

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Diseño e Implementación de un Arrancador Suave**

**para Motores de Inducción Trifásicos**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**José Alejandro Mora Ramírez**

**Cartago, Marzo de 2009**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

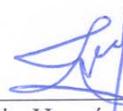
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



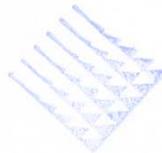
Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector

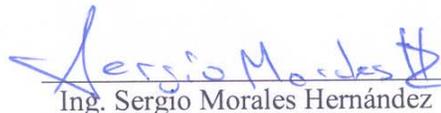


Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector



**TEC**  
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica



Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Marzo de 2009

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Marzo de 2009



José Alejandro Mora Ramírez

Céd: 1-1145-0635

## Resumen

Actualmente las ineficiencias en los procesos electromecánicos llevan a pérdidas de dinero, reflejadas en la factura eléctrica. Una de estas ineficiencias es la corriente de arranque en los motores de inducción. Los motores de inducción son la fuente más común de energía mecánica del mundo, por lo que el desperdicio se encuentra en todos los campos del sector productivo. Estas altas corrientes no solo elevan la factura eléctrica, sino también causan daños al equipo asociado a los motores.

En muchos casos el encargado de la planta conoce el problema, pero la complejidad o el alto costo de los métodos de arranque para los motores de inducción evitan que el problema sea resuelto. Ante este panorama la empresa Enertec Soluciones plantea la idea de desarrollar un dispositivo sencillo, económico y eficiente; que brinde un arranque suave para los motores de inducción. Esto con el fin de atacar el factor “Demanda” de la factura eléctrica con una solución asequible para la pequeña y mediana empresa.

Lo que se pretende desarrollar es un sistema con TRIACs, rectificadores controlados de potencia, para lograr aplicar gradualmente el voltaje a las terminales del motor. Esto es importante ya que si se logra reducir el volteje se reduce el pico de corriente en el momento del arranque del motor.

**Palabras claves: Motor de Inducción, Arranque Suave, Ahorro Energético**

## **Abstract**

Currently, the inefficiencies in the electromechanical processes lead to losses of money, reflected in the energy bill. One of these inefficiencies is the starting current in induction motors. The induction motors are the most common source of mechanical energy in the world, so the waste is found in all areas of the productive sector. These high currents not only raise the energy bill, but also cause damage to the equipment associated with the motors.

In many cases the operator of the plant knows the problem, but the high cost or complexities of the methods for starting induction motors avoid the problem to be resolved. Against this background the company Enertec Soluciones raises the idea of developing a simple, economical and efficient device, to provide a soft start for induction motors. The idea is to attack the factor of "Peak Demand" of the electric bill with an affordable solution for small and medium enterprises.

What is intended is to develop a system with Triacs, power controlled rectifiers, to progressively apply the voltage to motor terminals. This is important because if we manage to reduce the voltage it reduces the peak current at the starting of the motor.

**Key Words: Induction Motors, Soft Start, Energy Savings**

## **Dedicatoria**

Es difícil pensar en alguien más a quien dedicarle este trabajo, sino a la persona que más se preocupó, que más me presionó, y más quiere que yo salga adelante.

A mi mamá...

## **Agradecimiento**

Agradezco a mis padres por haberme dado la vida, por darme la oportunidad de estudiar, por apoyarme aún y cuando no coincidían conmigo. Por quererme, por regañarme, por presionarme para terminar mis estudios. Gracias por todo!!

A mis hermanas por quererme y apoyarme.

A mis sobrinos por darme esperanza.

A Gaby por apoyarme en todo y por mostrarme el lado bonito de las cosas.

Al Ing. Max Fernández por darme la oportunidad de realizar este proyecto en Enertec Soluciones S.A.

A mis compañeros por compartir todos los momentos difíciles y felices, por las palmadas, porque todo influyó en quien soy como persona.

A todos mis familiares, por creer en mí y apoyarme en todo momento. Gracias por ser como son!

A todos los que influyeron de una u otra manera,

Gracias!

## Índice General

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	2
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	2
1.2 Solución seleccionada .....	4
<b>Capítulo 2: Meta y Objetivos</b> .....	7
2.1 Meta.....	7
2.2 Objetivos .....	8
2.2.1 Objetivo Principal.....	8
2.2.2 Objetivos Específicos .....	8
<b>Capítulo 3: Marco Teórico</b> .....	10
3.1 Motores Eléctricos .....	10
3.1.1 Motores de Corriente Directa.....	10
3.1.2 Motores de Corriente Alterna.....	10
3.1.3 Motores de Inducción .....	11
3.2 Arranque de los Motores de Inducción .....	13
3.3 Métodos Electro-Mecánicos de Arranque de Motores de Inducción .....	16
3.3.1 Arranque Directo en Línea.....	16
3.3.2 Arrancador Estrella-Delta .....	17
3.3.3 Arrancador por Auto Transformador.....	19
3.3.4 Arrancadores de Estado Sólido .....	19
<b>Capítulo 4: Procedimiento Metodológico</b> .....	26
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	26
4.2 Obtención y análisis de información .....	27
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución .....	30
4.4 Implementación de la solución.....	31
4.5 Reevaluación y rediseño.....	33
<b>Capítulo 5: Descripción Detallada de la Solución.</b> .....	35
5.1 Análisis de Soluciones y Selección Final.....	35
5.2 Descripción del Hardware .....	37
5.2.1 Bloque de Acople.....	37
5.2.2 Bloque de Comunicación.....	39
5.2.3 Bloque de control.....	40
5.2.4 Bloque de potencia.....	42
5.3 Descripción del software .....	51

5.3.1. Programación del 18f4550: .....	52
5.3.2. Control del Sistema: .....	53
5.3.3. Secuencia para generar los disparos: .....	56
<b>Capítulo 6: Análisis de Resultados</b> .....	<b>59</b>
<b>Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>69</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>69</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>71</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>72</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>73</b>
<b>Apéndices</b> .....	<b>74</b>
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología .....	75
A.2 Cálculos .....	76
A.3 Manual de usuario .....	78
A.4 Protocolos de Medición .....	80
Medición de la corriente de arranque con el ARL.5 .....	80
A.5 Información sobre la empresa .....	83
A.6 Hoja de Datos del Triac BT137 600E .....	84

## Índice de Figuras

Figura 1.1.	Diagrama General del Sistema.....	5
Figura 3.1.	Construcción del Motor de Inducción.....	11
Figura 3.2.	Barras conductoras del Rotor Jaula de Ardilla.....	13
Figura 3.3.	Curva Torque vrs. Velocidad del Motor de Inducción.....	14
Figura 3.4.	Torque vrs. Velocidad para un sistema de carga.....	14
Figura 3.5.	Torque vrs. Velocidad para un sistema Motor-Carga.....	15
Figura 3.6.	Corriente y potencia de un motor conectado en “Directo en Línea”.....	17
Figura 3.7.	Corriente y potencia de Arranque de un motor de 40Hp con Sistema Estrella-Delta.....	18
Figura 3.8.	Aproximación del circuito equivalente del Motor de Inducción.....	22
Figura 4.1.	Corriente de Arranque Prensa Hidráulica, 75HP.....	28
Figura 5.1.	Diagrama General del Sistema.....	36
Figura 5.2.	Circuito Reductor de Tensión.....	37
Figura 5.3.	Circuito Detector de Cruces por Cero.....	37
Figura 5.4.	Imagen de la pantalla LCD.....	39
Figura 5.5.	Imagen PIC 18f4550.....	40
Figura 5.6.	Símbolo para identificar el Triac.....	42
Figura 5.7.	Principio de Control de Fase.....	43
Figura 5.8.	Circuito de excitación del TRIAC.....	44
Figura 5.9.	Circuitos para el desfase de los pulsos de disparo de los Triacs.....	45
Figura 5.10.	Conexión Trifásica de los Triacs.....	46
Figura 5.11.	Imagen de disipadores de calor utilizados.....	47
Figura 5.12.	Programador de PIC.....	50
Figura 5.13.	Diagrama de Flujo del Sistema.....	52
Figura 5.14.	Menú de Opciones.....	53
Figura 6.1.	Circuito completo en ProtoBoard.....	57
Figura 6.2.	Gráficas del Detector de Cruces por Cero.....	58
Figura 6.3.	Duración entre los pulsos de salida del detector de cruces por cero.....	59
Figura 6.4.	Secuencia de disparos del Triac para el arranque suave.....	60
Figura 6.5.	Desfase entre los pulsos de activación de dos Triacs.....	61
Figura 6.6.	Voltaje de arranque para el motor de prueba.....	62
Figura 6.7.	Corriente de arranque para el motor de prueba.....	63
Figura 6.8.	Voltaje de arranque del motor de prueba con el sistema conectado.....	64
Figura 6.9.	Corriente de arranque del motor de prueba con el sistema conectado.....	64

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Construcción del Motor de Inducción.....	21
Tabla 2.	Lista de componentes utilizados en la implementación del sistema.....	56
Tabla 3.	Voltaje de Salida del Controlador Trifásico.....	65
Tabla 4.	Porcentaje de disminución de la corriente máxima de arranque.....	65



**Capítulo 1:**  
**Introducción**

# Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se define claramente el problema, además de presentar y justificar la solución elegida para corregirlo. En la primera sección se explicarán los detalles del problema y la trascendencia del mismo. En la segunda sección, se hará una breve explicación de los beneficios que trae la realización del proyecto, así como un planteamiento general de la solución seleccionada.

## 1.1 Problema existente e importancia de su solución

En la actualidad el sector industrial es el mayor consumidor de energía eléctrica del país. Este gran consumo provoca que cada año el gobierno y entes privados inviertan más dinero en la generación de energía, para dar abasto a la demanda nacional. Estas inversiones se podrían reducir en muchos de los casos si se adoptasen políticas de ahorro energético. Pero ahorrar energía no es fácil: en la mayoría de los casos industriales ya el ahorro técnico posible se ha llevado a su límite con las tecnologías disponibles desde hace décadas.

Este panorama, que tiene implicaciones similares a nivel mundial, provoca que el costo de productos de ahorro energético sea irrelevante ante la eventual disyuntiva en una decisión gerencial entre 'gasto en energía' o 'inversión en productos de ahorro energético'. En definitiva, la decisión correcta sería instalar equipos que sean rentables, que se paguen por si mismos con el ahorro que generen y mejoren la eficiencia de los procesos existentes. Además le darían a la empresa que instalase este tipo de dispositivos, una posición entre las que se preocupan por ser amigables con la naturaleza. Esta distinción se ha vuelto relevante ante un consumidor que a su vez es cada vez más crítico e inquisitivo.

La industria consume gran cantidad de energía eléctrica debido en parte a la utilización de motores eléctricos como energía mecánica. Desde su invención hace 100 años, el motor de inducción trifásico se ha convertido en uno de los equipamientos industriales más utilizados por su bajo costo y alta versatilidad. Se usa en prácticamente todas las plantas industriales que requieran de una energía mecánica, con aplicaciones como: prensas hidráulicas, bandas transportadoras, máquinas inyectoras de plástico, molinos, mezcladoras. Debido a su simpleza de construcción, bajo costo, confiabilidad y relativa eficiencia, es muy probable que siga siendo la fuente principal de energía mecánica en el futuro.

El mayor problema con este tipo de motores, es su alto torque y corriente de arranque. Durante el arranque el motor usualmente produce, en una fracción de segundo, entre 150 y 200% del torque necesario para vencer la inercia y acelerar la carga a plena velocidad. Este exceso puede llevar a problemas mecánicos. De igual forma, la corriente de arranque puede llegar a ser hasta de diez veces la corriente nominal del motor, causando problemas eléctricos al motor y a los componentes asociados a este. También, estos picos de corriente provocan inestabilidad a la red de la que se alimenta el motor.

Reducir este problema traería beneficios directos e indirectos. Disminuir la corriente aumenta significativamente la vida útil del motor y de la circuitería de control. Además, bajaría el monto de la factura eléctrica, ya que el cargo "Demanda" es innecesariamente afectado. Se podrá prevenir reducciones de tensión en la red de alimentación al encender motores grandes.

Gracias a la reducción de la corriente de arranque ya no será necesario mantener los motores de la planta encendidos toda la jornada. Además se podrá conectar más equipos a la acometida existente, ya que se disminuye la carga del plantel.

## 1.2 Solución seleccionada

Según su propio discurso promocional, ENERTEC SOLUCIONES es una compañía dedicada a promover soluciones reales, innovadoras y de calidad probada, orientadas a satisfacer la creciente necesidad de reducir el consumo energético en la industria y el comercio local. Lo que ENERTEC pretende y ofrece a sus clientes potenciales destaca puesto que manejan un módulo de trabajo en donde definen mediante auditorías eléctricas el potencial de ahorro posible con la instalación de sus equipos. Estos equipos se basan en “dispositivos electrónicos” que controlan el torque y el consumo de cada motor, llevando con ello a ahorros importantes en la facturación eléctrica.

Para este caso se quiere llegar a una solución económica y sencilla, que logre controlar el arranque de cualquier tipo de motor de inducción, modificando los componentes que sean necesarios, según la corriente y el voltaje de cada aplicación.

Para lograr eliminar el pico de corriente en el arranque del motor, se implementará un sistema con Triacs para controlar con precisión el voltaje aplicado a los terminales del motor. Estos dispositivos de potencia logran recortar la onda de voltaje mediante un pulso de disparo en una de sus patillas.

Controlar el punto de disparo, relativo al cruce por cero de cada medio ciclo del voltaje de alimentación, hace posible regular la corriente que fluye por cada TRIAC. Entre más cerca se encuentre el disparo del final del ciclo, menor será el valor de la corriente que se está dejando fluir. Por el contrario, si el disparo es cercano al inicio del ciclo, mayor será la corriente que

fluye. Utilizando este principio, se puede ajustar el voltaje que se le aplica al motor, y por ende la corriente.

Así que, por ejemplo: al iniciar con una diferencia amplia entre el punto de cruce por cero y el disparo del TRIAC, y reducir progresivamente esta diferencia, el voltaje aplicado al motor empieza de un valor pequeño, justo para encenderlo, hasta alcanzar el voltaje total de la red. Debido a que el torque es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, el torque de arranque aumenta gradualmente, asegurando un arranque suave tanto al motor como a los mecanismos asociados.

La siguiente figura es un diagrama general del sistema por desarrollar.

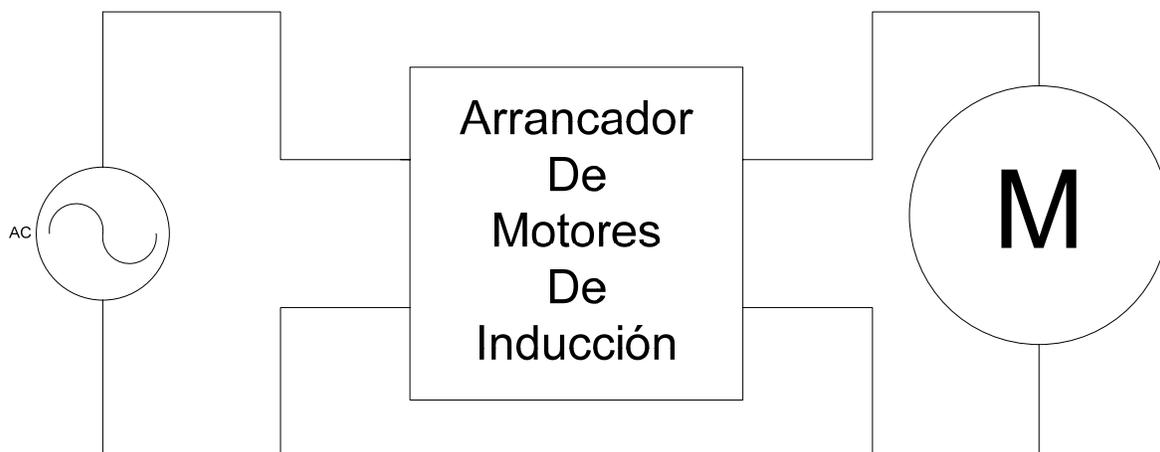


Figura 1.1. Diagrama General del Sistema

## **Capítulo 2:**

### **Meta y objetivos**

## Capítulo 2: Meta y Objetivos

### 2.1 Meta

Eliminar los altos picos de corriente en el arranque de los motores de inducción trifásicos.

Indicador: Mediciones de corriente hechas con el ARL.5

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 *Objetivo Principal***

Implementar un control electrónico capaz de realizar un arranque suave para los motores de inducción trifásicos, para reducir el pico de corriente en el arranque.

Indicador: Medición del pico de corriente en el arranque del motor

### **2.2.2 *Objetivos Específicos***

1. Desarrollar un módulo de control con una rutina de arranque para eliminar los picos de corriente en los motores de inducción.

Indicador: Mediciones de la corriente de arranque, hechas con el ARL.5.

2. Implementar un módulo de comunicación con el usuario para introducir los parámetros del arranque.

Indicador: Menú mostrado en LCD.

3. Implementar una etapa de potencia para lograr controlar el voltaje aplicado al motor.

Indicador: Medición del voltaje RMS aplicado al motor, con el ARL.5

4. Demostrar la diferencia eléctrica entre el arranque suave y los métodos convencionales de arranque.

Indicador: Comparación de las mediciones hechas con el ARL.5

## **Capítulo 3:**

### **Marco Teórico**

## Capítulo 3: Marco Teórico

### 3.1 Motores Eléctricos

Los motores son máquinas que funcionan a través de la interacción del flujo magnético y la corriente eléctrica, para convertir la energía eléctrica en energía mecánica. En general los motores eléctricos se clasifican en dos grandes grupos: motores de corriente directa y de corriente alterna. Ambos funcionan bajo el mismo principio que establece que un conductor por el que circula una corriente eléctrica y que se encuentra bajo la influencia de un campo magnético, será desplazado perpendicularmente a las líneas de acción de dicho campo.

#### 3.1.1 *Motores de Corriente Directa*

Los motores de corriente directa, como su nombre lo dice, funcionan con corriente y voltaje que son constantes en el tiempo. La construcción física de la máquina consta de dos partes principales: el estator o parte estacionaria del motor y el rotor o parte giratoria de la máquina. Este tipo de motores tiene mecanismos complicados que fallan con frecuencia elevando el costo de su mantenimiento.

