



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TARJETA INTELIGENTE
PARA EL ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DEL FACTOR DE
POTENCIA EN SISTEMAS TRIFÁSICOS.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

RAÚL VICENTE PAREDES LOOR

DIRECTOR: ING. ARMANDO MENDEZ

Quito, Febrero 2016

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2016
Reservados todos los derechos de reproducción.

DECLARACIÓN

Yo **RAÚL VICENTE PAREDES LOOR**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Raúl Vicente Paredes Loor

C.I. 1721986790

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Diseño y construcción de una tarjeta inteligente para el análisis y corrección del factor de potencia en sistemas trifásicos.**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Raúl Paredes**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.

Ing. Armando Méndez

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1754140091

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios, por darme la sabiduría necesaria para finalizar esta etapa importante en mi vida.

A mi madre, por ser uno de los pilares más importantes de mi vida, por sus cuidados y por siempre apoyarme sea cual sea la situación, siempre estuviste conmigo.

A mi padre, por enseñarme el valor del sacrificio, la responsabilidad y brindarme su experiencia en el campo de la industria.

A mis tíos, por siempre estar pendiente de mí a nivel personal y profesional.

A todos los docentes que conforman la carrera de Ingeniería Mecatrónica, ya que su talento humano y de enseñanza fueron claves para el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

A mi madre, mi padre y mi hermano, que con su amor y paciencia nunca dejaron de apoyarme para poder cumplir esta meta importante, a ellos por ser los pilares importantes en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 POTENCIA EN LOS CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA	3
2.1.1 POTENCIA REAL	3
2.1.2 POTENCIA APARENTE	4
2.1.3 POTENCIA REACTIVA.....	5
2.1.4 CIRCUITO RESISTIVO	6
2.1.5 CIRCUITO INDUCTIVO.....	7
2.1.6 CIRCUITO CAPACITIVO.....	8
2.1.7 TRIÁNGULO DE POTENCIA.....	9
2.1.8 FACTOR DE POTENCIA.....	10
2.2 UTILIZACION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	10
2.2.1 CAUSAS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA	10
2.2.2 PROBLEMAS POR BAJO FACTOR DE POTENCIA	11
2.2.3 BENEFICIOS DE CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA	13
2.3 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	14
2.4 DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	14
2.5 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA	14
2.5.1 COMPENSADORES SINCRÓNICOS.....	15
2.5.2 COMPENSADORES ESTÁTICOS.....	16
2.5.3 BATERÍA DE CONDENSADORES ESTÁTICOS.....	17
2.5.4 VARIADOR DE FRECUENCIA	17
2.6 TIPOS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CONDESADORES ESTÁTICOS.....	19
2.6.1 CORRECCIÓN DISTRIBUIDA.....	19
2.6.2 CORRECCION POR GRUPOS	19
2.6.3 CORRECCION CENTRALIZADA	20

2.6.4 CORRECCION AUTOMÁTICA	21
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1 METODOLOGIA MECATRÓNICA	22
3.1.1 MODELO V	22
3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	23
3.3 DISEÑO SIMULTÁNEO DEL SISTEMA	23
3.3.1 ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE	24
3.3.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE	25
3.3.3 DISEÑO ELECTRÓNICO	26
3.3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	27
3.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	28
3.5 ELEMENTOS	28
3.5.1 COMPARADORES DE VOLTAJE	28
3.5.2 TRANSFORMADOR DE VOLTAJE	29
3.5.3 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	30
3.5.4 COMPUERTA OR	32
3.5.5 MICROCONTROLADOR ATMEGA2560	32
3.5.6 MODULO DE RELÉS	33
3.5.7 PANTALLA LCD	35
4. DISEÑO	36
4.1 SEÑAL DE VOLTAJE.....	36
4.1.1 DETECTOR DE CRUCE POR CERO PARA LA SEÑAL DE VOLTAJE	37
4.2 SEÑAL DE CORRIENTE.....	40
4.2.1 DETECTOR DE CRUCE POR CERO PARA LA SEÑAL DE CORRIENTE	41
4.3 DISEÑO DE LA TARJETA ELECTRÓNICA	44
4.3.1 DISEÑO ELECTRÓNICO	44
4.4 DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL	47
4.4.1 ALGORITMO DE CONTROL	49
4.5 DISEÑO DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	52

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
6.1 CONCLUSIONES.....	66
6.2 RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formas de onda de la corriente y voltaje.....	3
Figura 2. Potencia y relación de fase en un circuito puramente resistivo.	6
Figura 3. Potencia y relación de fase en un circuito puramente inductivo.	7
Figura 4. Potencia y relación de fase de un circuito puramente capacitivo....	8
Figura 5. Triángulo de potencia.....	9
Figura 6. Relación del FP y la corriente nominal de una carga.	11
Figura 7. Reducción de pérdidas en los cables.	13
Figura 8. Compensador Sincrónico	15
Figura 9. Esquema básico de un TCR y TCS.....	16
Figura 10. Compensación por grupos.	20
Figura 11. Compensación de energía reactiva de forma centralizada.....	21
Figura 12. Metodología Mecatrónica.	22
Figura 13. Diseño simultaneo del sistema.....	23
Figura 14. Adquisición de señales de voltaje y corriente.	24
Figura 15. Acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente.....	25
Figura 16. Diseño electrónico	26
Figura 17. Diseño del sistema de control	27
Figura 18. Diagrama y respuesta de un comparador de voltaje.	29
Figura 19. Simbología del transformador de voltaje.	30
Figura 20. Representación de un transformador de corriente.	31
Figura 21. Transformador de corriente TA12-200	31
Figura 22. Diagrama de pines del microcontrolador ATmega2560.....	33
Figura 23. Módulo de relés de 4 canales.	34
Figura 24. Circuito Esquemático de un canal del módulo de relés.	34
Figura 25. Pantalla LCD 4x20.	35
Figura 26. Forma de onda de la señal de voltaje.	36
Figura 27. Salida del comparador de voltaje.	38
Figura 28. Detector de cruce por cero de la señal de voltaje.....	38
Figura 29. Salida del detector de cruce por cero de la señal de voltaje.....	40
Figura 30. Forma de onda de la señal de corriente	40

Figura 31. Detector de cruce por cero para la señal de corriente	41
Figura 32. Salida del detector de cruce por cero de la señal de corriente ...	42
Figura 33. Forma de onda del voltaje y la corriente.....	42
Figura 34. Sumador lógico de las formas de onda de voltaje y corriente.....	43
Figura 35. Forma de onda a la salida del sumador lógico	43
Figura 36. Diagrama eléctrico de la tarjeta.....	44
Figura 37. Distribución de componentes en la tarjeta.....	45
Figura 38. Modelo 3D de la tarjeta	45
Figura 39. Construcción de la tarjeta.....	46
Figura 40. Circuito impreso en la tarjeta.....	46
Figura 41. Deducción del desfase entre el voltaje y la corriente	47
Figura 42. Adquisición del ancho de pulso disparada por flancos	49
Figura 43. Diagrama de flujo del algoritmo de control	50
Figura 44. Diagrama de flujo del algoritmo de visualización.....	51
Figura 45. Triangulo de potencia antes de la compensación.....	53
Figura 46. Triangulo de potencia compensado y no compensado.....	54
Figura 47. Configuración de capacitores.....	56
Figura 48. Motor trifásico y freno electromagnético	58
Figura 49. Información mostrada en la pantalla LCD	59
Figura 50. Factor de potencia vs. Potencia Reactiva	61
Figura 51. Factor de potencia vs Potencia Aparente vs Potencia Reactiva	63
Figura 52. Potencia Reactiva vs. Capacitancia.	65
Figura 53. Salidas tipo relé activadas.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de corrección.....	18
Tabla 2. Características del amplificador operación LM741 y LM339... ..	29
Tabla 3. Características de los tipos de microcontroladores.....	32
Tabla 4. Características del módulo de relés de 4 canales.....	34
Tabla 5. Datos del motor trifásico jaula de ardilla.....	52
Tabla 6. Compensación del reactivo en función del factor de potencia.....	60
Tabla 7. Potencia reactiva y potencia aparente.....	62
Tabla 8. Potencia reactiva y capacitancia calculada.....	64

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	72
Código Fuente	
ANEXO 2	77
Diagrama Eléctrico	
ANEXO 3	78
Factor K	
ANEXO 4	79
Diagrama ATmega2560	

RESUMEN

En la mayor parte de industrias ecuatorianas existen máquinas y equipos, los cuales funcionan con energía eléctrica y en su mayoría son motores, transformadores y generadores. Muchos de estos equipos consumen energía, causan un desbalance en el rendimiento de los mismos y son grandes generadores de potencia reactiva que deterioran las condiciones de diseño de las vías de transmisión y sub-transmisión. La importancia de corregir el factor de potencia en equipos que generan energía reactiva, es disminuir el costo en la planilla de energía eléctrica y alargar la vida útil de las máquinas y sus elementos de transmisión. En este trabajo se estudió la forma de corregir de manera automática ese desaprovechamiento de la energía mediante el diseño de una tarjeta electrónica, para lo cual se utilizó elementos discretos, de control, electrónica digital y programación, el cual muestra el valor del capacitor de compensación mediante una pantalla de visualización de información. En el presente documento se abordó el diseño, implementación, construcción y pruebas de funcionamiento del sistema, así como las ventajas y desventajas de las diferentes maneras de corregir el factor de potencia.

ABSTRACT

There are many Ecuadorian companies that use machinery and devices, which work with electrical energy. There are motors, transformers and generators. Many of these devices consume energy, causing an imbalance in their own performance and are great generators of reactive power that deteriorate the design conditions of the routes of transmission and sub-transmission. The importance of correcting the power factor in equipment which generates reactive power is to reduce the cost of electricity consumption and extend the life cycle of machines and transmission elements. In this paper it was studied how to correct automatically the waste of energy through the design of an electronic card that uses discrete, control, digital electronics and programming elements, which shows the value of the compensation capacitor through an information visualization screen. This paper showed the design, implementation, construction and testing of system operation, as well as the advantages and disadvantages of different ways to correct the power factor.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las cargas y equipos de un sistema industrializado, como por ejemplo líneas de transmisión de energía eléctrica, transformadores, motores, entre otros son de naturaleza inductiva, por lo tanto requieren un flujo adicional de potencia reactiva, ya que su factor de potencia es bajo (menor a 0.9), si no se corrige este problema, se puede representar en un aumento de pérdidas como caídas de tensión en las líneas de transmisión y reducción de la vida útil de los equipos.

Debido a este inconveniente de bajo factor de potencia, las compañías eléctricas se han visto en la necesidad de imponer ciertas cláusulas que originan un recargo en las tarifas establecidas, por ende obliga a los consumidores a corregirlo.

En la actualidad existen varios dispositivos para la corrección del factor de potencia debido a que la variedad de equipos en las industrias es muy amplia, algunas cargas requieren de una corrección del factor de potencia como: hornos de arco, molinos de acero y en especial los motores de alta potencia.

Los sistemas de compensación de potencia reactiva tienen la finalidad de aportar energía reactiva de manera individual o a un conjunto de la instalación que presente un bajo factor de potencia.

La mejora del factor de potencia ayuda a disminuir el sobrecalentamiento de los transformadores y conductores, reduce las pérdidas en las líneas y las caídas de tensión.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una tarjeta electrónica inteligente, que permita de manera automática conocer y corregir el factor de potencia en sistemas trifásicos, en este caso motores.

Los objetivos específicos para la realización de esta tarjeta son los siguientes:

- Adquirir y acondicionar las señales involucradas para el ingreso hacia el microcontrolador, que son el voltaje y la corriente.

- Diseñar el algoritmo de control mediante interrupciones externas que ofrece el microcontrolador.
- Realizar pruebas de funcionamiento en base a equipos conectados de diferente factor de potencia como: lámparas fluorescentes, motores de baja potencia, inductores.

El campo de aplicación está dirigido hacia los consumidores de energía eléctrica de redes trifásicas en baja y media tensión, esto quiere decir de 1 a 60000 voltios.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 POTENCIA EN LOS CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

En cualquier carga dentro de una red senoidal de corriente alterna, el voltaje y la corriente varían con una naturaleza senoidal.

La magnitud de la potencia promedio entregada es independiente de si el voltaje adelanta a la corriente o viceversa. (Boylestad, 2004)

2.1.1 POTENCIA REAL

Cuando la carga en una fuente de corriente alterna contiene solamente una resistencia, la corriente y el voltaje están en fase (Fowler, 1994), tal como se muestra en la figura 1.

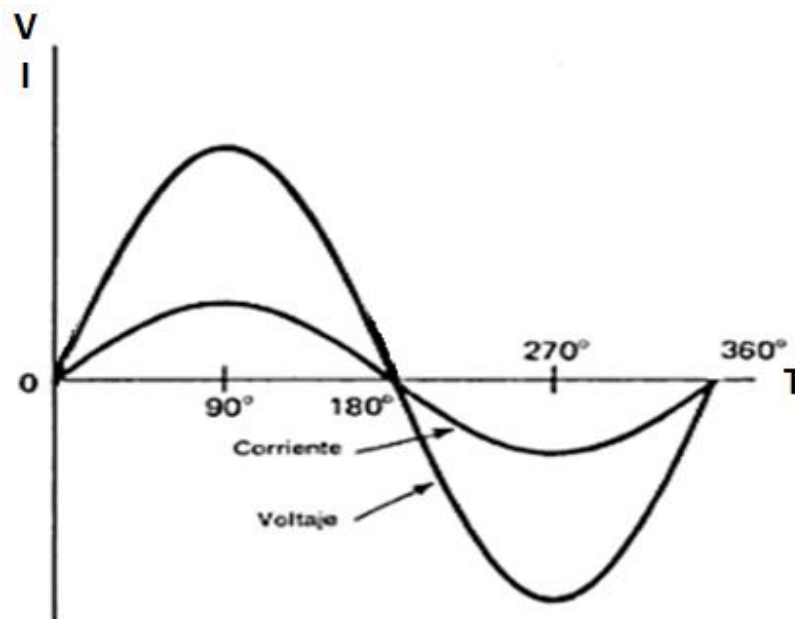


Figura 1. Formas de onda de la corriente y voltaje.

(Fowler, 1994)

Como se puede observar en la figura 1. El producto de los valores instantáneos de la corriente y el voltaje crea una potencia instantánea, la

forma de onda de la potencia siempre es positiva para circuitos donde el voltaje y la corriente están en fase. (Fowler, 1994)

La potencia real o promedio se representa mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi \quad [1]$$

Donde:

P: Potencia real o promedio

V_m : Valor pico de voltaje

I_m : Valor pico de corriente

ϕ : Ángulo formado por el desfase entre el voltaje y la corriente

La unidad de la potencia promedio es el Watt (W).

2.1.2 POTENCIA APARENTE

La potencia aparente está determinada por el producto de la corriente y el voltaje aplicados sin importar los componentes de la carga.

La potencia aparente es de mucha utilidad para la descripción y el análisis de redes de corriente alterna senoidales y para lograr fijar niveles máximos de muchos componentes y sistemas eléctricos. (Boylestad, 2004)

La potencia aparente se representa mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_m I_m}{2} \quad [2]$$

Donde:

S: Potencia Aparente

V_m : Valor máximo de Voltaje

I_m : Valor máximo de Corriente

La unidad de la potencia aparente es el Volt-Ampere (VA).

2.1.3 POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva no es una potencia realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo. Aparece en una instalación eléctrica en la que existen bobinas o condensadores, y es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes. (Imergia, 2014)

La potencia reactiva se representa mediante la ecuación:

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin \phi \quad [3]$$

Donde:

Q: Potencia reactiva

V_m : Valor máximo de Voltaje

I_m : Valor máximo de Corriente

ϕ : Ángulo formado por el desfase entre el voltaje y la corriente

La unidad de la potencia reactiva es el Volt-Ampere Reactivos (VAR).

2.1.4 CIRCUITO RESISTIVO

Para un circuito puramente resistivo tal como se muestra en la figura 2, el voltaje y la corriente se encuentran en fase, y el ángulo de fase es igual a cero. (Boylestad, 2004)

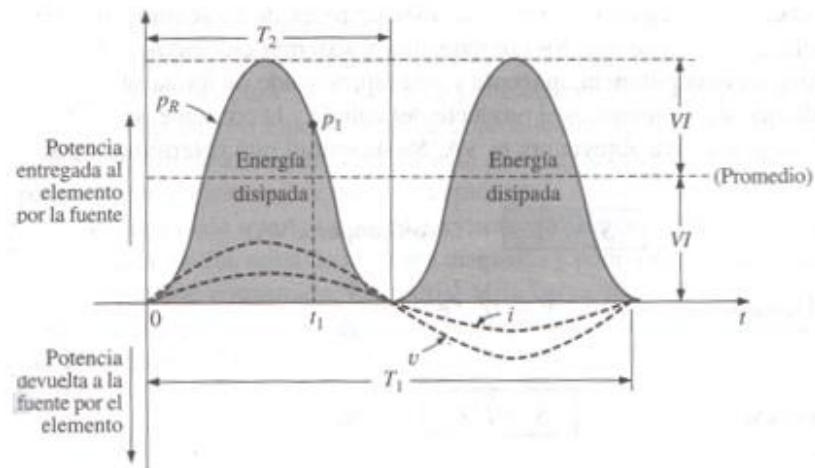


Figura 2. Potencia y relación de fase en un circuito puramente resistivo.

(Boylestad, 2004)

La potencia real para un circuito puramente resistivo es la siguiente:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$$

Entonces:

$$\cos \phi = 1 \text{ (Circuito Resistivo)}$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2}$$

2.1.5 CIRCUITO INDUCTIVO

Para un circuito puramente inductivo, el voltaje v adelanta en noventa grados a la corriente i , tal como se muestra en la figura 3.

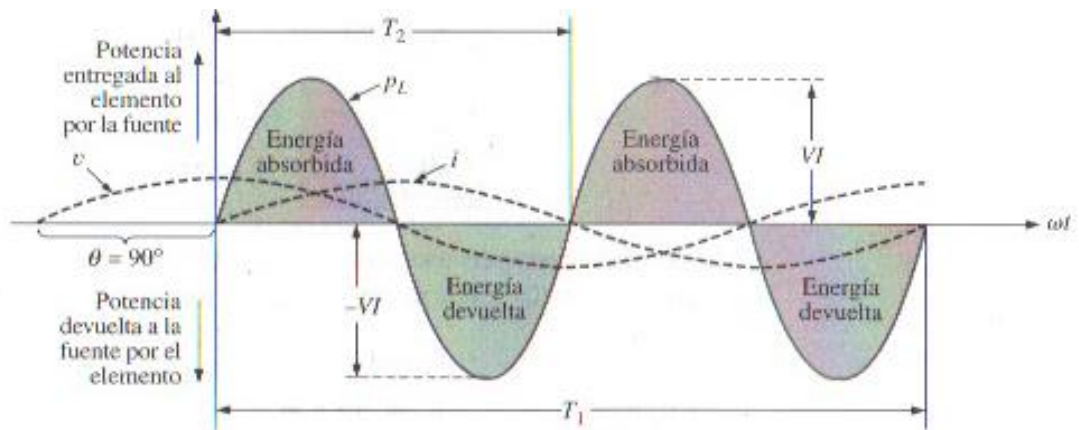


Figura 3. Potencia y relación de fase en un circuito puramente inductivo.
(Boylestad, 2004)

La potencia real para un circuito puramente capacitivo es la siguiente:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$$

$$\phi = 90 \text{ (Circuito Inductivo)}$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos 90$$

$$P = 0 \text{ Watts}$$

La potencia real en un circuito puramente inductivo es cero.

