



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO PARA ESTIMACIÓN DE POTENCIA Y TORQUE EN EL EJE DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN”

CRISTHOFER QUEZADA RIOS

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRICIDAD

CONCEPCIÓN – CHILE
2016



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO PARA ESTIMACIÓN DE POTENCIA Y TORQUE EN EL EJE DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN”

CRISTHOFER QUEZADA RIOS

PROFESOR GUÍA:	JAVIER RIEDEMANN AROS
PROFESORES CORRECTORES:	JUAN CARLOS DELGADO NAVARRO FABRICIO SALGADO DÍAZ

AGRADECIMIENTOS

Se destaca en primer lugar a don Javier Riedemann Aros por su disponibilidad para trabajar en este proyecto.

Se agradece a don Carlos Sandoval y a don Pedro Inostroza, quienes ayudaron enormemente a la realización de este seminario, ya sea entregando consejos técnicos y/o facilitando instrumentos y equipos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Sin duda grandes personas, los cuales respetaré siempre.

Se agradece también el aporte financiero entregado por el proyecto de investigación N° G1160510 EF "Conversión y Acondicionamiento de Energía Eléctrica" de la Universidad del Biobío.

Se agradece el aporte financiero entregado por el Comité de Desarrollo Productivo Regional mediante su proyecto N° 16CTEBI-67542 "Convocatoria de Apoyo a la Realización de Tesis", perteneciente a CORFO.

ÍNDICE

RESUMEN	6
OBJETIVOS	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO N°1	10
Motor de inducción	10
1.1.- Introducción.....	10
1.2.- Aspectos constructivos del motor de inducción.....	10
1.3.- Principio de Funcionamiento	11
1.4.- Potencias en motor de inducción	13
1.5.- Par o torque del motor de inducción	14
1.6.- Potencia, máxima transferencia de potencia y torque máximo	16
1.7.- Característica par-velocidad del motor de inducción.....	17
CAPÍTULO N°2	20
Arduino (hardware y software)	20
2.1.- Introducción a Arduino	20
2.2.- Hardware Arduino	20
2.2.1.- Entradas y salidas Digitales.....	21
2.2.2.- Entradas Analógicas.....	21
2.2.3.- Entradas y salidas especiales	21
2.2.4.- Alimentación de Arduino	21
2.2.5.- Resumen de características Técnicas.....	22
2.3.- Software Arduino.....	22
CAPÍTULO N°3	26
Medición de Voltaje, Corriente y Velocidad.....	26
3.1.- Descripción General.....	26
3.2.- Medición de Voltaje.....	26
3.3.- Transductores de tensión LV 25-P	28
3.4.- Tarjeta para medición de tensión	30
3.5.- Tarjeta para conversión de señal de tensión.....	31
3.5.1.- Off-Set de una señal.....	31
3.5.2.- Diseño del circuito	31
3.6.- Medición de corriente	33
3.7.- Transductores de corriente LA 55-P	34

3.8.- Tarjeta para medición de corriente.....	35
3.9.- Tarjeta para conversión de señal de corriente	36
3.10.- Tarjeta para medición de velocidad	37
3.11.- Tarjetas adicionales.	39
3.11.1.- Fuente de alimentación	39
3.11.2.- Tarjeta para medición de velocidad	40
CAPÍTULO Nº4	42
Programación Arduino.....	42
4.1.- Descripción General.....	42
4.2.- Cálculo de Pérdidas en motor de inducción	42
4.2.1.- Prueba de corriente directa	43
4.2.2.- Ensayo de rotor libre.....	44
4.3.- Código de programación.	45
4.3.1.- Selección de conexión (Delta o Estrella)	45
4.3.2.- Medición de corriente RMS	47
4.3.2.- Medición de potencia media	48
4.3.3.- Medición de velocidad	50
4.3.4.- Muestra de los valores en LCD	51
CAPÍTULO Nº5	53
CALIBRACIÓN Y PRUEBAS	53
5.1.- Calibración	53
a) Calibración tarjeta conversión de tensión.....	53
b) Calibración tarjeta conversión de corriente.....	54
5.2.- Pruebas.....	54
Prueba en vacío.....	54
Prueba con carga	56
CAPÍTULO Nº6	60
COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	63
ANEXOS	64

RESUMEN

En este documento se explica el diseño y construcción de un medidor de torque y potencia para máquinas de inducción, el cual está fundado en las variables eléctricas y mecánicas fundamentales de este tipo de motor, que son voltaje, corriente y velocidad.

Para ello, se planifica la fabricación de un instrumento basado en la tarjeta de desarrollo Arduino, elemento que permitirá el procesamiento de las señales medidas y entregará los valores de corriente, potencia y torque en una pantalla de cristal líquido (lcd).

La construcción se realiza mediante tarjetas para la medición de voltajes y corrientes de línea, las cuales entregan señales de tensión alterna. Debido a que Arduino no es capaz de procesar señales alternas (solo es capaz de recibir señales analógicas positivas), se fabrican tarjetas especiales para el acondicionamiento de estas señales, de manera de obtener una forma de onda positiva de 5V peak-to-peak.

Además, se crea un sistema de medición para la velocidad del motor mediante un fototransistor, el cual posee un mecanismo tal que para cada giro del motor se entregan 2 señales de pulso a Arduino, que más tarde se traducirán en velocidad angular gracias a la programación del hardware.

Finalmente, al contar con las variables necesarias para el cálculo de torque y potencia en el eje del motor, se programa el microcontrolador para el cálculo de potencia para cualquier tipo de conexión del motor (ya sea delta o estrella), y además, para que a esta potencia se le resten las pérdidas internas del motor (pérdidas en el cobre de los devanados, pérdidas magnéticas y pérdidas mecánicas), de manera que la estimación de potencia sea lo más precisa posible.

El resultado final nos muestra que el medidor de torque y potencia diseñado y construido funciona correctamente con una aproximación aceptable si se compara con magnitudes entregadas por instrumentos de medición clásicos.

OBJETIVOS

1.- Objetivo general:

- Diseñar y construir un sensor de potencia y torque en el eje de máquinas de inducción, basado en variables eléctricas y mecánicas.

2.- Objetivos Específicos:

- Diseñar y construir tarjetas para la medición de voltajes y corrientes.
- Diseñar y construir tarjeta para la medición de posición/velocidad proveniente de un encoder.
- A partir de las variables eléctricas medidas se debe calcular el torque en un microprocesador Arduino, el cuál graficará el torque en una pantalla Lcd.

INTRODUCCIÓN

El torque y la potencia son variables de suma importancia en los motores eléctricos de inducción, ya que ambas están relacionadas con la carga que tiene acoplada la máquina en su eje. Estudiar la medición de torque resulta interesante si se considera que en el mercado no existen muchas alternativas para poder estimarlo.

Considerando lo anterior, es que en este seminario de título se busca diseñar y construir un instrumento capaz de medir en tiempo real el torque y la potencia en el eje de un motor de inducción, y que estos valores medidos sean mostrados a través de una pantalla de cristal líquido.

El instrumento se basará en la plataforma de software libre Arduino, elemento que permitirá el procesamiento de las señales obtenidas de la medición de las variables eléctricas y mecánicas del motor (voltaje, corriente y velocidad), para luego, mediante operaciones matemáticas, poder estimar el torque en el eje del motor asíncrono.

CAPÍTULO N°1
MOTOR DE INDUCCIÓN

CAPÍTULO N°1

Motor de inducción

1.1.- Introducción

El motor de inducción, también llamado motor asíncrono, es una máquina eléctrica de corriente alterna. Es el tipo de motor más utilizado en la industria, debido a su robustez y su bajo costo de mantenimiento.

1.2.- Aspectos constructivos del motor de inducción

Estator: Se le llama estator a la parte fija del motor (figura 1.1), constituida principalmente por un devanado trifásico que al ser alimentado por un sistema de tensiones sinusoidales produce un campo magnético giratorio. Cada devanado está desplazado 120° mecánicos entre sí.



Figura 1.1 Estator de un motor de Inducción

Rotor: El devanado de rotor es un circuito cerrado por el que circulan corrientes inducidas desde el circuito de estator gracias al campo magnético producido por este. Existen dos tipos de rotor: de jaula de ardilla y de rotor bobinado.

- a) **Rotor jaula de ardilla:** Formado por barras conductoras alojadas en las ranuras del rotor, que son cortocircuitadas en sus extremos por anillos (figura 1.2).

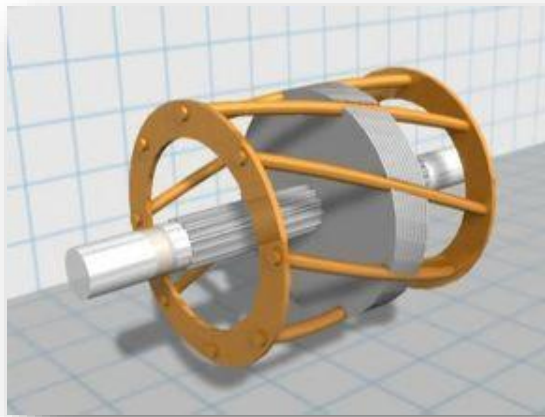


Figura 1.2 Rotor Jaula de ardilla

- b) **Rotor devanado:** conjunto de devanados similares a los de estator, con mismo número de polos y fases, que se conectan al exterior mediante anillos rozantes montados en el eje, de forma que mediante escobillas de carbon estas se cortocircuitan entre sí a través de las resistencias externas. En la figura 1.3 se puede apreciar la disposición de los anillos rozantes de un rotor devanado.

