautín, Lámpara), la Potencia Real (P) y la Potencia Aparente son aproximadamente iguales por lo que el Factor de Potencia es cercano a la unidad, lo cual es acorde a lo mostrado en la sección (2.3.3). Las Figura 40 y Figura 41 muestran las lecturas de los elementos resistivos en el analizador de redes, la figura a) muestra en la segunda lectura el valor de Potencia Aparente y la b) cambia este valor por el del Factor de Potencia.



Figura 40: Valores de energía para el cautín obtenidos por el analizador de redes



Figura 41: Valores de energía para la lámpara obtenidos por el analizador de redes

Resultados

Para corroborar que nuestro sensor presenta un correcto funcionamiento, se realizan las pruebas de funcionamiento con las cargas resistivas antes mostradas, como se puede observar en la Figura 42 y Figura 43 respectivamente.



a)

b)

c)

Figura 42: Parámetros de energía para el cautín medidos con el prototipo



a)

b)

c)

Figura 43: Parámetros de energía para la lámpara medidos con el prototipo

Como se puede apreciar los valores de energía medidos entre el analizador de redes y el sensor diseñado son muy similares, existiendo pequeñas diferencias entre ambas mediciones que se deben a las variaciones de voltajes de la red eléctrica.

En el caso de las cargas con carácter inductivo (Motor, Bomba de vacío), véase Figura 44 y Figura 45 respectivamente, se puede apreciar que existe una gran diferencia entre la Potencia Real y la Potencia Aparente. Esto trae como resultado que el Factor de Potencia sea relativamente bajo, por lo que en estos casos es recomendable el uso de dispositivos para la corrección del mismo.



a)

b)

Figura 44: Valores de energía para el motor obtenido por el analizador de redes



Figura 45: Valores de energía para la Bomba de Vacío obtenido por el analizador de redes

A continuación mostramos un ejemplo de cómo calcular la capacitancia necesaria para la corrección del Factor de Potencia en el caso de la bomba de vacío, de modo tal que el Factor de Potencia corregido sea de aproximadamente de 0.96. Haciendo uso de las ecuaciones vistas en la sección 2.5.2.2 la capacitancia puede escribirse como:

$$C = \frac{\sqrt{S^2 - P^2} - P * \tan(\varphi_2)}{2 * \pi * F * V^2} \quad (35)$$

Utilizando los valores de la Tabla 5 para la bomba de vacío y teniendo en cuenta que la frecuencia es de 60Hz obtenemos que

$$C = 63.21 \mu F \quad (36)$$

Una vez calculado el valor teórico necesario para la corrección del Factor de Potencia a 0.96, se realizan las pruebas con el sensor diseñado, colocando en los bancos las capacitancias siguientes.

Tabla 6: Tabla de bancos capacitivos conectados al prototipo

| Banco 1 | Banco 2 | Banco 3 | Banco 4 |
|------------|------------|------------|-------------|
| 24 μ F | 12 μ F | 20 μ F | 4,7 μ F |

La Figura 46 muestra los valores obtenidos en el sensor con el Factor de Potencia corregido



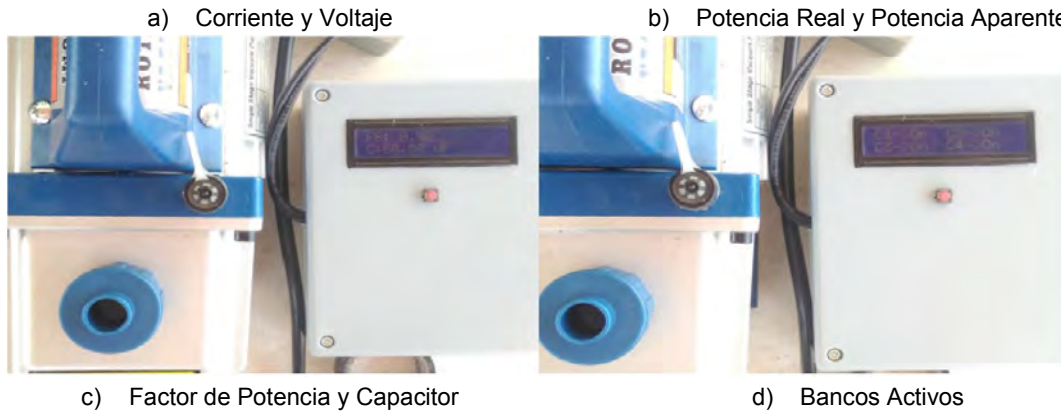


Figura 46: Mediciones con el Factor de Potencia corregido mediante el prototipo del sensor