Las escobillas y los anillos rozantes, que se encargan de suministrar la potencia desde una fuente externa, deben ser remplazados constantemente. Los conmutadores también se dañan periódicamente. Estos se encargan de mantener la máquina girando, ya que al alternar la polaridad del voltaje de la espira del rotor cambian las conexiones para mantener un voltaje de salida constante.

#### 3.1.2 *Motores de Corriente Alterna*

Este tipo de motor, a diferencia del de corriente directa, trabaja con voltajes cuya magnitud y dirección varía cíclicamente. Existen varios tipos de motores de corriente alterna, pero en general se pueden clasificar en tres: el Motor Universal, el Motor Síncrono, y el Motor de Inducción. El motor eléctrico más sencillo de todos es el motor de inducción trifásico. Por esta razón es el más utilizado como fuente de energía mecánica. Su uso generalizado en la mayoría de las industrias y aplicaciones en el mundo merece una mejor descripción.

### 3.1.3 Motores de Inducción

La característica principal que diferencia al motor de inducción de las demás máquinas eléctricas es que las corrientes del bobinado secundario son creadas únicamente, como su nombre lo dice, por inducción. En el resto de los motores esta corriente es creada por excitación directa por una fuente de CD u otra fuente de energía externa. Este motor tiene dos tipos de rotor: rotor de “jaula de ardilla” y rotor “devanado”. Los motores de rotor devanado presentan problemas de mantenimiento similares a los motores de corriente directa, debido a que también utilizan escobillas y anillos rozantes. La siguiente figura muestra una descripción de las partes del motor de inducción.

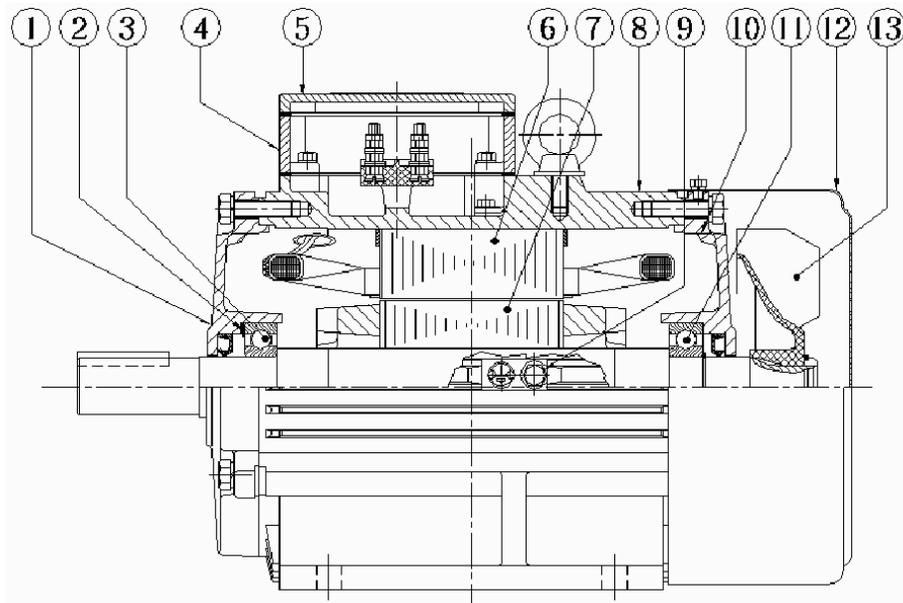


Figura 3.1. Construcción del Motor de Inducción<sup>1</sup>

Tabla 1. Construcción del motor de inducción

<b>Numero de Parte</b>	<b>Nombre</b>
1	Cubierta Externa
2	Cojinete
3	Soporte Externo
4	Caja con Terminales
5	Cobertor de Terminales
6	Laminado del Estator
7	Laminado del Rotor
8	Ajuste del Motor
9	Tierra
10	Cubierta Interna
11	Soporte Interno
12	Carcasa del Abanico
13	Abanico

Los motores con rotor de jaula de ardilla son los más utilizados. Su rotor presenta una serie de conductores sólidos acomodados en forma de círculo alrededor del eje y paralelos a él. La figura 3.2 muestra un esquema del eje de este tipo de motores. Tienen este nombre ya que la configuración de estos conductores es muy similar al mecanismo usado para que los roedores se ejerciten.

---

<sup>1</sup> Fuente: Tomado de [8].



© DWTMA 1998

Figura 3.2. Barras conductoras del Rotor Jaula de Ardilla.<sup>2</sup>

### 3.2 Arranque de los Motores de Inducción

El motor es un sistema de conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Dicha conversión la realiza por medio de un eje que rota a una velocidad fija determinada por la frecuencia de la red de alimentación y las características propias de la máquina. La potencia disponible del eje es igual al torque multiplicado por la velocidad del eje. Desde un valor inicial en reposo, el torque cambia, aumenta y disminuye, mientras el motor acelera, llegando a un máximo alrededor del 70% de la velocidad plena, hasta ser cero a la velocidad de sincronía.

Esta característica significa que los motores de inducción siempre trabajan un poco menos rápido que la velocidad de sincronía para desarrollar potencia, de ahí el término “asíncrono”. La siguiente figura muestra la curva Torque vs. Velocidad de este tipo de motores.

---

<sup>2</sup> Fuente: Tomado de [17]

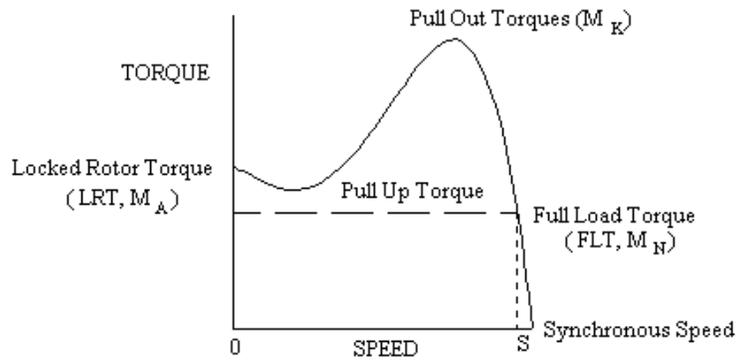


Figura 3.3. Curva Torque vrs. Velocidad del Motor de Inducción.<sup>3</sup>

La curva anterior depende de las características propias del motor y de cómo se nutre del sistema de red. De igual manera, para cada carga existe una característica torque/velocidad.

La figura 3.4 muestra una curva característica para un sistema de carga.

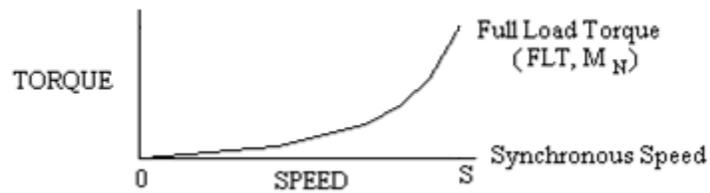


Figura 3.4. Torque vrs. Velocidad para un sistema de carga.<sup>4</sup>

La aceleración de un sistema motor-carga es debida a la diferencia entre el torque desarrollado por el motor y el torque absorbido por la carga como se muestra en la siguiente figura.

<sup>3</sup> Fuente: Tomado de [9]

<sup>4</sup> Fuente: Tomado de [9]

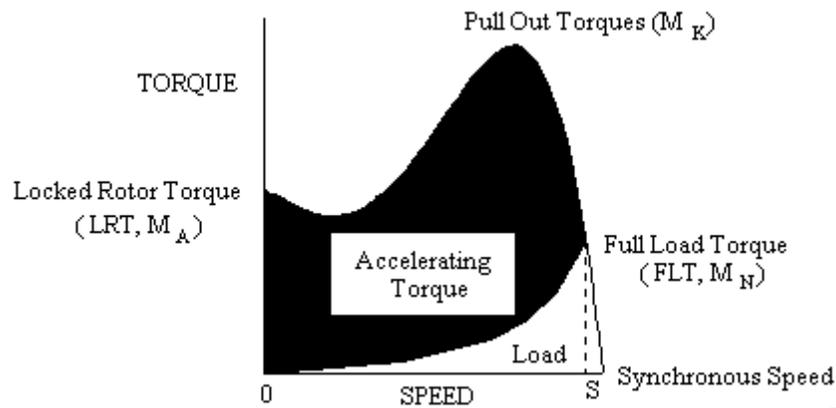


Figura 3.5. Torque vrs. Velocidad para un sistema Motor-Carga.<sup>5</sup>

Es claro que entre mayor sea la diferencia entre estas magnitudes, más rápido acelerará el sistema y se llegará a la velocidad plena. De igual manera, mayores serán los desgastes experimentados por los mecanismos acoplados al motor y los sistemas de suministro durante el proceso de aceleración. Un arranque ideal aceleraría la carga con la fuerza justa para alcanzar la velocidad plena suavemente en un tiempo razonable, produciendo daños mínimos al sistema.

En términos generales, la curva torque-velocidad es determinada por la resistencia del rotor; un motor con una resistencia de rotor alta puede generar el torque máximo en el momento del arranque dándole al motor una característica de alta fuerza de arranque. Por el contrario, cuando la resistencia de rotor es baja, el motor producirá bajo torque de arranque pero generará el máximo torque cerca de la velocidad de sincronía. El arranque de motor es crítico ya que causa costos importantes en la producción. Una vez que el motor se encuentra en su ciclo normal de trabajo, es probable que trabaje con una carga mucho menor a la que tiene por diseño.

<sup>5</sup> Fuente: Tomado de [9].

Para el arranque, los motores modernos utilizan técnicas como una doble jaula o cambios en el diseño de las barras, para combinar tanto la característica de alto torque de arranque como también una operación eficiente a velocidad plena.

### **3.3 Métodos Electro-Mecánicos de Arranque de Motores de Inducción**

#### ***3.3.1 Arranque Directo en Línea.***

La forma más fácil de controlar la corriente que fluye hacia un motor de inducción es interrumpiendo la conexión con la red de alimentación por medio de un “interruptor”. Este tipo de control es utilizado donde se requiere un método sencillo y barato de arranque. El arranque “directo en línea” (DOL) es el más popular de los arranques en el mundo. Aún motores de gran tamaño son arrancados por este método. Presenta serias inconveniencias y elevados costos relacionados con el mantenimiento de los motores y el pago de la factura eléctrica.

La siguiente figura muestra la corriente y potencia de arranque del motor de 30Hp de un molino de plástico, medición hecha en la Planta de Reciclaje de Florida Bebidas, ubicada en Rio Segundo de Alajuela. Se puede observar que la corriente llega a un máximo de 250 A, mientras que la potencia asciende hasta más de 80KW.

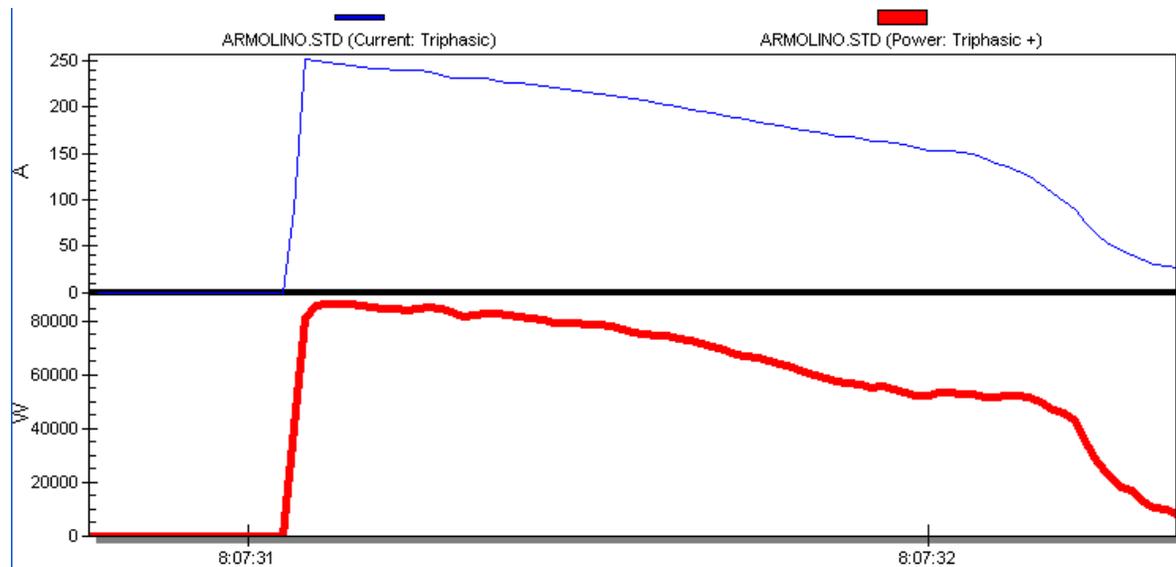


Figura 3.6. Corriente y potencia de un motor conectado en “Directo en Línea”

Los severos y dañinos efectos de una rápida aceleración de la carga acoplada debida a un exceso de torque de arranque, además de corrientes muy altas, aparecen con este tipo de arranque. La simpleza y bajo costo aparente pueden resultar engañosos, ya que los gastos por pagos en la factura eléctrica así como alto mantenimiento y remplazo de equipo debido a estas altas corrientes de impacto súbito (llamadas “picos” de arranque) a fin de cuentas terminan siendo mucho mayores con respecto a métodos de control más eficientes.

### 3.3.2 *Arrancador Estrella-Delta*

Se pueden utilizar métodos de reducción del voltaje aplicado para disminuir la corriente de arranque, los cuales están basados en el principio de que el torque del motor es proporcional al cuadrado del voltaje. El más común de estos arrancadores utilizando esta modalidad es el “Estrella-Delta”.

Este controlador consiste en tres interruptores y un temporizador. Inicia el arranque del motor en una configuración “estrella”, cambiando luego a la configuración “delta” para aplicar todo el voltaje al motor. El cambio entre configuraciones es controlado por el temporizador y usualmente está programado para dispararse cuando el motor ya no puede seguir acelerando. La idea de arrancar el motor en configuración estrella es para aplicar el 58% del voltaje normal a los bobinados del estator. Esto reduce el torque de arranque a una tercera parte del torque del rotor en reposo, disminuyendo así la corriente y las fuerzas de aceleración.

Aunque en principio parece una mejora importante sobre el sistema de conexión o arranque “directo en línea”, el sistema aun presenta ciertas desventajas. La siguiente figura muestra exactamente lo que sucede en el arranque de un motor con un sistema Estrella-Delta. Dicha medición fue tomada en el aserradero “El Cipresal” en Cartago.

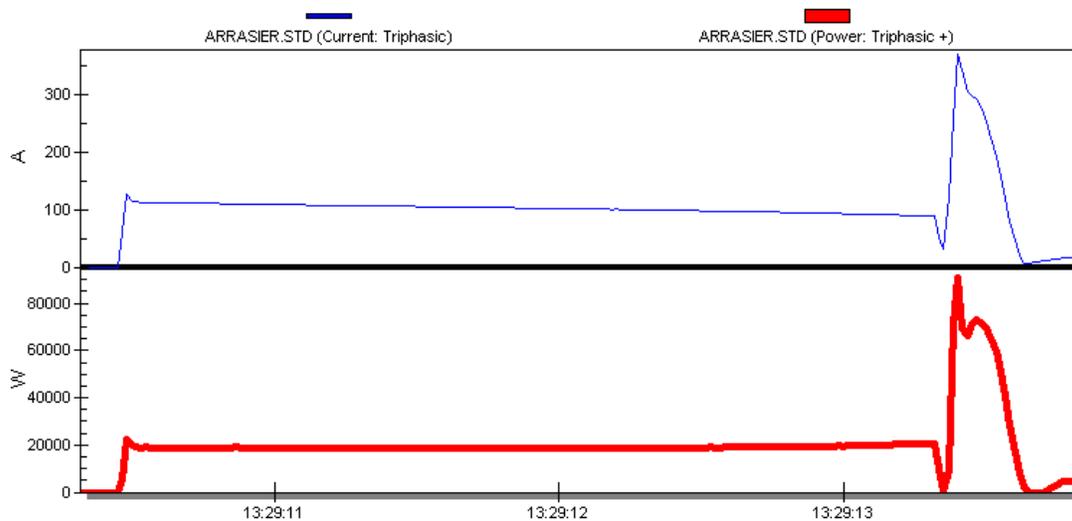


Figura 3.7. Corriente y potencia de Arranque de un motor de 40Hp con Sistema Estrella-Delta

Se puede notar claramente el cambio entre las dos configuraciones, si bien en los primeros segundos del arranque (configuración Estrella) se logra limitar la corriente, al entrar la configuración Delta se da un pico de corriente similar al de la conexión directa. El cambio entre la configuración estrella y delta desconecta los bobinados del motor de la red por un momento. Durante este tiempo el motor se encuentra bajo la influencia mecánica de la carga en rotación y durante el momento de la desconexión, la corriente sigue fluyendo por las barras del rotor debido a que el flujo magnético no ha cesado. Por lo tanto, hay un flujo residual en la superficie del rotor en movimiento, el cual corta los bobinados del estator, creando un pequeño voltaje cuya frecuencia depende de la velocidad de giro del rotor en ese momento. Este voltaje, en aplicaciones de carga con baja inercia o alta fricción, puede provocar una pérdida de velocidad significativa.

### ***3.3.3 Arrancador por Auto Transformador***

Este método de arranque utiliza las divisiones del bobinado secundario de un transformador para aplicar voltajes reducidos a los bobinados del motor. Presenta una gran desventaja: su gran costo de reparación. Usualmente las aplicaciones con este tipo de arranque vienen hechas a la medida, por lo que un daño en el auto transformador significa cambiar por completo el sistema de arranque.

### ***3.3.4 Arrancadores de Estado Sólido***

Estos dispositivos son la última tecnología en sistemas de arranque para motores. Utilizan elementos de electrónica de potencia, como tiristores para aplicar voltaje reducido al motor. Su mayor problema es el alto costo, por lo que se resultan usualmente relegados o inaccesibles en las pequeñas y medianas empresas. Lo curioso es que estos arrancadores tienen un alto valor

de “Retorno a la Inversión”, muchas veces de tan solo meses. Sin embargo pasan sin ser utilizados en la mayor parte de las aplicaciones industriales, incluso aquellas de gran tamaño.

### 3.4 Principios Físicos y Electrónicos.

En relación con el problema de alto consumo asociado con el arranque de motores, es importante destacar algunos principios de base.