2.1.6 CIRCUITO CAPACITIVO

Para un circuito puramente capacitivo, la corriente i adelanta en noventa grados al voltaje V , tal como se muestra en la figura 4.

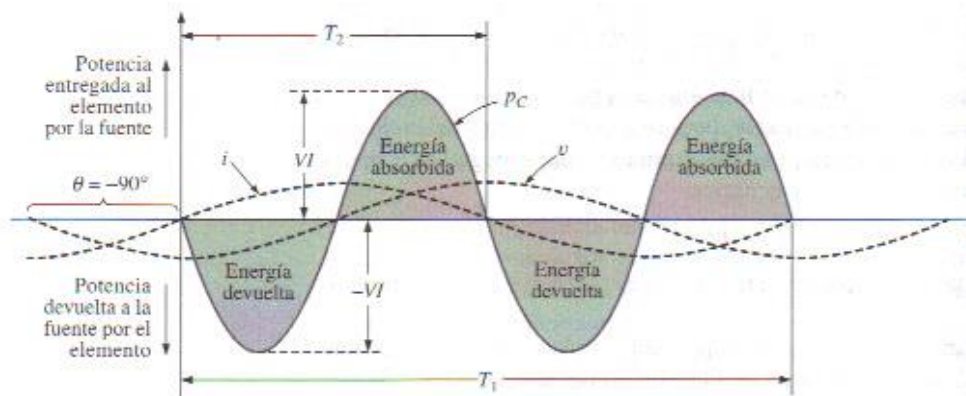


Figura 4. Potencia y relación de fase de un circuito puramente capacitivo.

(Boylestad, 2004)

La potencia real para un circuito puramente capacitivo es la siguiente:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$$

$$\phi = 90 \text{ (Circuito Capacitivo)}$$

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos 90$$

$$P = 0 \text{ Watts}$$

La potencia real en un circuito puramente capacitivo es cero.

2.1.7 TRIÁNGULO DE POTENCIA

La potencia promedio, potencia aparente y potencia reactiva, tal como se muestra en la figura 5. Se puede relacionar en el dominio vectorial donde:

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + \mathbf{Q} \quad [4]$$

Para una carga inductiva, el fasor de potencia \mathbf{S} , está definido por:

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q} \quad [5]$$

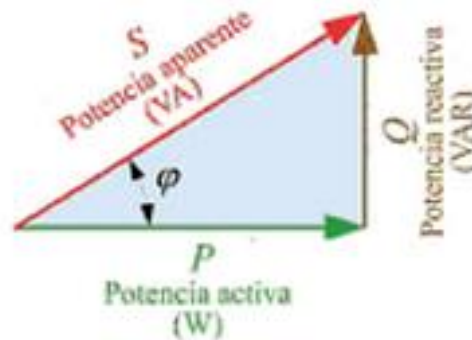


Figura 5. Triángulo de potencia.

(Miguel, 2010)

El procedimiento para calcular la potencia Activa, Reactiva y Aparente en cualquier sistema es el siguiente:

- 1.- Encontrar la potencia real y la potencia reactiva para cada rama del circuito
- 2.- La potencia real total del sistema (P_T) es la suma de la potencia promedio entregada a cada rama
3. La potencia reactiva total (Q_T) es la diferencia entre la potencia reactiva de las cargas inductivas y la de las cargas capacitivas
4. La potencia aparente total es $S_T = (P_T^2 + Q_T^2)^{1/2}$. (Boylestad, 2004)

2.1.8 FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se considera como el coseno del ángulo de desfase que existe entre el voltaje y la corriente. (Soto, 1996)

Un factor de potencia cercano a la unidad significa que la energía reactiva es pequeña comparada con la energía activa, mientras que un valor de factor de potencia bajo indica la condición opuesta. (Schneider Electric, 2014)

El factor de potencia en un circuito polifásico equilibrado, es el mismo que el de cada una de sus fases, cuando las fases no se encuentran en equilibrio, el factor de potencia real es indeterminado. (Fink, Carroll, & Beaty, 1981)

2.2 UTILIZACION DEL FACTOR DE POTENCIA

Para la utilización del factor de potencia se consideran las siguientes características, como sus causas, sus problemas y sus beneficios.

2.2.1 CAUSAS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA

Las causas de un bajo factor de potencia se deben a diferentes equipos que deterioran la red eléctrica.

Las cargas capacitivas como los condensadores, y cualquier otro elemento que sea capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico.

Las cargas inductivas como motores, balastros, transformadores, etc. Son el origen del bajo factor de potencia ya que son cargas no lineales que deterioran la red eléctrica. (Serrano, 2013)

2.2.2 PROBLEMAS POR BAJO FACTOR DE POTENCIA

Los problemas por un bajo factor de potencia son reflejados en el desempeño y la vida útil de sus equipos. A continuación se presenta los problemas más frecuentes.

- Modificación de la corriente

Para una potencia activa consumida constante, con factor de potencia bajo, la potencia aparente será más alta y por consiguiente la corriente en el equipo aumenta.

Para una potencia activa constante, la cantidad de corriente de la red se incrementa en medida que el valor de factor de potencia disminuya. (Soto, 1996)

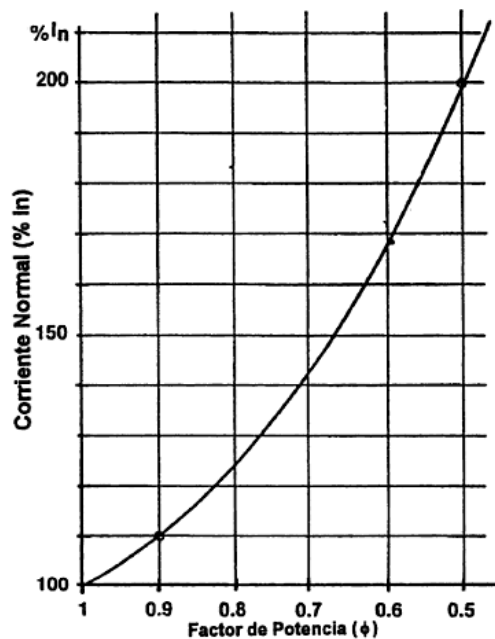


Figura 6. Relación del FP y la corriente nominal de una carga.

(Soto, 1996)

En el punto en donde existe un aumento de corriente existen varias desventajas para el usuario industrial como:

Aumento de pérdidas por efecto Joule, uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores, que además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortocircuitos. (Serrano, 2013)

Aumento en la caída de voltaje, que su principal consecuencia es el insuficiente suministro de potencia a las cargas tales como motores, lámparas.

Tanto la caída de voltaje y el aumento de corriente afecta principalmente a los embobinados de transformadores y motores, cables de alimentación y los sistemas de protección y control. (Soto, 1996)

- Penalización Económica

Multa a la empresa por la compañía que suministra la energía eléctrica. (Saucedo, 2001)

En el caso de Ecuador, la empresa eléctrica multa cuando el valor del factor de potencia es menor a 0,92. (EEQ, 2014)

La penalización por bajo factor de potencia, será igual a la facturación mensual correspondiente a consumo de energía, demanda y comercialización multiplicada por el siguiente factor:

$$Bfp = \frac{0,92}{Fpr} - 1 \quad [6]$$

Donde:

Bfp: Factor de penalización por bajo factor de potencia

Fpr: Factor de potencia registrado

La penalización por bajo factor de potencia es parte integrante de la planilla por venta de energía.

- Pérdidas en los cables

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. De la figura 7 se puede observar que la mejora del factor de potencia de 0.6 a 0.8 reduce las pérdidas en un 44% y de 0.6 a 1 representa una reducción del 66%. Esto quiere decir que la vida útil de los cables aumenta (Soto, 1996)

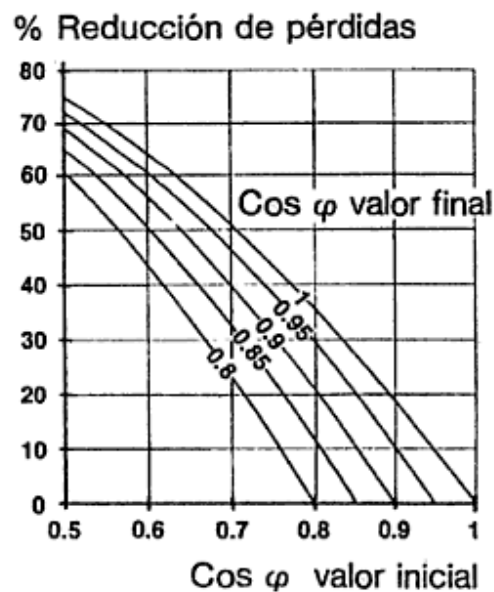


Figura 7. Reducción de pérdidas en los cables.

(Soto, 1996)

2.2.3 BENEFICIOS DE CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA

Los beneficios más significativos de corregir el factor de potencia son los siguientes:

- Disminución de pérdidas en los conductores.
- Reducción de las caídas de tensión.
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores y líneas.
- Incremento de la vida útil de las instalaciones eléctricas.
- Reducción del costo de su facturación de energía eléctrica.

(CFE, 2015)

2.3 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

En los sistemas eléctricos de corriente alterna se tienen dos tipos de cargas fundamentales: las cargas resistivas y reactivas.

En la mayoría de plantas industriales, el problema del factor de potencia es motivo de preocupación en el área administrativa por la penalización por bajo factor de potencia.

2.4 DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA

Existen 2 modos de hallar el factor de potencia:

- a. Directa: Mediante la medida directa de un cosfímetro.
- b. Indirecta: A través de la lectura de los contadores de energía activa y reactiva. (ABB, 2014)

2.5 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA

La corrección o mejora del factor de potencia implica diferentes maneras de elevarlo, Todos los métodos de mejoramiento consisten en conectar dispositivos entre los conductores en paralelo con las cargas inductivas. (Kosow, 1993)

La finalidad es de mejorar los perfiles de tensión del sistema, reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas y prolongar la vida útil de los equipos. (ABB, 2014)

2.5.1 COMPENSADORES SINCRÓNICOS

Se trata de motores sincrónicos que funcionan en vacío, puestos en sincronismo con la red, cuya única función es proporcionar la potencia reactiva que falta (funcionamiento en sobreexcitación), o bien absorber la potencia que excede (funcionamiento en subexcitación), tal como se muestra en la figura 8. (ABB, 2014)

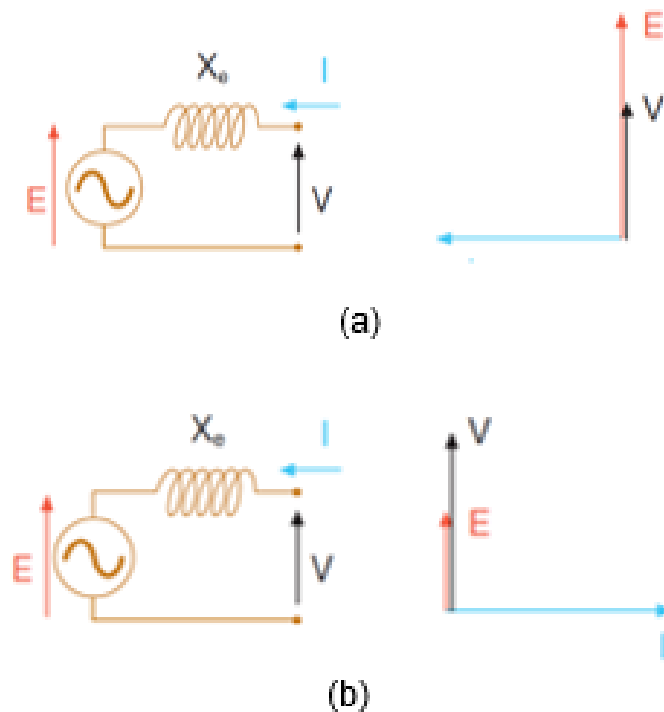


Figura 8. Compensador Síncrono. (a) Sobreexcitación (b) Subexcitación
(ABB, 2014)

Donde:

E : f.e.m. inducida en las fases de estator

V : Tensión de fase impuesta por la red a los bornes del alternador

I : Corriente del estator

X_e : reactancia del estator

Si no se acoplan a carga alguna, los compensadores síncronos se pueden emplear como capacitores síncronos, en esta última aplicación, casi toda su capacidad en KVA se representa en jQ Kilovars de corrección. (Kosow, 1993)

2.5.2 COMPENSADORES ESTÁTICOS

En el desarrollo de la electrónica de potencia está favoreciendo la sustitución de los compensadores síncronos por sistemas estáticos para el control de la potencia reactiva como, por ejemplo, los TSC (Thyristor Switched Capacitors) y los TCR (Thyristor Controlled Reactors). Tal como se muestra en la figura 10.

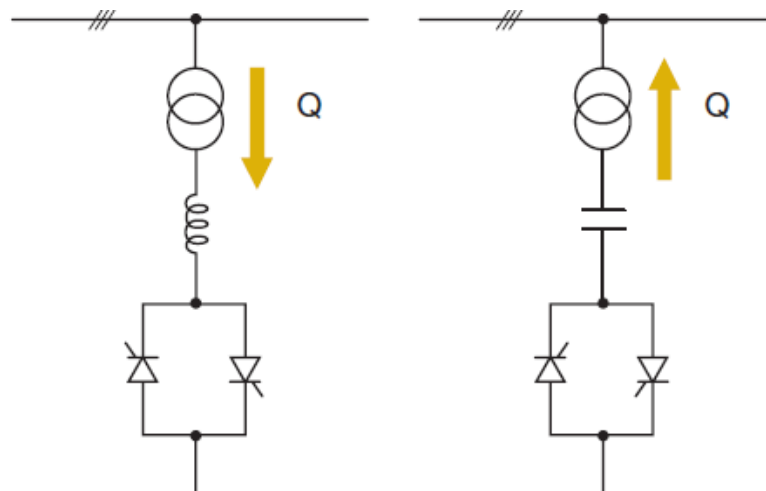


Figura 9. Esquema básico de un TCR y TCS.

(ABB, 2014)

Los TSC permiten un control escalonado de la potencia reactiva suministrada por grupos de condensadores, mientras que con los TCR se puede controlar con continuidad la potencia reactiva absorbida por las inductancias. Desde el punto de vista aplicativo, estos dispositivos se emplean sobre todo en redes de alta y muy alta tensión. (ABB, 2014).

2.5.3 BATERÍA DE CONDENSADORES ESTÁTICOS

El condensador es un bipolo pasivo constituido por dos superficies conductoras, llamadas armaduras, entre las cuales se interpone un material dieléctrico.

Debido a su capacidad de acumular y suministrar energía, el condensador se utiliza como elemento de base para la realización de las baterías de corrección del factor de potencia (en todos los niveles de tensión) y de los dispositivos estáticos de regulación de la potencia reactiva. (ABB, 2014)

Para dimensionar la batería de condensadores en una instalación hay que determinar de manera precisa el factor de potencia a partir de los consumos o ciclos de carga.

2.5.4 VARIADOR DE FRECUENCIA

Es un dispositivo de electrónica de potencia, capaz de modificar la frecuencia en hercios de la alimentación de un motor. El variador de frecuencia trabaja entre una frecuencia mínima y una frecuencia máxima. (Martin, 2009)

En el caso de los variadores de frecuencia, no se recomienda el uso de condensadores estáticos para la corrección del factor de potencia, ya que el mismo equipo realiza esa función. Un motor que opera con este dispositivo, muestra un factor de potencia mayor a 0,95. Los daños por colocar condensadores a un variador son severos, por el fenómeno de resonancia. (GlobalTec, 2008)

El principio de funcionamiento del variador de frecuencia es el siguiente:

Se alimenta al equipo con un voltaje de corriente alterna, el equipo primero convierte la CA en corriente directa, por medio de un puente rectificador de diodos, este voltaje es filtrado por un banco de capacitores interno, con el fin de suavizar el voltaje rectificado y reducir la emisión de variaciones en la

señal; posteriormente en la etapa de inversión, la cual está compuesta por transistores IGBT, que encienden y apagan en determinada secuencia enviando pulsos para generar una forma de onda cuadrada de voltaje de CD a un frecuencia constante, y su valor promedio tiene la forma de onda senoidal de la frecuencia que se aplica al motor.

En la tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de corrección del factor de potencia.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de corrección.

METODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Compensadores síncronos	<ul style="list-style-type: none"> - Control de potencia activa y reactiva en redes de corriente alterna - Sistema de excitación de fácil control 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos costos de instalación y mantenimiento - Costo elevado del equipo y su desarrollo
Compensadores estáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en el tamaño de los equipos - Aumento en flujo de potencia en las líneas de transmisión - Mejora las condiciones de estabilidad - Reducción de campos magnéticos y de ruido 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección de armónicos en la red. - Costo elevado
Batería de condensadores	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil mantenimiento - Durabilidad del gabinete - Tienen medidas de seguridad que evitan descargas - Bajo costo en comparación a todos los métodos existentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de potencia reactiva entre las cargas y el centro de control de motores. - Requiere un regulador automático de corrección. - El costo de capacitores por separado (Suma de capacitancias) es mayor que un capacitor del mismo valor.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de corrección. (continuación)

Variador de frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del consumo de energía eléctrica por reducción de picos de corriente en el arranque - Ahorro en mantenimiento - Contar con la posibilidad de las funciones de un PLC básico y freno dinámico - Corrección del factor de potencia y filtros de armónicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las averías no se pueden reparar in situ. - En caso que exista una avería, si no se tiene un variador de repuesto, la instalación queda sin funcionamiento. - Precio elevado
-------------------------------	---	--

2.6 TIPOS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CONDESADORES ESTÁTICOS

2.6.1 CORRECCIÓN DISTRIBUIDA

La corrección distribuida se realiza conectando una batería de condensadores debidamente dimensionada directamente a los terminales del dispositivo que necesita la potencia reactiva.

2.6.2 CORRECCION POR GRUPOS

Los equipos de compensación están conectados en el embarrado de cada cuadro de distribución local, tal como se muestra en la figura 10. Una parte significativa de la instalación se ve beneficiada por este tipo de compensación, sobre todo los cables de alimentación y cada uno de los cuadros de distribución secundaria. (Schneider Electric, 2014)

Si se desea efectuar una corrección distribuida o por grupos es importante determinar el $\cos \phi$ de la carga o grupo de cargas.