Como se puede observar en la Figura 46(c,d) se pudo regular el Factor de Potencia a un valor de 0.9 haciendo uso de todos los bancos conectados al sensor. El principal motivo por el que no aumentó mucho más este valor, se debe a que los capacitores utilizados no cuentan con la calidad necesaria para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, se puede apreciar una disminución considerable en el valor de la Potencia Aparente y la corriente consumida por la bomba de vacío mediante la corrección.

De igual manera se realizó la prueba para el motor como se puede apreciar en la Figura 47, brindando resultados satisfactorios.

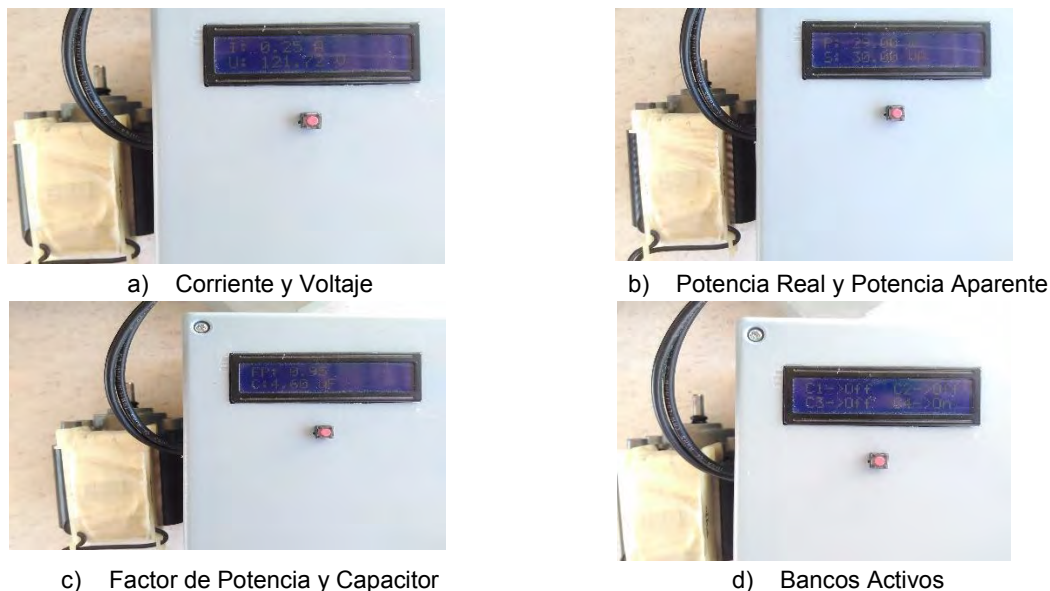


Figura 47: Mediciones con el Factor de Potencia corregido mediante el prototipo del sensor

De manera general en la Tabla 7 se puede observar los valores de energía medidos, haciendo uso del dispositivo diseñado para la Corrección Automática del Factor de Potencia.

Tabla 7: Consumo de equipos con Factor de Potencia corregido

| Equipo | Potencia Real | Potencia Aparente | Voltaje | Corriente | Factor de Potencia |
|----------------|---------------|-------------------|---------|-----------|--------------------|
| Cautín | 37 | 36 | 122.24 | 0.29 | 0.99 |
| Lámpara | 66 | 65 | 119.34 | 0.54 | 0.99 |
| Bomba de vacío | 155 | 170 | 117.09 | 1.44 | 0.90 |
| Motor | 29 | 30 | 121.72 | 0.25 | 0.95 |

Como se puede apreciar en la Tabla 7, haciendo uso del prototipo fue posible corregir los Factores de Potencia en los equipos de carácter inductivo alrededor de 0.9, logrando de esta manera una mejor eficiencia energética.