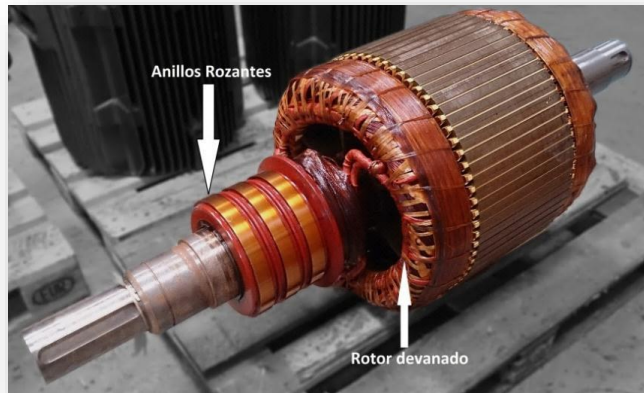


Figura 1.3 Rotor devanado

1.3.- Principio de Funcionamiento

A estos motores se les denomina “motores de inducción” debido a que su funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos de estator y rotor. El flujo principal es producido por el devanado estatórico de la máquina que induce una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday [1], cuya fórmula es:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

Donde;

ε : Tensión inducida.

N : Número de espiras del conductor (devanado).

$d\phi/dt$: Variación del Flujo Magnético en función del tiempo.

Nota: El signo menos (-) se debe a que la fem inducida se opone al campo magnético rotatorio.

Esta tensión origina la aparición de corrientes en el rotor, que a su vez provocarán el surgimiento de un campo magnético que seguirá el movimiento del campo estático, produciéndose un par motor que permite que el rotor gire (principio de inducción mutua).

Sin embargo, la inducción en el rotor solo se dará si la velocidad de giro de los campos magnéticos estático (1.2) y rotórico son diferentes (en la práctica la velocidad del rotor es relativamente más baja).

$$Ns = \frac{60 \times f}{P} \text{ (r.p.m.)} \quad (1.2)$$

Donde;

Ns : Velocidad sincrónica del campo magnético de estator.

f : Frecuencia de la corriente eléctrica.

P : Numero de pares de polos del motor.

La diferencia entre estas velocidades se denomina deslizamiento (s), y el par inducido solo existirá si este factor es distinto de 0. El deslizamiento difiere con la carga mecánica aplicada al rotor, siendo este máximo con la máxima carga aplicada en el eje del motor. Sin embargo, a pesar de esto, el motor varía poco su velocidad, pero el par motor aumenta (y con ello la intensidad de corriente consumida) por lo que se puede deducir que son motores de velocidad constante.

1.4.- Potencias en motor de inducción

Un motor de inducción se puede describir como un transformador giratorio trifásico, en el cual sus bobinados secundarios están cortocircuitados por lo que la potencia de salida no es eléctrica sino que es mecánica.

En la figura 1.4 se ilustra la relación de la potencia de entrada (eléctrica) con la potencia de salida (mecánica).

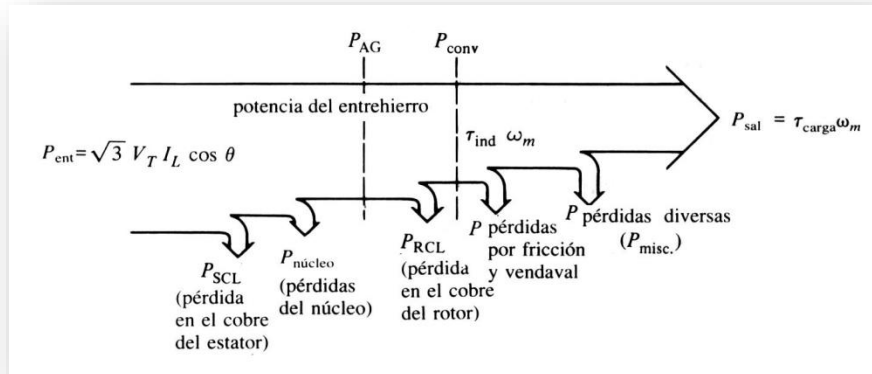


Figura 1.4 Diagrama de potencias del motor de inducción

Por otro lado, el circuito equivalente por fase del motor de inducción es el que se muestra en la figura 1.5:

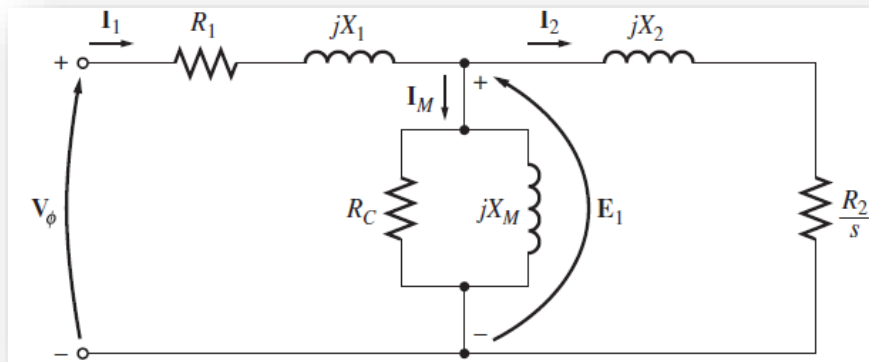


Figura 1.5 Circuito equivalente (por fase) del motor de inducción

Del circuito equivalente por fase de un motor de inducción se tiene:

$$Pérdidas\ del\ cobre\ del\ estator = 3 * I_1^2 * R_1 \quad (\text{Watts}) \quad (1.3)$$

$$Pérdidas\ del\ núcleo\ en\ el\ estator = 3 * E_1^2 * G_c = 3 * \frac{E_1^2}{R_c} \quad (\text{Watts}) \quad (1.4)$$

$$Potencia\ entrehierro = P_{entrada} - P_{Cu} - P_{núcleo} = 3 * I_2^2 * \left(\frac{R_2}{s}\right) \quad (\text{Watts}) \quad (1.5)$$

Ahora, las pérdidas resistivas del rotor se obtienen aplicando la ecuación:

$$Potencia\ rotor = 3 * I_2^2 * R_2 \quad (\text{Watts}) \quad (1.6)$$

La potencia restante será la potencia convertida de eléctrica a mecánica:

$$Potencia\ mecánica = P_{entrehierro} - P_{rotor} = 3 * I_2^2 * R_2 * \left(\frac{1}{s} - 1\right) \quad (\text{Watts}) \quad (1.7)$$

Donde;

R_2 : Resistencia total del rotor, referida al estator.

I_2 : Corriente del rotor, referida al estator.

s : Deslizamiento.

Por lo tanto se puede deducir que:

- Mientras más bajo sea el deslizamiento del motor, la corriente rotórica disminuye y las pérdidas del rotor de la máquina son menores.
- Si el rotor no está girando el deslizamiento es igual a 1, y la potencia del entrehierro se disipa completamente en el cobre del rotor.

La eficiencia está relacionada con la potencia, ya que según su ecuación (1.8), esta será la relación entre la potencia eléctrica de entrada y la corriente eléctrica que finalmente se convierte en energía mecánica.

$$\eta = \frac{Potencia\ Salida}{Potencia\ de\ Entrada} \times 100 \quad (1.8)$$

1.5.- Par o torque del motor de inducción

El torque es la fuerza con la que rota el eje del motor de inducción. De esto dependerá con cuanta carga puede trabajar la máquina sin detenerse ni dañarse.

El torque en el eje del motor asíncrono se expresa como:

$$\tau = \frac{\text{Potencia Mecánica}}{\omega_{motor}} \quad (\text{Nm}) \quad (1.9)$$

Donde;

τ : Torque en el eje de la máquina.

ω : Velocidad del rotor en Rad/Seg .

Utilizando 1.7, la ecuación de torque es:

$$\tau = \frac{3 \times I_2^2 \times R_2 \times \left(\frac{1}{s} - 1\right)}{\omega_{motor}} \quad (\text{Nm}) \quad (1.10)$$

La manera más sencilla de trabajar con el circuito equivalente por fase del motor de inducción es determinando el circuito de Thevenin de la figura 1.6.

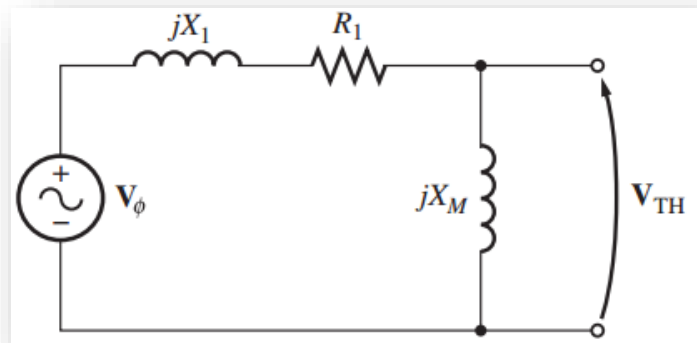


Figura 1.6 Voltaje Thevenin en circuito equivalente motor inducción

Nota: Para la impedancia de magnetización se toma en cuenta solo la reactancia jX_m .

Por lo tanto, determinando el circuito de Thevenin se tiene:

$$V_{th} = V\phi \times \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \quad (\text{V}) \quad (1.11)$$

Mientras tanto que Z_{th} será:

Nota: Debido a que $X_m \gg X_1$ y además $(X_m + X_1) \gg R_1$, la resistencia y reactancia de Thevenin viene dada aproximadamente por:

$$R_{th} = R_1 \left(\frac{x_m}{x_1 + x_m} \right)^2 \quad (\Omega) \quad (1.12)$$

$$X_{th} = x_1 \quad (\Omega) \quad (1.13)$$

De esta forma, la corriente I_2 será:

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (\text{A}) \quad (1.14)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación 1.14 en la fórmula de torque (1.10), se obtiene:

$$\tau = \frac{3 \times V_{th}^2 \times R_2}{s \times \omega_{sinc} [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad (\text{Nm}) \quad (1.15)$$

1.6.- Potencia, máxima transferencia de potencia y torque máximo.