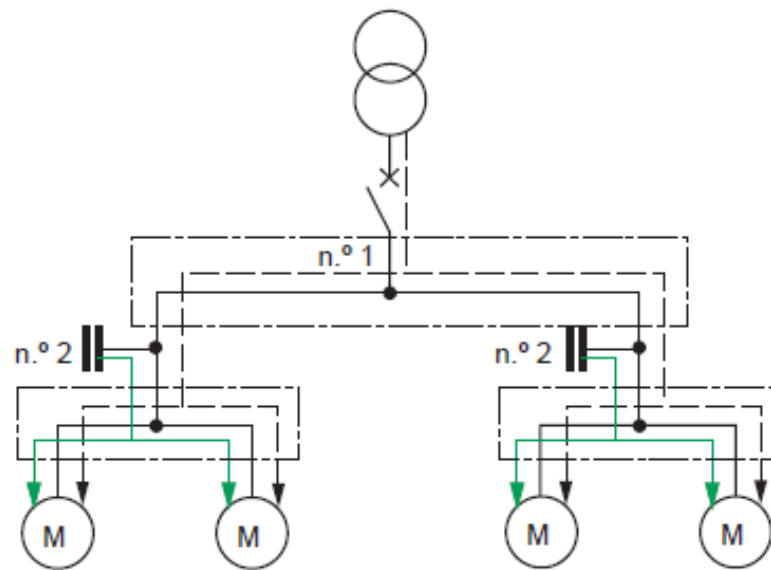


Figura 10. Compensación por grupos.

(Schneider Electric, 2014)

La corriente reactiva, está presente en la instalación desde el nivel 2 hasta los receptores. Una ventaja de esto, es la reducción de la sección de los cables en el nivel 1. (Schneider Electric, 2014)

2.6.3 CORRECCION CENTRALIZADA

Consiste en situar la batería de los condensadores en la acometida, es decir, cerca de los tableros de distribución de energía.

La potencia total de la batería se divide en varios bloques llamados escalones comunicado con un regulador automático, tal como se muestra en la figura 11, el cual se encarga de conectar o desconectar en cada momento según el consumo de energía reactiva. (Trashorras, 2013)

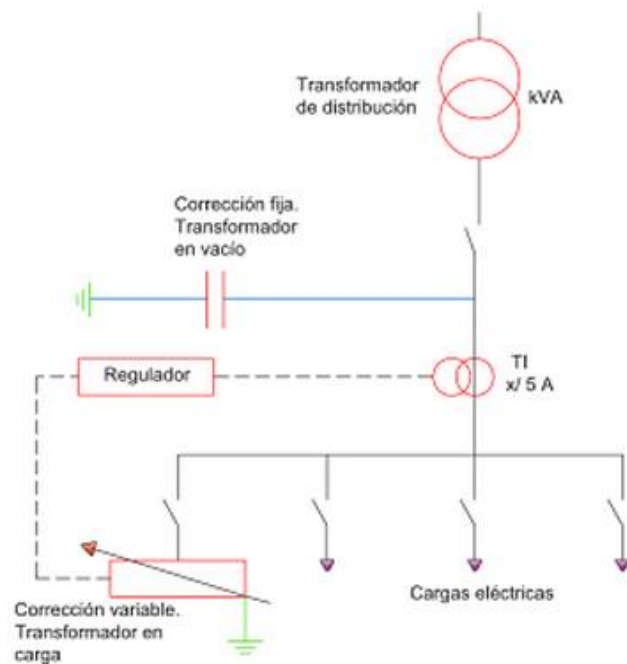


Figura 11. Compensación de energía reactiva de forma centralizada.

(Trashorras, 2013)

2.6.4 CORRECCION AUTOMÁTICA

En la mayor parte de las instalaciones no tiene lugar una absorción constante de potencia reactiva, por ejemplo, a causa de ciclos de trabajo en los que se utilizan máquinas con diferentes propiedades eléctricas.

Un sistema de corrección automática está compuesto por:

- Sensores que detectan las señales de corriente y tensión.
- Una unidad inteligente que compara el factor de potencia medido con el deseado y ejecuta la inserción o la desconexión de las baterías de condensadores en función de la potencia reactiva.
- Un cuadro eléctrico de potencia, que incluye los dispositivos de protección y maniobra.
- Baterías de condensadores. (ABB, 2014)

3. METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGIA MECATRÓNICA

La metodología mecatrónica tal como se muestra en la Figura 12 reúne áreas de la tecnología que involucran sensores, sistemas de medición, sistemas de manejo, sistemas de microprocesador y actuadores.

La metodología mecatrónica se refiere al modelo V como un ciclo macro.

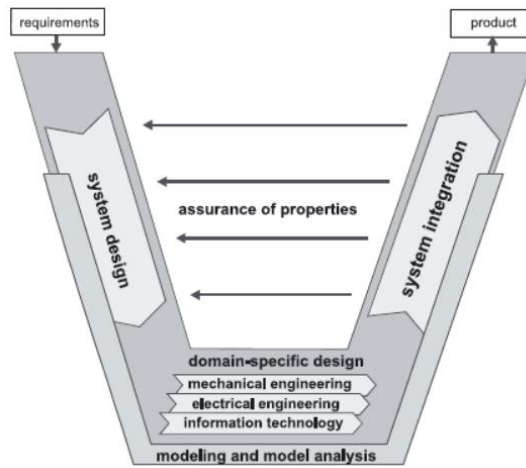


Figura 12. Metodología Mecatrónica.

(VDI-Richtlinien, 2004)

3.1.1 MODELO V

El modelo V describe el procedimiento genérico para el diseño de sistemas mecatrónicos mediante los siguientes parámetros:

- Requerimientos
- Diseño de sistema
- Diseño específico
- Integración de sistemas
- Aseguramiento de propiedades
- Producto

3.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para el diseño y posterior construcción del prototipo mecatrónico se consideran los siguientes requerimientos para su correcto funcionamiento.

Requerimientos:

- Adquisición de las señales de voltaje de red y corriente del motor.
- Detectar cruce por cero de las señales de voltaje y corriente.
- Tipo de salida relé.
- Tecnología de control basada en microcontrolador.
- Es necesario conocer la potencia nominal del motor, voltaje de operación del motor (60 Hz) antes de la puesta en funcionamiento.
- Corregir el factor de potencia cuando sea menor a 0,92.
- Se debe visualizar la información recopilada como: valor del capacitor para corregir el factor de potencia, número de pasos para contactores.

3.3 DISEÑO SIMULTÁNEO DEL SISTEMA

Para el diseño mecatrónico se considera la adquisición y acondicionamiento de las señales, el diseño electrónico y el diseño del algoritmo de control de la tarjeta.

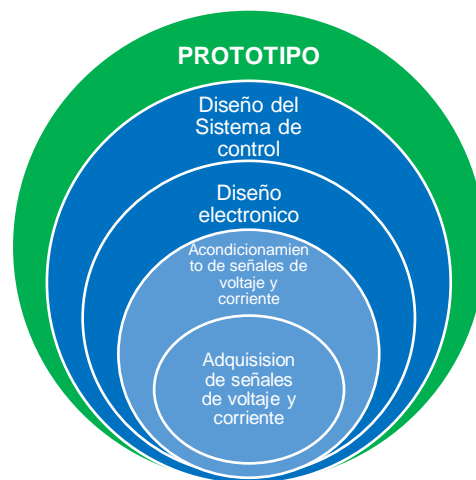


Figura 13. Diseño simultáneo del sistema

3.3.1 ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE

En esta etapa de la adquisición de las señales de voltaje y corriente lo más importante es obtener la forma de onda senoidal de cada una de las señales antes mencionadas para lo cual se procedió a:

- Reducir el voltaje de la red a un valor admisible (Transformador de Voltaje)
- Recopilar la forma de onda de la señal de corriente del motor (Transformador de Corriente)
- Verificar que las formas de onda del voltaje y la corriente tengan la misma frecuencia

La figura 14 representa el proceso para el cual se adquieren las señales de voltaje y corriente, así como sus respectivas formas de onda.

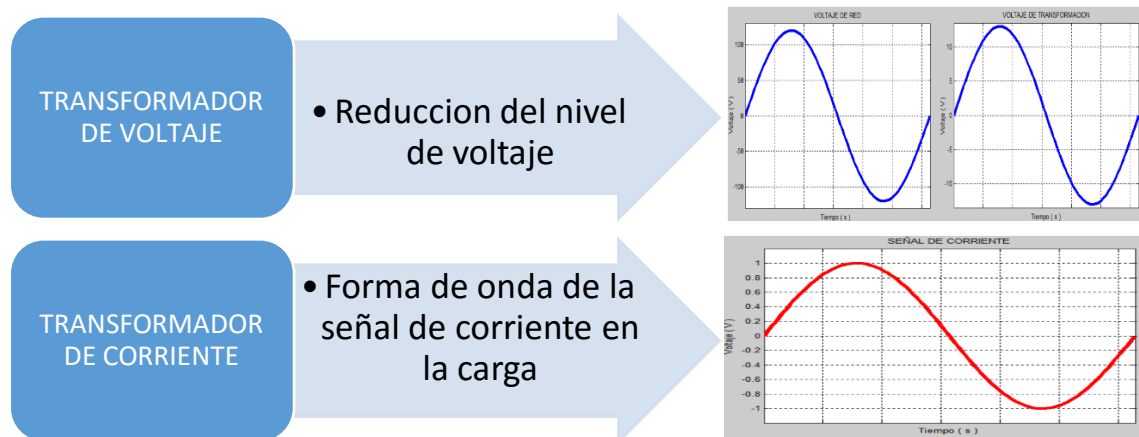


Figura 14. Adquisición de señales de voltaje y corriente.

3.3.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE

En la etapa del acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente, es importante determinar la pureza de las señales que ingresaran al microcontrolador y para ello se procedió con lo siguiente:

- Implementación de detectores de cruce por cero, necesarios para la conversión de niveles de AC a DC
- Análisis del ruido de las señales de voltaje y corriente
- Selección del filtro adecuado para la eliminación del ruido y frecuencias no requeridas
- Suma lógica de las señales de voltaje y corriente, para obtener un pulso con una frecuencia establecida

La figura 15 representa el proceso del acondicionamiento de las señales, tanto para el voltaje como para la corriente.

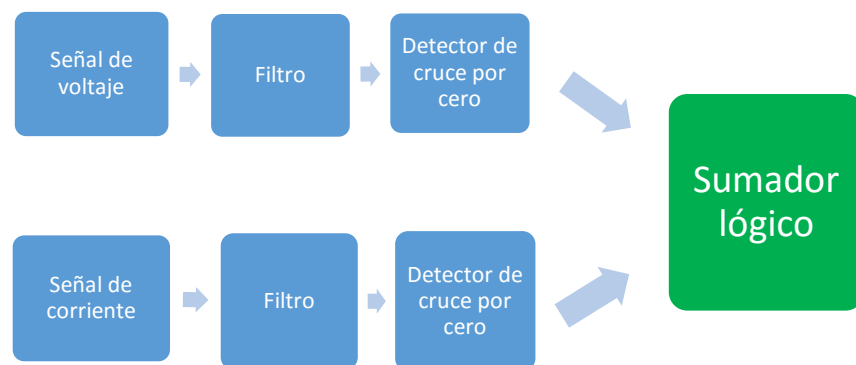


Figura 15. Acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente

3.3.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

En la etapa del diseño electrónico es importante determinar la dimensión de la tarjeta electrónica y su funcionalidad, para ello se procedió con lo siguiente:

- Cálculo de la corriente máxima para el dimensionamiento del módulo de relés
- Elección del tamaño de la pantalla LCD para la visualización de la información
- Diseño del circuito impreso PCB
- Implementación de los elementos sobre la tarjeta electrónica
- Selección del microcontrolador.

La figura 16 representa el proceso del diseño electrónico, hasta llegar finalmente a la implementación de todos los elementos descritos.

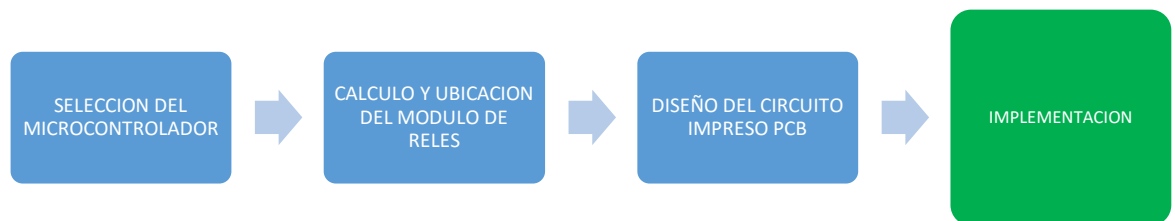


Figura 16. Diseño electrónico

3.3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En la etapa del diseño de control es importante determinar el tipo de microcontrolador que se va a utilizar y el algoritmo de control que funcionara de manera cíclica, para ello se procedió con lo siguiente:

- Diseño del algoritmo de control basado en lógica secuencial
- Implementación del software embebido en el microcontrolador

La figura 17 representa el proceso del diseño del sistema de control.



Figura 17. Diseño del sistema de control

Una vez realizado e implementado el algoritmo de control en el microcontrolador, se procederá a revisar el comportamiento de cada línea de código, mientras la tarjeta está en funcionamiento.

3.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En la etapa del diseño es importante llevar a cabo la conceptualización de las ideas, esto quiere decir, la construcción del prototipo y verificar su correcto funcionamiento y que cumpla con los requerimientos, llevando al prototipo a las máximas condiciones de trabajo.

Después de la construcción del prototipo se procederá a varias pruebas de funcionamiento por lo cual se llevara a cabo el siguiente procedimiento:

- Verificación de las formas de onda adecuadas que ingresan al microcontrolador
- Verificar el factor de potencia cuando el eje del motor esta sin carga
- Someter el eje del motor a diferentes cargas
- Verificar la variación del factor de potencia cuando al eje del motor se aplica diferentes cargas
- Validar el algoritmo de control y el tiempo de respuesta del sistema

3.5 ELEMENTOS

Para la adquisición, acondicionamiento, sistema electrónico y de control se eligió componentes de características que satisfagan y cumplan con los requerimientos descritos anteriormente.

3.5.1 COMPARADORES DE VOLTAJE

Los comparadores como su nombre lo indica, sirven para comparar dos señales una de las cuales generalmente es una tensión de referencia y determina cuál de ellas es mayor o menor. El componente básico de un comparador de voltaje es el amplificador operacional.

En la figura 18 se observa el diagrama básico de un comparador de voltaje y su respuesta a la salida.

Se eligió el amplificador operación LM339 en base a la comparación mostrada en la tabla 2, el cual se lo aplica en comparadores diferenciales independientes y son diseñados para operar con una fuente simple de energía.

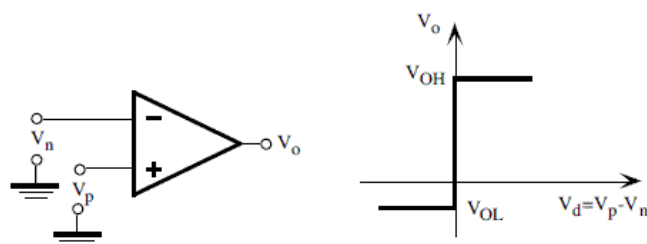


Figura 18. Diagrama y respuesta de un comparador de voltaje.

(Boylestad, 2004)

La tabla 2 muestra las características de dos amplificadores operacionales

Tabla 2. Características del amplificador operación LM741 y LM339

LM741	LM339
Alta impedancia de entrada	Bajo consumo y alta precisión
Aplicación: Seguidor de tensión, inversores	Aplicación: Comparadores de voltaje
Numero de amp-op en encapsulado: 2	Numero de amp-op en encapsulado: 4
Tensión máxima de alimentación : 18 VDC	Tensión máxima de alimentación: 30 VDC

3.5.2 TRANSFORMADOR DE VOLTAJE

Se eligió un transformador con núcleo de hierro de 110 V a 12 V con una corriente de 1 amperio como sensor de voltaje, en base al voltaje máximo de alimentación de los comparadores de voltaje.

El voltaje de salida del transformador puede ser de 24, 12 o 5 voltios, siempre y cuando se encuentre dentro del voltaje permitido por los comparadores.

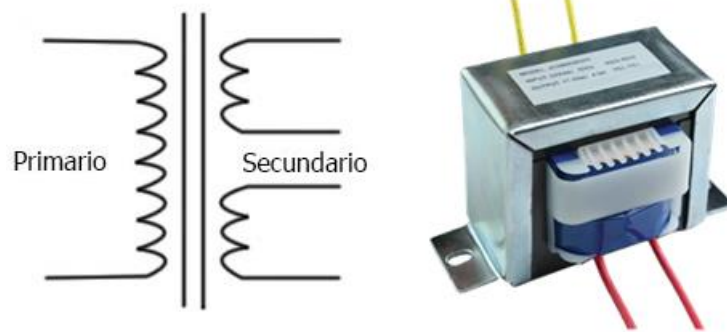


Figura 19. Simbología del transformador de voltaje.

(Russell, 2009)

3.5.3 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Un transformador de corriente o "TC" es el dispositivo que alimenta una corriente proporcionalmente menor a la del circuito. Un transformador de corriente por su aplicación se puede subdividir en transformador de medición y transformador de protección, los transformadores se diseñan para realizar ambas funciones y su corriente nominal por secundario puede ser de 1 o 5 amperios, es decir desarrollan dos tipos de funciones, transformar la corriente y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión. (Montano, 2011)

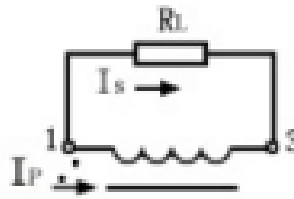


Figura 20. Representación de un transformador de corriente.

(Hatena, 2013)

Se eligió un transformador de corriente TA12-200, el cual es un sensor de efecto hall para captar la forma de onda de la señal de corriente tal como se muestra en la figura 21.

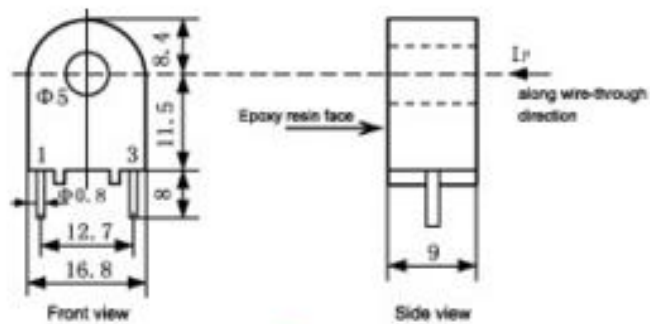


Figura 21. Transformador de corriente TA12-200

(Hatena, 2013)

3.5.4 COMPUERTA OR

Es una puerta lógica digital que implementa la disyunción lógica.