Todo conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él. Este es el principio de funcionamiento de los motores eléctricos. En los motores de *Jaula de Ardilla*, las corrientes trifásicas aplicadas a los bobinados del motor crean un campo magnético giratorio, el cual hará girar al rotor de la máquina. La velocidad de rotación del campo giratorio no depende de la magnitud voltaje aplicado, sino de la frecuencia del mismo y de la cantidad de polos del motor. La siguiente ecuación comprueba lo antes mencionado. En ella  $f_e$  es la frecuencia del sistema, medida en Hertz,

$$v_{\text{rot}} = \frac{120f_e}{p} \quad (1.1)$$

Este campo magnético giratorio influye sobre las barras del rotor generando un voltaje en ellas. El voltaje es determinado por el producto cruz entre la velocidad y la magnitud del campo, multiplicado por el largo del conductor, en este caso la barra. Este voltaje inducido en el rotor produce un flujo de corriente en el rotor que atrasa al voltaje, debido a la característica inductiva del mismo. La corriente a su vez produce un campo magnético en el rotor, el cual interactúa con el campo magnético neto para producir un par o torque. El torque puede llamarse la "fuerza de torsión" aplicada al eje de rotación, y se define como el producto de la fuerza aplicada al objeto multiplicado por la distancia mínima entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del objeto. En el caso específico de los motores de inducción, se define por la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{ind}} = k B_r \times B_e \quad (1.2)$$

Donde  $B_r$  es el campo magnético inducido en el rotor y  $B_s$  el campo magnético del estator. La polaridad del campo magnético inducido del rotor es tal que repele al campo del estator que lo creó, y esta repulsión resulta en un torque sobre el rotor que lo impulsa a girar.

La velocidad de los motores de inducción no puede sobrepasar la velocidad del campo magnético giratorio o velocidad sincrónica. Si el rotor de este tipo de motores llegara a igualar esta velocidad sincrónica, las barras no estarían en movimiento con respecto al campo, por lo que no habría voltaje inducido en las barras del rotor. Sin este voltaje inducido no se podría crear el campo magnético en el rotor, por lo que no habría fuerza de repulsión y el motor se frenaría debido a las fuerzas de fricción o rozamiento. Esta diferencia entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad real del motor se llama “deslizamiento”.

Para comprender los problemas de arrancar el motor de inducción con conexión “Directa en Línea”, se puede recurrir a una aproximación del circuito equivalente del motor. Con este circuito se puede encontrar la ecuación para la corriente en función del deslizamiento y de las impedancias propias del motor. La siguiente figura muestra dicha aproximación.

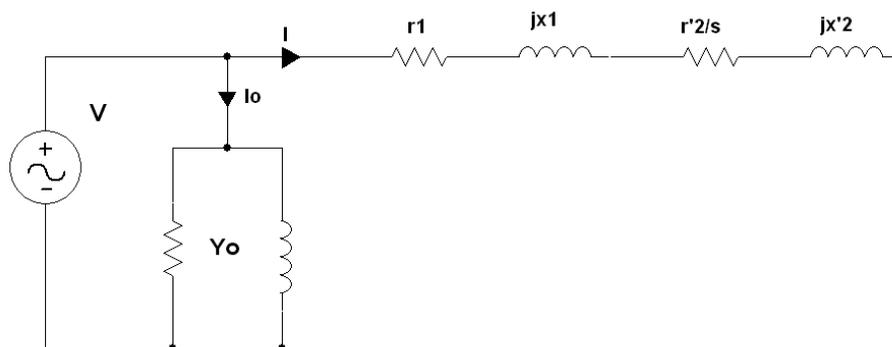


Figura 3.8. Aproximación del circuito equivalente del Motor de Inducción<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Fuente: Tomado de [4]

El circuito representa una de las fases del motor, donde:

$Y_0$  es la admitancia magnetizante del motor,

$r_1$  es la resistencia del devanado del estator,

$r'_2$  es la resistencia del devanado del rotor referida al estator,

$x_1$  es la reactancia de dispersión del devanado del estator,

$x'_2$  es la reactancia de dispersión del devanado del rotor a la frecuencia de alimentación

$s$  es el deslizamiento.

Del anterior circuito se modelan las siguientes ecuaciones que describen el funcionamiento teórico del motor de inducción.

Corriente:

$$I = \frac{V}{\sqrt{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}} \quad (1.3)$$

Factor de Potencia:

$$\cos \theta = \frac{r_1 + r'_2/s}{\sqrt{\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}} \quad (1.4)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{x_1 + x'_2}{r_1 + r'_2/s}\right)^2\right]}} \quad (1.5)$$

Salida de Potencia mecánica por fase:

$$P_{me} = I^2 r'_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (1.6)$$

Torque:

$$T = \frac{P_{me}}{\omega} = \frac{P_{me}}{\omega_s} \quad (1.7)$$

Analizando las ecuaciones anteriores se puede demostrar uno de los conceptos principales del proyecto. El hecho de que el torque del motor es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado. Partiendo de esta afirmación, nace la idea que aplicando gradualmente el voltaje aplicado al motor se pueden reducir los problemas relacionado con el arranque de estas máquinas eléctricas.

### Expresiones para el Voltaje de Salida del Controlador Trifásico de Onda Completa

Las expresiones para el cálculo del voltaje de fase (RMS) de salida dependen del rango de los ángulos de disparo de los Triacs. Las expresiones se desarrollan a continuación:

Para  $0 \leq \alpha < 60^\circ$ :

$$V_o = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{an}^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (1.8)$$

$$V_o = \sqrt{2}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2} \quad (1.9)$$

Para  $60 \leq \alpha < 90^\circ$ :

$$V_o = \sqrt{2}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{12} + \frac{\sin 2\alpha}{8} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

Para  $90 \leq \alpha < 150^\circ$ :

$$V_o = \sqrt{2}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (1.11)$$

Las expresiones anteriores indican que la magnitud del voltaje es función del ángulo de disparo de los Triacs. La ecuación de corriente (1.6) es la base del proyecto, ya que independientemente de las características del motor al cual se quiera controlar el arranque, la corriente es proporcional al voltaje aplicado.

## Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

## Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

### 4.1 Reconocimiento y definición del problema

La idea general del proyecto es buscar la manera de reducir la factura eléctrica en las pequeñas y medianas empresas que utilicen motores de inducción en sus procesos. Las plantas que utilizan motores de inducción como fuente de energía mecánica tienen un problema en común que eleva la factura eléctrica. Las altas corrientes de arranque de este tipo de motores hacen que el factor “Demanda” se incremente de manera innecesaria. Existen métodos de arranque para los motores de inducción pero la mayoría son muy complejos y costosos. Lo que se pretende con este proyecto es realizar un dispositivo económico, que sea asequible para las pequeñas y medianas empresas que les resulta difícil incorporar equipo costoso.

La gran oportunidad que se presenta con la realización del proyecto es que encontrando una solución que se apegue a las necesidades económicas de la industria, se pueden reducir los costos por electricidad simplemente controlando la corriente de arranque de los motores de la planta. Esto llevaría a un aumento en la productividad de la empresa. Además se presenta a la sociedad una imagen de una compañía que se preocupa por el medio ambiente.

Se llegó a la conclusión que como primera etapa del proyecto, se debe implementar un prototipo que emule el funcionamiento real del dispositivo, dejando para una segunda etapa la construcción del producto final.

## 4.2 Obtención y análisis de información

Para lograr obtener la información necesaria hubo que consultar bibliografía referente al tema de motores de inducción. Antes de realizar cualquier prueba o medición fue necesario investigar y estudiar a fondo el comportamiento de este tipo de motores. Además, se analizaron facturas de distintas plantas industriales para determinar los factores que se cobran y cuales tienen mayor impacto. El factor “Máxima Demanda” en promedio resultaba el 40% del costo total de la factura.

Una vez recopilada la información necesaria se procedió a hacer pruebas a un motor. La empresa cuenta con un motor pequeño de  $\frac{3}{4}$ Hp y un analizador de red de alimentación de la marca española Circuitor, llamado ARL.5. Este medidor toma los valores de corriente y voltaje de cada fase para así calcular las potencias y los consumos de la máquina que se desea analizar. Además tiene la capacidad del almacenar las mediciones en su memoria interna para luego ser desplegados y analizados en una computadora. El ARL.5 se diferencia de los multímetros convencionales debido a que puede tomar muestras de corriente cada medio ciclo de la red de alimentación, característica que resulta muy útil para analizar el arranque de los motores. Con esta herramienta se puede determinar con exactitud la máxima corriente y potencia de las máquinas analizadas. Fue necesario estudiar el manual de usuario del analizador para lograr medir correctamente las características del motor.

Luego de hacer pruebas al motor pequeño de la empresa y dominar el ARL.5, se realizaron visitas a plantas industriales donde se utilizan motores de inducción como fuente de energía mecánica. Se realizaron pruebas del arranque de motores en las siguientes plantas:

- **Planta de Reciclaje de Florida Bebidas:** la planta se localiza en San Joaquín de Flores, Heredia, cerca de la planta principal de FLORIDA ICE AND FARM. En esta planta se

midieron los tres motores de mayor tamaño. El de la prensa hidráulica es el más grande, de 75Hp. Este motor no posee método de arranque, se enciende 28 veces por hora con pico de corriente de más de 450A, o bien alcanza un valor máximo de 132KW. La figura 4.1 muestra la corriente de arranque para este motor. Esta figura es un ejemplo de los gráficos que puede desplegar el software del ARL.5.

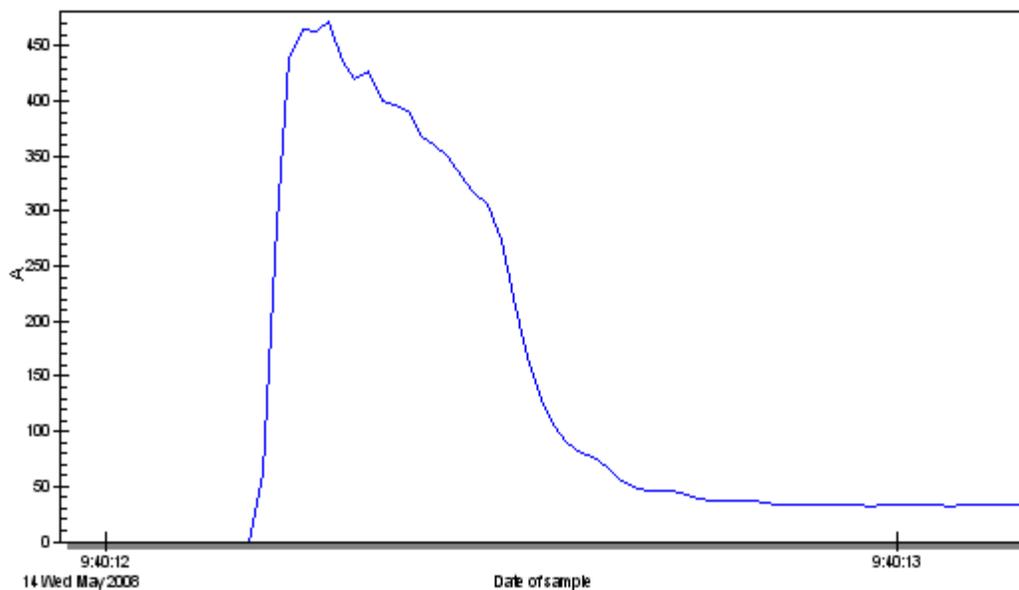


Figura 4.1. Corriente de Arranque Prensa Hidráulica, 75HP

Los otros dos motores medidos son de dos molinos de plástico. El primero, de 30Hp arranca con conexión directa a la línea y su valor máximo de corriente de arranque es de 250A. El segundo molino es la máquina más moderna, este ya incorpora un sistema de arranque Estrella-Delta, pero aun así, su pico de corriente supera los 310A.

- **Plásticos Artavia S.A.:** La Planta se ubica en Patarra, Desamparados, 100 metros Este de la Iglesia. Se dedica a la inyección de plásticos en varias máquinas especializadas. La planta labora con 4 máquinas de inyección las cuales permanecen encendidas las 24 horas, 6

días a la semana. Según el encargado de la planta, es necesario que las máquinas no se apaguen durante el día debido a los picos de corriente en el momento del arranque. Entre sus trabajos se encuentran algunos procesos de maquila, en donde la eficiencia y los costos de producción son muy importantes en un mercado que es altamente competitivo. Se tomaron mediciones de los motores principales de las cuatro máquinas inyectoras. Los tamaños de los motores analizados van desde los 15Hp, del motor más pequeño cuyo pico de arranque es de casi 250A, hasta el más grande de 25Hp. En este último la corriente alcanza los 400A. Esta planta es importante ya que la industria de plásticos en Costa Rica es muy grande, y en todas las plantas que se dedican a esta actividad se presentan los mismos problemas.

- **Nicoll-Durman:** Luego de analizar las ineficiencias existentes en una planta pequeña de inyección de plástico, intentamos contactar alguna de las compañías grandes de este sector. Logramos hablar con el Ing. Francisco Zúñiga, gerente de Mantenimiento de Nicoll-Durman, quien nos dejó tomar mediciones en varias máquinas de la planta. En la siguiente visita, supervisados por Alejandro Gutiérrez encargado de los molinos, se tomaron mediciones en cuatro motores: tres molinos de plástico y una mezcladora de químicos para obtener el plástico para las extrusoras.

De los cuatro motores analizados sólo el de la mezcladora presentaba método de reducción de corriente ya que esta es la máquina más nueva. Los otros tres motores arrancaban con conexión directa a la línea, siendo el molino de 100Hp el más grande de los tres. Este motor presentó una corriente máxima de 250A. No se tuvo oportunidad de medir la corriente de las máquinas inyectoras, debido a que la planta está en preparación para la obtención del ISO 14001.

### **4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

Luego de analizar los métodos convencionales de arranque de motores, se vio claro que la mejor solución era mediante la utilización de un microprocesador para implementar una rutina de inicio. La flexibilidad de programación de los microprocesadores, y su relativo bajo costo, hace de estos una herramienta muy útil para el control eléctrico.

Además, se analizaron diferentes elementos de electrónica de potencia con los que se pudiera controlar el voltaje aplicado al motor. El uso de tiristores resultó la mejor opción, considerando el costo y la gran gama de voltajes con los que trabajan. Además, su funcionamiento resultó muy sencillo debido a las bajas potencias necesarias para activarlo y su característica de desactivación por caída de corriente. Estas consideraciones se siguieron para que, en la medida de lo posible, la solución implementada resultara lo más sencilla y económica posible.

#### **4.4 Implementación de la solución**

Para implementar la solución lo primero que se hizo fue hacer un sondeo de los componentes de potencia disponibles en el mercado. Una vez más, los tiristores resultó ser la opción más viable y económica. Luego de decidirse por utilizar estos elementos, se hizo una investigación bibliográfica del funcionamiento y las características de los tiristores. Se encontró que el uso de Triacs (Tiristores Bidireccionales) es lo que se necesita en aplicaciones de voltaje alterno.

Una vez escogido el Triac como elemento principal del bloque de potencia, se procedió a diseñar la circuitería de control. Como se mencionó anteriormente, el uso de microprocesadores para controlar el disparo de los Triacs se presenta como la mejor opción. La facilidad de programación mediante un software compilador en lenguaje basado en C, simplifica las dificultades de sincronización de los pulsos de activación de los Triacs con la red de alimentación. Se hicieron pruebas con botones y LEDs simulando el comportamiento de los motores en tiempos que pueden ser vistos por el ojo humano. Por ejemplo, mediante los botones se simulaban los pulsos de sincronía, para después poder observar el LED que estaba simulando el pulso de disparo del Triac. Con esta dinámica, se logro llegar a una rutina que generara un pulso cada vez más cercano al punto de cruce por cero de la señal de voltaje de alimentación.

Luego de diseñar un módulo de pruebas con simulaciones, se procedió a alambrear los circuitos para poder trabajar con la red. Se usó el osciloscopio de rayos catódicos para lograr observar el comportamiento del circuito. Con este instrumento se calibró el detector de cruces por cero para lograr la sincronía con el voltaje de la red. También se utilizó el osciloscopio para ajustar la duración del tiempo de arranque en cada un de los casos solicitados por la empresa. Se lograron ajustar las rutinas para obtener arranque de 5, 10, 15 y 20 segundos. También Se

modificó el programa para lograr que el arranque iniciara desde el 40, 50 y 60% del total del voltaje de la red.

Cuando ya todos los tiempos y rutinas fueron ajustados, se procedió a diseñar los circuitos relacionados con los Triacs. Se diseñaron los circuitos de protección, los de polarización, el circuito de desfase. Luego de ajustar los tiempos de desfase de los disparos de los Triacs, se hicieron las pruebas y mediciones en el motor trifásico.

#### **4.5 Reevaluación y rediseño**

Una vez concluido todo el diseño del sistema y la implementación del mismo, se hicieron pruebas generales al circuito. Fue necesario hacer algunos cambios para lograr el funcionamiento esperado. Los cambios se dieron en el bloque de potencia, en los circuitos de protección y polarización de los Triacs. También fue necesario hacer ajustes en el programa de control para lograr que los tiempos y voltajes de inicio fueran los establecidos.

La próxima etapa del proyecto es hacer una evaluación de los resultados obtenidos para determinar si se debe seguir la investigación y trabajo para llegar a un dispositivo comercial.

**Capítulo 5:**  
**Descripción Detallada de la Solución**

## **Capítulo 5: Descripción Detallada de la Solución.**

### **5.1 Análisis de Soluciones y Selección Final**

Luego de consultar la bibliografía referente al tema y hacer una investigación en el mercado de los métodos electromecánicos de arranque de los motores de inducción, se llegó a la decisión de implementar un control de voltaje mediante dispositivos de electrónica de potencia. Se tomó la decisión de utilizar los “Triacs” como elemento principal debido a su gran variedad de voltajes aplicables y a su accesibilidad en el mercado local. Existe un buen potencial para que, con mejores recursos de financiamiento y tiempo, se pueda implementar una solución con mayor impacto, usando dispositivos más sofisticados ya disponibles. Este trabajo debe valorarse como un paso más en ese sentido.

Se hicieron varias entrevistas a Ingenieros en mantenimiento industrial, encargados de plantas en las que se utilizan motores de inducción. La mayoría coincidió en que los métodos actuales de arranque ya se encuentran obsoletos y que no existe en el mercado una solución económica que resuelva el problema de las altas corrientes en el momento del arranque. Es importante destacar que en Costa Rica (y Centro América) se penaliza el “pico de arranque” de manera severa, más que en países desarrollados.