La potencia trifásica instantánea que consumirá el motor de inducción será:

$$P_{3\phi}(t) = [v_a(t) \times i_a(t)] + [v_b(t) \times i_b(t)] + [v_c(t) \times i_c(t)] \quad (\text{Watts}) \quad (1.16)$$

Por otra parte, la máxima transferencia se dará cuando:

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (1.17)$$

Al resolver la ecuación anterior, el deslizamiento para el par máximo estará dado por:

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (1.18)$$

Por último, insertando la fórmula anterior en la ecuación 1.15 el par máximo será:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3 \times V_{th}^2}{2 \times \omega_{sinc} [R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}]} \quad (\text{Nm}) \quad (1.19)$$

1.7.- Característica par-velocidad del motor de inducción.

En las figuras 1.7 y 1.8 se presentan las curvas características par-velocidad del motor de inducción.

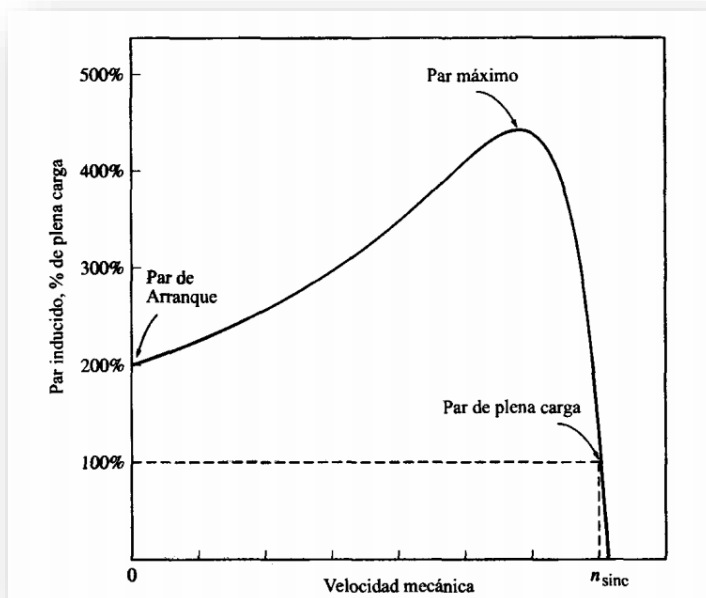


Figura 1.7 Curva característica típica motor de inducción

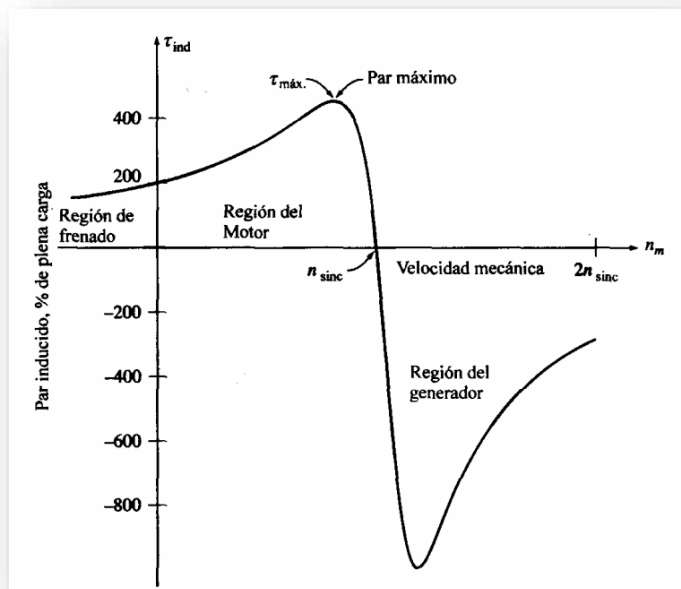


Figura 1.8 Curva característica par-velocidad motor de inducción que muestra rangos de operación (frenado y generación)

La información que se extrae de los gráficos expuestos es:

- 1.- El par inducido es cero a la velocidad sincrónica.
- 2.- La curva par velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga, ya que cuando crece el deslizamiento lo hacen también la corriente del rotor, el campo magnético del rotor y el par inducido.
- 3.- El par de arranque es ligeramente mayor al par de plena carga.
- 4.- El par inducido varía con el cuadrado de la tensión.
- 5.- La máquina de inducción opera como generador cuando la velocidad de rotación supera a la síncrona. Como se invierte la dirección del par inducido, la energía mecánica se convierte en eléctrica.

CAPÍTULO N°2
ARDUINO (HARDWARE Y SOFTWARE)

CAPÍTULO N°2

Arduino (hardware y software)

2.1.- Introducción a Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una tarjeta poseedora de un microcontrolador y un entorno de desarrollo integrado (IDE4), constituido principalmente por entradas y salidas análogas y digitales que permiten a Arduino interactuar con el exterior mediante interruptores y sensores de diversos tipos.

Con Arduino es posible crear objetos interactivos, leyendo datos de los sensores o interruptores y controlando luminarias, motores u otros actuadores físicos.

2.2.- Hardware Arduino.

Arduino Uno [2] es una plataforma open-hardware basada en una sencilla tarjeta con entradas y salidas (I/O), analógicas y digitales. El elemento principal es el microcontrolador Atmega328, un chip sencillo y de bajo costo que permite el desarrollo de múltiples diseños. Como se observa en la figura 2.1, además de entradas y salidas de señales, posee pines de alimentación, salida de tensión regulada, etc.

Nota: Existe una gran variedad de modelos de Hardware Arduino, pero en este documento se especificará solo el modelo ARDUINO UNO, debido a que es éste el que se utiliza en el desarrollo del proyecto.

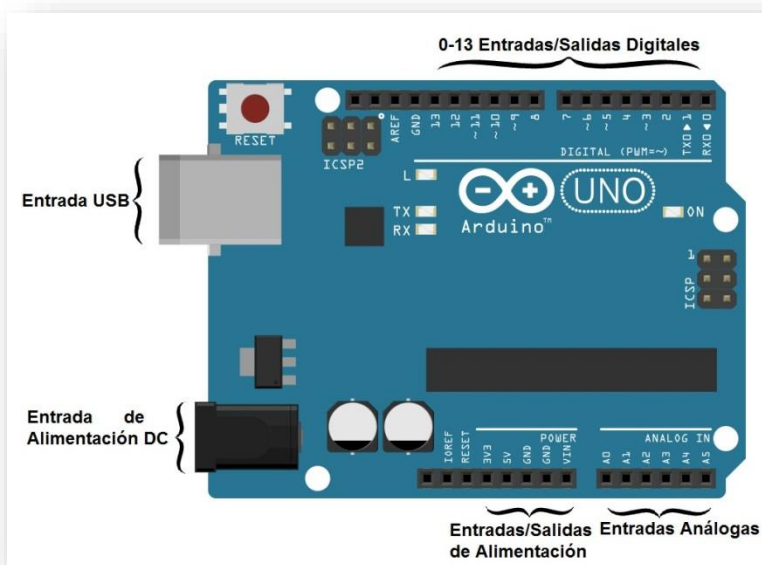


Figura 2.1 Arduino Uno

2.2.1.- Entradas y salidas Digitales: Arduino Uno posee 14 pines digitales (del pin 0 al 13, ver Figura 2.1) que pueden ser configurados como entradas o salidas dependiendo del requerimiento del usuario. Estas entradas/salidas funcionan con voltajes de 0 y 5 V, y pueden soportar una corriente de 40 mA.

Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20 k Ω y 50 k Ω que está desconectada, salvo que se indique lo contrario.

2.2.2.- Entradas Analógicas: Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits.

2.2.3.- Entradas y salidas especiales:

- **Rx y Tx:** Se utilizan para transmisiones serie de señales TTL.
- **Interrupciones externas:** Los pines 2 y 3 están configurados para generar una Interrupción en el atmega. Las interrupciones pueden dispararse cuando se encuentra un valor bajo en estas entradas y con flancos de subida o bajada de la entrada.
- **PWM:** Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits.
- **SPI:** Los pines 10, 11, 12 y 13 pueden utilizarse para llevar a cabo comunicaciones SPI, que permiten trasladar información full dúplex en un entorno Maestro/Esclavo.
- **I²C:** Permite establecer comunicaciones a través de un bus I²C. El bus I²C es un producto de Phillips para interconexión de sistemas embebidos. Actualmente se puede encontrar una gran diversidad de dispositivos que utilizan esta interfaz, desde pantallas LCD, memorias EEPROM, sensores, etcétera.

2.2.4.- Alimentación de Arduino: Arduino puede alimentarse directamente a través del propio cable USB o mediante una fuente de alimentación externa, como puede ser un pequeño transformador o, por ejemplo una pila de 9V. Los límites están entre los 6 y los 12 V.

La alimentación puede conectarse mediante un conector de 2,1mm con el positivo en el centro o directamente a los pines Vin y GND marcados sobre la tarjeta.

2.2.5.- Resumen de características Técnicas: En la tabla 2.1 se resumen las características técnicas de Arduino Uno [3].

Tabla 2.1 Características técnicas Arduino Uno

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (Límite)	6-20V
Pines de entrada-salida digital	14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines entrada analógica	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 kB (0,5 kB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Frecuencia de reloj	16 MHz

2.3.- Software Arduino.

Arduino, mediante su página web oficial proporciona un software homónimo consistente en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación de Arduino y el bootloader ejecutado en la tarjeta. El lenguaje estándar de programación es C++, aunque es posible programarlo en otros lenguajes.