Se eligió la compuerta 74LS32, el cual consiste en un dispositivo de cuatro compuertas OR independientes, su operación se basa en la tecnología TTL (Transistor-Transistor-Logic).

3.5.5 MICROCONTROLADOR ATMEGA2560

Se eligió el microcontrolador ATmega2560 en base a las características mostradas en la tabla 3.

Al elegir dicho microcontrolador sobresalen las características como velocidad de procesamiento, número de entradas y salidas digitales.

Tabla 3. Características de los tipos de microcontroladores.

Microcontrolador	ATmega2560	ATmega328P	PIC16F877A
Voltaje de operación	5 V	5 V	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7–12 V	7–12 V	5 V
Voltaje de entrada (limites)	6–20 V	6–20 V	3 - 5.5 V
Pines Digitales I / O (PWM)	54 (15)	6 / (6)	33
Pines entradas analógicas	16	6	8
Corriente DC por Pin I / O	40 mA	20 mA	25 mA
Corriente DC para el Pin 3.3 V	50 mA	50 mA	-
Memoria Flash	128 KB	32 KB	8 KB
SRAM	8 KB	2 KB	368 bytes
EEPROM	4 KB	1 KB	256 bytes
Velocidad del reloj	16 MHz	16 MHz	20 MHz

(Arduino, 2015)

En la figura 22 se muestra la distribución de pines del microcontrolador ATmega2560.

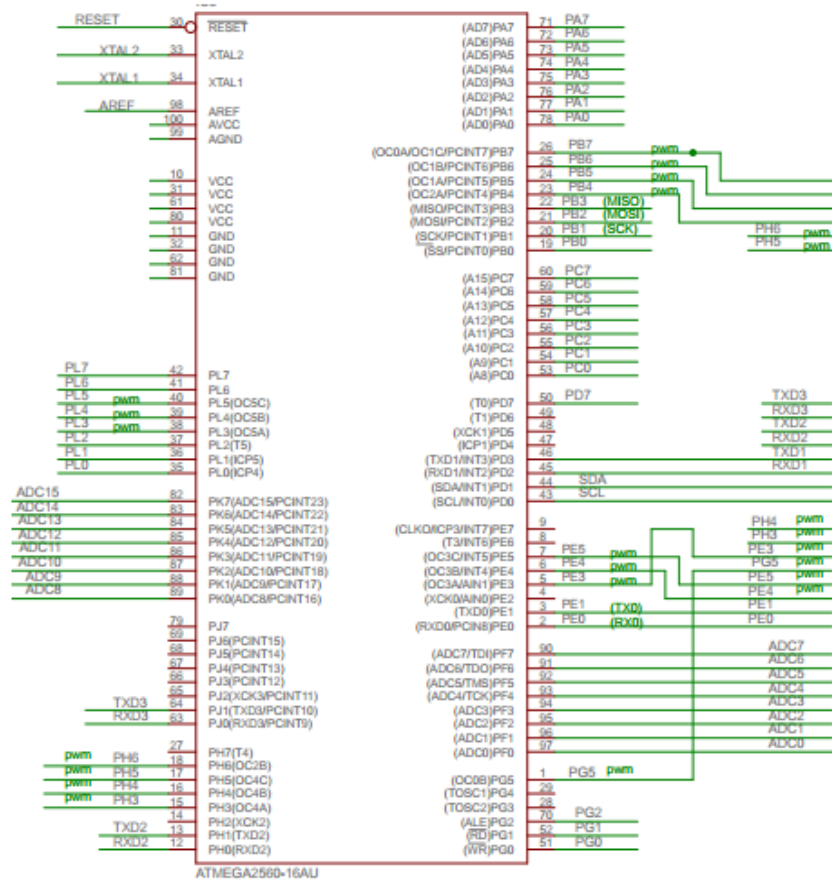


Figura 22. Diagrama de pines del microcontrolador ATmega2560.

(Arduino, 2015)

3.5.6 MODULO DE RELÉS

El relé es un dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil abre o cierra un circuito en el cual disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador.

El relé sirve también como protección, esto quiere decir que aísla la parte de control de la parte de potencia.

Se eligió un módulo de relés de 4 canales tal como se muestra en la figura 23.



Figura 23. Módulo de relés de 4 canales.

(Songle, 2015)

En la figura 24 se muestra el circuito esquemático de un canal, el cual es el mismo para los otros canales restantes del módulo.

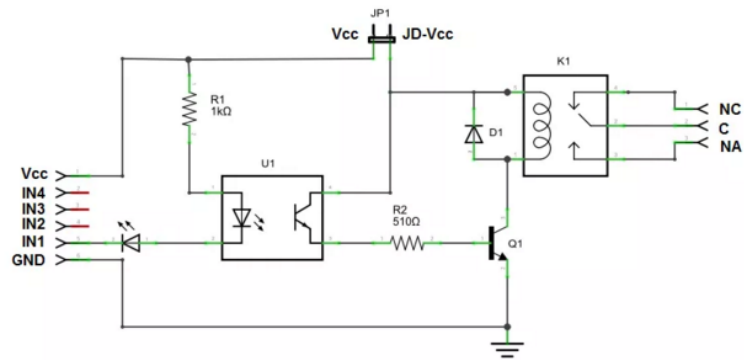


Figura 24. Circuito Esquemático de un canal del módulo de relés.

(profeTolocka, 2015)

La tabla 4 muestra las características principales del módulo de relés de 4 canales.

Tabla 4. Características del módulo de relés de 4 canales.

Voltaje de la bobina	Voltaje máx-contactos	Corriente máx-contactos
5 V	230 VAC	10 A
5 V	30 VDC	10 A

(Songle, 2015)

3.5.7 PANTALLA LCD

La pantalla LCD (Liquid Crystal Display) se utiliza para visualizar información.

Se eligió la pantalla 4x20, esto quiere decir, 20 caracteres por línea, tal como se muestra en la figura 25.

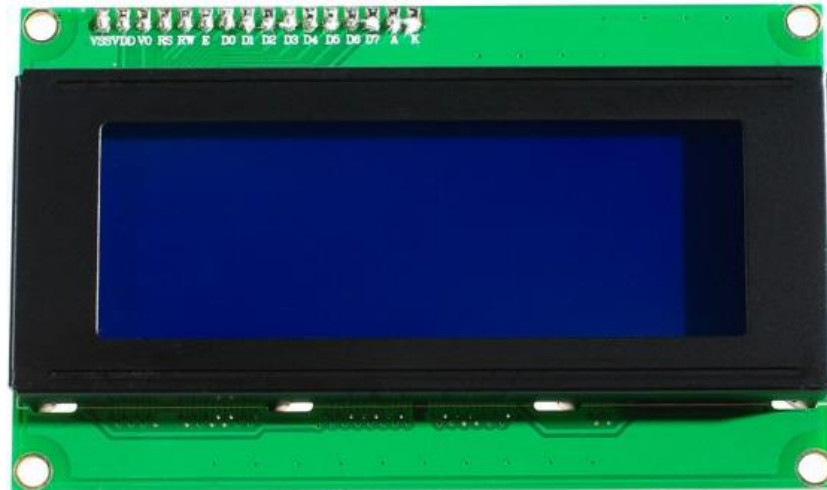


Figura 25. Pantalla LCD 4x20.

(Gravitech, 2015)

4. DISEÑO

Una vez establecido los requerimientos necesarios para cada sistema, se debe iniciar con el diseño de cada sistema.

4.1 SEÑAL DE VOLTAJE

La determinación de la forma de onda de la señal de voltaje se obtuvo mediante un transformador de potencial de 110 V a 12 V.

En la figura 26 se presenta la forma de onda medida a la salida del transformador de potencial, para lo cual, se utilizó un osciloscopio.

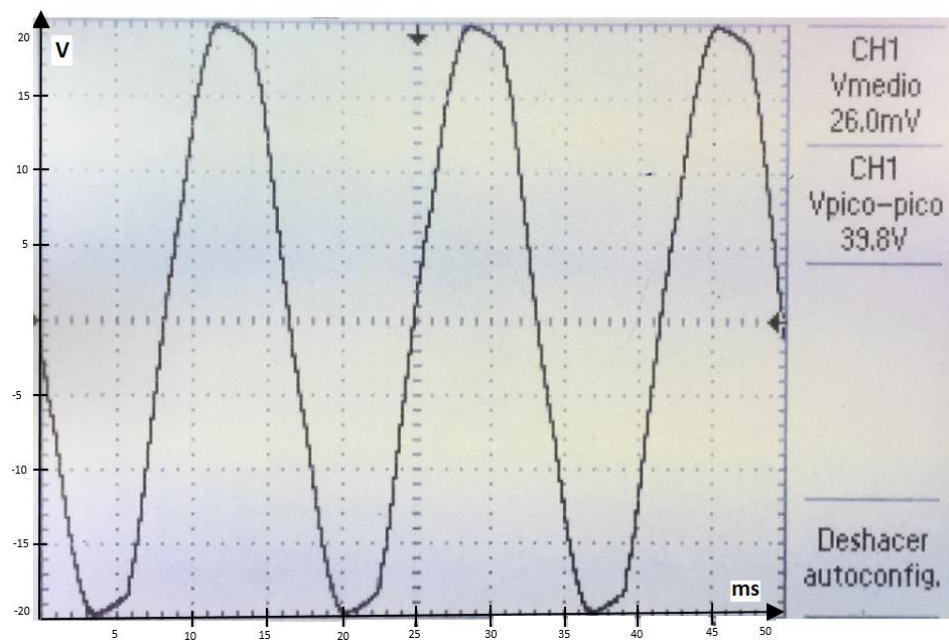


Figura 26. Forma de onda de la señal de voltaje.

Para obtener los valores máximos a la salida del transformador de voltaje se utiliza la ecuación de valores RMS y Valores picos máximos de una onda periódica definida por:

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m \quad [7]$$

Donde:

V: Voltaje efectivo de una señal senoidal (teórico)

V_m : Valor máximo de una señal senoidal

Como el voltaje teórico (V) a la salida del transformador es 12 voltios, se procede a hallar el voltaje máximo de la onda senoidal:

$$12 \text{ voltios} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m$$

$$V_m = 16,97 \text{ V}$$

Para encontrar el valor pico-pico de una señal senoidal se multiplica por dos el valor máximo de la misma, esto se debe a que la señal es simétrica, y está definida por:

$$2 V_m = V_{pp} \quad [8]$$

Entonces:

$$V_{pp} = 33,94 \text{ V}$$

4.1.1 DETECTOR DE CRUCE POR CERO PARA LA SEÑAL DE VOLTAJE

EL circuito empieza realizando un comparador de voltaje, mediante un amplificador operacional LM339, la idea de realizar esto es convertir la señal analógica senoidal de entrada en un tren de pulsos simétrico a la salida.

La figura 27 muestra la salida teórica del comparador de voltaje para la señal de voltaje.

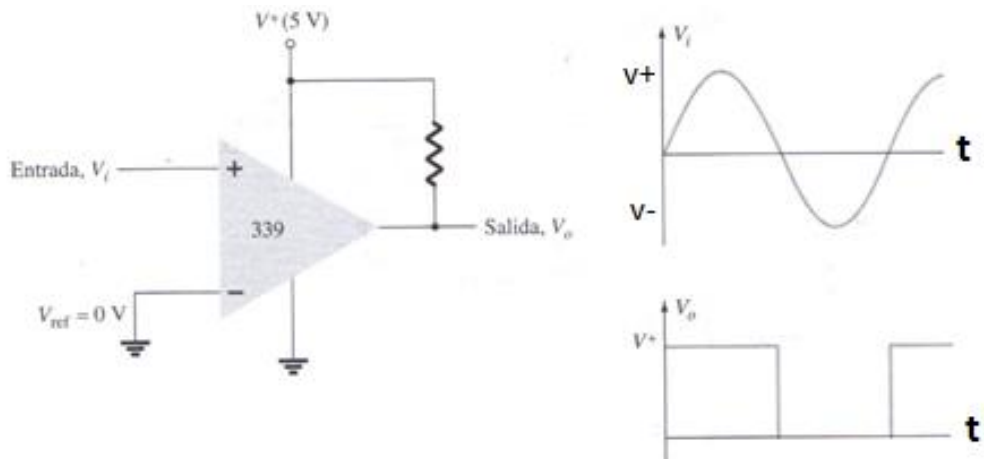


Figura 27. Salida del comparador de voltaje.

(Boylestad, 2009)

En la figura 28 se observa el diagrama del detector de cruce por cero implementado para la señal de voltaje.

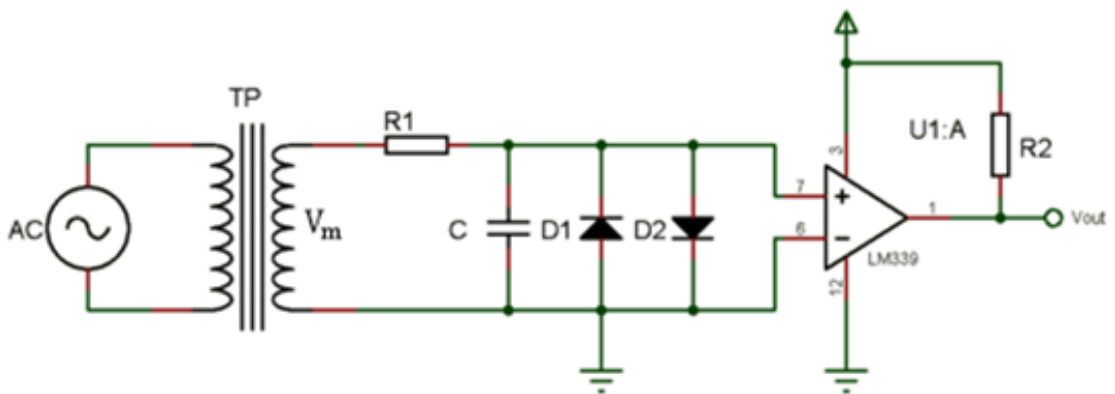


Figura 28. Detector de cruce por cero de la señal de voltaje

Para proteger el amplificador operacional de tensiones superiores a las indicadas por el fabricante en sus entradas, se coloca dos diodos 1N4148 en anti paralelo, D1 y D2. El valor del capacitor C es de 180 pF.

Para obtener el valor de la resistencia R1 se utiliza la Ley de Ohm definida por:

$$V = I \times R \quad [9]$$

Como la corriente máxima que puede soportar el diodo 1N4148 es de $I_{Dmax}=200$ mA y el voltaje máximo de entrada es de 16,97 V, el valor mínimo de la resistencia R1 se calcula de la siguiente manera:

$$R1 = \frac{V_m}{I_{Dmax}}$$

$$R1 = \frac{16,97 \text{ V}}{0,2 \text{ A}}$$

$$R1 = 84,85 \Omega$$

Para proteger de sobrecorrientes a los diodos, el valor de la resistencia R1 es el siguiente:

$$R1 = 510 \Omega$$

La característica del amplificador operacional LM339 es que la salida es de tipo colector abierto, el fabricante recomienda colocar una resistencia de 1 K Ω , por lo tanto:

$$R2 = 1 \text{ K}\Omega$$

En la figura 29 se observa la forma de onda en la salida del detector de cruce por cero para la señal de voltaje.

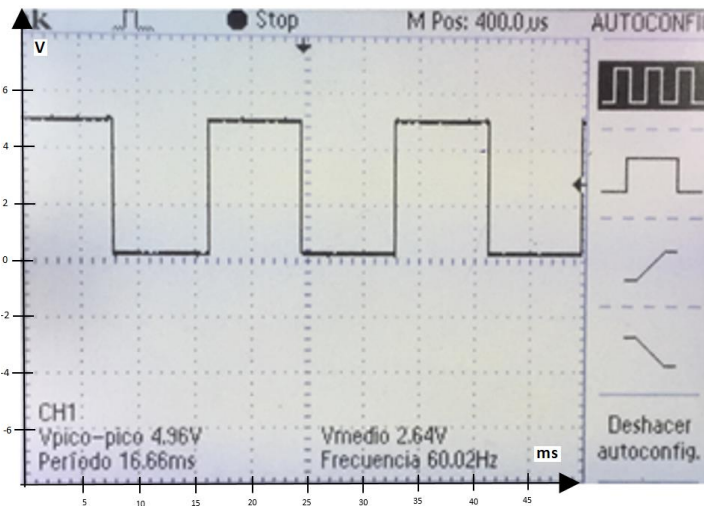


Figura 29. Salida del detector de cruce por cero de la señal de voltaje

4.2 SEÑAL DE CORRIENTE

La determinación de la forma de onda de la señal de corriente se la obtuvo mediante un transformador de corriente TA12-200.

En la figura 30 se presenta la forma de onda medida a la salida del transformador de corriente.

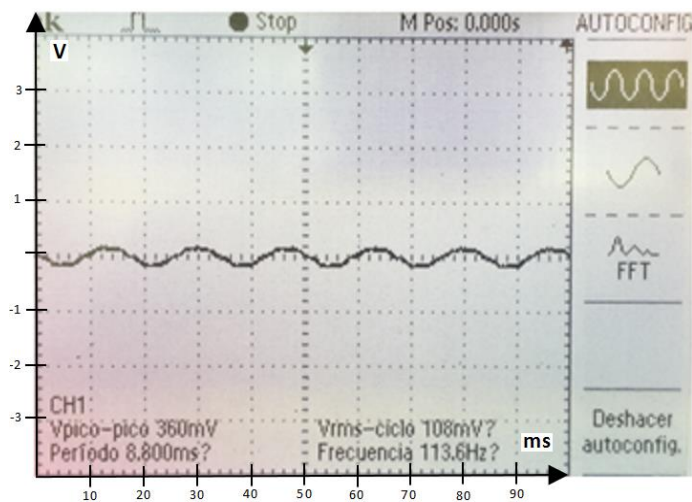


Figura 30. Forma de onda de la señal de corriente

4.2.1 DETECTOR DE CRUCE POR CERO PARA LA SEÑAL DE CORRIENTE

El circuito detector de cruce por cero para la señal de la corriente, es similar al de voltaje, la única variación que se tiene es que como el voltaje de entrada al comparador de voltaje es menor a 1 voltio, no es necesario colocar diodos de protección, ni resistencias que limiten la corriente tal como se muestra en la figura 31.