También se quería llegar a una solución que fuera lo más sencilla posible para así lograr obtener un dispositivo que cumpliera con los objetivos propuestos y que resultara económicamente viable para pequeños empresarios, que son en definitiva, la clientela meta de este diseño. Se parte del criterio, corroborado entre personeros de las empresas visitadas, de que algunas de las soluciones de arranque disponibles en el mercado no se aplican por desconocimiento o por su alto costo de implementación.



## 5.2 Descripción del Hardware

En general, el sistema diseñado es un dispositivo que se conecta en serie con el motor, que es amigable con el usuario y que puede controlar el arranque de los motores de inducción de una manera congruente con los objetivos del trabajo. La siguiente figura representa el diagrama general del sistema, para luego explicar con detalle cada uno de los módulos.

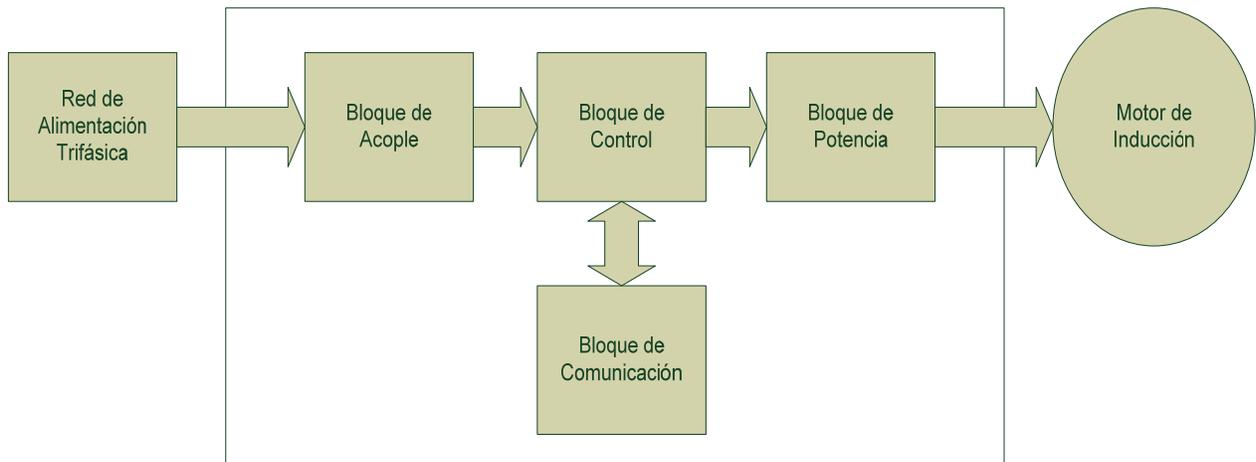


Figura 5.1. Diagrama General del Sistema

### 5.2.1 *Bloque de Acople*

El módulo de acople es el encargado de reducir la tensión de la línea para poder trabajar con los circuitos de control. Se utilizó un transformador 10/1 para lograr rebajar los 120VAC de la red a un valor de 12VAC. Luego de reducir la tensión se conectó un rectificador de onda completa y un regulador de tensión 7805. El regulador 7805 mantiene un voltaje constante de 5VDC con el que se polariza el microprocesador del bloque de control. La siguiente figura muestra el circuito de reducción de tensión del bloque de acople.

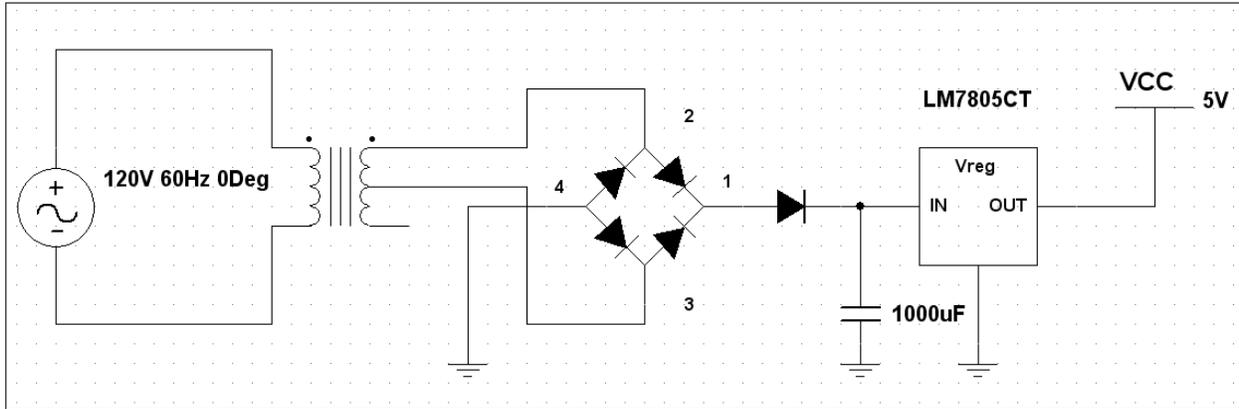


Figura 5.2. Circuito Reductor de Tensión

El bloque lo completa un detector de cruces por cero (Figura 5.3), el cual enviará pulsos al microcontrolador para lograr una sincronía con la red. El detector se realiza con un circuito comparador utilizando una configuración con amplificador LM311.

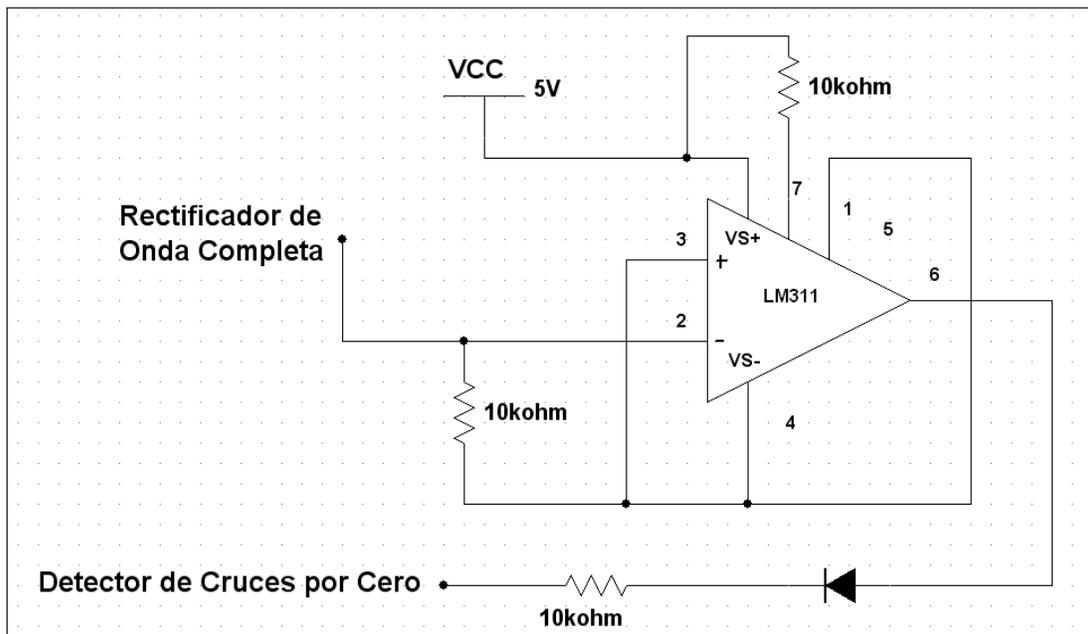


Figura 5.3. Circuito Detector de Cruces por Cero

Para la configuración como comparador se conecta la patilla positiva del amplificador a “tierra” (mediante una resistencia de  $10k\Omega$ ) y la patilla negativa a la salida del rectificador de onda completa. Con esta conexión se logra que cada vez que el voltaje de la red pase por cero haya un pulso en la salida del comparador. Estos pulsos son los que activarán las rutinas en el PIC para generar los disparos de los dispositivos de potencia encargados de controlar el voltaje aplicado al motor.

### ***5.2.2 Bloque de Comunicación***

La comunicación con el usuario es necesaria debido a que el dispositivo creado es un sistema flexible que se puede utilizar en cualquier motor de inducción. El objetivo es desarrollar un controlador de arranque programable y que el encargado del proceso pueda escoger el voltaje de inicio en la secuencia del arranque. La duración del arranque también es programable para que el usuario pueda utilizar el mismo dispositivo en diferentes aplicaciones.

La comunicación entre el usuario y el controlador se logra por medio de cuatro botones: un interruptor, dos LEDs y una pantalla LCD. La pantalla de cristal líquido es de 16 caracteres en dos líneas. Los botones se utilizan para moverse por el menú que aparece en la pantalla. Los cuatro botones son: arriba, abajo, introducir y cancelar. Además, una vez que el motor esté trabajando, el botón de cancelar funciona como un sistema de seguridad. Si el operario presiona este botón cuando el motor ya haya arrancado o este arrancando, el controlador dejará de enviar pulsos al Triac, deteniendo de inmediato el motor.

El diseño también incluye un interruptor para que una vez conectado el sistema, se pueda tomar la decisión de entrar directamente a la rutina de arranque del motor o, en su defecto, ingresar al menú de opciones. Se utilizaron dos LEDs, el verde para indicar que el dispositivo esta conectado, y el rojo para indicar cuando el motor se está encendiendo.



Figura 5.4. Imagen de la pantalla LCD<sup>7</sup>

### ***5.2.3 Bloque de control***

El bloque de control es el cerebro del sistema. Este es el encargado de controlar y hacer funcionar a los demás bloques. Las tareas que tiene a cargo son:

- Generar rutina para generar los pulsos de disparo de los Triacs
- Enviar los mensajes a la pantalla LCD
- Interpretar los comandos introducidos por el usuario mediante los botones

---

<sup>7</sup> Fuente: Tomado de [18]

Se utilizó un PIC para realizar las tareas de este bloque. El PIC es un microcontrolador que incorpora en un solo dispositivo las tres unidades básicas de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de Entrada/Salida. Este dispositivo es programable con la ayuda de un software compilador y el puerto serial de la computadora, procedimiento que se detalla adelante en la sección de Software. Se utilizó el PIC 18f4550 de Microchip® para realizar las secuencias y rutinas de control. Se escogió trabajar con este microcontrolador en particular ya que la empresa tenía a disposición dos de ellos. Además, debido a su gran versatilidad y cantidad de funciones es muy cómodo para la realización de prototipos.

El PIC cumplió con las características necesarias para la implementación del proyecto. Tiene los puertos de entrada/salida necesarios para controlar:

- la pantalla LCD, la cual ocupa 11 puertos de salida;
- los 4 botones, el interruptor y 2 LEDs , 7 puertos de entrada;
- el pulso de disparo de los Triacs, con un puerto de salida.



Figura 5.5. Imagen PIC 18f4550<sup>8</sup>

Otra de las características que cumple este PIC, y en general la mayoría de los microcontroladores, es que posee interrupciones externa e interna. Las interrupciones son llamadas a una secuencia en particular, causadas a su vez por eventos externos e internos. La interrupción externa es activada mediante los pulsos de salida del detector de cruces por cero. Es necesaria para la sincronización del dispositivo con la red de alimentación. La interrupción interna es provocada por el desbordamiento del registro interno del Timer0, encargado de definir el ancho del pulso de disparo de los Triacs. Este tema es ampliado en el capítulo del software.

El 18f4550 tiene la opción de utilizar un reloj interno de 8MHz, la cual simplifica el circuito ya que no se debe conectar a cristales u osciladores externos. Como el proyecto trabaja con una aplicación de baja frecuencia (60Hz) no se necesita de un reloj rápido para poder realizar las operaciones. El caso crítico o limitante para este dispositivo se da cuando se requiera arrancar un motor partiendo desde un 60% del voltaje, con una duración de 20 segundos. Para lograr este escenario se deben hacer muchas divisiones en un tiempo muy corto. En todos los casos los 8MHz de reloj interno es suficiente para realizar todas las tareas en el tiempo necesario.

#### ***5.2.4 Bloque de potencia***

Este es el bloque más importante, ya que en el se encuentran los dispositivos de electrónica de potencia, los cuales se encargan de controlar el voltaje que se aplicará al motor. El sistema se

---

<sup>8</sup>Fuente: Tomado de [19]

basa en el principio de control de fase mediante Triacs, Tiristor de Trío Bidireccional, para crear un controlador de voltaje de corriente alterna.

El Triac es un dispositivo semiconductor que controla el flujo de corriente en ambas direcciones, funcionando como interruptor controlado. Su nombre resume las características que lo identifican: “tri” indica que tiene tres terminales, T1, T2 y G. Además, “ac” significa que trabaja con corriente alterna y que puede conducir en cualquiera de los dos sentidos. Al ser un dispositivo bidireccional no es posible identificar sus terminales como ánodo y cátodo. El dispositivo conducirá en el sentido que le indique la polaridad del voltaje aplicado en sus terminales T1 y T2. Por ejemplo, si la terminal T2 es positiva con respecto a T1, el Triac conducirá en dicho sentido. La siguiente figura muestra el símbolo utilizado para identificar este dispositivo.

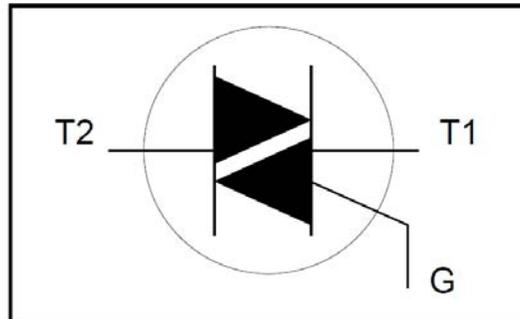


Figura 5.6. Símbolo para identificar el Triac

Se utilizó la técnica de *Corriente de Compuerta* para activar los Triacs de forma controlada. Esta consiste en aplicar un pulso de voltaje en la compuerta del dispositivo para inyectar una corriente entre la compuerta y la terminal T2. Este pulso de voltaje viene dado por el PIC del bloque de control, necesario para implementar el principio de control de fase. Dicho principio consiste en que el flujo de potencia es controlado modificando el ángulo de disparo del Triac

con respecto al cruce por cero de la señal de voltaje de la red de alimentación. El principio de control de fase se ilustra en la siguiente figura.

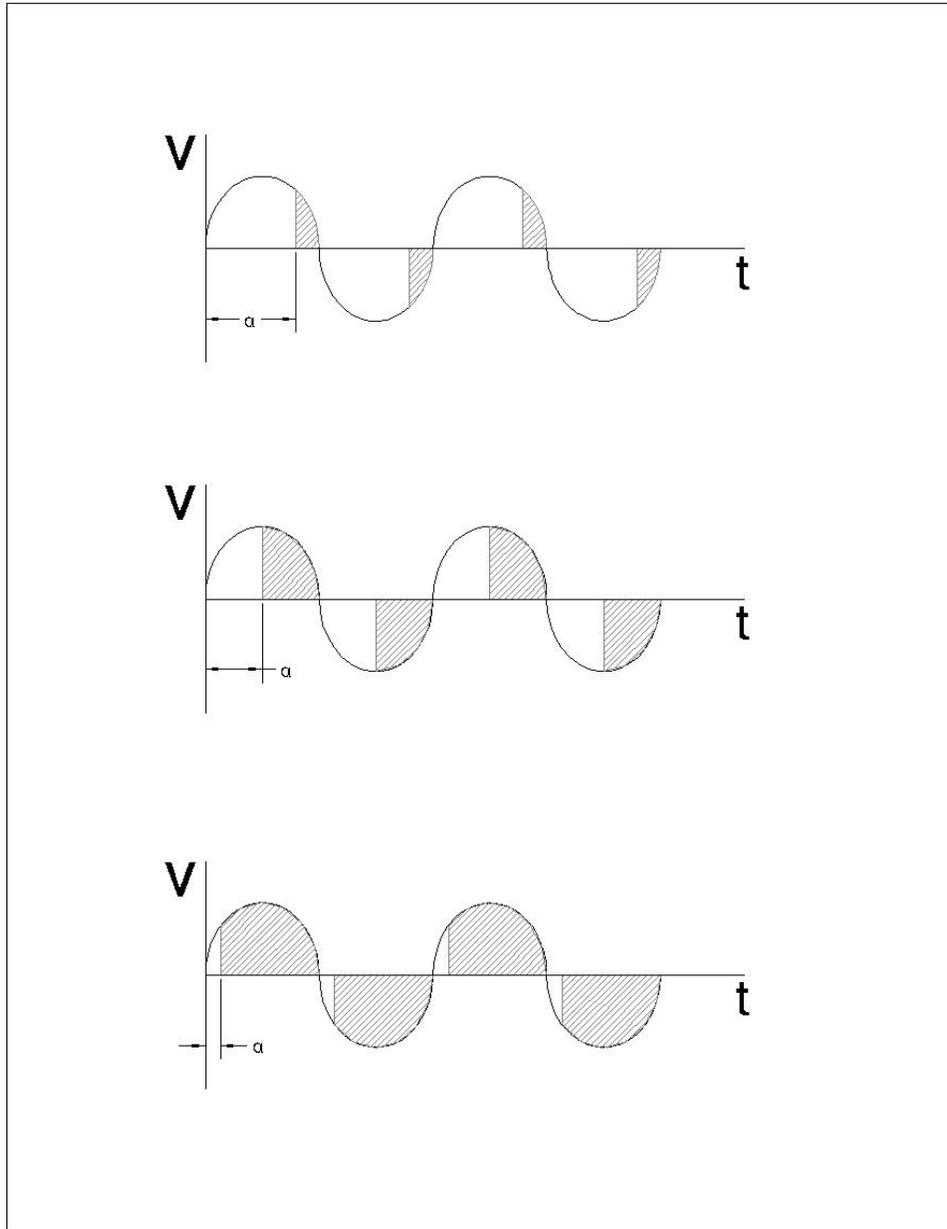


Figura 5.7. Principio de Control de Fase

Si el pulso de disparo es cercano al cruce por cero ( $\alpha \approx 0$ ), se aplicará toda la potencia disponible. En la figura se observa en la gráfica inferior. El área sombreada es el voltaje que se

aplica al motor. Si este ángulo  $\alpha$  aumenta, corriendo el pulso de activación hacia el final del semi-ciclo, se aplicará menos potencia que en el caso anterior. Este principio hace posible la manipulación del voltaje aplicado a las terminales del motor.