Los programas creados por el usuario deberán ser ingresados al software de Arduino, y serán ingresados al hardware mediante conexión USB. Estos deberán ser escritos en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés) que se muestra en la figura 2.2, y será este quien automáticamente nos muestre si el programa es correcto o presenta errores en su escritura.

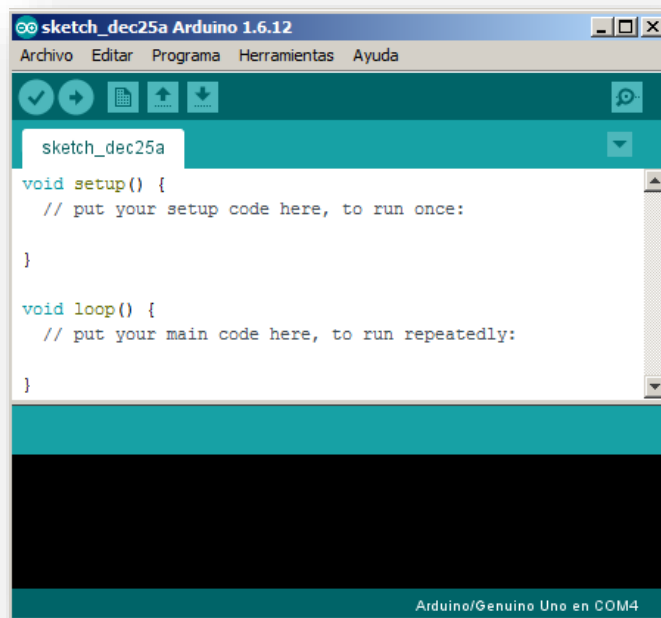


Figura 2.2 Captura de pantalla de IDE del software Arduino

2.3.1.- Estructura básica de un programa: La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes: setup y loop. Setup() constituye la preparación del programa y loop() es la ejecución. En la función Setup() se incluye la declaración de variables y se trata de la primera función que se ejecuta en el programa. Esta función se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el pinMode (por ejemplo, si un determinado pin digital es de entrada o salida) e inicializar la comunicación serial. Luego, la función loop() incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.). En la figura 2.3 se muestra un ejemplo básico de como estructurar un código de programación.

```
void setup() {
  pinMode(pin, OUTPUT); // Establece 'pin' como salida
}
void loop() {
  digitalWrite(pin, HIGH); // Activa 'pin'
  delay(1000); // Pausa un segundo
  digitalWrite(pin, LOW); // Desactiva 'pin'
  delay(1000);
}
```

Figura 2.3 Estructura básica de un programa en Arduino

Además, un programa puede contener variables, las cuales guardaran los datos que se obtendrán de las entradas del Arduino. Estas variables podrán contener datos del tipo int, long, float, Byte, etc., los cuales se diferencian entre sí por el rango de bits en que trabajan. Las variables deben ser siempre declaradas antes de la función setup ().

2.3.2.- Comunicación por puerto serie: Arduino posee como principal característica la habilidad de comunicarse con nuestra computadora a través del puerto serie. Esto se conoce como comunicación serial. Debido a que el uso de este puerto ha quedado un poco en desuso a favor de la tecnología USB, Arduino cuenta con un convertidor de Serial a USB que permite a la tarjeta ser reconocida por la computadora como un dispositivo conectado a un puerto COM incluso cuando la conexión física sea mediante USB.

Arduino IDE proporciona una herramienta que permite enviar y visualizar los datos que se manejan a través del puerto Serie. Dicha herramienta se conoce como Monitor Serial y se puede encontrar en el menú de herramientas, en la opción “Monitor Serial” (figura 2.4). Es la forma más simple que existe para establecer la comunicación serial con Arduino.

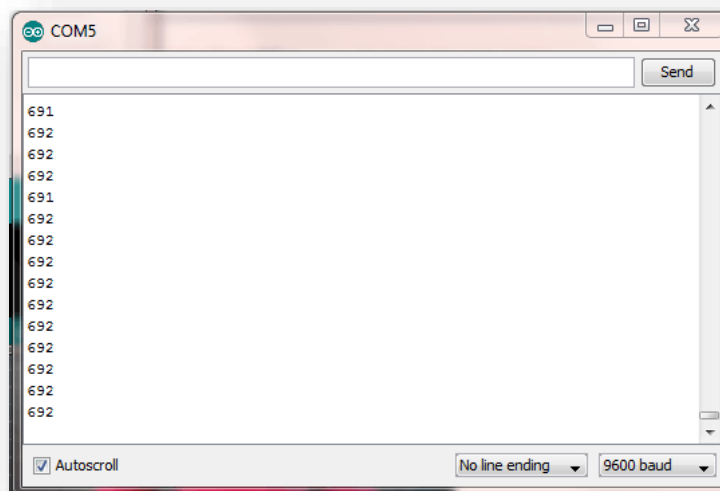


Figura 2.4 Monitor Serial

A través de esta ventana se puede enviar o recibir información utilizando el puerto serie. Para poder abrir esta ventana es necesario que tengamos la tarjeta Arduino conectada al PC mediante USB.

El puerto serial de Arduino no solo sirve para comunicarse con la computadora, sino que también permite la comunicación con otros Arduinos mediante los pines digitales 0(RX) y 1(TX), para recepción y transmisión de datos, respectivamente.

CAPÍTULO N°3
MEDICIÓN DE VOLTAJE, CORRIENTE Y VELOCIDAD

CAPÍTULO N°3

Medición de Voltaje, Corriente y Velocidad

3.1.- Descripción General.

El presente documento trata sobre el diseño y construcción de un medidor de torque y potencia para motores de inducción, basado en la medición de variables eléctricas y mecánicas. Debido a que la potencia eléctrica es el producto entre los valores instantáneos de los voltajes y las corrientes, se debe crear un mecanismo que permita sentir en todo momento las magnitudes vectoriales trifásicas de estas variables. Asimismo, para el cálculo de torque es necesario contar con la velocidad de rotación del rotor de la máquina, por lo que será necesario poseer un sistema para la medición de velocidad.

En este capítulo se explica el diseño de los circuitos a utilizar para la medición de corriente, voltaje y velocidad.

3.2.- Medición de Voltaje.

Los motores de inducción funcionan con tensiones trifásicas sinusoidales equilibradas, y la magnitud de la tensión en las bobinas varía dependiendo si la conexión de los devanados es en “Estrella” o en “Delta”. En la figura 3.1 se observan las tensiones en las bobinas para cada conexionado.

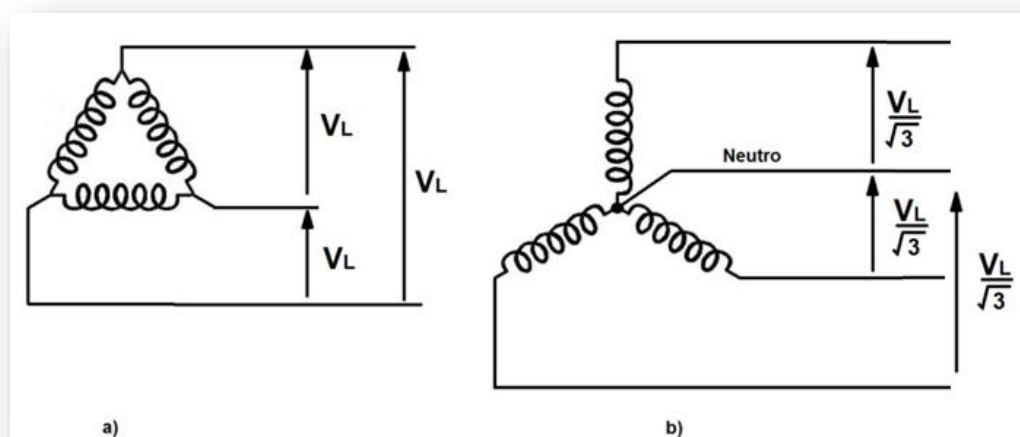


Figura 3.1 Voltajes en motor de inducción

a) Conexión Delta b) Conexión Estrella

Como se advierte, en la conexión delta los voltajes de fase son iguales en magnitud que las tensiones de línea, mientras que al conectar los devanados del motor en

estrella, la magnitud de los voltajes de fase es $\sqrt{3}$ veces menor que las tensiones de línea. Por otra parte, la potencia instantánea de un motor asíncrono viene dada por las ecuaciones 3.1 y 3.2, dependiendo de la conexión de los devanados del motor:

Conexión Estrella:

$$P_{3\phi}(t) = [v_{an}(t) * i_a(t)] + [v_{bn}(t) * i_b(t)] + [v_{cn}(t) * i_c(t)] \text{ (Watts)} \quad (3.1)$$

Conexión Delta:

$$P_{3\phi}(t) = [v_{ab}(t) * i_{ab}(t)] + [v_{bc}(t) * i_{bc}(t)] + [v_{ca}(t) * i_{ca}(t)] \text{ (Watts)} \quad (3.2)$$

Por lo tanto, para poder calcular la potencia instantánea en cualquier conexión del motor, es necesario contar con todas las tensiones de líneas y fase.

Para simplificar el diseño y la construcción del instrumento, se medirán solo dos tensiones de línea: V_{ab} y V_{bc} . Con la medición de estas dos tensiones se puede obtener la tercera tensión de línea, ya que al ser un sistema trifásico balanceado se tiene que:

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad (3.3)$$

Por lo tanto, despejando esta ecuación se tiene que:

$$V_{ca} = -(V_{ab} + V_{bc}) \quad (3.4)$$

Además, las tensiones de fase en conexión estrella se pueden calcular mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ V_{bc} &= V_b - V_c \\ 0 &= V_a + V_b + V_c \end{aligned} \quad (3.5)$$

En notación matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_T \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Al calcular la inversa de la matriz de transformación T queda que:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/3 & -2/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Multiplicando matricialmente, se obtiene que las tensiones de fase serán:

$$V_a = 1/3 (2V_{ab} + V_{bc}) \quad (3.8)$$

$$V_b = 1/3 (-V_{ab} + V_{bc}) \quad (3.9)$$

$$V_c = -1/3 (V_{ab} + 2V_{bc}) \quad (3.10)$$

De esta forma se consiguen todas las tensiones requeridas para el cálculo de potencia en motores de inducción en cualquier tipo de conexonado, a partir de la medición de solo dos tensiones de línea.