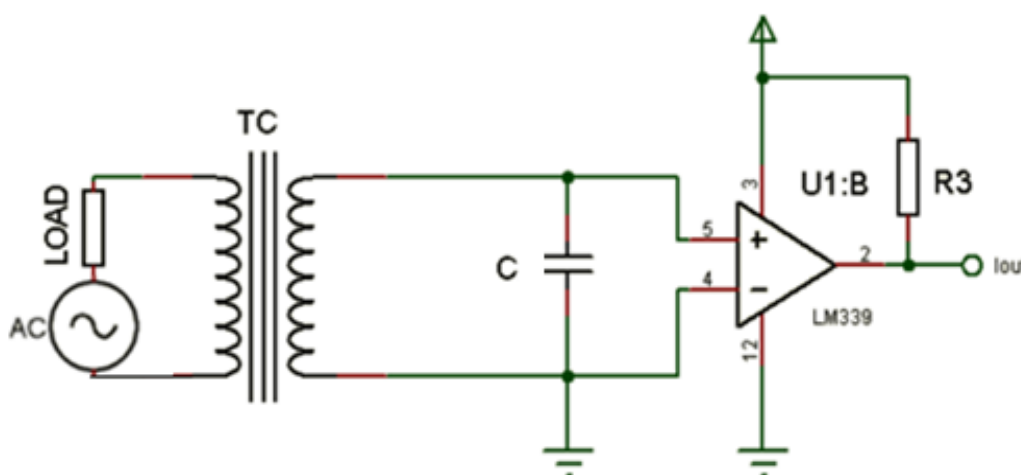


Figura 31. Detector de cruce por cero para la señal de corriente

Ya que el amplificador operacional LM339 como mencionamos anteriormente, su salida es del tipo colector abierto, por lo tanto el valor de la resistencia R3 es el siguiente:

$$R3 = 1 \text{ K}\Omega$$

En la figura 32 se observa la forma de onda en la salida del detector de cruce por cero para la señal de corriente. El valor del capacitor C es de 180 pF.

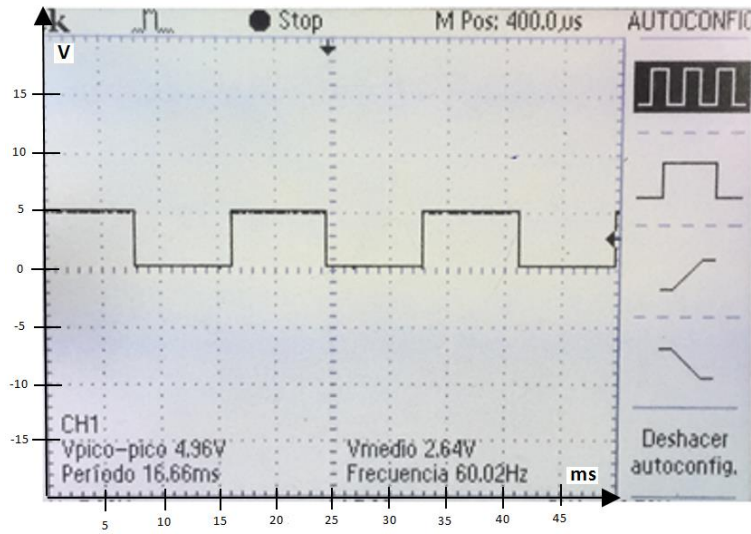


Figura 32. Salida del detector de cruce por cero de la señal de corriente

En la figura 33 se muestra las formas de onda del voltaje y la corriente.

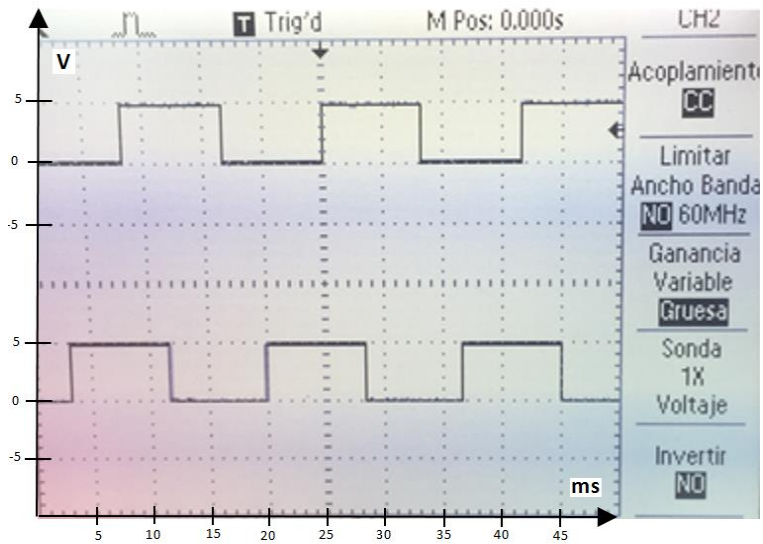


Figura 33. Forma de onda del voltaje y la corriente

El propósito de tener dos trenes de pulsos, uno de voltaje y otro de corriente, es observar el desfase que tiene una respecto de la otra, tal como se muestra

en la figura 33. Y por otra parte, realizar la suma lógica tal como se muestra en la figura 34 mediante una compuerta OR.

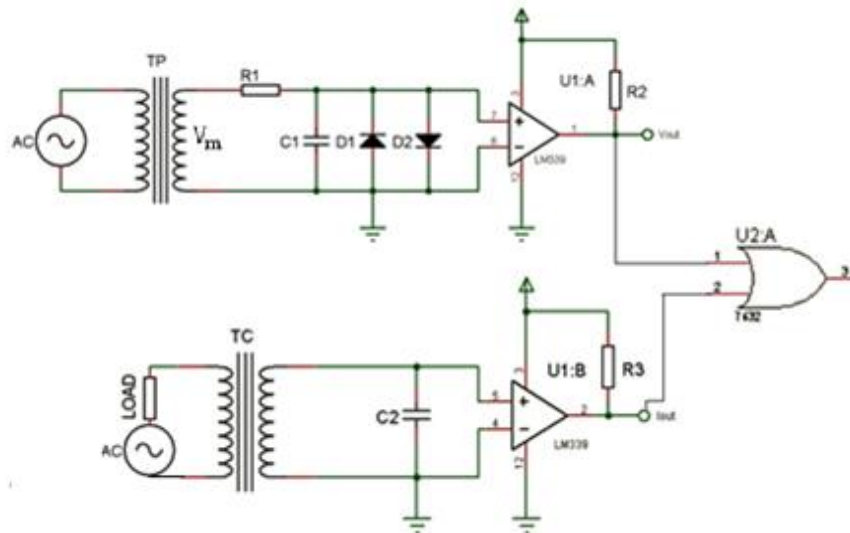


Figura 34. Sumador lógico de las formas de onda de voltaje y corriente

En la figura 35 se muestra la forma de onda a la salida del sumador lógico.

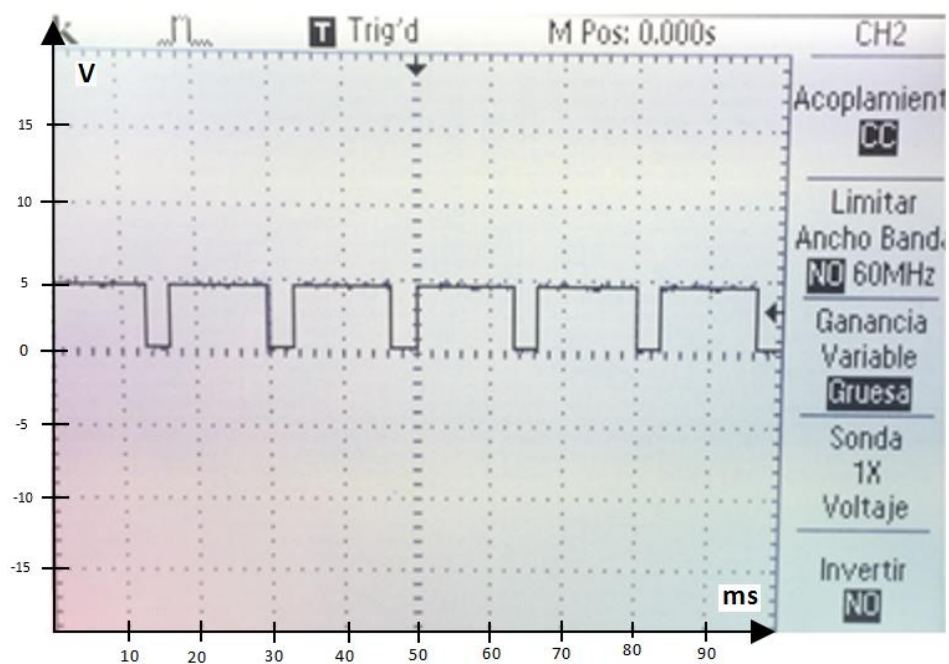


Figura 35. Forma de onda a la salida del sumador lógico

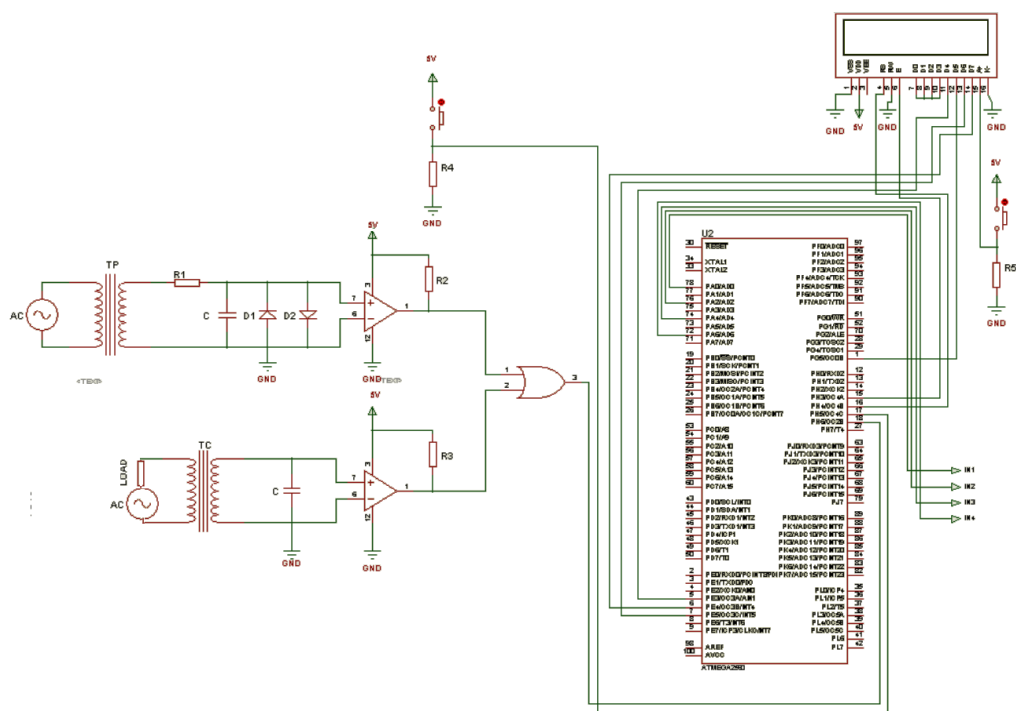
4.3 DISEÑO DE LA TARJETA ELECTRÓNICA

Una vez definida la adquisición y el acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente, es necesario continuar con el diseño electrónico, el cual partirá de la ubicación de cada componente de la tarjeta como:

- Unidad de control
- Visualización
- Adquisición y acondicionamiento de señales
- Salidas tipo relé

4.3.1 DISEÑO ELECTRÓNICO

En el diseño electrónico se procederá a realizar el diagrama eléctrico de toda la tarjeta y el diseño del circuito impreso tal como se muestra en la figura 36 y 37 respectivamente. Las salidas IN1, IN2, IN3, IN4 están conectadas al módulo de relés.



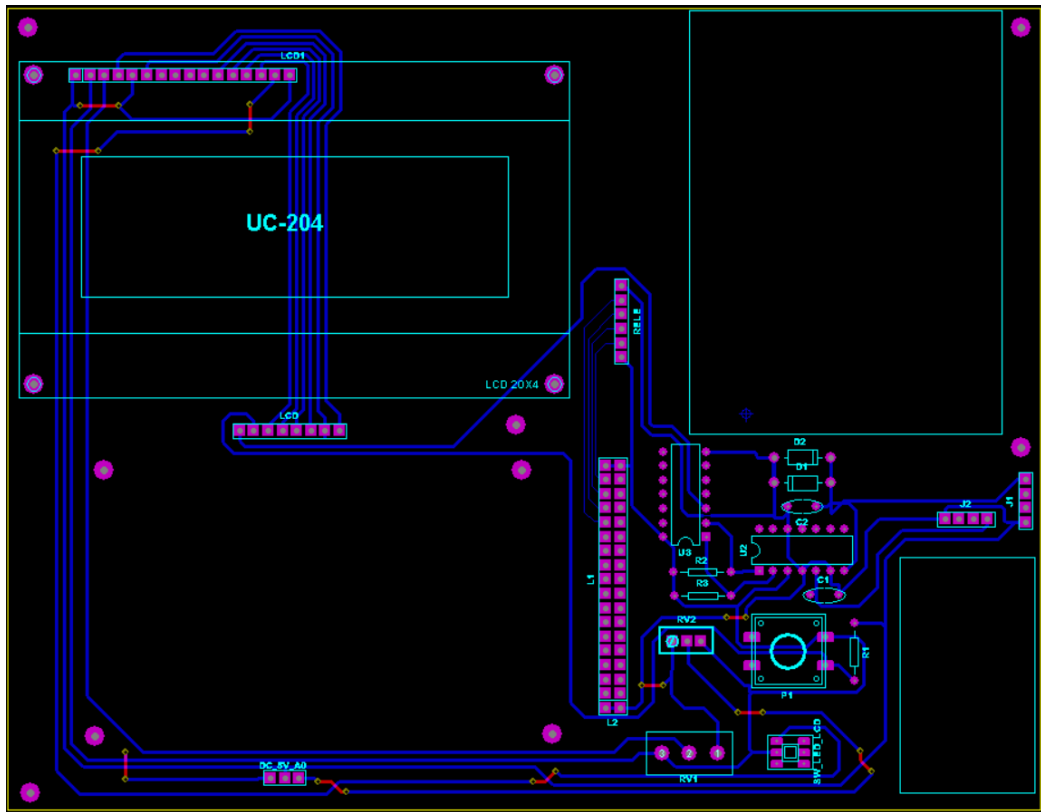


Figura 37. Distribución de componentes en la tarjeta

La figura 38 representa un modelo en 3D de la tarjeta electrónica a construir.

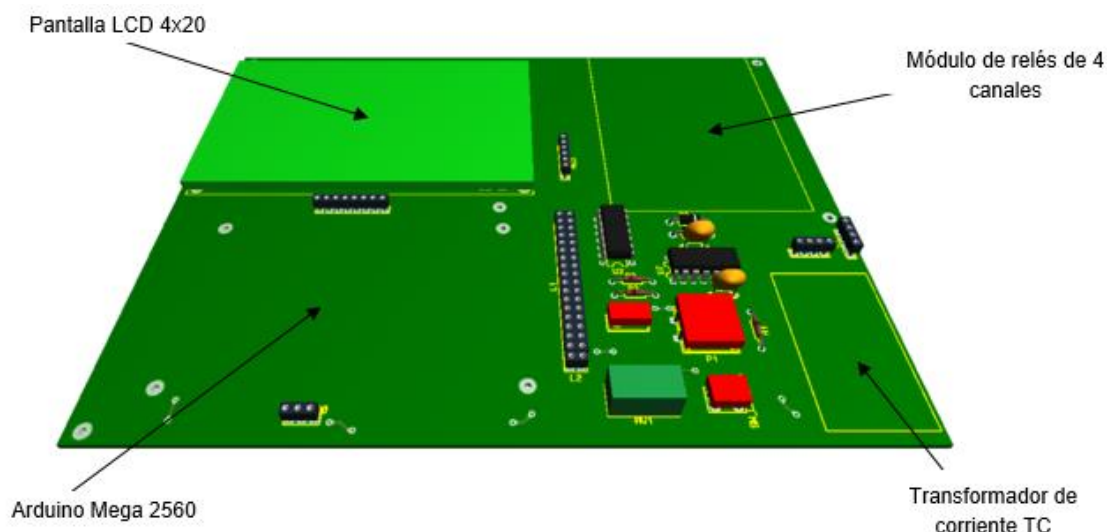


Figura 38. Modelo 3D de la tarjeta

En la figura 39 y 40 se muestra la construcción de la tarjeta y el circuito impreso de la misma respectivamente, en la cual se colocó todos los componentes involucrados.

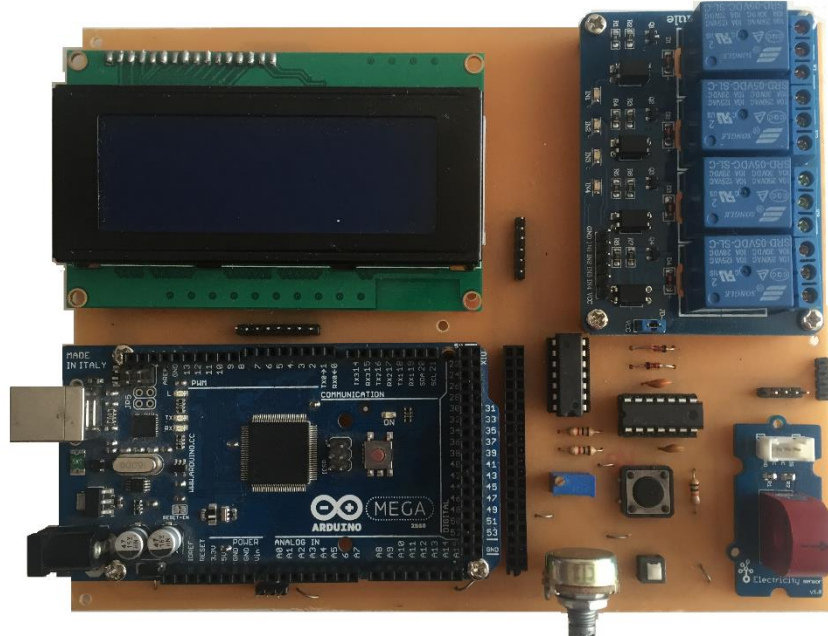


Figura 39. Construcción de la tarjeta

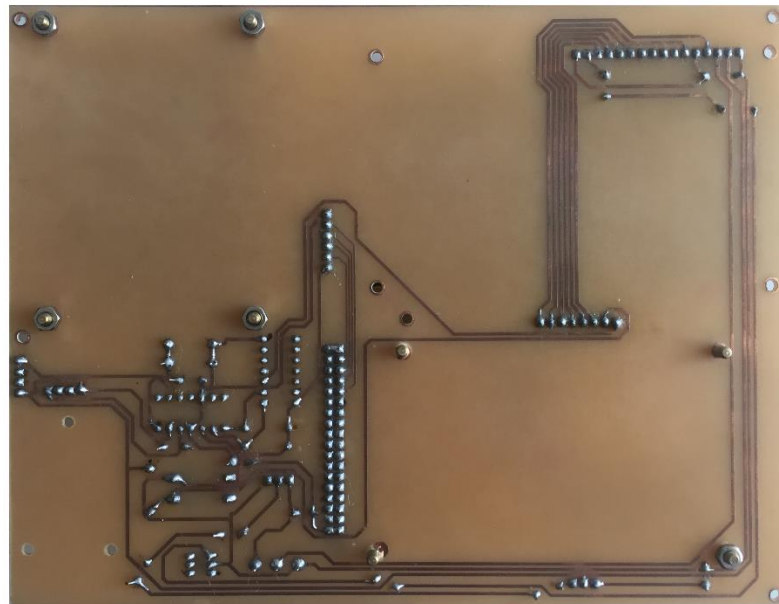


Figura 40. Circuito impreso en la tarjeta

4.4 DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

Para el diseño del algoritmo de control se tomará en cuenta las señales antes acondicionadas de voltaje y corriente.