Otra característica importante que facilita el uso de los Triacs es la desactivación por caída de tensión. Un Triac que está en estado activo se desactiva una vez se haya reducido la corriente directa a un nivel por debajo de la corriente de mantenimiento ( $I_H$ ). Esto se logra con cada semiciclo, cuando cambia la polaridad del voltaje aplicado en las terminales. Por esta razón, se puede controlar el voltaje simplemente aplicando un pulso en el momento deseado para activar el Triac, sin tener que desactivarlo.

Se consultó la hoja de datos del Triac para poder dimensionar los componentes necesarios para la polarización del componente. Según el fabricante se necesita una corriente de entre 2.5 y 10mA en la compuerta para activar el Triac. Con estos valores se escogió una resistencia de compuerta de 2k $\Omega$ . Los cálculos necesarios para dimensionar los componentes de polarización están incluidos en los anexos. La siguiente figura muestra el circuito de polarización del Triac.

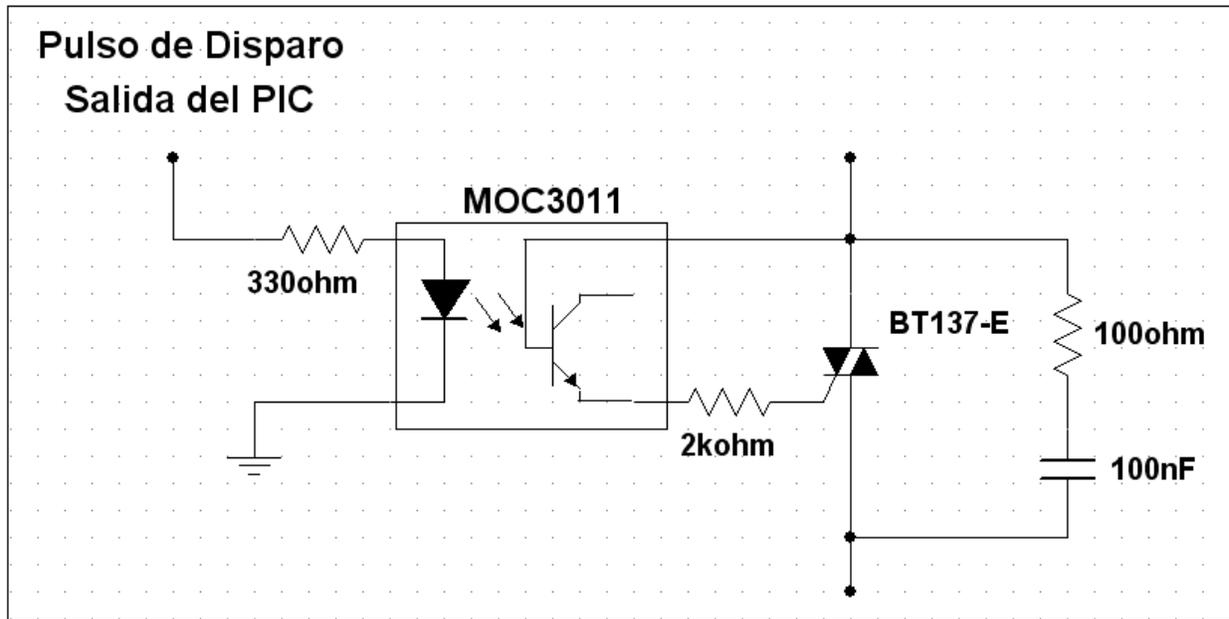


Figura 5.8. Circuito de excitación del TRIAC

Además de la polarización del Triac, es necesario aislar los componentes de potencia de los componentes de control. Para esto se utilizaron los optoacopladores MOC3011. Los acopladores evitan que los circuitos de control se dañen con las fluctuaciones de voltaje producidas por el motor.

Debido a que la carga que se desea conectar es un motor trifásico, es necesario implementar circuitos de desfase para generar los disparos de cada una de las fases. Cada fase está separada de la anterior y de la siguiente por  $120^\circ$ . Para realizar los desfases, se utilizaron temporizadores 74123, en funcionamiento monoestable. Mediante la variación de la red RC del monoestable se obtuvo el retraso de aproximadamente 5.5ms, correspondientes al desfase de  $120^\circ$  a una frecuencia de 60Hz. Los cálculos para obtener los valores de las resistencias y los capacitores aparecen en los apéndices.

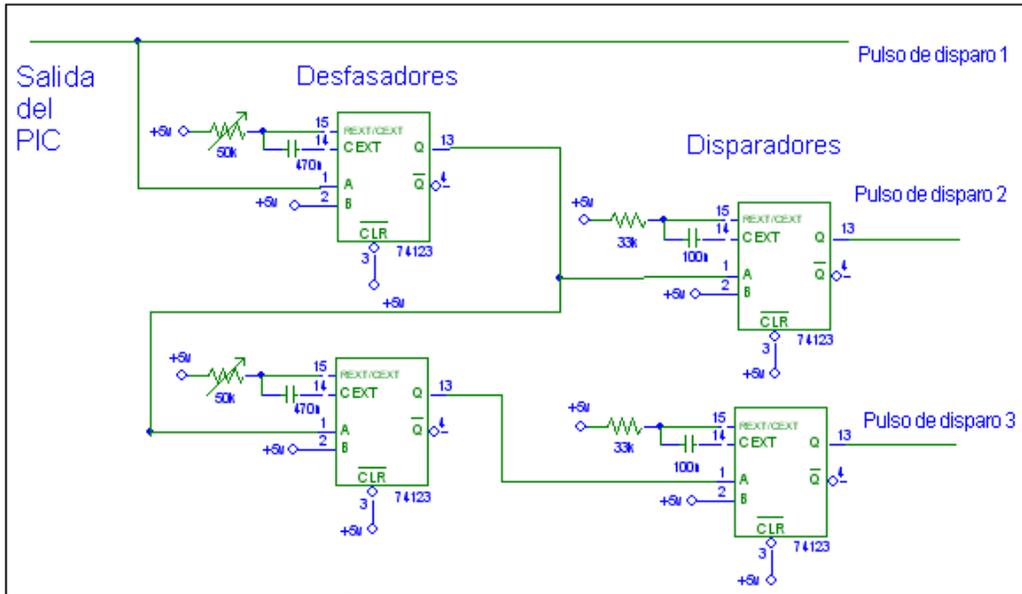


Figura 5.9. Circuitos para el desfase de los pulsos de disparo de los Triacs

La siguiente figura muestra la conexión de los Triacs a cada una de los bobinados del estator del motor. El motor se conectó en delta para que la tensión nominal aplicada fuera de 120V.

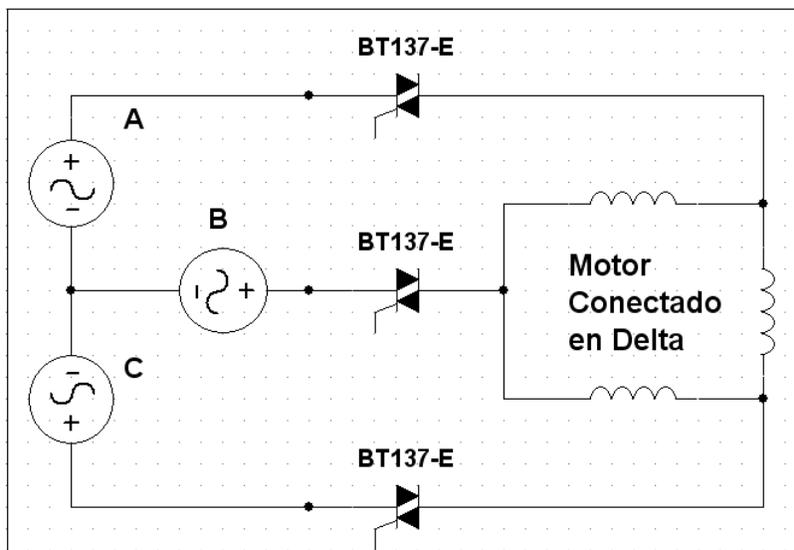


Figura 5.10. Conexión Trifásica de los Triacs

### *Protección de Dispositivos y Circuitos*

Los Triacs son elementos sensibles y también deben ser protegidos. El Triac no se puede dañar por altas tensiones, ya que alcanzará el voltaje de ruptura e iniciará la conducción transfiriendo la alta tensión a la carga. Sin embargo es necesaria la protección contra transitorios de voltaje que puedan provocar arranques indeseados del motor. Para proteger el sistema contra los cambios bruscos de voltaje se utilizó una red Snubber. Esta red es una configuración RC en paralelo, con el capacitor de 100nF y la resistencia de 100Ω.

Los Triacs tienen la capacidad de dispersar la conducción de la corriente a través de las uniones. Es necesario proteger el dispositivo con una inductancia que limite el cambio de corriente, para que no haya calentamientos debidos a una alta densidad de corriente. Como el motor es una carga inductiva, la propia inductancia interna es suficiente para proteger el dispositivo contra los picos de corriente.

Otro elemento importante para la protección de los Triacs, y más aún, para el correcto funcionamiento del sistema son los disipadores de calor. Se utilizaron disipadores de aluminio laminado para dispersar el calor producido por pérdidas en el Triac.

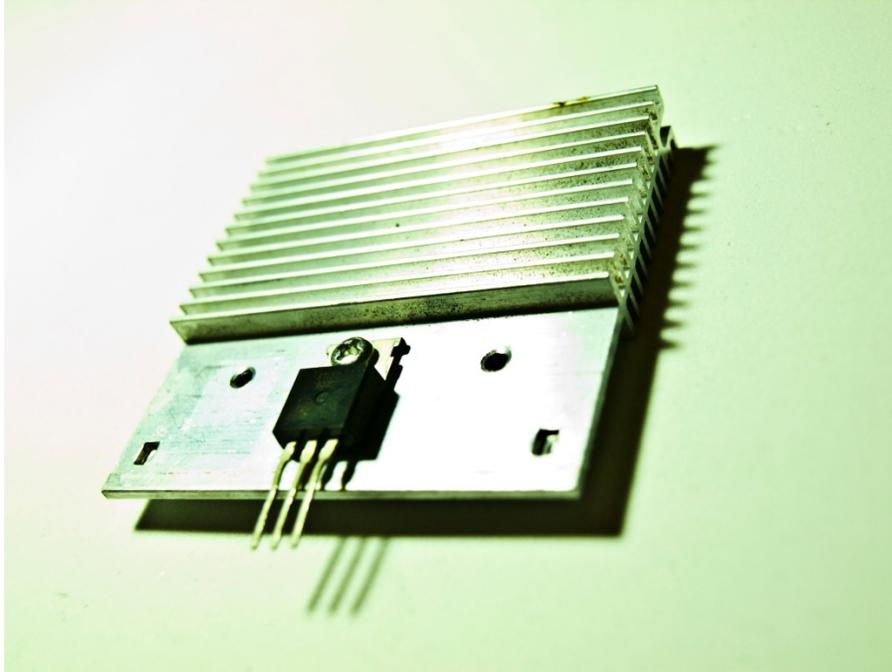


Figura 5.11. Disipadores de calor utilizados

### *Lista de componentes utilizados*

La siguiente tabla muestra la lista de los componentes utilizados en la implementación del Proyecto.

Tabla 2. Lista de componentes utilizados en la implementación del sistema

<b>Componente</b>	<b>Código</b>	<b>Cantidad</b>
Amplificador Comparador	LM311	1
Condensador 1000 $\mu$ F	108K 35V	1
Condensador 100nF	104K 250V	3
Condensador 10nF	103K 250V	2
Condensador 470nF	2A474J	2
Diodo	1n4003	2
Disipadores de Calor	DC12	3
Interruptor	SW	1
LED	LED	2
Microcontrolador	PIC 18f4550	1
Optoacoplador	MOC3011	3
Potenciómetro 1k $\Omega$	B1K	1
Potenciómetro 50k $\Omega$	B50K	2
Puente de Diodos	KBL06	1
Pulsador de Botón	PB	4
Regulador de Voltaje	L7805CV	1
Resistencia 100 $\Omega$ 5W	R100 $\Omega$	3
Resistencia 10k $\Omega$ ¼W	R10k $\Omega$	3
Resistencia 1k $\Omega$ ¼W	R1k $\Omega$	4
Resistencia 2k $\Omega$ ¼W	R2k $\Omega$	3
Resistencia 330 $\Omega$ ¼W	R330 $\Omega$	5
Resistencia 5k $\Omega$ ¼W	R5k $\Omega$	2
Temporizador	74LS123	2
Transformador 10/1	TF10/1	1
Triac	BT137 600E	3

### **5.3 Descripción del software**

El software en este proyecto cumple una función muy importante. Se puede dividir en tres secciones principales. En primer lugar es necesaria la programación del microcontrolador para que trabaje de la manera que se necesita. La segunda parte es la programación de una máquina de estados para controlar el sistema y la comunicación con el usuario. La tercera es la secuencia para generar los pulsos de disparo de los Triacs de manera que se de una ampliación gradual en el voltaje aplicado al motor.

Se utilizó el compilador PIC-C para trabajar todo el software. PIC-C es una excelente herramienta para desarrollar programas de bajo nivel en lenguaje de alto nivel, ya que es basado en lenguaje ANSI C. Este compilador está diseñado específicamente para satisfacer las necesidades únicas de los microcontroladores. Esto permite a los desarrolladores diseñar rápidamente aplicaciones de software de una forma más sencilla. Una vez desarrollado el software se procede a compilarlo y el PIC-C creará un archivo .hex. Este archivo es introducido al microcontrolador mediante un dispositivo programador, el cual utiliza el puerto serial de la computadora para comunicarse. A continuación se explicarán más detalladamente cada una de las secciones del software.

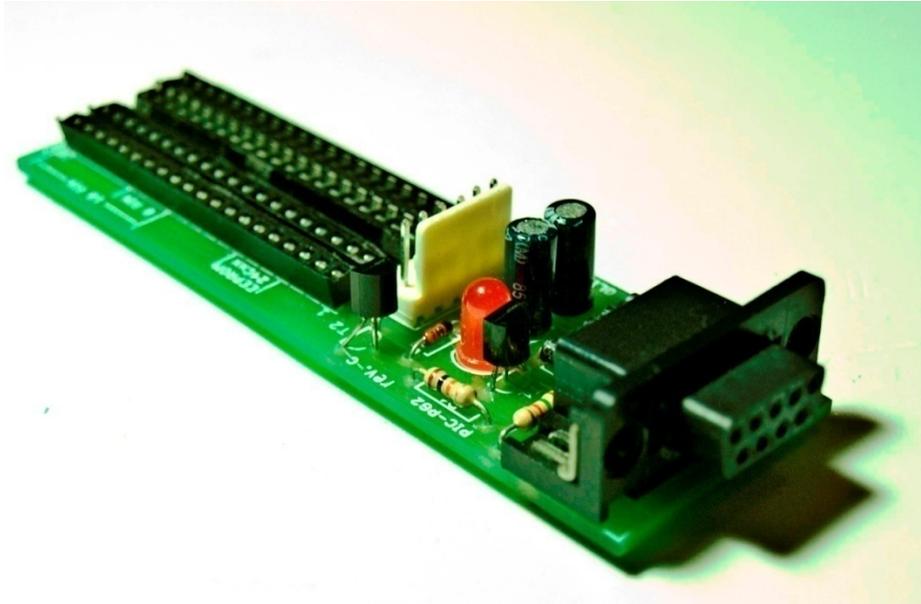


Figura 5.12. Programador de PIC

### 5.3.1. Programación del 18f4550:

Como se ha dicho anteriormente, uno de los requerimientos del proyecto es que el sistema sea lo más económico y sencillo posible. Por esta razón se programó el PIC 18f4550 de manera tal que pueda ser reemplazado por otro microcontrolador más económico. La primera característica que se programó fue el reloj interno. Muy importante a la hora de ajustar los tiempos de arranque y los voltajes de inicio. Se programó una velocidad de 8MHz, debido a que es el valor estándar en la mayoría de los microcontroladores.

Por otra parte se habilitó el uso de las interrupciones, tanto externa como interna. La interrupción externa es necesaria para sincronizar el PIC con la red de alimentación. Los pulsos del detector de cruces por cero son aplicados a la patilla RBO del 18f4550. Cada vez que llega un pulso al microcontrolador se activará la rutina de arranque, que se explicará más adelante. La interrupción interna se usó para determinar el largo del pulso de activación del Triac. Una vez que se activa la salida del microprocesador (inicio del pulso) se habilita la interrupción.

El reloj interno del PIC empieza a hacer un conteo desde un valor pre-cargado en un registro de 8 bits. El valor que se precarga es tal que el pulso tiene una duración de 200 $\mu$ S, suficiente para activar el Triac. Cuando el registro se desborda activa la secuencia que está programada, la cual desactiva la salida del micro (fin del pulso), y con esto se logra mantener en alto la señal para activar los Triacs el tiempo que sea necesario (valor obtenido de la hoja de datos del fabricante).

### **5.3.2. Control del Sistema:**

El sistema se controla por medio de una máquina de estados micro-programada. La máquina de estados es una secuencia que se sigue cada vez que el dispositivo se conecta, es decir cada vez que se activa el interruptor para encender el motor. La figura 5.10 muestra el diagrama de flujo del sistema en general. Lo primero que hace es desplegar la página de la empresa para la que se desarrolló el dispositivo ([www.enertec.cr](http://www.enertec.cr)). El manejo del LCD se hizo por medio del código propio del compilador. Esta es otra de las ventajas del PIC-C.

El programa trae ciertas rutinas para manejo de dispositivos. Uno de estos códigos es el encargado de manejar el LCD.