3.3.- Transductores de tensión LV25-P.

La medición de tensión se realiza mediante el transductor de tensión LV25-P perteneciente al fabricante LEM®, el cual es un sensor para montajes en PCB basado en el efecto Hall.

Este sensor permite el sondeo de tensiones de entre 0 y 500V continuos o alternos. Para esta medición no se puede superar una corriente de 10 mA rms en el lado primario, por lo cual se debe instalar una resistencia (R_1) en serie en el primario del transductor de tal forma de obtener la intensidad deseada ($I_{1Nominal}$). Por otra parte, la señal de salida será una corriente de 25 mA rms nominales. En el secundario deberá ir en serie una resistencia de medición (R_M).

Por ejemplo, si se desea medir una tensión de 220 Volts, para obtener una corriente de 10 mA en el lado primario se deberá instalar una resistencia de valor óhmico igual a:

$$R(\Omega) = \frac{V}{I} (\Omega) \quad (3.11)$$

$$R(\Omega) = \frac{220 V}{10 mA} = 22k\Omega$$

De esta forma, además de obtener los 10 mA nominales en el lado primario del transductor, se consigue una corriente de 25 mA en la salida.

La alimentación debe ser una tensión continua de ± 12 V. El esquema del transductor se muestra en la figura 3.2:

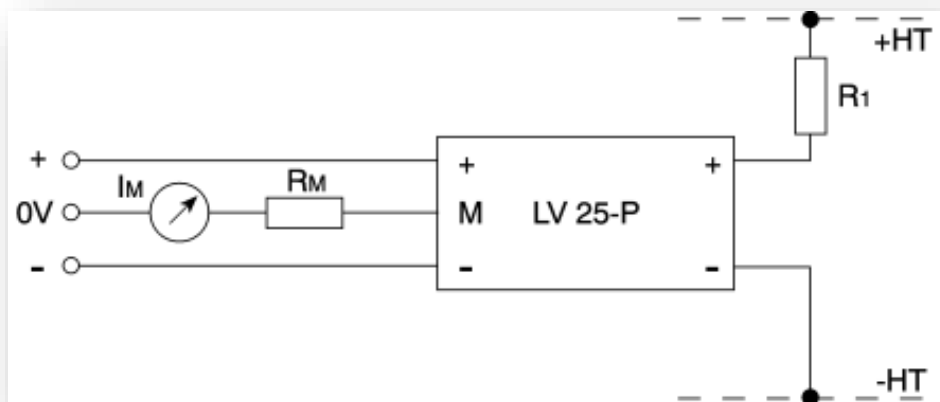


Figura 3.2 Esquema LV 25-P

Las principales características del transductor de tensión se resumen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Características técnicas LV25-P

Corriente nominal I_N	10mA
Corriente nominal de salida analógica	25mA
Relación de espiras	2.500:100
Tensión de alimentación	± 12 V o ± 15 V
Linealidad	$<0,2\%$
Temperatura de funcionamiento	de 0°C a $+70^\circ\text{C}$
Consumo de corriente	10mA + corriente de salida
Resistencia interna del primario	250Ω
Resistencia interna del secundario	110Ω

3.4.- Tarjeta para medición de tensión.

Debido a que el medidor de torque y potencia está pensado para trabajar con motores de tensiones nominales de 380 volts, la resistencia del lado primario tendrá una magnitud de 38 kΩ (según la ecuación 3.11). Sin embargo, si se desea trabajar con valores de voltaje diferentes es necesario volver a calcular esta resistencia, de manera que la corriente no supere los 10 mA.

Como se explicó en el punto 3.2, se medirán solo dos tensiones de línea (V_{ab} y V_{bc}), por lo tanto es necesario utilizar solo dos transductores de tensión, como se observa en la figura 3.3.



Figura 3.3 Tarjeta para medición de tensión

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| (1) Entrada voltaje V_{ab} | (2) Entrada voltaje V_{bc} |
| (3) Alimentación ± 18 Vdc | (4) Salida Conector Db9 |

La potencia disipada en las resistencias primarias viene dada por la expresión $P = I^2 * R$, por lo tanto, al tener una resistencia de 38 kΩ con una corriente de 10 mA se estará disipando una potencia media de 3,8 W. Por esto, es elemental utilizar resistencia que soporten como mínimo 4 W. En este caso, se han utilizado resistencias de cerámico de 5 watts

Por las características de los sensores de efecto Hall, en la salida de estos se obtendrán señales de corriente, las cuales deberán ser procesadas para transformarlas en señales de tensión. Este proceso se realiza mediante una tarjeta denominada

“Tarjeta para conversión de señal de tensión”, la cual recibirá la señal a través de un conector Db9.

3.5.- Tarjeta para conversión de señal de tensión.

3.5.1.- Off-Set de una señal: El hardware Arduino solo puede leer señales de tensión analógicas y positivas de amplitud máxima 5V (es decir, la onda sinusoidal no puede tener polaridad negativa en ningún momento), es por esto que se requiere diseñar un circuito capaz de rectificar la onda para obtener una señal analógica positiva. A este proceso se le denomina off-set, el cual consiste en sumarle a la señal alterna una tensión continua, levantando así la señal como se observa en el ejemplo de la figura 3.4.

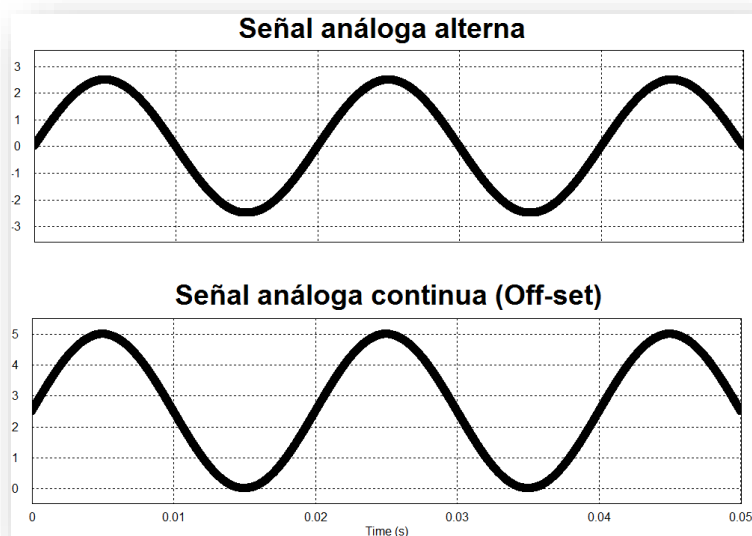


Figura 3.4 Ejemplo de Off-set (2.5 Vdc) a señal alterna

3.5.2.- Diseño del circuito: La salida del transductor será de una corriente con una magnitud de 25 mA rms, la que habrá que transformar en señal de tensión de 5V peak-to-peak. Por lo tanto, la resistencia de medición será de:

$$R_M = \frac{5V}{\sqrt{2} * 25mA} = 141,4 \Omega$$

Sin embargo, la corriente de salida del transductor puede variar por diversos factores, como variaciones en la tensión de medición debido a fluctuaciones en la red, temperatura de trabajo, ruidos, etc. Es por esto que la resistencia de medición será variable de 200 Ω , de manera que se pueda ajustar manualmente hasta obtener los 5 volts peak-to-peak requeridos para la medición de los 380 Volts rms en las líneas del motor.

Ahora, para la aplicación del off-set se implementa el siguiente circuito, cuyo esquema se presenta en la figura 3.5:

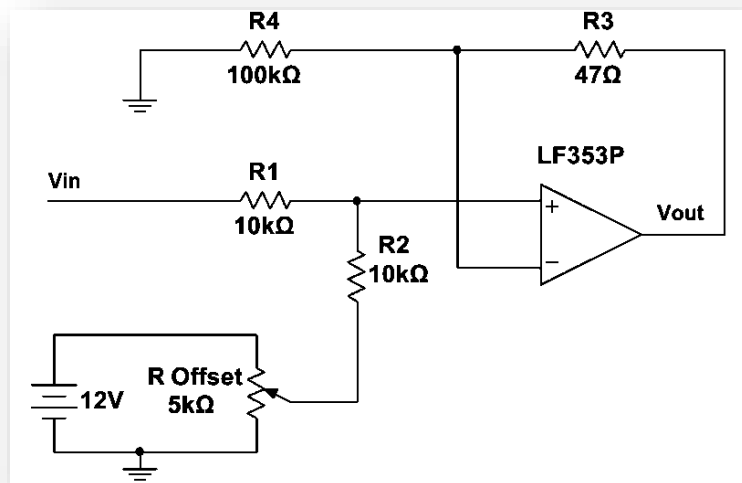


Figura 3.5 Esquema circuito Off-set señal 0-5 Volts p-p (voltaje)

El amplificador operacional (LF353) está en conexión no inversor, alimentado con una tensión de ± 18 V_{DC}. Además, el off-set será regulable mediante una resistencia variable de 5 k Ω , de manera de poder tener control sobre el levantamiento de la señal.