Los valores obtenidos durante las mediciones haciendo uso del dispositivo, son muy cercanos al valor requerido inicialmente durante la programación, la diferencia entre el valor obtenido y el valor deseado se debe fundamentalmente a la riqueza en los bancos de capacitores, es decir si contamos con una mayor variedad de capacitancias en los bancos es posible mejorar el resultado obtenido en la corrección a un valor más cercano a la unidad.

5.4. Conclusiones del Capítulo.

Por medio de arreglos experimentales hemos corroborado que sólo los equipos de carácter inductivo requieren la corrección del Factor de Potencia. Haciendo uso del prototipo fabricado mediante el diseño propuesto en el Capítulo 4, se logró corregir con gran precisión el Factor de Potencia, demostrando así su buen funcionamiento y utilidad.

Conclusiones

A lo largo de este proyecto se discutió la necesidad de disminuir los consumos energéticos tanto en hogares como en industrias, para lograr de esta manera un uso eficiente de la energía y así aportar al cuidado del medio ambiente y la economía.

Se demostró que las mayores pérdidas de energía corresponden a los equipos de carácter inductivo, cuyo Factor de Potencia es mucho menor que la unidad, debido a que estos equipos necesitan de energía reactiva para su funcionamiento. Haciendo una amplia búsqueda en la literatura, se encontró que una de las alternativas para disminuir el consumo, tanto en hogares como en industrias es la utilización de sensores con la capacidad de corregir los bajos Factores de Potencia, haciendo uso de bancos capacitivos en conjunto con las cargas inductivas.

Luego de un estudio profundo del marco teórico que envuelve esta problemática y un análisis de algunos dispositivos comerciales, se diseñó y fabricó un dispositivo capaz de calcular y aplicar de manera automática, la capacitancia óptima necesaria para la corrección del Factor de Potencia a un valor cercano a la unidad. La principal ventaja del dispositivo fabricado es la optimización de los bancos capacitivos, mediante un algoritmo que hace uso de la base binaria para contemplar cada una de las posibles conexiones en paralelo con la carga de los bancos de capacitores. El uso de esta metodología brinda un menor número de conmutaciones entre los bancos y la red eléctrica, lo cual disminuye el efecto de armónicos y transitorios no deseados en la red. Para comprobar la utilidad y eficiencia del dispositivo, éste fue sometido a prueba utilizando varios equipos de carácter inductivo cuyo Factor de Potencia no sobrepasaba el valor de 0.5. En cada uno de los casos, se logró que el Factor de Potencia corregido estuviera en el rango de (0.90 - 1.00), haciendo uso de apenas cuatro bancos capacitivos.

Teniendo en cuenta el bajo costo de manufactura del prototipo, este sensor puede ser utilizado para corregir desde un equipo inductivo hasta toda una instalación eléctrica donde los transitorios no excedan los 30 Amperes. En el caso de que esto sucediera sería necesario dimensionar un nuevo sensor de corriente, considerando el consumo máximo de la instalación.

Bibliografía

- [1] «gob.mx,» 3 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-para-el-ajuste-del-factor-de-potencia?state=published>.
- [2] Schneider Electric, «Electrical installation guide 2010 Acording to IEC International standards,» de *Electrical installation guide 2010 Acording to IEC International standards*, Technical Collection, 2010, pp. Chapter L page 10-11.
- [3] Circutor, « circutor.es,» 2013. [En línea]. Available: http://circutor.com/docs/MitjaTensio_SP_Cat.pdf. [Último acceso: Junio 2018].
- [4] Vogar, «Vogar,» [En línea]. Available: <http://lavogar.com.mx/>.
- [5] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Mc Graw Hill, 2000.
- [6] A. Gray, Electrical Machine Desing, McGraw- Hill book Company.
- [7] C. J. Kaiser, The Inductor HandBook, CJ Pub., 1996.
- [8] J. F. Mora, Circuitos Electricos, Madrid: PEARSON, 2012.
- [9] C. J. Kaiser, The Capacitor Handbook, New York: Van Nostrand Reinhold., 1990.
- [10] J. D. G. & M. S. Sarma, Sistemas de Potencia, Análisis y Diseño Tercera Edicion, Ciencias e Ingenierias, 2003.
- [11] J. S. John Grainger, Power System Analysis, New York: McGraw-Hill, Inc. , 1994.
- [12] R. O. Albuquerque, Análise de Circuitos em Corrente Alternada, Sao Paulo: Erika, 1989.