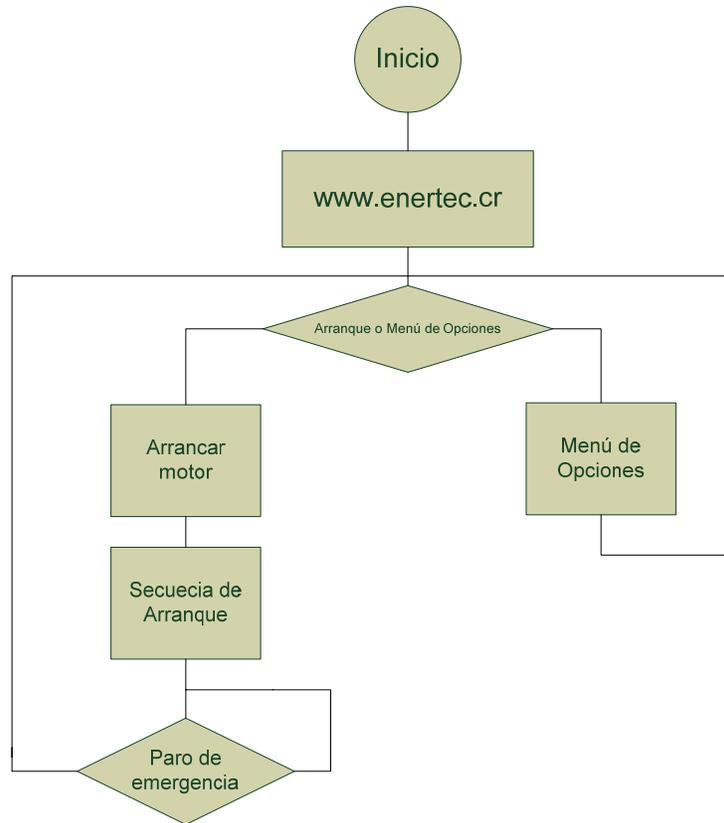


Figura 5.13. Diagrama de Flujo del Sistema

El siguiente paso de la máquina de estados es “preguntar” por el interruptor que le indica al sistema si debe proceder con el arranque del motor o si ingresar al menú de opciones. El menú de opciones contiene una serie de estados en los que el usuario puede escoger los parámetros del arranque. Las opciones que tiene se presentan en la figura 5.11. Entre lo que se puede programar está el voltaje de inicio de la secuencia de arranque.

Se ofrece la opción de arrancar el motor desde el 40, 50 o 60% del voltaje total. Se tomó la decisión de que el voltaje de inicio fuera programable para brindar al dispositivo una mayor versatilidad, por lo que se amplían sus aplicaciones potenciales en la industria local. Por ejemplo, si el motor al que se va a conectar el sistema que inicia sin carga, el dispositivo se

puede programar para que la secuencia arranque desde el 40%. Por el contrario si se requiere cierto torque para vencer una mayor inercia en el arranque se puede programar para que la rutina empiece desde el 60% del voltaje total.

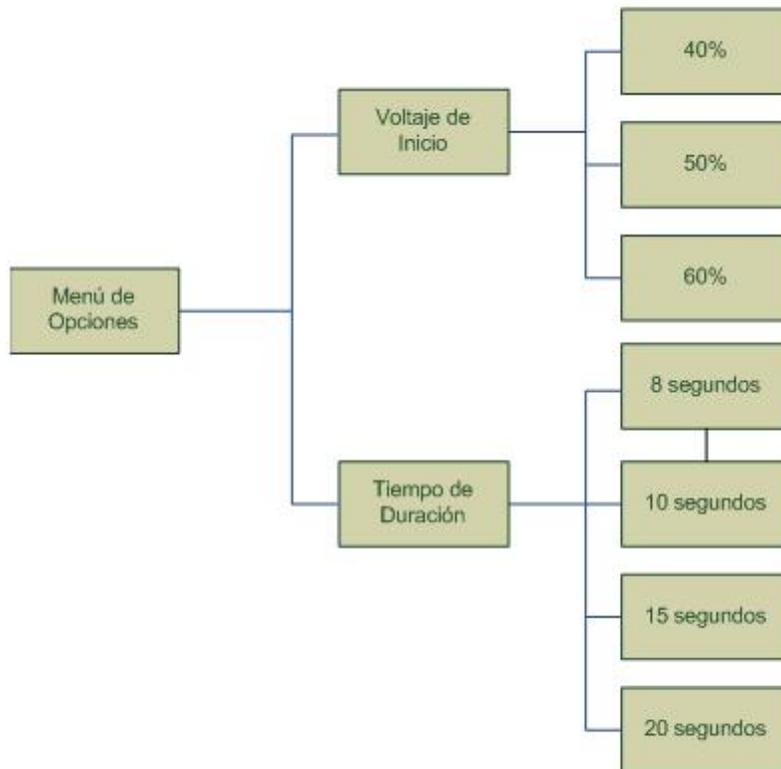


Figura 5.14. Menú de Opciones

El tiempo de duración del arranque también es programable. Existen muchas aplicaciones para las que se ocupan diferentes tiempos de arranque. Por ejemplo, si se necesita llevar una carga de alta inercia a cierta velocidad de trabajo, se puede poner más tiempo, así se protegerá el sistema de la gran corriente que puede exigir el motor de la red.

Si el interruptor está en el estado para arrancar el motor, el dispositivo habilita la interrupción externa, señal que proviene del detector de cruces por cero, como se mencionó anteriormente. Una vez habilitada la interrupción externa el sistema entra en un ciclo, en espera de la señal de paro de emergencia. Si encuentra la señal de emergencia, deshabilita la interrupción externa y despliega en el LCD la pregunta alternativa: Se desea arrancar de nuevo el motor o se prefiere ingresar al menú de opciones.

### 5.3.3. Secuencia para generar los disparos:

Como se mencionó en el párrafo anterior, cuando la máquina de estados toma la decisión de iniciar la secuencia de arranque, se habilita la interrupción externa. Cada vez que el detector de cruces por cero envíe un pulso al PIC, se ingresará a la sección del programa donde se encuentra la secuencia de arranque. La secuencia se adjunta a continuación:

```
void EXT_isr(){  
  
    delay_us(j);  
    output_bit(PIN_B7,1);  
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,0,1);  
    enable_interrupts(INT_TIMER2);  
    m=m+1;  
    if(m==n){  
        m=0;  
        j=j-div;  
        if(j<=150){  
            j=150;  
        }  
    }  
}
```

La secuencia utiliza la función *delay\_us()* del PIC-C para crear retardos de tiempo. La función crea código para generar un retardo de la longitud especificada. El tiempo está dado en microsegundos, por lo que es sencillo determinar el porcentaje del voltaje al cual se desea

iniciar. Luego de cumplirse el tiempo especificado de espera, se enciende la salida del PIC B7 y habilita la interrupción interna para que ésta desactive la salida al cabo del tiempo pre-cargado en su registro.

El tiempo de duración del arranque es controlado por tres variables y un contador. Las variables son: j, n y div; m es el contador. Cuando se escogen las opciones de tiempo de duración y voltaje de inicio en el menú, se cambian y almacenan los valores de estas variables. La variable “j” se utiliza para especificar el voltaje de inicio de la rutina de arranque. Los valores están dados en microsegundos, por lo que para el arranque desde el 40% “j” tendrá el valor de 4980. Si medio ciclo dura  $8300\mu\text{s}$ , para iniciar con el 40% del voltaje es necesario activar el disparo  $4980\mu\text{s}$  después del cruce por cero. De forma similar se calculan los valores para el inicio a un 50% y a un 60%.

La variable “div” depende de “j”, y representa el tiempo que se le debe ir restando a “j” para lograr obtener una rutina de 1 segundo. Para obtener el valor se divide el tiempo del retardo (j) entre 120. Por estar trabajando a 60Hz y con un detector de cruces por cero para activar la secuencia de arranque, se harán 120 restas por segundo. La variable “n” especifica la cantidad de segundos que va a durar el arranque, tomando valores de 8, 10, 15 y 20. Los cálculos para obtener estas variables aparecen en los apéndices. Con este algoritmo se logra generar los disparos para proporcionar un arranque suave para el motor.

## Capítulo 6:

### Análisis de Resultados

## Capítulo 6: Análisis de Resultados

En la siguiente figura se muestra la implementación del circuito completo. Por ser un prototipo fue realizado en ProtoBoard, ya que esto facilita el cambio del diseño en la marcha, y se pueden presentar los resultados de manera sencilla.

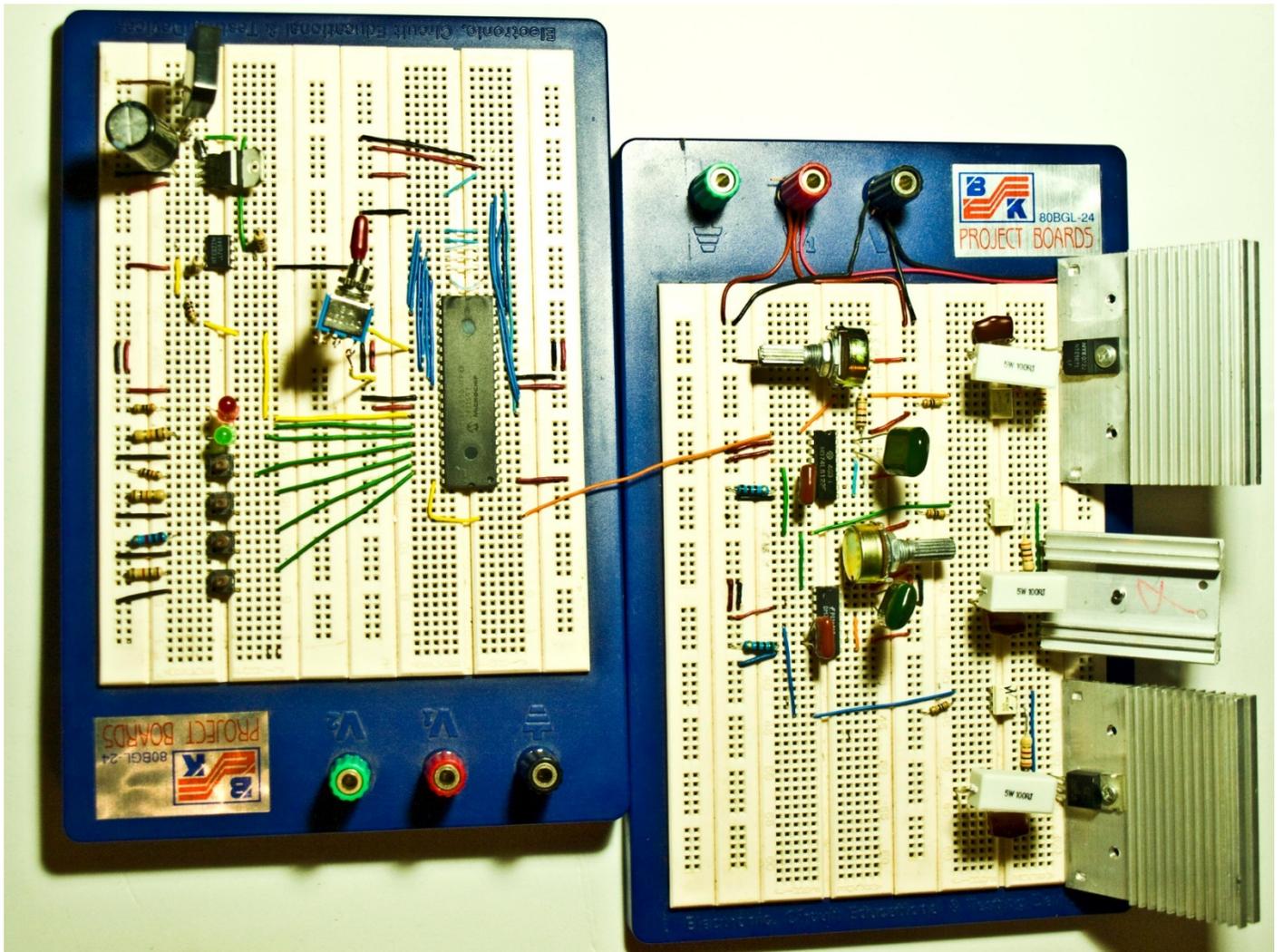
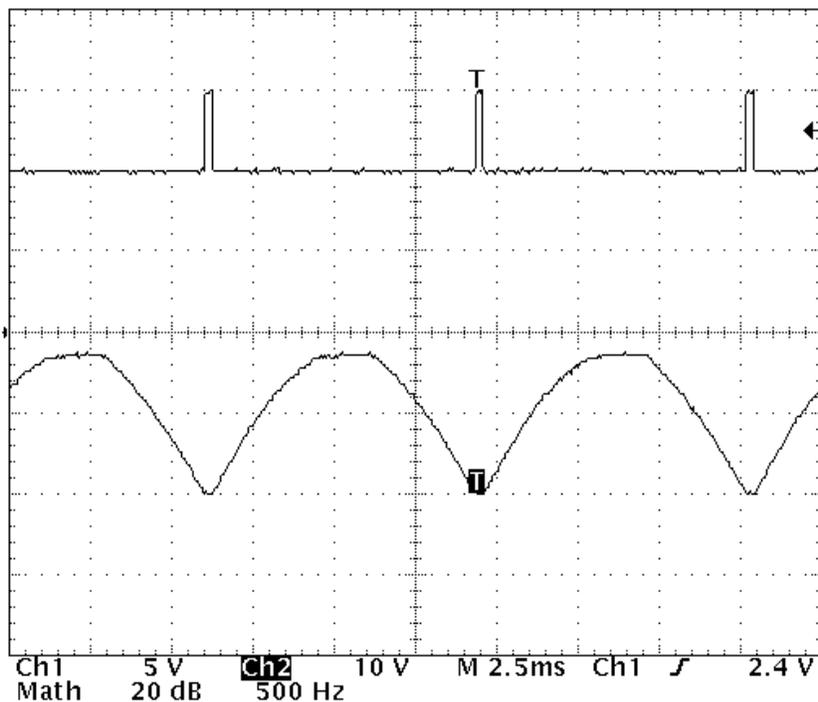


Figura 6.1. Circuito completo en ProtoBoard

Se utilizaron dos instrumentos para medir y documentar los resultados obtenidos en el proyecto: el osciloscopio de rayos catódicos y el AR5.L. A continuación se presentan los resultados obtenidos y su análisis correspondiente.

El detector de cruces por cero es el encargado de sincronizar el sistema con la red de alimentación. La figura 6.2 muestra las graficas de entrada y salida del detector. Como se puede ver, la entrada es la onda de voltaje luego del rectificador de onda completa. Las escalas se muestran en el cuadro de al lado. Este bloque es muy importante ya que los pulsos de salida activan la interrupción externa del PIC. La interrupción externa es la encargada de controlar la rutina de arranque.



Escala:  
Canal 1: 5V/ división  
Canal 2: 10V/división  
Eje X: 2.4 ms / división

Figura 6.2. Gráficas del Detector de Cruces por Cero

La figura 6.3 muestra el tiempo exacto entre cada uno de los pulsos. De la teoría se sabe que medio ciclo en una distribución de 60Hz dura 8.3ms.

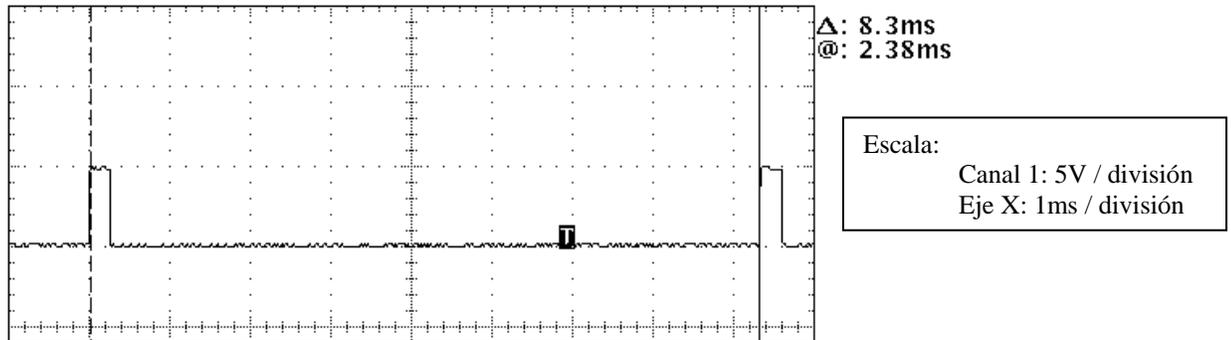


Figura 6.3. Duración entre los pulsos de salida del detector de cruces por cero

La rutina de arranque consiste en generar disparos para los Triacs tal que se pueda aplicar gradualmente el voltaje al motor. El principio de control de fase, explicado en el capítulo anterior es la base de la secuencia de arranque. Si se activa el Triac justo en la mitad del semiciclo se aplicará al motor la mitad del voltaje. La figura 6.4 ilustra la secuencia de arranque, y como los pulsos de disparo se van desplazando desde un punto de inicio (aplicando 40% del voltaje), hasta el punto final donde se logra aplicar la onda de voltaje completa.