Así, la tarjeta para la conversión de señal de tensión nos queda como se muestra en la figura 3.6:

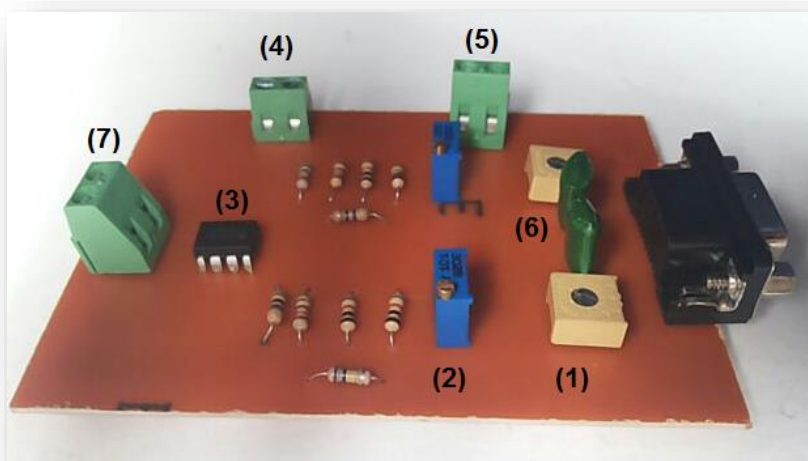


Figura 3.6 Tarjeta para conversión de señal de tensión

- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| (1) Resistencia Medición | (2) Resistencia Off-Set | (3) A.O. LF353 |
| (4) Entrada ± 18 V _{DC} | (5) Entrada ± 12 V _{DC} | (6) Capacitores Filtrado |

(7) Salida Señal

Finalmente, la señal analógica deberá llegar al hardware Arduino, el cual será programado de tal forma que cuando la señal tenga un valor máximo de 5V sea equivalente a 380V (eficaces).

La programación del hardware se tratará en el capítulo 4.

3.6.- Medición de corriente.

De la misma forma en que las tensiones necesarias para el cálculo de potencias varían dependiendo si el motor presenta una conexión delta o estrella, según las ecuaciones 3.1 y 3.2 las corrientes requeridas también obedecen a la conexión de la máquina. Es por esto que se necesitan las corrientes de línea y las corrientes de fase para el posterior cálculo de la potencia.

El sondeo se hará a las corrientes de línea del motor, y de estas se extraerán las corrientes de fase mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{bc} \\ I_b &= I_{bc} - I_{ca} \\ 0 &= I_{ab} + I_{bc} + I_{ca} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Matricialmente se tiene que:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_H \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Calculando la inversa de la matriz de transformación H y despejando:

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 2/3 & 1/3 \\ -2/3 & -1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Por último, multiplicando matricialmente se consigue que las corrientes de fase sean:

$$I_{ab} = 1/3 (I_a - I_b) \quad (3.15)$$

$$I_{bc} = 1/3 (I_a + 2I_b) \quad (3.16)$$

$$I_{ca} = -1/3 (2I_a + I_b) \quad (3.17)$$

Para la conexión estrella del motor se utilizan las corrientes de línea, debido a que estas coinciden con las de fase, sin embargo, para la conexión delta se emplean las corrientes de fase calculadas en las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17.

3.7.- Transductores de corriente LA 55-P.

La medición de las corrientes de línea en la entrada del motor de inducción se realiza por medio de transductores de corriente LA 55-P pertenecientes (al igual que los de voltaje) al fabricante norteamericano LEM®. Estos sensores basados en el efecto Hall poseen solo entradas de alimentación ($\pm 12 V_{DC}$) y una salida de corriente, mientras que el circuito primario está constituido únicamente por el conductor activo, idéntico a algunos transformadores de corriente. El sensor se muestra en la figura 3.7:



Figura 3.7 Transductor de corriente LA 55-P

El rango de medición de este sensor fluctúa entre los 0 y 70 Amperes (continuos o alternos), con una corriente nominal de 50 (A) rms, mientras que la salida posee una corriente nominal de 25 mA. El esquema del transductor de corriente se observa en la figura 3.8:

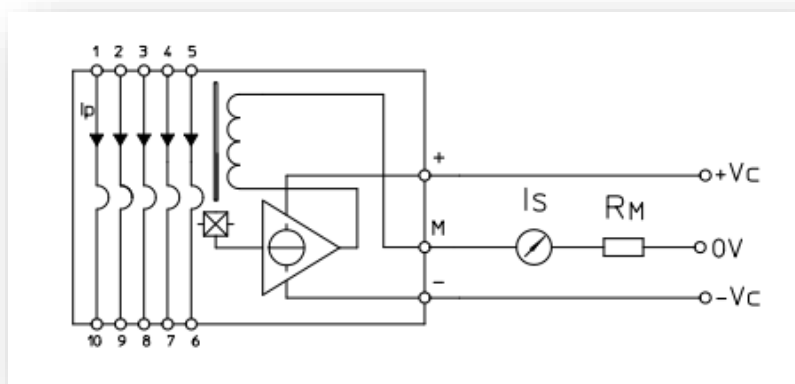


Figura 3.8 Esquema transductor de corriente LA 55-P

La resistencia de medición deberá ser calculada para obtener una magnitud de voltaje que el usuario desee, siempre y cuando esta no salga del rango de entre 10 y 100 Ω como se observa en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Características técnicas LA55-P

Rango Medición	0 ... ± 70 A
Corriente nominal de salida	50 mA
Relación de espiras	1:1000
Tensión de alimentación	± 12 V ($\pm 5\%$)
Linealidad	$< 0,15\%$
Temperatura de funcionamiento	de -40°C a $+90^{\circ}\text{C}$
Consumo de corriente	10mA + corriente de salida
Resistencia medición	10-100 Ω (Para medición de 50 A _{Máx})

3.8.- Tarjeta para medición de corriente.

Como se explicó en el punto 3.5, la medición de corriente se realizará a las tres líneas de entrada al motor, por lo cual será necesario utilizar tres transductores de corriente, como se observa en la figura 3.8:

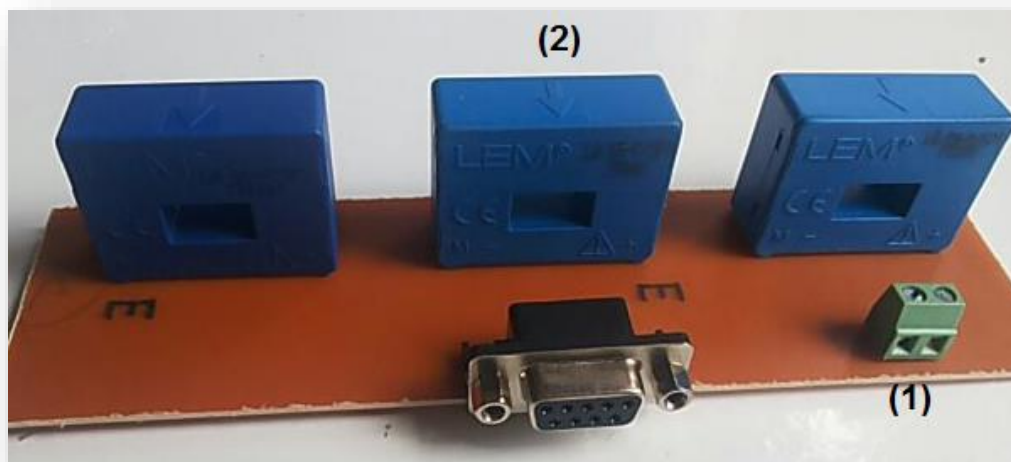


Figura 3.8 Tarjeta para medición de corriente

(1) Alimentación ± 18 Vdc (2) Transductores LA55-P

Las señales entregadas por los sensores serán llevadas a una tarjeta anexa (al igual que en la medición de tensión) llamada “Tarjeta para conversión de señal de corriente”, en la cual se transformará la onda analógica alterna en una señal legible por el software Arduino.

3.9.- Tarjeta para conversión de señal de corriente.

Anteriormente se dijo que Arduino solo puede procesar señales analógicas positivas, por lo que es necesario crear otra tarjeta para convertir las señales entregadas por los sensores de corriente. El diseño del circuito se muestra en la figura 3.9:

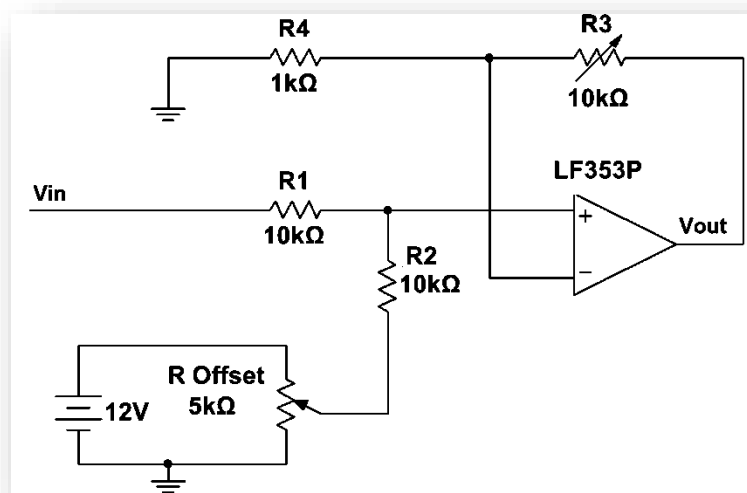


Figura 3.9 Esquema circuito Off-set señal 0-5 Volts p-p (corriente)

Como se ve en la figura 3.9, este circuito presenta una resistencia variable de 10 kΩ entre el pin negativo y la salida del LF353. Esto se debe a que si se toma en cuenta que la corriente nominal del transductor LA55-P es de 50A primarios, al medir los 5A nominales del motor en cuestión la señal de corriente entregada por el sensor será de tan solo 5 mA, que multiplicados por la resistencia máxima de medición (100 Ω) da un valor de 500 mV rms y 707 mV_{pp}. Así, si se considera que la señal de salida del amplificador operacional viene dada por:

$$V_0 = V_1 \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \quad (3.18)$$

Entonces para obtener 4V_{pp} se necesitará una ganancia igual a:

$$4 = 0,707 \left(1 + \frac{R_3}{1 \text{ k}\Omega}\right)$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que R₃ debe tener un valor aproximado de 4,66 kΩ.