La figura 41 representa las ondas de voltaje, corriente y la suma lógica de las mismas, la deducción de la fórmula del desfase se presenta a continuación.

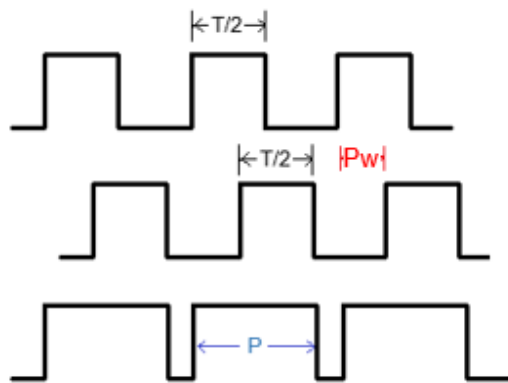


Figura 41. Deducción del desfase entre el voltaje y la corriente

$$P_w = P - \frac{T}{2} \quad [10]$$

Donde:

P_w : Ancho de pulso entre el voltaje y la corriente medido en milisegundos

P : Ancho de pulso de la salida de la compuerta OR medido en milisegundos

T : Periodo de la señal de voltaje y corriente en milisegundos

Si la frecuencia de la red es 60 Hz la ecuación queda de la siguiente forma:

$$f = 60 \pm X \text{ Hz}$$

$$T = 16,66 \text{ ms} \pm x \text{ ms}$$

$$P_w = P - 8,33 \text{ ms} \pm x \text{ ms}$$

Donde X y x representan las posibles variaciones de la red en hercios y milisegundos respectivamente.

La ecuación 10 representa el ancho de pulso entre el voltaje y la corriente medido en milisegundos.

Utilizando una identidad y propiedad de la función seno, se puede transformar de milisegundos a grado sexagesimal tal como se presenta a continuación:

$$T = 2\pi \text{ rad} = 360^\circ$$

$$\frac{1^\circ}{360^\circ} = \frac{X}{16,66 \text{ ms} \pm x \text{ ms}}$$

$$1^\circ = 0,046 \text{ ms} \pm x \text{ ms}$$

Entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\emptyset = \frac{2P-T}{0,092} \quad [11]$$

Donde:

\emptyset : Angulo entre el voltaje y la corriente medido en grados

La ecuación 11 representa el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente medido en grados.

La adquisición del ancho de pulso del voltaje y la corriente, tal como se muestra en la figura 42, se la realiza mediante una interrupción externa disparada por flancos, tal como se detalla en el siguiente procedimiento:

- Detectar el flanco de subida
- Empezar el conteo del Timer
- Detectar el flanco de bajada
- Detener el conteo del Timer y almacenar el tiempo transcurrido

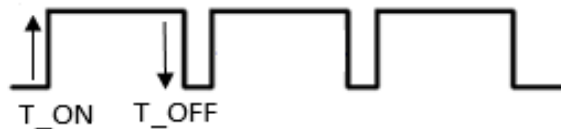


Figura 42. Adquisición del ancho de pulso disparada por flancos

4.4.1 ALGORITMO DE CONTROL

El algoritmo de control se basa en líneas de código que van a ingresar al microcontrolador y que debe cumplir con lo establecido anteriormente para su correcto funcionamiento.

En la figura 43 se encuentra el diagrama de flujo del algoritmo de control del bucle principal, donde se utiliza una interrupción por desbordamiento del timer para realizar un retardo de 1 segundo.

También se realiza el algoritmo de control de salidas mediante la colocación de pasos con incremento de 1 hasta 4 cada 15 segundos y decremento de los mismos hasta 0.

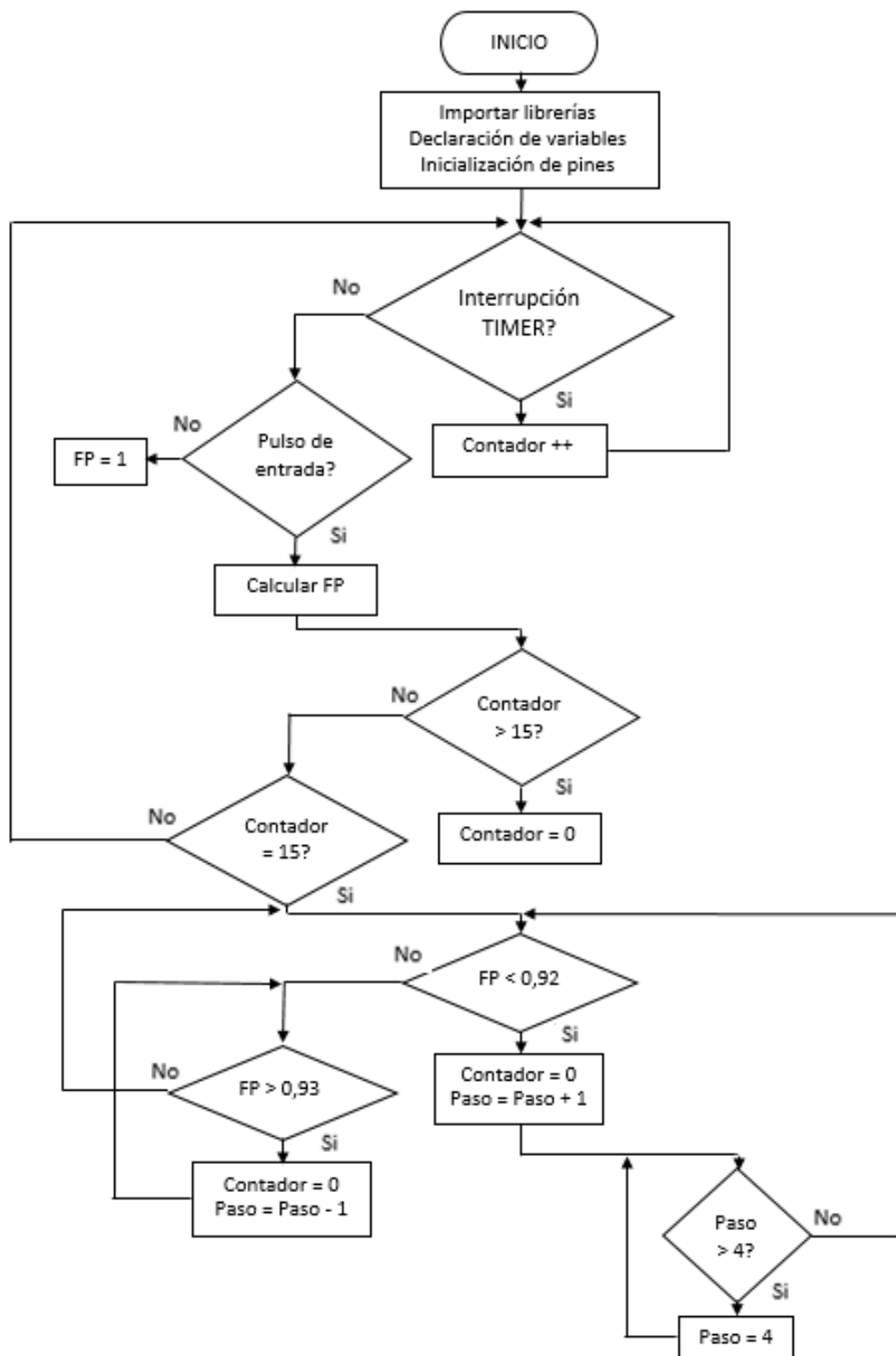


Figura 43. Diagrama de flujo del algoritmo de control

En la figura 44 se encuentra el diagrama de flujo del algoritmo de visualización de la información mediante una pantalla LCD 4x20.

El cambio de pantalla o display se lo realiza mediante un botón.

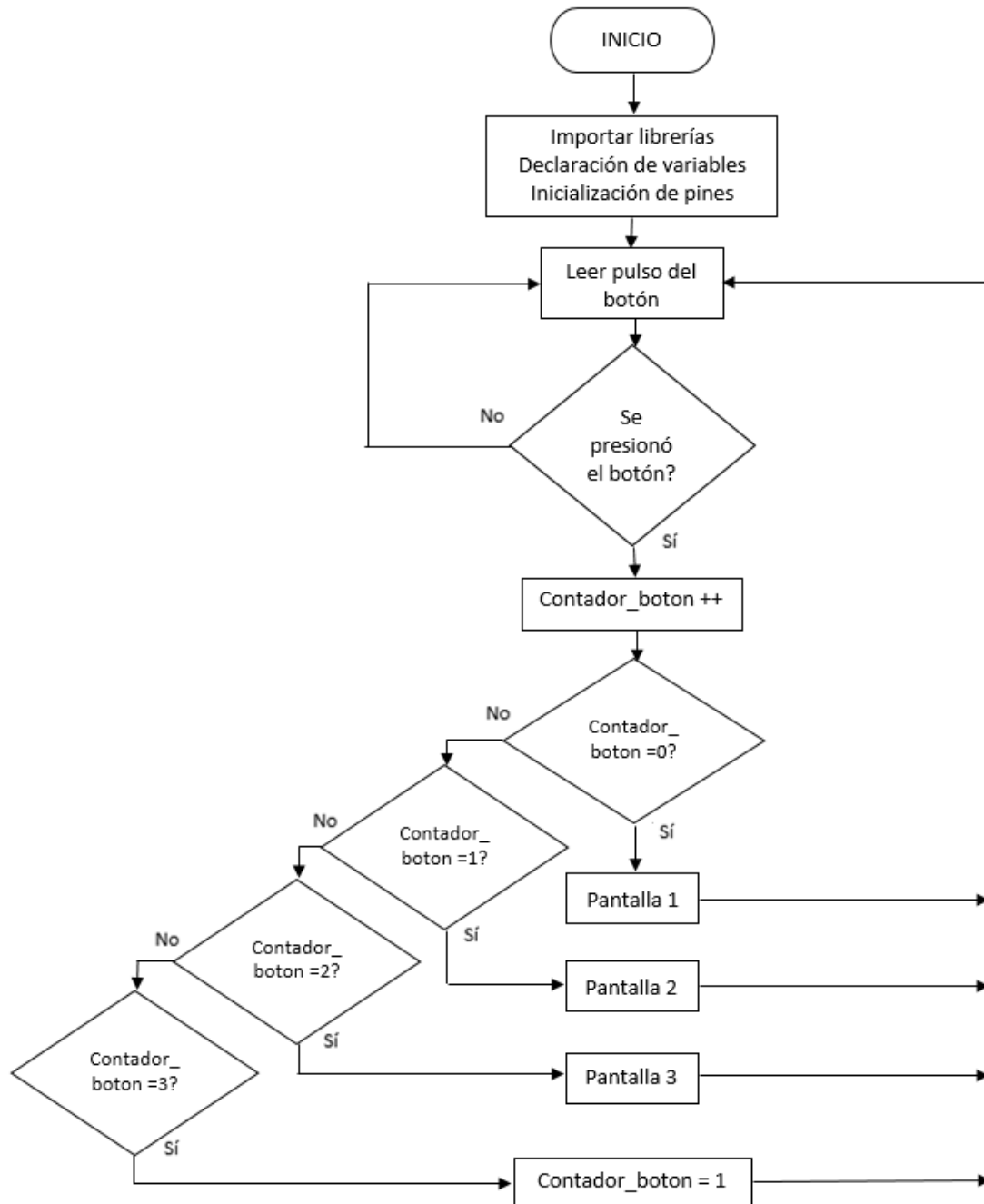


Figura 44. Diagrama de flujo del algoritmo de visualización

4.5 DISEÑO DE LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Para tener toda la información acerca de la compensación y los valores de potencias que serán mostrados en la visualización de la tarjeta electrónica fue necesario realizar los cálculos que se detallan a continuación:

Con los valores de la Tabla 5 se procede a los cálculos respectivos para el nuevo factor de potencia que será de 0,92.

Tabla 5. Datos del motor trifásico jaula de ardilla

Voltaje de Alimentación (V)	Potencia Nominal (P) (KW)	RPM	Corriente nominal (A)	Frecuencia de operación (Hz)	Tipo de alimentación	Factor de potencia (Fp) (Vacío)
220	0.35	1630	2	60	Trifásica	0,7

$$F_p = \cos \phi \quad [12]$$

$$\phi = 45,57^\circ$$

Partiendo del triángulo de potencias podemos deducir la ecuación de la potencia reactiva y potencia aparente.

Potencia Reactiva:

$$Q_L = P \tan \phi \quad [13]$$

$$Q_L = 350 \text{ W} * \tan 45,57^\circ$$

$$Q_L = 357,03 \text{ VAR (L)}$$

Potencia Aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2} \quad [14]$$

$$S = \sqrt{(350)^2 + (357,03)^2}$$

$$S = 500 \text{ VA}$$

En la figura 45 se observa el triángulo de potencia antes de la compensación.

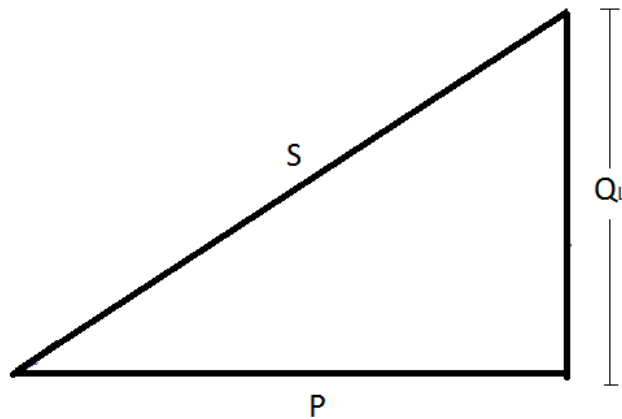


Figura 45. Triángulo de potencia antes de la compensación.

Si se desea corregir el factor de potencia a un valor de 0,92 se realiza los mismos pasos anteriores.

$$F_p = \cos \phi'$$

$$\phi' = 23,07^\circ$$

Entonces la potencia reactiva a un valor de $F_p = 0,92$ será:

$$Q_L' = P \tan \phi'$$

$$Q_L' = 350 \text{ W} * \tan 23,07^\circ$$

$$Q_L' = 149,07 \text{ VAR (L)}$$

Por ende la potencia aparente a un valor de $F_P = 0,92$ será:

$$S' = \sqrt{P^2 + Q_L'^2}$$

$$S' = \sqrt{(350)^2 + (149,07)^2}$$

$$S' = 380,42 \text{ VA}$$

Entonces el triángulo de potencia después de la compensación es el que se muestra en la figura 46.

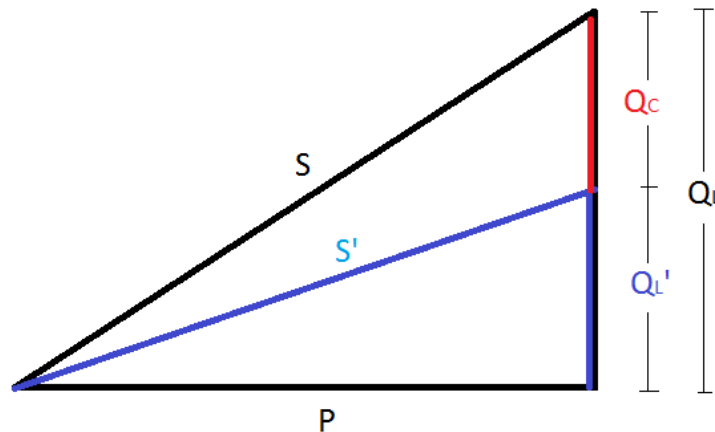


Figura 46. Triángulo de potencia compensado y no compensado.

Para calcular el valor de potencia reactiva que debe aportar el banco de capacitores, se usa simplemente una operación entre segmentos, en este caso una diferencia matemática de la siguiente manera:

$$Q_C = Q_L - Q_L' \quad [15]$$

$$Q_C = 357,03 - 149,07$$

$$Q_C = 207,96 \text{ VAR (C)}$$

Se procede a calcular el valor de la impedancia capacitiva:

$$X_C = V^2 / Q_C \quad [16]$$

$$X_C = 220^2 / 207,96$$

$$X_C = 232,73 \Omega$$

Una vez teniendo el valor de la impedancia capacitiva, se procede a calcular el valor del capacitor.

$$C = 1 / 2\pi f X_C \quad [17]$$

$$C = 1 / 2\pi(60)(232,73)$$

$$C = 11,39 \mu\text{F}$$

Nótese que estamos trabajando con sistemas trifásicos entonces el valor del capacitor será de:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C / 3 \quad [18]$$

$$C_1 = 11,39 / 3$$

$$C_1 = 3,8 \mu\text{F}$$

Donde:

FP: Factor de potencia

QL: Potencia reactiva

S: Potencia Aparente

Xc: Impedancia capacitiva

C: Capacitancia eléctrica

En la figura 47 se observan la configuración de los capacitores conectados hacia el motor.

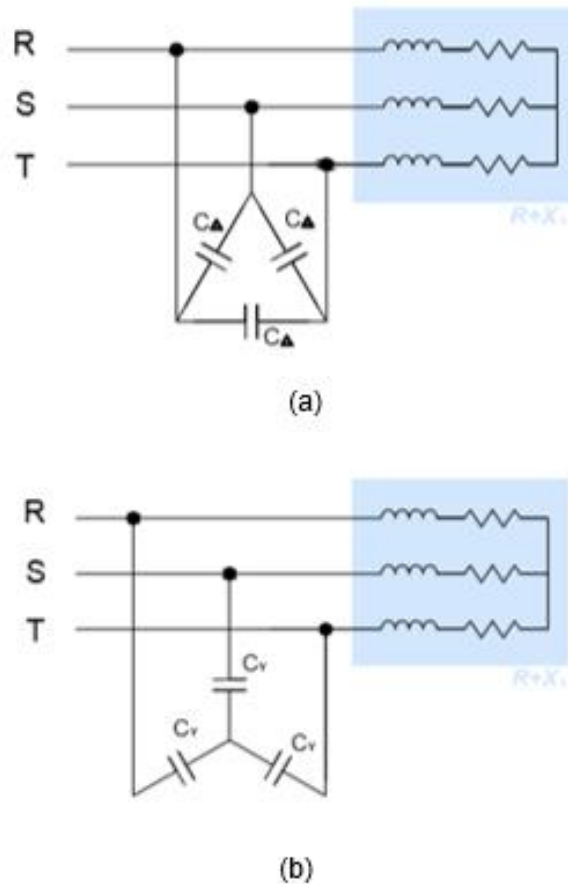


Figura 47. Configuración de capacitores. (a) Triangulo (b) Estrella
(Guasch, 2015)

Para motores de mayor potencia se puede referir al anexo 3, que nos indica el valor de potencia reactiva dependiendo que factor de potencia se quiere alcanzar.