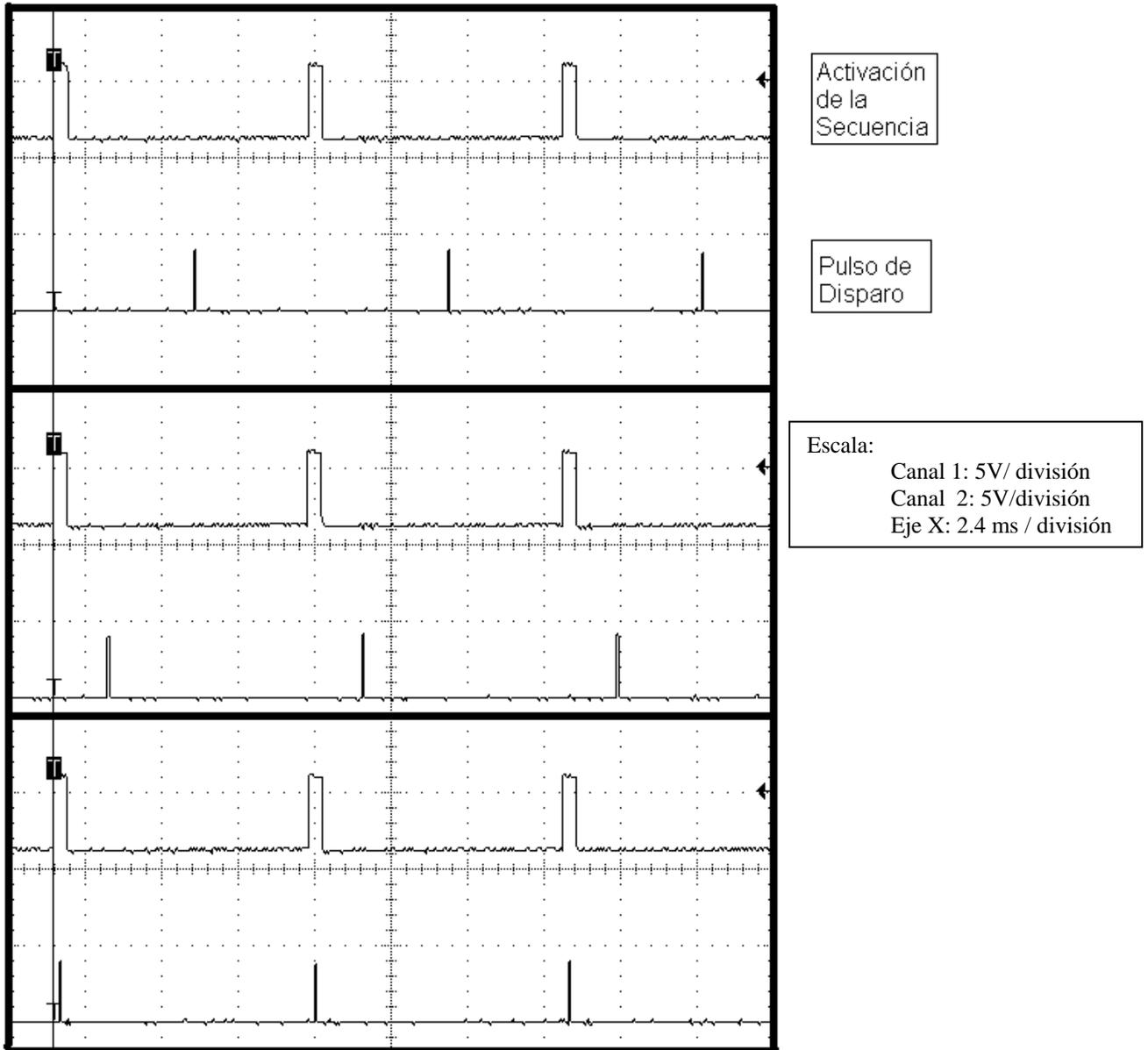


Figura 6.4. Secuencia de disparos del Triac para el arranque suave

Una vez ajustados que se ajustó el inicio de la secuencia de pulsos de disparo para cada uno de los casos, y la duración de los tiempos, se procedió a ajustar los desfases de los pulsos de disparo. Como se trabajó con una carga trifásica, fue necesario generar tres pulsos separados para disparar el Triac de cada una de las fases. Para esto se tomó como referencia el pulso de salida del PIC. Se sabe que en un sistema trifásico con una frecuencia de 60Hz, las ondas de

voltaje se encuentran desfasadas  $120^\circ$  una de otra, equivalentes en el tiempo a 5.5ms. Se utilizó una cadena de temporizadores 74123 funcionando como monoestables para lograr generar el desfase. La figura 6.5 muestra la el desfase entre dos de los pulsos de activación. Se utilizó la herramienta “Cursor” del osciloscopio, la cual utiliza dos barras verticales para medir una diferencia de tiempo, para ajustar cada uno de los desfases. La diferencia se puede observar en la parte superior derecha de la gráfica. Se hizo una cadena en la que el pulso de salida del PIC es el disparo del Triac de la primera fase, el segundo disparo se ajusto para q se activara 5.5ms después, y que esta a su vez active el desfase para el tercer pulso.

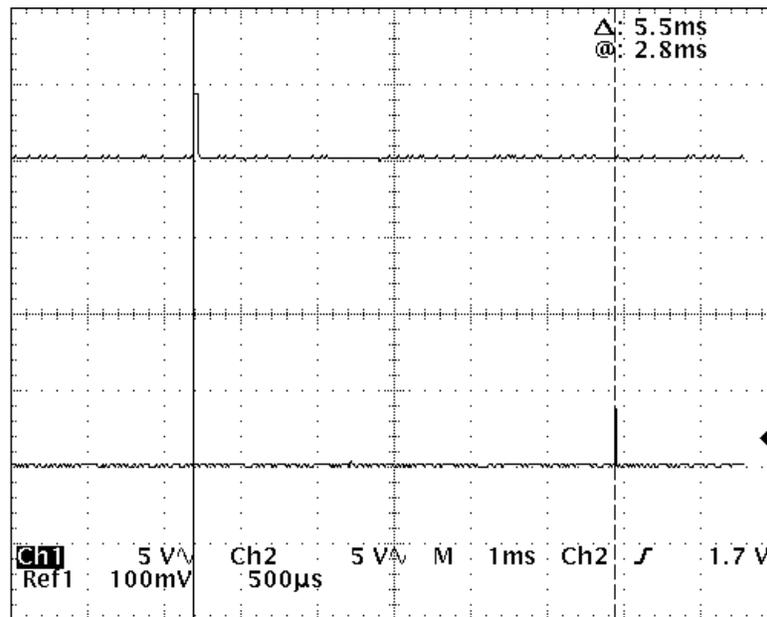


Figura 6.5. Desfase entre los pulsos de activación de dos Triacs

Luego de tener el circuito listo para ser conectado al motor, se procedió a hacer las mediciones previas para lograr determinar la diferencia entre arrancar el motor conectándolo directamente a la línea y arrancarlo suavemente con el sistema conectado. Las pruebas se hicieron en el motor trifásico de 100W del Laboratorio de Máquinas Eléctricas del ITCR. Se utilizó el AR5-L

para hacer las mediciones de la corriente y el voltaje de arranque. El protocolo seguido para obtener la medición se adjunta en los apéndices.

En primer lugar se midió el voltaje y al corriente de arranque del motor conectándolo directamente a la red trifásica. Las figuras 6.6 y 6.7 muestran los resultados obtenidos. Se puede notar que el voltaje es cero en un instante y luego alcanza los 120V rápidamente. La gráfica 6.7 ilustra la magnitud de la corriente de arranque, donde se alcanza un valor máximo de mas de 6A.

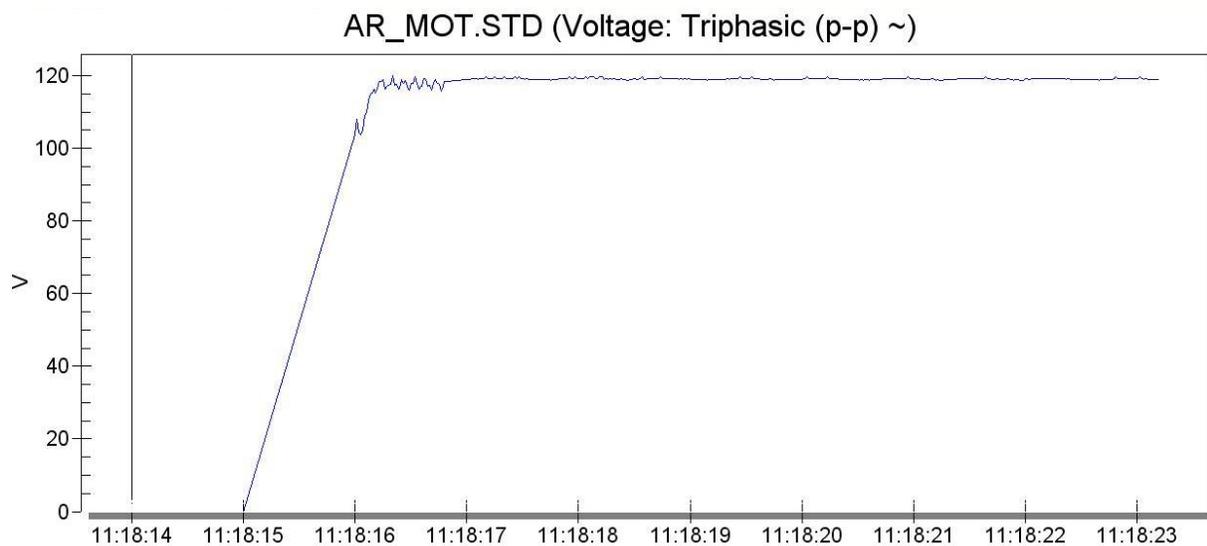


Figura 6.6. Voltaje de arranque para el motor de prueba

El comportamiento del motor de prueba es similar a los motores de las plantas industriales que se visitaron antes de realizar el diseño. Una corriente de arranque muy alta en comparación con la corriente nominal. Es claro que el ser este un motor pequeño los resultados serán menos drásticos, pero igual sirven para ilustrar el problema.

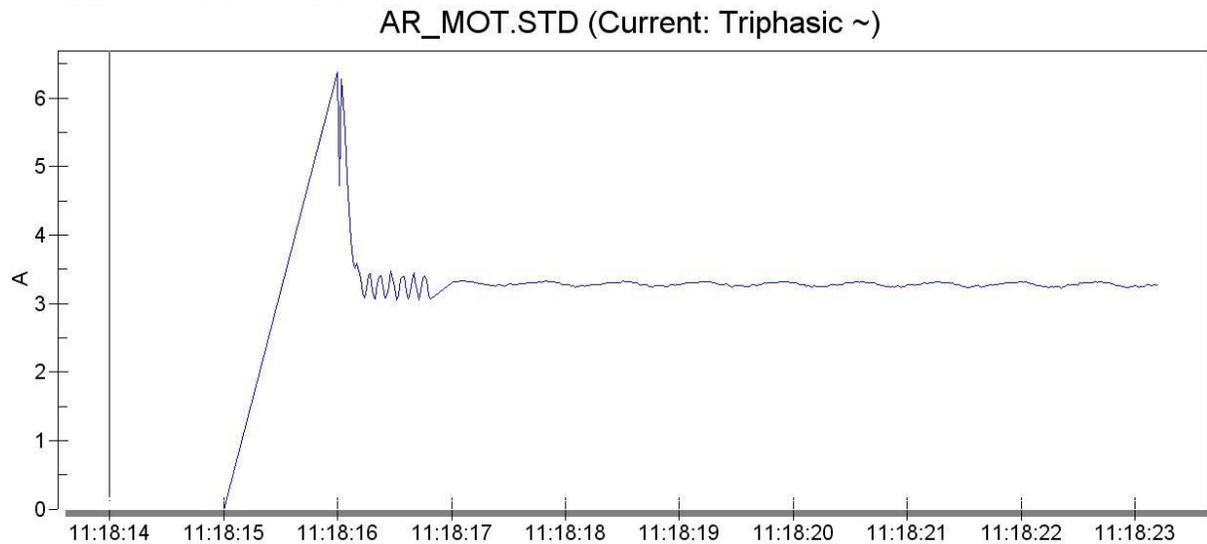


Figura 6.7. Corriente de arranque para el motor de prueba

Después de tomar estas mediciones se conectó el sistema desarrollado en línea con el motor y se procedió a tomar la misma medición. Se programó el arrancador para que iniciara desde el 40% del voltaje y con una duración de 8 segundos. Las figuras 6.8 y 6.9 muestran los resultados obtenidos. En la gráfica de voltaje se aprecia como la secuencia de arranque inicia desde 45V aproximadamente, y va creciendo paulatinamente hasta alcanzar los 120V. Se puede ver claramente la diferencia con la medición hecha sin el arrancador conectado, sin embargo la gráfica de corriente es la más reveladora. La figura 6.9 muestra como la corriente aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor nominal de aproximadamente 3.5A.

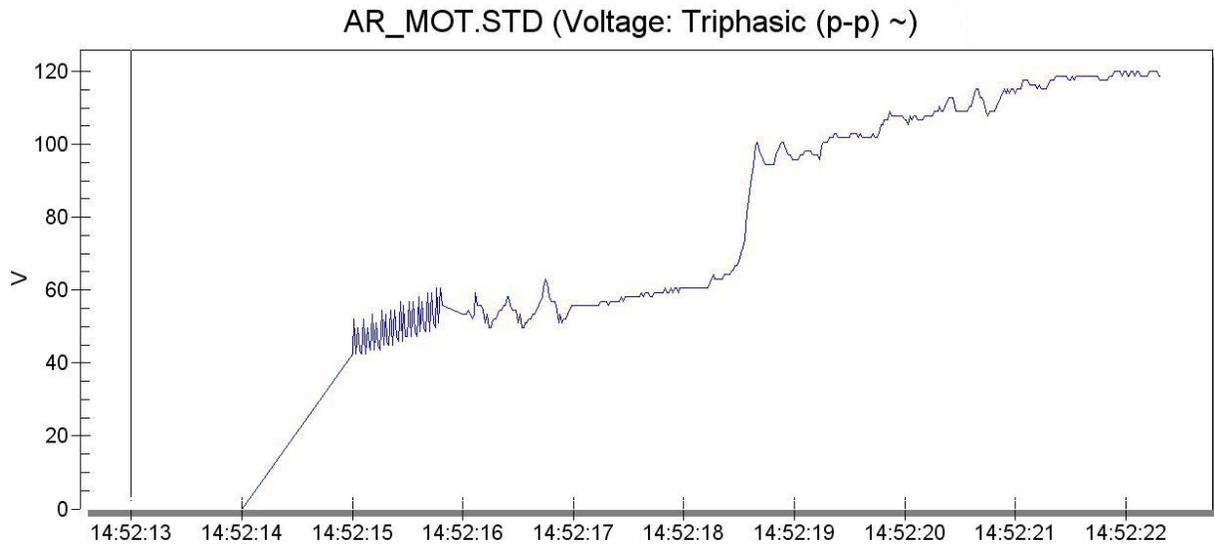


Figura 6.8. Voltaje de arranque del motor de prueba con el sistema conectado

Las figuras 6.8 y 6.9 revelan que se puede eliminar el pico de corriente en el arranque de motor, cuando este se conecta directamente a la red, aplicando gradualmente el voltaje a dicho motor.

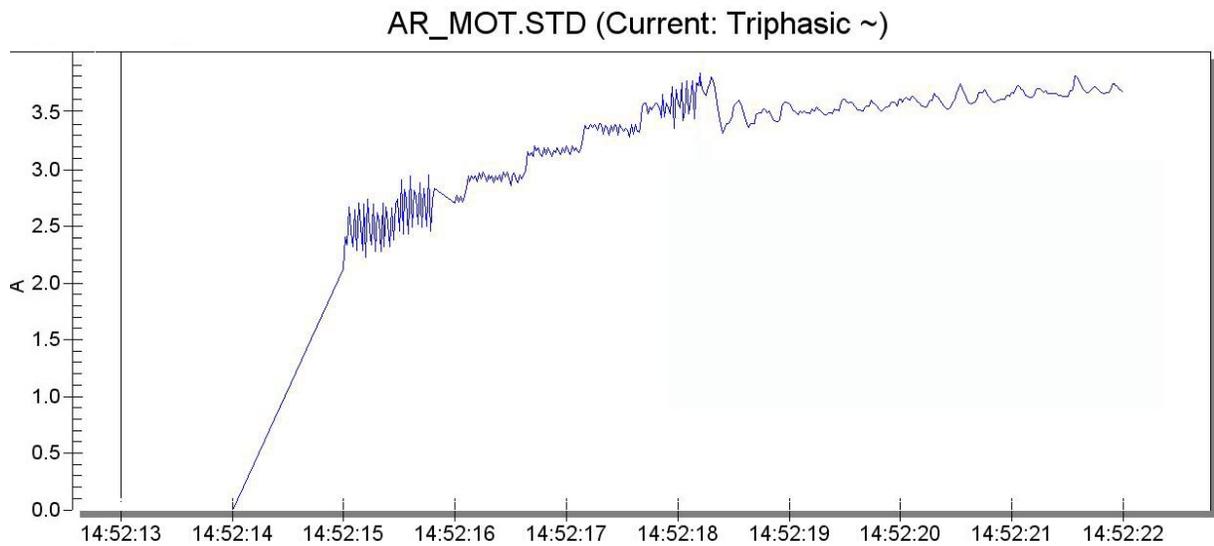


Figura 6.9. Corriente de arranque del motor de prueba con el sistema conectado

### Demostración de las expresiones de voltaje

Para comprobar las expresiones del voltaje de salida se hizo el cálculo teórico del voltaje de salida del controlador trifásico para un ángulo de  $108^\circ$ . Este ángulo representa el inicio de la secuencia de arranque desde el 40% del voltaje total. Se comprobó la ecuación 1.11 con un  $\alpha=108^\circ=3\pi/5$  y  $V_s = 120V$ . Los resultados se tabulan en la tabla 3.

$$V_o = \sqrt{2} \cdot 120 \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{2\pi}{24} - \frac{\pi}{4} + \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{24}\right)}{16} + \frac{\sqrt{3}\cos\left(\frac{2\pi}{24}\right)}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (1.11)$$

$$V_o = 52.03V$$

Tabla 3. Voltaje de Salida del Controlador Trifásico

Valor teórico	Valor Experimental	Porcentaje de Error
52.03V	48V	7.74%

### Porcentaje de disminución de la corriente de arranque

Se midió la corriente máxima de arranque, cuando el motor arranca sin el controlador y cuando arranca con éste, con el fin de hacer una comparación de ambas magnitudes. Los datos se tabulan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Porcentaje de disminución de la corriente máxima de arranque

Corriente sin controlador	Corriente con controlador	Porcentaje de disminución
6.5 A	3.8 A	58.46%

Capítulo 7:  
Conclusiones y Recomendaciones

## Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Se Implementó un control electrónico capaz de realizar un arranque suave para los motores de inducción trifásicos, reduciendo el pico de corriente en el arranque. Lo anterior se puede demostrar con la medición de corriente hecha con el AR5.L (Figura 6.9).
- Se logró demostrar que si se aplica gradualmente el voltaje a los motores de inducción se puede reducir el pico de corriente producido por un arranque desmedido y sin método de control.
- La propiedad del Triacs de pasar de estado de desconexión a conducción mediante un pulso en su patilla de disparo, y la facilidad de desconexión una vez el voltaje haya caído a cero cada medio ciclo del voltaje de alimentación, facilita la operación de un sistema basado en estos dispositivos.
- En un mercado de trabajo donde los costos de la energía afectan directamente las ganancias de una empresa, una producción energéticamente eficiente es clave para determinar sus estrategias operativas. Un manejo ineficiente o negligente del problema planteado, tiene varios efectos nocivos para el desarrollo de estas empresas. Mayores costos de producción las hacen menos competitivas en el mercado, menos solventes para enfrentar problemas financieros y menos propensos a aprovechar opciones de crecimiento.

- Es posible aumentar la productividad de las empresas que utilizan motores de inducción en sus procesos, disminuyendo el tiempo que tarda la planta en arrancar. Actualmente, para reducir las cargas por “Demanda”, muchas plantas industriales no encienden sus motores al mismo tiempo. Con esto se pierde tiempo de trabajo mientras se espera que los motores se enciendan. Si se hacen proyecciones rápidas, esto puede significar varias jornadas perdidas anualmente.
- El uso de un Optoacoplador permitió el aislamiento óptico entre la parte de control del sistema y la de potencia, evitando que se dañara el circuito al mezclar señales de alta y baja potencia.
- Debido a que los circuitos de protección pueden aumentar la complejidad del sistema, se debe limitar su uso a solo los necesarios. Una opción es utilizar Triacs cuyos valores nominales sean mayores que las condiciones bajo las que se va a trabajar. Por ejemplo, en este proyecto los Triacs son para 600V y 16A, condiciones que nunca serán sobrepasadas.
- La velocidad de rotación del campo giratorio no depende de la magnitud voltaje aplicado, sino de la frecuencia del mismo y de la cantidad de polos del motor. Debido a este concepto es posible la utilización de control mediante el recorte de onda para controlar el torque de un motor en una aplicación con velocidad constante.