El motivo de ajustar la tensión a solo 4V máximos es debido a que la resistencia de medición está en el valor máximo permitido por el fabricante (100Ω), por lo cual la señal se satura al tratar de superar los 4.5V (se deja en 4V para tener un margen de 0.5V en caso de que la carga del motor sea mayor a 5A).

El valor de la ganancia puede ser variada manualmente mediante la resistencia marcada con el símbolo (4) en la figura 3.10 que se muestra a continuación:

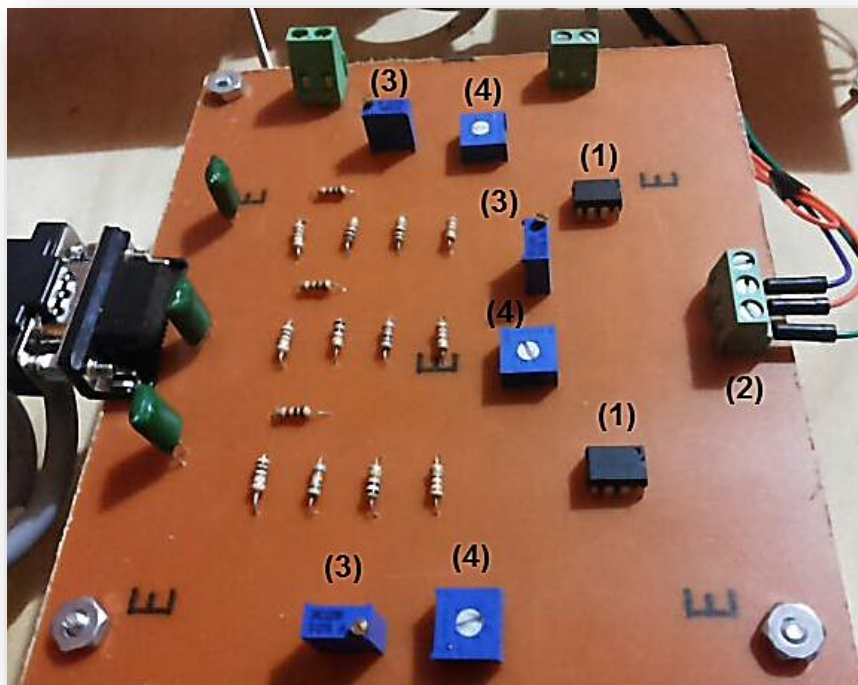


Figura 3.10 Tarjeta para conversión de señal de corriente

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| (1) LF353 | (2) Salida Señales |
| (3) Resistencias Off-set | (4) Resistencias Ganancia |

La programación de Arduino deberá contemplar que una tensión analógica de 4V máximos equivalga a que la corriente de línea del motor (o de fase, según corresponda) sea de 5A eficaces en el instante de la medición.

3.10.- Tarjeta para medición de velocidad.

En la ecuación 1.9 se muestra que para el cálculo de torque es necesario contar con la velocidad de rotación del motor. Por esto, se debe crear un sistema que posibilite medir esta velocidad en todo momento. Para ello se utilizará un fototransistor TCRT5000, el

cual es un sensor óptico reflexivo que consta de un emisor de radiación infrarroja -fotodiodo- y un receptor –fototransistor-. El fotodiodo emite un haz de radiación infrarroja mientras que el fototransistor recibe ese haz de luz cuando este se refleja sobre alguna superficie u objeto. Dependiendo de la cantidad de luz recibida por el fototransistor, el dispositivo envía una señal de retorno a Arduino.

Por lo tanto, se configura la conexión del TCRT5000 como una entrada digital de Arduino para distinguir dos estados: reflectivo o no reflectivo. Cuando el sensor está orientado hacia la superficie sin barrera (hueco o fisura de la barrera) el haz de luz se pierde en el espacio, por lo tanto el sensor envía un valor bajo (LOW- 0) a Arduino. A su vez cuando el sensor se sitúa sobre la superficie de la barrera, gran parte de la luz emitida por el diodo es reflejada al fototransistor. Entonces, el sensor envía un valor alto (HIGH – 1) a Arduino.

La barrera se divide en cuatro partes: habrá dos tramos con “huecos” de manera que en el momento en que el fototransistor apunte hacia él no habrá reflexión; y dos tramos con barrera reflectiva, por lo tanto, por cada giro del rotor, se enviarán dos pulsos altos a Arduino. Estos pulsos serán transformados internamente por Arduino a radianes/segundo, para posteriormente poder realizar el cálculo de torque.

En la figura 3.11 se observa el sistema de medición de velocidad completo.

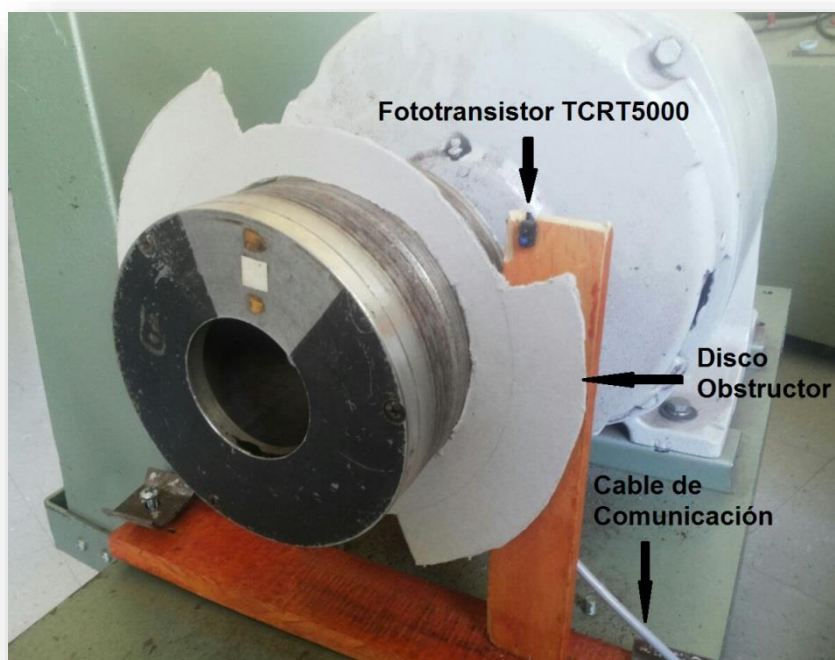


Figura 3.11 Sistema de medición de velocidad

3.11.- Tarjetas Adicionales.

Para poder alimentar los sistemas anteriormente descritos es necesario contar con una fuente de alimentación con las tensiones necesarias para alimentar, por ejemplo, a los transductores de tensión, los amplificadores operacionales o el mismo hardware Arduino. Por ello, se diseñan dos tarjetas de alimentación, que se describen a continuación.

3.11.1.- Fuente de Alimentación: Para poder alimentar los transductores de tensión y corriente es necesario contar con una fuente de alimentación de $\pm 12V$ continuos, y además, los amplificadores operacionales funcionan con una polarización de $\pm 18V$. Por lo tanto, se fabrica una fuente de alimentación con estas tensiones, como se muestra en la figura 3.12:

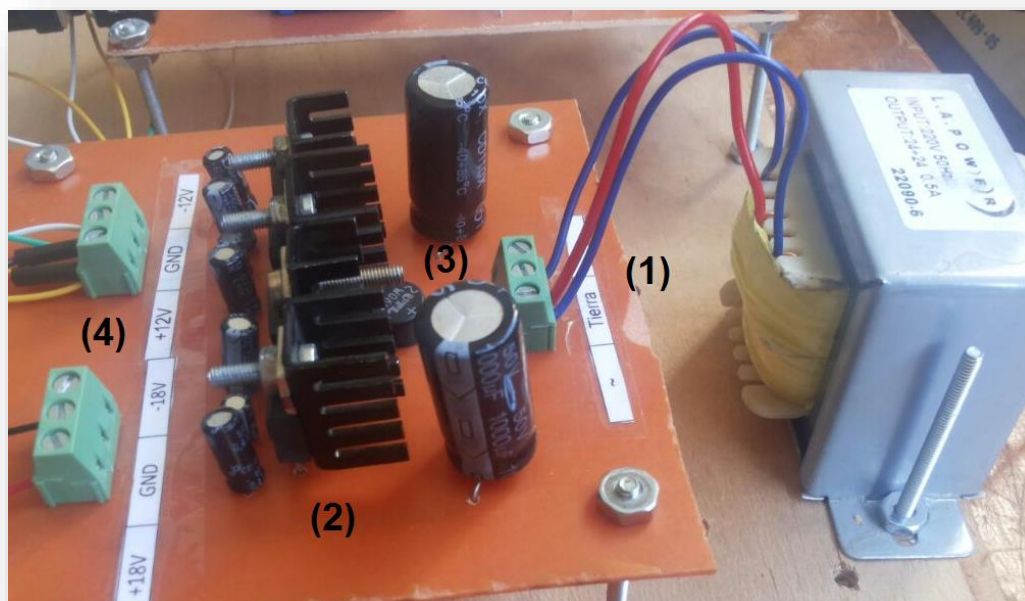


Figura 3.12 Fuente de Alimentación

- | | |
|----------------------------------|--|
| (1) Entrada 18-0-18 Vac | (2) Reguladores de Tensión |
| (3) Puente de Diodo Rectificador | (4) Salidas de $\pm 18V$ Vdc y $\pm 12V$ Vdc |

Los reguladores de tensión utilizados son los pertenecientes a la familia de reguladores LM78xx (LM7812 y LM7818 para los voltajes positivos) y los LM79xx (LM7912 y LM7918 para tensiones negativas).