El procedimiento es escoger el factor de potencia actual, luego el factor de potencia a corregir y donde se crucen dichos valores, es el factor que se debe multiplicar, tal como se muestra en la ecuación 19.

A partir del valor K, se puede obtener la potencia reactiva necesaria mediante la ecuación:

$$Q_c = K P \quad [19]$$

Donde:

K: Factor K

P: Potencia nominal del motor expresado en KW

Qc: Potencia reactiva expresada en KVAR

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez concluido el diseño electrónico y el algoritmo de control que va a regir el sistema, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento correspondientes y la recopilación de los resultados.

La validación de la tarjeta electrónica se obtuvo mediante la aplicación de diferentes valores de carga en el eje del motor, la variación del factor de potencia en la pantalla y el accionamiento de las salidas tipo relé.

Las pruebas se realizaron con un motor trifásico del tipo jaula de ardilla, para revisar sus características, de acuerdo a la tabla 5.

En la figura 48 se muestra el motor trifásico tipo jaula de ardilla acoplado a un freno electromagnético y su unidad de control.



Figura 48. Motor trifásico y freno electromagnético

Lo primero que se debe observar es el funcionamiento de la tarjeta electrónica sin ninguna conexión de potencia.

La información que se muestra en la figura 49 se refiere a valores de:

- Factor de potencia a corregir
- Factor de potencia actual
- Voltaje de operación
- Numero de paso actual de banco
- Potencia Real, Aparente y Reactiva
- Valor de capacitor a colocar

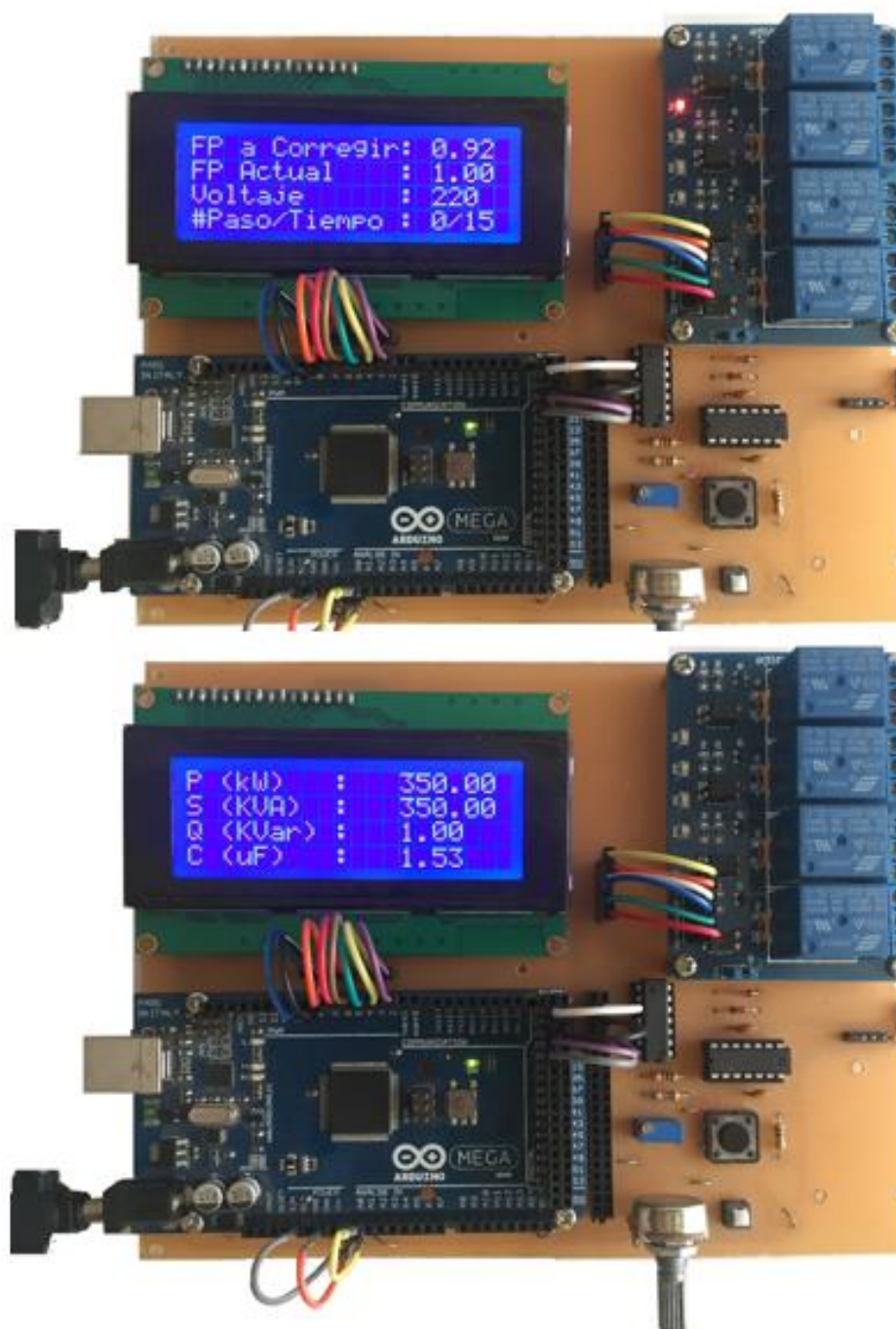


Figura 49. Información mostrada en la pantalla LCD

En la tabla 6 se presenta los datos que involucran a la compensación de potencia reactiva para un motor Jaula de ardilla.

Tabla 6. Compensación del reactivo en función del factor de potencia.

FP	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA REACTIVA A CORREGIR
	VAR	VAR
0,12	2895,59	2746,49
0,14	2475,38	2326,28
0,16	2159,32	2010,22
0,18	1912,69	1763,59
0,2	1714,64	1565,54
0,22	1551,93	1402,83
0,24	1415,71	1266,61
0,26	1299,86	1150,76
0,28	1200,00	1050,90
0,3	1112,93	963,83
0,32	1036,24	887,14
0,34	968,09	818,99
0,36	907,04	757,94
0,38	851,96	702,86
0,4	801,95	652,85
0,42	756,27	607,17
0,44	714,32	565,22
0,46	675,59	526,49
0,48	639,67	490,58
0,5	606,22	457,12
0,52	574,92	425,82
0,54	545,52	396,42
0,56	517,81	368,71
0,58	491,58	342,48
0,6	466,67	317,57
0,62	442,92	293,82
0,64	420,21	271,11
0,66	398,40	249,30
0,68	377,39	228,29
0,7	357,07	207,97
0,72	337,35	188,25
0,74	318,12	169,03
0,76	299,31	150,21
0,78	280,80	131,70
0,8	262,50	113,40
0,82	244,30	95,20
0,84	226,08	76,98
0,86	207,68	58,58
0,88	188,91	39,81
0,9	169,51	20,41
0,92	149,10	0,00
0,94	127,03	0,00
0,96	102,08	0,00
0,98	71,07	0,00
1	0,00	0,00

En la figura 50 se observa como el factor de potencia afecta a la potencia reactiva de un sistema, la curva azul representa la corrección del factor de

potencia a un valor de teórico de 1, mientras que la curva naranja representa la corrección del factor de potencia a un valor de 0,92 (Experimental).

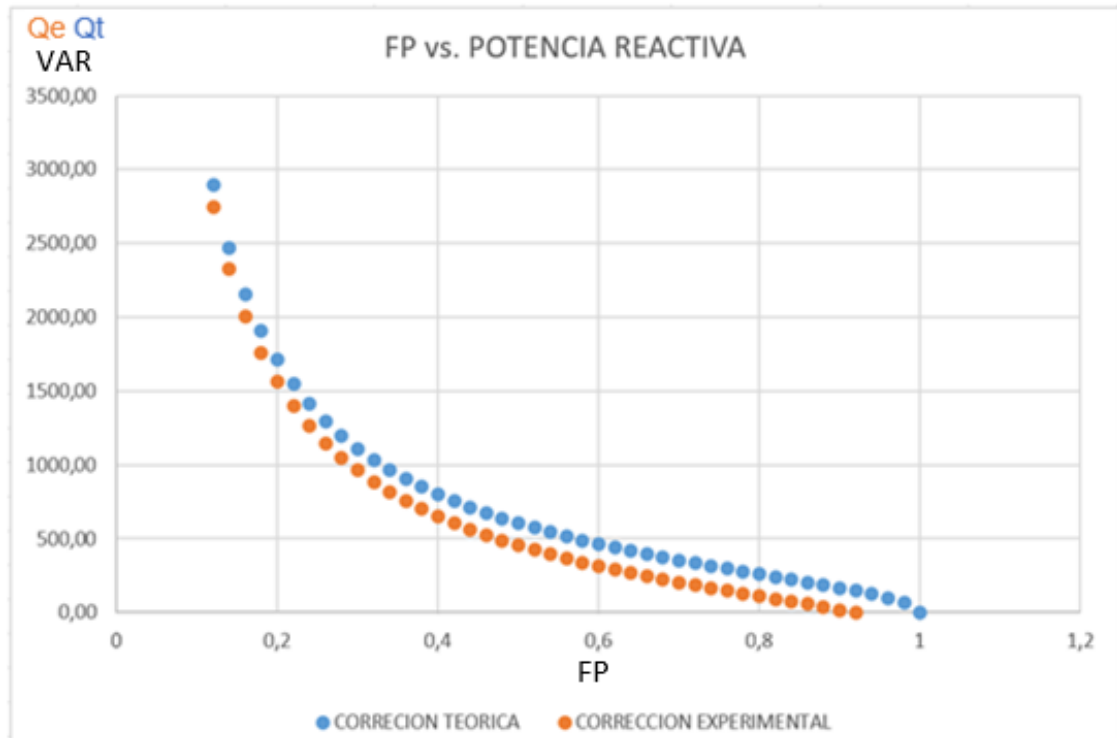


Figura 50. Factor de potencia vs. Potencia Reactiva

De la figura 50 se puede deducir que, a menor factor de potencia, mayor es la cantidad de energía reactiva necesaria para poder compensar el sistema.

Mientras el factor de potencia esté por encima del factor de potencia mínimo, no es necesario aportar con más energía reactiva de compensación al sistema.

En la tabla 7, se puede observar la relación que existe entre la potencia reactiva y la potencia aparente a diferentes valores de factor de potencia.

Tabla 7. Potencia reactiva y potencia aparente.

FP	POTENCIA APARENTE	POTENCIA REACTIVA
	VA	VAR
0,12	2916,67	2895,59
0,14	2500,00	2475,38
0,16	2187,50	2159,32
0,18	1944,44	1912,69
0,2	1750,00	1714,64
0,22	1590,91	1551,93
0,24	1458,33	1415,71
0,26	1346,15	1299,86
0,28	1250,00	1200,00
0,3	1166,67	1112,93
0,32	1093,75	1036,24
0,34	1029,41	968,09
0,36	972,22	907,04
0,38	921,05	851,96
0,4	875,00	801,95
0,42	833,33	756,27
0,44	795,45	714,32
0,46	760,87	675,59
0,48	729,17	639,67
0,5	700,00	606,22
0,52	673,08	574,92
0,54	648,15	545,52
0,56	625,00	517,81
0,58	603,45	491,58
0,6	583,33	466,67
0,62	564,52	442,92
0,64	546,88	420,21
0,66	530,30	398,40
0,68	514,71	377,39
0,7	500,00	357,07
0,72	486,11	337,35
0,74	472,97	318,12
0,76	460,53	299,31
0,78	448,72	280,80
0,8	437,50	262,50
0,82	426,83	244,30
0,84	416,67	226,08
0,86	406,98	207,68
0,88	397,73	188,91
0,9	388,89	169,51
0,92	380,43	149,10
0,94	372,34	127,03
0,96	364,58	102,08
0,98	357,14	71,07
1	350,00	0,00

En la figura 51 se observa como el factor de potencia afecta de una manera similar a la potencia reactiva y a la potencia aparente, la curva verde representa la potencia aparente mientras que la curva azul representa la potencia reactiva.

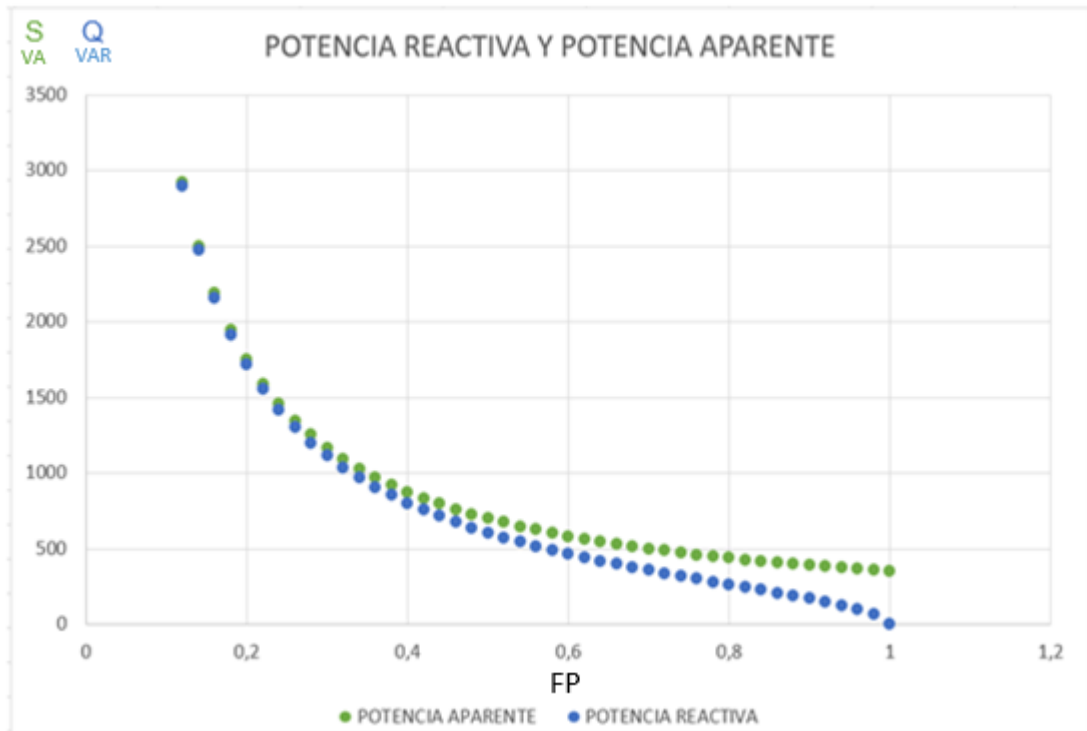


Figura 51. Factor de potencia vs Potencia Aparente vs. Potencia Reactiva

De la figura 51 se puede deducir que, cuando el factor de potencia es cercano a la unidad, la potencia aparente jamás podrá ser menor o igual a la potencia real.

En la tabla 8, se puede observar la relación que existe entre la potencia reactiva a corregir y el valor de capacitancia necesario para la corrección del factor de potencia del sistema.

El capacitor será aquel elemento que proporcionará la energía reactiva capacitiva necesaria para contrarrestar el efecto reactivo inductivo del sistema.

Tabla 8. Potencia reactiva y capacitancia calculada

FP	POTENCIA REACTIVA A CORREGIR	CAPACITANCIA
	VAR	uF
0,12	2746,49	50,17
0,14	2326,28	42,50
0,16	2010,22	36,72
0,18	1763,59	32,22
0,2	1565,54	28,60
0,22	1402,83	25,63
0,24	1266,61	23,14
0,26	1150,76	21,02
0,28	1050,90	19,20
0,3	963,83	17,61
0,32	887,14	16,21
0,34	818,99	14,96
0,36	757,94	13,85
0,38	702,86	12,84
0,4	652,85	11,93
0,42	607,17	11,09
0,44	565,22	10,33
0,46	526,49	9,62
0,48	490,58	8,96
0,5	457,12	8,35
0,52	425,82	7,78
0,54	396,42	7,24
0,56	368,71	6,74
0,58	342,48	6,26
0,6	317,57	5,80
0,62	293,82	5,37
0,64	271,11	4,95
0,66	249,30	4,55
0,68	228,29	4,17
0,7	207,97	3,80
0,72	188,25	3,44
0,74	169,03	3,09
0,76	150,21	2,74
0,78	131,70	2,41
0,8	113,40	2,07
0,82	95,20	1,74
0,84	76,98	1,41
0,86	58,58	1,07
0,88	39,81	0,73
0,9	20,41	0,37
0,92	0,00	0,00
0,94	0,00	0,00
0,96	0,00	0,00
0,98	0,00	0,00
1	0,00	0,00

En la figura 52 se muestra la gráfica de la potencia reactiva y la capacitancia, donde se puede observar que el valor de la capacitancia es directamente proporcional a la potencia reactiva.

Mientras la potencia reactiva aumente el valor de la capacitancia para corregir el factor de potencia aumenta.



Figura 52. Potencia Reactiva vs. Capacitancia.

Como el objetivo de la tarjeta electrónica es determinar los pasos a partir del valor en el cual se realiza la corrección del factor de potencia se dotó a la tarjeta un sistema de señalización. En la figura 53 se puede observar las salidas tipo relé activarse mediante los diodos led de cada paso.