- [13] ABB, «Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants,» Technical Application Papers, July 2008.
- [14] Schneider Electric, «Power factor correction and harmonic filtering guide,» Schneider Electric.
- [15] M. B. Carreras, *Electronica Novedad 2017*, Editex, 2017.
- [16] R. P. Á. S.-A. & J. G. WEBSTER, *SENSORS AND SIGNAL CONDITIONING*, second edition, New York: JOHN WILEY & SONS, INC. , 2001.
- [17] R. P. Areny, *Adquisicion y distribucion de senales*, Barcelona: Marcombo, 1993.
- [18] MetAs & Metrólogos Asociados, «Método Indirecto para la Calibración de Shunt de Corriente Continua,» *La Guia Metas*, Agosto 2009.
- [19] W. Koon, «Current sensing for energy metering,» Analog Devices, Inc. .
- [20] T. & S. Vrieswijk, «TheoryCurrentTransformers Theory Current Transformers,» Tennet, Amerongen,NL, 2012.
- [21] J. Anderson, «Current Transformer Theory & Testing,» OMICRON, 2016.
- [22] H. Mani, «Analog Devices Energy (ADE) Products: Frequently Asked Questions (FAQs),» Analog Devices, Norwood, 2013.
- [23] S. Tumanski, «4.2.9 Rogowski Coil,» de *HANDBOOK OF MAGNETIC MEASUREMENTS*, Taylor & Francis Group, 2011, p. 174.
- [24] A. F. O. G. L. Felipe Mader, «Sensor lineal de corriente para medicion de energia,» UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE, Argentina, 2003.
- [25] R. S. Popovic, *Hall Effect Devices*, Second Edition, Philadelphia: Institute of Physics Publishing , 2004.
- [26] ANALOG DEVICES, «GENERAL DESCRIPTION,» de *Active Energy Metering IC with Serial Interface ADE7756*, ANALOG DEVICES, 2001, p. 1.

- [27] H.-L. O. G. Motta Bittencurt, «Medidor Electrónico de Energía,» Facultad de Cs. Exactas y Naturales y Agrimensura , Argentina.
- [28] CIRRUS LOGIC, «Single Phase, Bi-directional Power/Energy IC CS5463,» Copyright @Cirrus Logic, 2011.
- [29] M. Bates, *Interfacing PIC Microcontrollers Embedded Design by Interactive Simulation*, Elsevier , 2006.
- [30] T. V. Sickle, *Programming Microcontrollers in C Second Edition*, Eagle Rock, Virginia : LLH Technology Publishing, 2001 .
- [31] C. Platt, «relay,» de *Encyclopedia of Electronic Components Volume 1*, O'Reilly Media, Inc, 2013, pp. 65-73.
- [32] F. J. Charles Platt, «solid-state relay,» de *Encyclopedia of Electronic Components Volume 2*, United States of America, Maker Media, Inc., 2014, p. 25.
- [33] Zowie Technology Corporation, «2W005G THRU 2W10GSINTERED GLASS PASSIVATED BRIDGE RECTIFIER,» Zowie Technology Corporation.
- [34] I. Allegro MicroSystems, «ACS712, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor,» Allegro MicroSystems, Inc., 115 Northeast Cutoff, Box 15036 Worcester, Massachusetts 01615-0036 , 2006.
- [35] Atmel Corporation, « 8-bit AVR Microcontrollers ATmega328/P,» Atmel Corporation, 2016.
- [36] Fairchild Semiconductor Corporation, «MOC3031M, MOC3032M, MOC3033M, MOC3041M, MOC3042M, MOC3043M6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output (250/400 Volt Peak),» Fairchild Semiconductor Corporation, 2005.
- [37] Philips Semiconductors, «Triacs BT138 series,» Philips Electronics , 1997.

- [38] extech instruments, «User Manual Power Analyzer Model 380801,» 2013.
- [39] C. K. A. & M. N. Sadiku, Fundamentos de Circuitos Electricos, Mc Graw Hill, 2006.
- [40] Julio Usaloe Garcia, Circuitos Electricos Problemas y Ejercicios Resueltos, Prentice Hall.