## Recomendaciones

- La alta corriente en los motores grandes tiende a durar mas tiempo que los motores pequeños, ya que sus momentos de inercia son mayores. La corriente de arranque puede llegar a ser entre 6 y 10 veces la corriente nominal del motor. El calentamiento puede provocar daños en el aislamiento de los devanados. Por esta razón se deben instalar elementos que controlen el arranque de los motores en la industria.
- Se deben incorporar leyes que regulen el arranque de los motores las plantas industriales, para llevar a ahorros a nivel nacional. Con este se puede disminuir la carga energética del país, beneficiando a toda la población.
- Es importante realizar estudios del comportamiento práctico de las plantas industriales que dispongan de dispositivos que controlan el arranque de los motores. Lo anterior para determinar un antes y un después de la incorporación de este tipo de equipos. Teniendo un estudio de este tipo es posible hacer proyecciones para calcular impactos a nivel nacional.
- El uso de dispositivos de protección para los elementos de potencia puede llegar a reducir el costo de un proyecto de diseño. Si alguno de estos se daña o quema, pueden ser fácilmente reemplazados y a un precio muy bajo. La instalación de diodos de Selenio como medida de protección extra contra los transitorios de voltaje. Estos diodos tienen la capacidad de disipar le energía transitoria sin una elevación indebida de temperatura. Los varistores también se utilizan como protecciones.

## **Bibliografía**

## Referencias

- [1]. Muhammad H. Rashid. Electrónica de Potencia, Prentice Hall, México 1995.
- [2]. Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas, Tercera Edición, McGRAW-HILL, Colombia 2000.
- [3]. Wildi, T. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. Sexta Edición. Prentice Hall. México. 2007.
- [4]. Ramshaw, Raymond. Electrónica de Potencia: Potencia Controlada por Tiristor para Motores Eléctricos. Marcombo, Barcelona. 1982
- [5]. Coughlin, R; Driscoll, F. Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales. Quinta Edición. Prentice Hall. México. 1999.
- [6]. Boylestad Nashelsky. Electrónica: Teoría de Circuitos, Edición Revisada, Prentice Hall, México 1982.
- [7]. Smith, Andy. Electro-Mechanical Methods of Starting Induction Motors. Technical Document. Somar International LTD. December, 2004. Truro, England.
- [8]. Smith, Andy. Squirrel Cage Motors – Basic Principles. Technical Document. Somar International LTD. December, 2004. Truro, England.
- [9]. Smith, Andy. Induction Motor Characteristics. Technical Document. Somar International LTD. December, 2004. Truro, England.
- [10]. Miranda, Gerardo Enrique. Gerente Ambiental, Florida Bebidas. Sobre comportamiento de los Motores de Inducción. Entrevista. Alajuela. Mayo, 2008.
- [11]. Vargas, Ignacio. Arquitecto, Cemaco. Sobre comportamiento de los Motores de Inducción. Entrevista. San José. Mayo, 2008.
- [12]. Artavia, Luis Alfonso. Gerente General, Plásticos Artavia S.A. Sobre comportamiento de los Motores de Inducción. Entrevista. San José. Junio, 2008.
- [13]. Zuñiga, Francisco. Gerente Mantenimiento, Nicoll-Durman. Sobre comportamiento de los Motores de Inducción. Entrevista. Alajuela. Setiembre, 2008.
- [14]. Visita a Planta de Reciclaje de Florida Bebidas. Alajuela. Mayo, 2008
- [15]. Visita a Planta de Plásticos Artavia S.A. Desamparados, San José. Junio, 2008
- [16]. Visita a Local Cemaco Zapote. San José. 20 de Mayo, 2008
- [17]. [www2.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm](http://www2.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm)
- [18]. [http://img.alibaba.com/photo/11413948/16x2\\_LCD\\_Modules.jpg](http://img.alibaba.com/photo/11413948/16x2_LCD_Modules.jpg)
- [19]. <http://www.coolcomponents.co.uk/catalog/images/pic18f4550.jpg>

## Apéndices

## **A.1 Glosario, abreviaturas y simbología**

ANSI-C: Lenguaje de programación

AR5.L: Instrumento de Análisis de variables eléctricas

DOL: Arranque de motores eléctricos por conexión directa a la línea

Hardware: corresponde a todas las partes físicas y tangibles del sistema desarrollado

LCD: Pantalla de Cristal Líquido

LED: Diodo emisor de Luz

Motor Eléctrico: Máquina capaz de convertir energía eléctrica en mecánica

Optoacoplador: dispositivo de emisión y recepción de luz que funciona como un interruptor excitado mediante la luz.

PIC: Familia de microcontroladores de la marca Microchip®

PIC-C: Software compilador de programas para microcontroladores

Software: comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios para hacer posible la realización de una tarea específica

Triac: Tiristor de tródo bidireccional

## A.2 Cálculos

### A.2.1 Cálculos para los circuitos desfasadores.

Se utilizaron dos circuitos desfasadores de 120° implementados con integrados 74LS123. Se obtuvo pulsos de 5.5ms mediante la ecuación:

$$T_w = 0.28 \cdot R \cdot C \cdot (1 + 0.7 \div R)$$

Se selecciona  $C = 470\text{nF}$  y despejando R:

$$R \approx T_w \div (0.28 \cdot C) = 41.79\text{k}\Omega$$

Este valor se ajustó mediante un potenciómetro de 50 kΩ.

### A.2.2 Cálculos para los circuitos disparadores.

Según la hoja de datos del Triac utilizado, BT137, se necesitan pulsos para disparar el triac de al menos:

$$t_{gt} = 2 \mu\text{s}$$

Para hacer los pulsos de disparo se utilizaron monoestables 74LS123, y asignando valores comerciales de  $R = 5\text{k}\Omega$  y  $C = 10\text{nF}$ :

### A.2.3 Cálculos para la protección del optoacoplador

Se utilizaron optoacopladores MOC 3011 con voltaje y corriente de LED:

$$I_{FT\text{max}} = 15\text{mA}$$

$$V_{F\text{max}} = 1.5\text{V}$$

Éstos son activados por las salidas de los monoestables 74LS123 con:

$$V_{OH} = 5\text{V}$$

Por lo tanto la resistencia mínima para proteger el acoplador debe ser:

$$R_{P\text{min}} = \frac{V_{OH\ 74LS123} - V_F}{I_{FT}} = \frac{5\text{V} - 1.5\text{V}}{15\text{mA}} = 233\Omega$$

Como criterio de diseño se elige una resistencia de protección para el diodo del optoacoplador de 330Ω

#### A.2.4 Cálculos para la resistencia de Gate del Triac.

Se debe calcular una resistencia para proteger el gate del triac. Para un triac BT 137 600E:

$$I_{GT} = 25mA$$

$$V_{GT} = 1.5V$$

$$I_{FGM} = 2A$$

Con estos valores se determina la resistencia mínima y máxima para la terminal Gate del tiristor.

$$R_{G\max} = \frac{V_P - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{170V - 1.5V}{25mA} = 6740\Omega$$

$$R_{G\min} = \frac{V_P - V_{GT}}{I_{FGM}} = \frac{170V - 1.5V}{2A} = 84.25\Omega$$

Como criterio de diseño se elige una resistencia de Gate de un valor de  $2K\Omega$  y se obtiene una corriente en el Gate:

$$I_G = \frac{V_P - V_{GT}}{R_G} = \frac{170V - 1.5V}{2K\Omega} = 84,25mA$$

$$I_G < I_{FGM}$$

### A.3 Manual de usuario

#### Introducción

El dispositivo fue creado para motores de inducción trifásicos. El mayor problema con este tipo de motores, es su alto torque y corriente de arranque. Durante el arranque el motor usualmente produce, en una fracción de segundo, entre 150 y 200% del torque necesario para vencer la inercia y acelerar la carga a plena velocidad. Este exceso puede llevar a problemas mecánicos. De igual forma, la corriente de arranque puede llegar a ser hasta de diez veces la corriente nominal del motor, causando problemas eléctricos al motor y a los componentes asociados a este. También, estos picos de corriente provocan inestabilidad a la red de la que se alimenta el motor.

#### Instalación del Dispositivo

El dispositivo fue creado para funcionar conectado a una red alterna de 120V, por lo que no se debe conectar a redes cuya magnitud de tensión sea mayor. Es necesario conectar el transformador a una de las fases para lograr obtener el voltaje necesario.

El sistema se conecta en línea con el motor, para que cuando éste se conecte, encienda el dispositivo. Las terminales del motor se deben conectar como lo indica la siguiente figura. Se deben identificar las patillas de los Triacs para poder conectarlo correctamente.

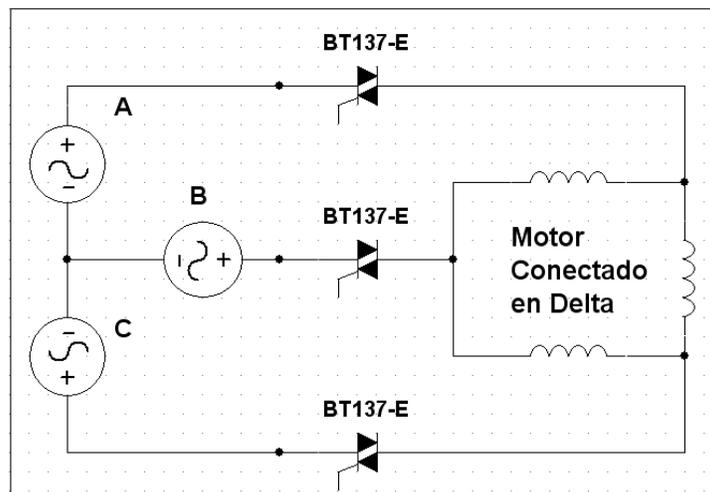


Figura 1. Conexión de las terminales del motor.

#### Funcionamiento del Sistema

Antes de conectar el dispositivo es necesario cerciorarse que las terminales del motor estén bien conectados a los Triacs para evitar dañar los componentes. El usuario puede escoger si encender el motor directamente o ingresar al menú de opciones en el momento del arranque. Esto se escoge con el interruptor de dos posiciones.

Cuando se escoge la opción de arrancar el motor, una vez se encienda el motor, se iniciará la rutina de arranque, la cual aplicará gradualmente el voltaje al motor. Cuando se escoge

ingresar al menú de opciones, aparecerá en la pantalla LCD los pasos correspondientes para configurar el dispositivo. Una vez escogidas las opciones deseadas se puede proceder a arrancar el motor. La figura siguiente muestra las opciones disponibles para el usuario.

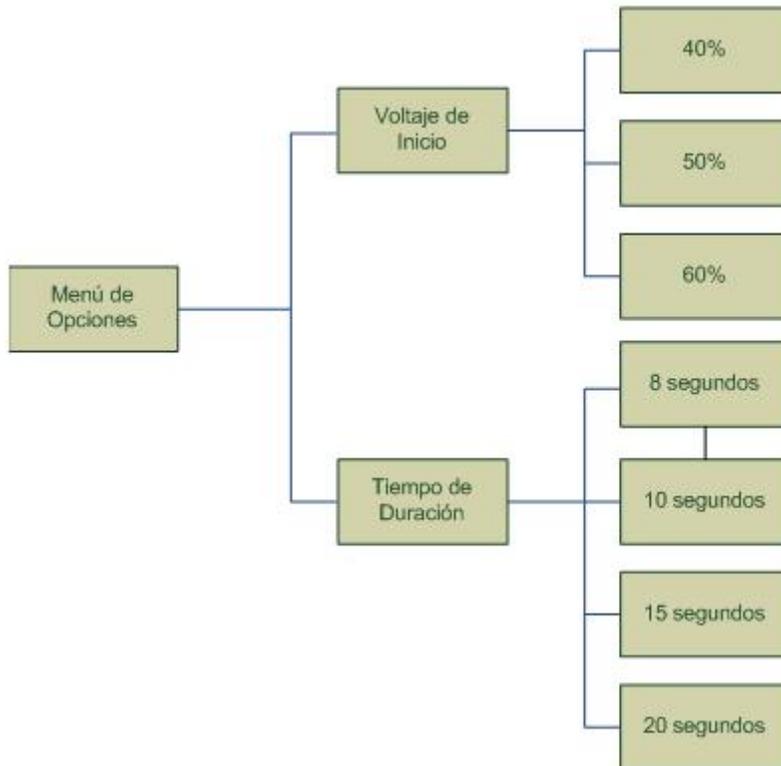


Figura 2. Menú de Opciones

## A.4 Protocolos de Medición

Medición de la corriente de arranque con el ARL.5

A la hora de medir la corriente de arranque en un motor que se conecta directamente a la línea es necesario tomar en cuenta que el pico de corriente ocurrirá en los primeros tres ciclos del voltaje. Esto quiere decir que en una distribución cuya frecuencia es 60Hz el pico de corriente usualmente tarda 50ms. Los multímetros digitales por lo general tienen un tiempo de adquisición de 1 segundo, por que medir la corriente de arranque resulta imposible.

El ARL.5 toma mediciones cada ciclo por lo que puede medir la corriente en el arranque. Cuando se quiere medir la corriente es necesario:

- Poner el ARL.5 en “STOP”.
- Configurar el periodo a un ciclo.
- Desactivar todos los parámetros de medición excepto la corriente

Cuando se esté listo para tomar la medición, presionar el botón para poner el ARL.5 en “RUN” unos segundos antes de encender el motor, para asegurarse de hacer la medición correctamente. La siguiente figura es una gráfica típica de un arranque en conexión directa a la línea.

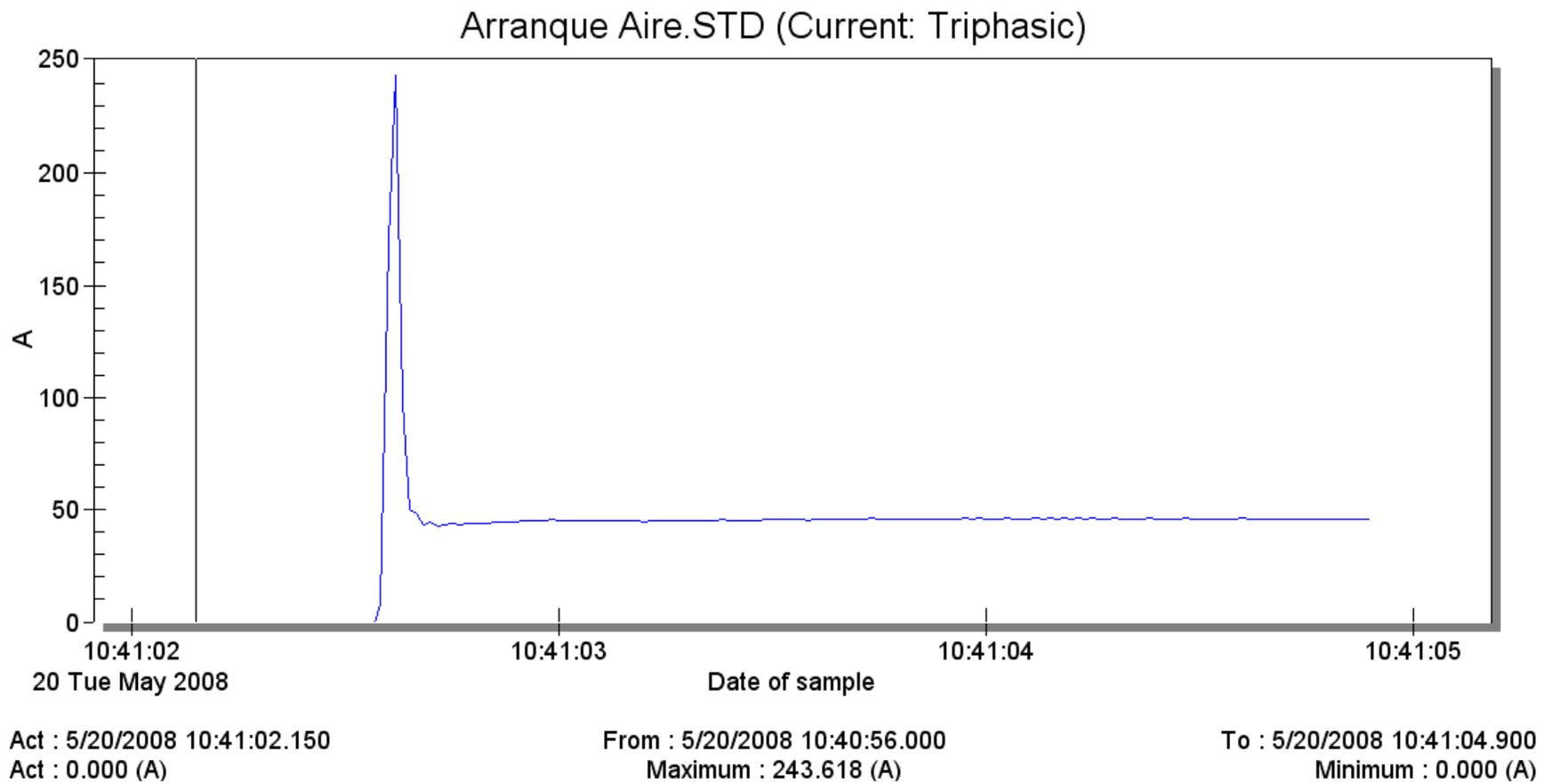


Figura A.3.1 Corriente de Arranque de un motor trifásico de 30Hp @ 470V,  
de un sistema de aire acondicionado



## **A.5 Información sobre la empresa**

Nombre: Enertec Soluciones S.A.

Zona: San José

Dirección: Barrio Los Yoses, San Pedro de Montes de Oca.

Teléfono: 2283-2912

Fax: 2283-3041

Pagina Web: [www.enertec.cr](http://www.enertec.cr)

Actividad Principal: Ahorro Energético

## **A.6 Hoja de Datos del Triac BT137 600E (Ver archivo adjunto)**