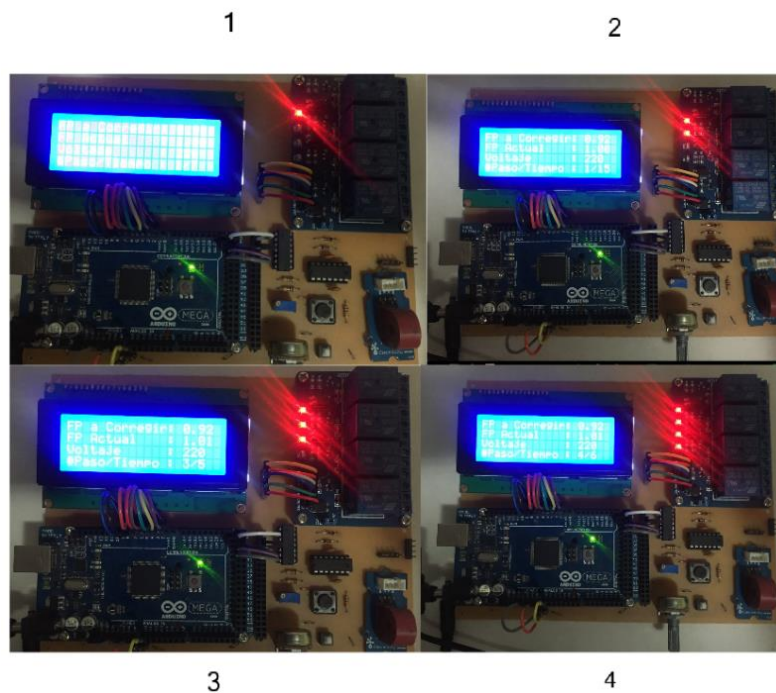


Figura 53. Salidas tipo relé activadas

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El uso de la interrupción del Timer permitió trabajar de manera autónoma con el programa principal de la adquisición del pulso de entrada, provocando que el sistema de una respuesta inmediata.
- La colocación de pasos debe realizarse en un tiempo mayor a 15 segundos por cada paso, esto es, para que el sistema se estabilice en un tiempo prudente antes de colocar o retirar el siguiente paso.
- La importancia de corregir el factor de potencia en una instalación es importante para evitar aumentos en la facturación del suministro eléctrico.
- Los resultados obtenidos mediante esta técnica de medición son de carácter discreto, debido al hecho de que es necesario medir el desfase entre las dos señales en cada período, lo que hace que la medición sea constante.
- La precisión de la tarjeta electrónica ocurre cuando el ingreso de las dos señales, tanto de voltaje y corriente, se encuentran con el menor ruido posible, para así evitar mediciones erróneas.
- El uso de la lógica secuencial permite que el programa funcione de manera cíclica, sin retraso en las mediciones e independientemente de los eventos externos que puedan ocurrir.

6.2 RECOMENDACIONES

- El sensor de corriente debe tener una precisión dentro del rango del consumo de la carga, esto es para que la señal que ingrese al microcontrolador sea detectada sin necesidad de realizar un amplificador de señal.
- Cuando se ponga en funcionamiento la tarjeta electrónica, preferiblemente que estén conectados todos los elementos de potencia antes de encender la unidad de control.
- Para garantizar el desempeño óptimo de la tarjeta electrónica se deberá ingresar un valor de voltaje de entrada de 12 VDC, esto para evitar que por falta de energía se reinicie la tarjeta.
- Si se usara la tarjeta en una red monofásica, se debe tomar en cuenta el valor de la capacitancia para la corrección, ya que no sería el mismo que el de un sistema trifásico.
- No sobrepasar la compensación del factor de potencia máximo de 0,98 ya que esto provocaría alteraciones en las líneas de transmisión principales y la disminución de la vida útil de los componentes.
- No sobrepasar el rango de adquisición del sensor de corriente TC, ya que provocaría que el sensor se sature y como resultado diera una señal deformada y la medición sería errónea.
- Si la potencia del motor es superior al límite del sensor de corriente TC, se recomienda cambiar de sensor en un rango que esté dentro de la potencia del motor.

BIBLIOGRAFIA

- ABB. (2014). Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas. Barcelona: Voltimum.
- Arduino. (2015). Arduino CC. Recuperado de <https://www.arduino.cc/>
- Bolton, W. (2013). Sistemas de control electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Mexico: Alfaomega.
- Boylestad, R. (2004). Introducción al análisis de circuitos. Mexico: Pearson Education.
- Boylestad, R. (2009). Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos. Mexico: Prentice Hall.
- CFE. (20 de Marzo de 2015). Comisión Federal de Electricidad. Recuperado de <http://www.cfe.gob.mx/Industria/AhorroEnergia/Lists/Calendario%20de%20eventos/Attachments/3/Factor%20de%20potencia.pdf?Mobile=1>
- EEQ. (28 de Febrero de 2014). Pliego tarifario. Recuperado de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/PLIEGO+TARIFARIO+FEBRERO+2014/b57671e8-911c-463a-9697-c395b1f21a33>
- ElecFreaks. (s.f.). ElecFreaks. Recuperado de http://www.elecFreaks.com/wiki/index.php?title=Octopus_Non-invasive_AC_current_sensor_%28TA12-100%29_Brick
- electroSome. (11 de Octubre de 2015). electroSome. Recuperado de <https://electrosome.com/interfacing-lcd-atmega32-microcontroller-atmel-studio/>
- Fink, D., Carroll, J., & Beaty, W. (1981). Manual práctico de electricidad para ingenieros. España: Editorial Reverté S.A.

- Floyd, T. (2006). Fundamentos de Sistemas Digitales. Madrid: Prentice Hall.
- Fowler, R. J. (1994). Electricidad Principios y Aplicaciones. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- GlobalTec. (2008). Corrección del factor de potencia en arrancadores y variadores de frecuencia. Motortico, 1.
- Gravitech. (11 de Octubre de 2015). Electronic Experimental Solutions. Recuperado de <http://www.gravitech.us/20chblld.html>
- Guasch. (12 de Octubre de 2015). Guasch. Recuperado de http://e-guasch.com/onlinedocs/catalogue/appnotes/AN110627_c.pdf
- Hatena. (21 de Abril de 2013). Hatena.
- Imergia. (18 de Marzo de 2014). Imergia. Recuperado de <http://www.imergia.es/eficiencia-energetica/que-es-la-potencia-reactiva>
- Kosow, I. L. (1993). Máquinas eléctricas y transformadores. Mexico: Prentice-Hall Inc.
- Martin, J. C. (2009). Automatismos Industriales.
- Miguel, P. A. (2010). Equipos electrónicos de consumo. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Montano, H. (27 de Agosto de 2011). Transformadores de corriente. Recuperado de <https://montanux.wikispaces.com/file/view/trafos+de+corriente.pdf>
- Motorola. (15 de Noviembre de 2015). Electronic Components Datasheet Search. Recuperado de <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/3064/MOTOROLA/LM339.html>
- National Instruments. (s.f.). National Instruments. Obtenido de Metodología de diseño Mecatrónico: www.ni.com

- profeTolocka. (9 de Mayo de 2015). Recuperado de <http://www.profetolocka.com.ar/2015/05/09/modulo-de-4-reles-para-arduino/>
- Reyes, F., & Cid, J. (2 de Febrero de 2013). Saberes y Ciencias. Recuperado de <http://www.saberesyciencias.com.mx/sitio/component/content/article/10-portada/277-mecatronica>
- Russell, R. (25 de Febrero de 2009). Ventanas al Universo. Recuperado de http://www.windows2universe.org/physical_science/physics/electricity/voltage_transformers.html&lang=sp
- Saucedo, R. (2001). Introducción a las instalaciones eléctricas. Mexico: Universidad Autonoma de Baja California .
- Schneider Electric. (2014). Guia de diseños de instalaciones electricas. Mejora del factor de potencia y filtrado de armónicos, 26.
- Serrano, M. (3 de Mayo de 2013). Coleccion de Tesis Digitales . Recuperado de Universidad de las Americas Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendez_s_j/capitulo_1.html
- Sirio. (s.f.). Transformadores y soluciones magneticas. Recuperado de <http://sirio.com.co/tia/>
- Songle. (9 de Diciembre de 2015). Songle Relays. Recuperado de <http://www.songle.com/en/Product.asp?ClassID=9>
- Soto, J. J. (1996). Fundamentos sobre ahorro de energía. Yucatan: Departamento Editorial.
- STMicroelectronics. (s.f.). STMicroelectronics. Recuperado de <http://www.st.com/web/en/home.html>

Trashorras, J. (2013). Configuración de instalaciones eléctricas. Editorial Paraninfo.

VDI-Richtlinien. (2004). Design methodology for mechatronic systems. Germany.

Zuloaga, A., & Astarloa, A. (2008). Sistemas de Procesamiento Digital. Madrid: Delta Publicaciones.

ANEXOS

ANEXO I

Código Fuente

```
/*
 * PROGRAMA QUE CALCULA EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS TRIFASICOS, CORRIGE DE
 * MANERA AUTOMATICA A UN FACTOR DE POTENCIA DE 0.92 MEDIANTE LA COLOCACION DE
 * PASOS, CASO CONTRARIO SI ES MAYOR A 0.94 EMPIEZA A QUITAR PASOS
 */

/*=====
 *
 * LIBRERIAS DEL MICROCONTROLADOR
 *=====*/

#include <LiquidCrystal.h>
#include <TimerOne.h>

LiquidCrystal lcd(2, 3, 4, 5, 6, 7);
/*RS PIN 2
 *ENABLE 3
 *D4 4
 *D5 5
 *D6 6
 *D7 7
 */

/*=====
 *
 * DECLARACION DE VARIABLES
 *=====*/

const int buttonPin = 8; // Pin 8 para cambiar de pantalla

// Variables que cambiaran dependiendo el estado

int buttonPushCounter = 0; // contador del numero de pulsos del boton
int buttonState = 0; // estado actual del boton
int lastButtonState = 0; // estado previo del boton

int contador=0; // contador=0
int constante; // constante para el loop
float fp; // valor a almacenar del factor de potencia
int paso=0; // inicializacion del paso (banco de capacitores)
float duration_ms; // duracion del pulso en ms
float desfase_deg; // desfase del voltaje y corriente en grados
float desfase_ms; // desfase del voltaje y corriente en ms
float radianes; // angulo de desfase en radianes

float sensorpin=A0; // Pin A0 para ADC

float calibration=0; // variable de la salida del ADC

int senal =9; // Pin 9 para ingreso de pulsos de voltaje y corriente
unsigned long duration_us; // Variable para la duracion del pulso en uS (pulseIn)

float p_real=350.0;
float reactiva_1; //Potencia Reactiva Actual con FP variable
float reactiva_2; //Potencia Reactiva Fijo del motor en vacio FP=0,65
float reactiva_corregir; //Potencia Reactiva a corregir

float capacitor; //Valor del capacitor a colocar para compensar P. Reactiva

float aparente; //Potencia Aparente
```

```

/*=====
*                               INICIALIZACION DEL MICROCONTROLADOR
=====*/

void setup()
{
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(senal, INPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(22, OUTPUT);
  pinMode(24, OUTPUT);
  pinMode(26, OUTPUT);
  pinMode(28, OUTPUT);

  digitalWrite(13, LOW);
  digitalWrite(22, HIGH);
  digitalWrite(24, HIGH);
  digitalWrite(26, HIGH);
  digitalWrite(28, HIGH);

  Timer1.initialize(500000); //Tiempo en microsegundos (medio segundo)
  Timer1.attachInterrupt(interruptcion);

  lcd.begin(20, 4);
}

/*=====
*                               PROGRAMA PRINCIPAL
=====*/

void loop() {

  constante=1;

  calibration=analogRead(sensorpin);
  calibration=calibration/1000.0;

  duration_us=pulseIn(senal, HIGH);
  delay(100);

  duration_ms=(duration_us*0.001)+0.04;
  desfase_ms=duration_ms-8.32;
  desfase_deg=((180.0*desfase_ms)/8.29);
  radianes=desfase_deg*0.01745;
  fp=abs(cos(radianes))+ calibration;

  reactiva_1=p_real*tan(radianes);
  reactiva_2= p_real*tan(23.07*0.01745);
  reactiva_corregir=reactiva_1-reactiva_2;
  capacitor=((reactiva_corregir)/(120.0*3.1416*220.0*220.0))*1000000.0;

  aparente=p_real/fp;

  buttonState = digitalRead(buttonPin);

  if (buttonState != lastButtonState)
  {
    if (buttonState == HIGH)
    {
      buttonPushCounter++;
    }
  }
}

```

```

else
{
    Serial.println(" ");
}
delay(50);
}

lastButtonState = buttonState;

/*=====
*                               PANTALLA 1
=====*/

if(buttonPushCounter == 0)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print("U.T.E.");
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Ing. Mecatronica");
    lcd.setCursor(1,2);
    lcd.print("Factor de Potencia");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Raul V. Paredes Loor");
    delay(300);
}

/*=====
*                               PANTALLA 2
=====*/

if(buttonPushCounter == 1)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("FP a Corregir:");
    lcd.setCursor(15,0);
    lcd.print("0.92");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("FP Actual   :");
    lcd.setCursor(15,1);
    lcd.print(fp);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje       : 220");
    lcd.setCursor(17,3);
    lcd.print(contador);

    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("#Paso/Tiempo : /");
    lcd.setCursor(15,3);
    lcd.print(paso);
    delay(300);
}

/*=====
*                               PANTALLA 3
=====*/

if(buttonPushCounter == 2)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("P (kW)   :");
    lcd.setCursor(13,0);
    lcd.print(p_real);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("S (KVA)  :");

```



```

    lcd.setCursor(13,1);
    lcd.print(aparente);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Q (KVar) :");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(reactiva_1);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("C (uF)   :");
    lcd.setCursor(13,3);
    lcd.print(capacitor);
    delay(300);
}

if(buttonPushCounter == 3)
{
    buttonPushCounter=1;
}

/*=====
*                               ALGORITMO DE CONTROL DE PASOS
*=====*/

if(contador>15)
{
    contador=0;           // Si el contador es mayor a 15 contador=0
}

if(contador==15)
{
    if(constante==1)
    {
        if(fp<1.5)
        {
            contador=0;
            paso=paso+1;           //Incremento del paso hasta un valor max de 4
            if(paso>4)
            {
                paso=4;
            }
        }

        if(fp>1.6)
        {
            if(paso>0)
            {
                contador=0;
                paso=paso-1;       //Decremento del paso hasta un valor min de 1
            }
        }
    }
}

/*=====
*                               PASOS A SALIDAS DIGITALES
*=====*/

switch(paso)
{
    case 0:    digitalWrite(22,HIGH);
               digitalWrite(24,HIGH);           //APAGADOS TODOS LOS PASOS
               digitalWrite(26,HIGH);
               digitalWrite(28,HIGH);
               break;

    case 1:    digitalWrite(28,LOW);
               digitalWrite(26,HIGH);           //ENCENDIDO PASO #1
               digitalWrite(24,HIGH);
               digitalWrite(22,HIGH);
               break;
}

```

```

    case 2:  digitalWrite(28,LOW);
            digitalWrite(26,LOW); //ENCENDIDO PASO #2
            digitalWrite(24,HIGH);
            digitalWrite(22,HIGH);
            break;

    case 3:  digitalWrite(28,LOW);
            digitalWrite(26,LOW); //ENCENDIDO PASO #3
            digitalWrite(24,LOW);
            digitalWrite(22,HIGH);
            break;

    case 4:  digitalWrite(28,LOW);
            digitalWrite(26,LOW); //ENCENDIDO PASO #4
            digitalWrite(24,LOW);
            digitalWrite(22,LOW);
            break;
}

}

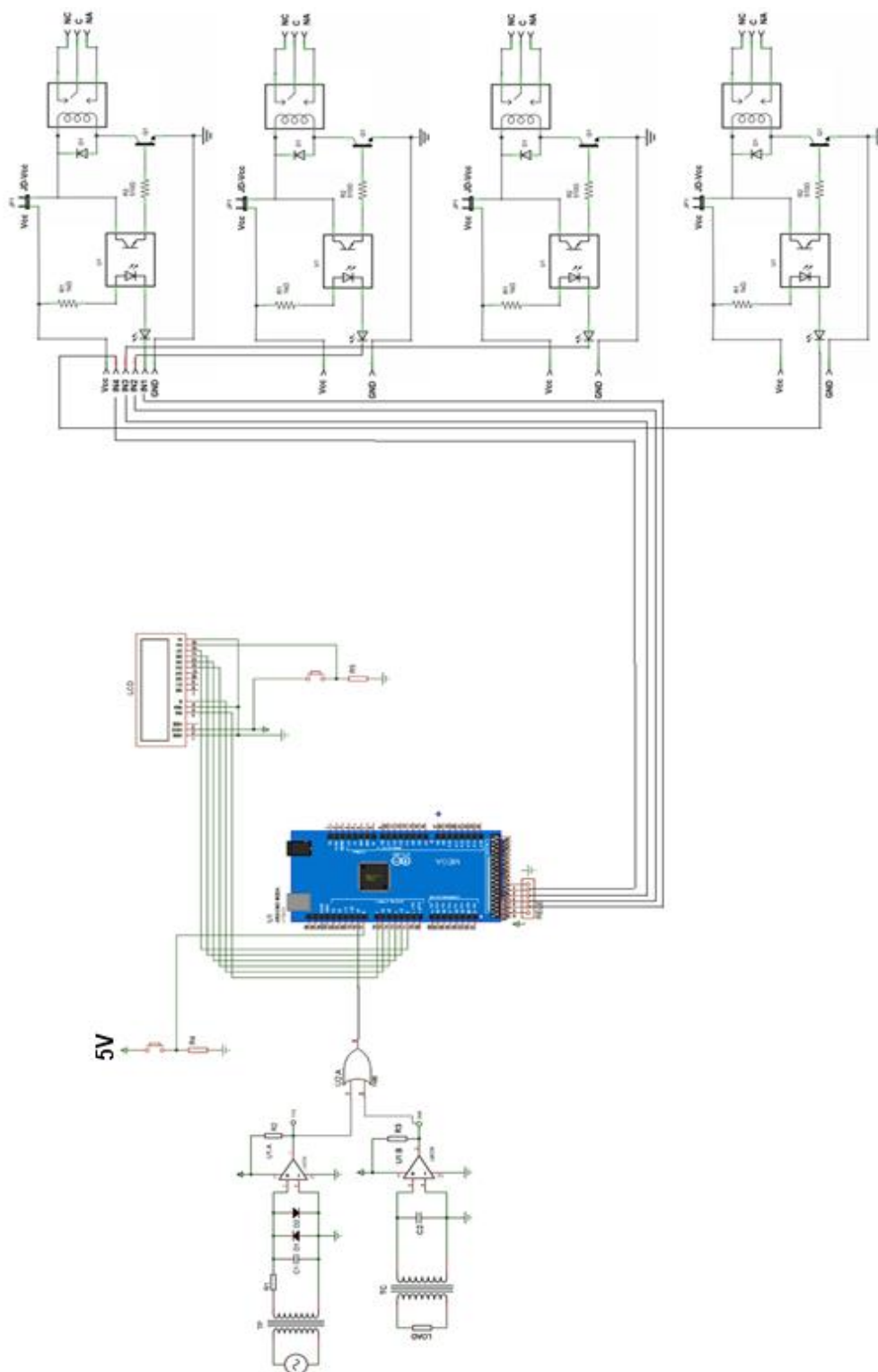
void interrupcion()//funcion interrupción timer
{
    contador++;
}

/*****
*                               FIN DE PROGRAMA
*****/

```

ANEXO II

Diagrama Eléctrico



ANEXO III

Factor K

Factor K (kvar/kW)

cos ϕ inicial	cos ϕ final												
	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

ANEXO IV

Diagrama ATmega2560