3.11.2.- Tarjeta para Medición de Velocidad: El fototransistor TCRT5000 utilizado posee una conexión típica en la cual debe ser alimentado con +5 Vdc, además de llevar 2 resistencias en serie en sus salidas, según lo indicado en el datasheet. Por ello se construye una tarjeta especial para la medición de velocidad del motor, como se observa en la figura 3.13:

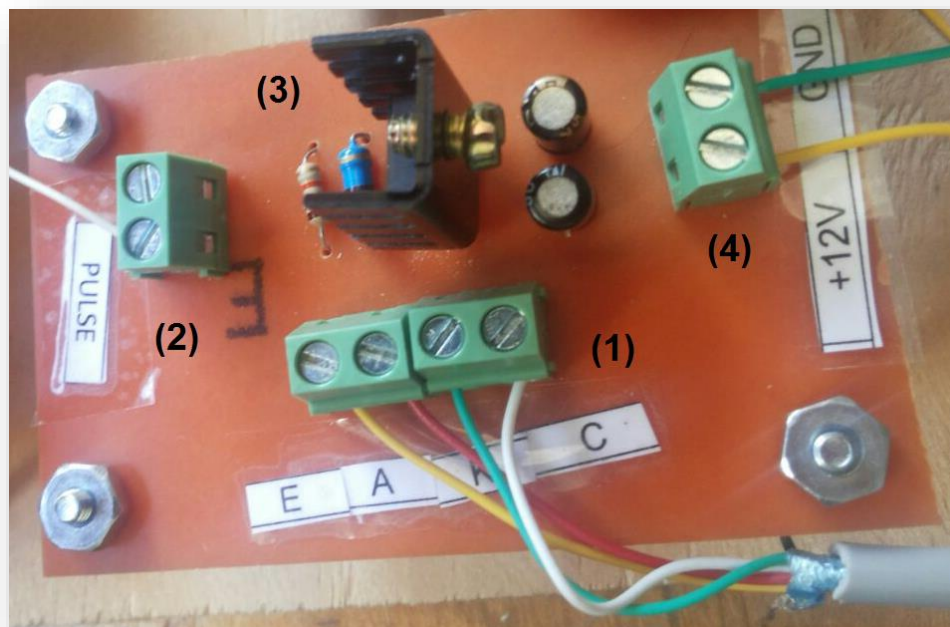


Figura 3.13 Tarjeta medición de velocidad

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| (1) Entradas y salidas fototransistor | (2) Salida de Pulso a Arduino |
| (3) Regulador de Tensión LM7805 | (4) Entrada +12 Vdc |

CAPÍTULO N°4
PROGRAMACIÓN ARDUINO

CAPÍTULO N°4

Programación Arduino

4.1.- Descripción General.

La programación de la plataforma Arduino es fundamental para el desarrollo de este proyecto, debido a que es aquí donde se concentran todas las señales analógicas y digitales de entradas para obtener, mediante las ecuaciones descritas con anterioridad, los valores de torque y potencia en el motor de inducción.

Para este caso, se desea programar al Arduino de tal forma que pueda medir torque y potencia, y además, se puedan mostrar estos valores en una pantalla lcd “Keypad Shield”.

Sin embargo, antes de programar, se debe tener algunas consideraciones, como por ejemplo, que al tratarse de una medición de torque y potencia en el eje de una máquina de inducción, a la potencia eléctrica de entrada se debe restar las pérdidas internas del motor, tales como pérdidas en el cobre, pérdidas magnéticas, pérdidas mecánicas, etc. Es por esto, que en primer lugar, y antes de programar, se calcularán estas pérdidas en un motor de inducción perteneciente al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Bío Bío. Este motor será utilizado en todos los ensayos posteriores que se realizan al medidor de torque y potencia descrito en este documento.

4.2.- Cálculo de Pérdidas en motor de inducción.

Las pérdidas internas de un motor se pueden obtener mediante el diagrama de círculo entregado comúnmente por el fabricante, sin embargo, al carecer de este documento, se pueden calcular las pérdidas aplicando los ensayos de vacío, rotor bloqueado al motor de inducción.

El motor a utilizar posee las siguientes características mostradas en la figura 4.1, disponible en la placa de datos del mismo.

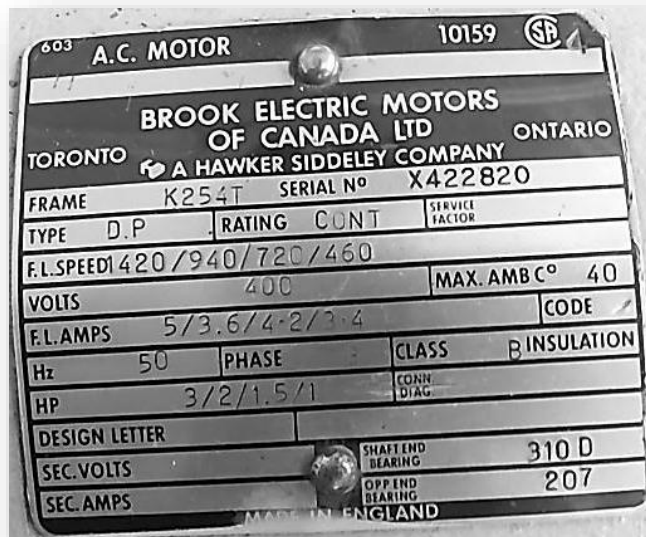


Figura 4.1 Placa de datos motor de inducción

Aquí, destacan principalmente la tensión y corriente nominal del motor (400 volts y 5A respectivamente), además de la potencia nominal en el eje del motor de 3 HP para una velocidad de 1420 RPM nominales (conexión de 4 polos).

4.2.1.- Prueba de corriente directa.

La prueba de corriente continua permite calcular el valor de la resistencia de estator R_1 independiente de R_2 , X_1 y X_2 . Consiste en aplicar corriente DC directamente en los devanados de estator del motor de inducción y, puesto que la corriente es DC, no se inducirán voltajes en el circuito de rotor y además la reactancia será igual a 0. Por consiguiente, la única cantidad que limitará el flujo de la corriente será la resistencia de estator. En la figura 4.2 se observa el esquema para la prueba de corriente directa.

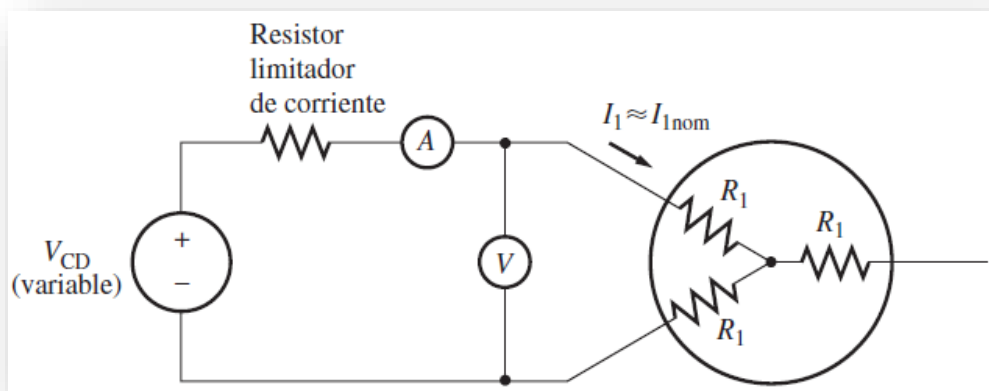


Figura 4.2 Prueba de corriente directa.

Los datos obtenidos del ensayo se presentan en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 Datos prueba corriente directa

Voltaje L-L	Corriente
47.1 (V)	3 (A)

Por lo tanto, la impedancia de los devanados por fase será:

$$R = \frac{V_{cc}}{2 \cdot I_{cc}} = 7,85 \Omega$$

Por otra parte, para confirmar que el cálculo de la resistencia sea correcto, se midió la resistencia estática con un puente de wheatstone, obteniendo una resistencia de aproximadamente 7,6 Ω .

4.2.2.- Ensayo de rotor libre.

Cuando el motor opera sin carga, la velocidad de rotación del rotor es prácticamente igual a la velocidad sincrónica, y toda la potencia consumida recae en las pérdidas mecánicas (pérdidas por roce y ventilación) más las pérdidas en el hierro. Al realizar el ensayo de rotor libre al motor en cuestión los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.1:

Tabla 4.1 Datos ensayo rotor libre

Voltaje L-L	Corriente	Velocidad	Potencia	Cos Φ
380 (V)	1.3 (A)	1499 (RPM)	180 (W)	0.22

Nota: El motor opera en conexión estrella.

Por lo tanto, las pérdidas serán:

$$P_{\text{pérdidas mecánicas}} = P_{Fe} + P_{\text{Roce y ventilación}} - P_{cu} = 180 - (3 \cdot 7.85 \cdot 1.3^2) \cong 140 \text{ (Watts)}$$

Debido a que la velocidad del motor varía muy poco ante distintos valores de cargas, las pérdidas mecánicas se supondrán constantes en todo momento.

4.3.- Código de programación.

4.3.1.- Selección de Conexión (Delta o Estrella): Al encender el medidor de torque, se deberá elegir la conexión del motor. Para ello se utilizará el teclado resistivo del LCD Keypad Shield conectado al pin analógico A5 de Arduino, el cual tiene las siguientes resistencias internas (figura 4.3):

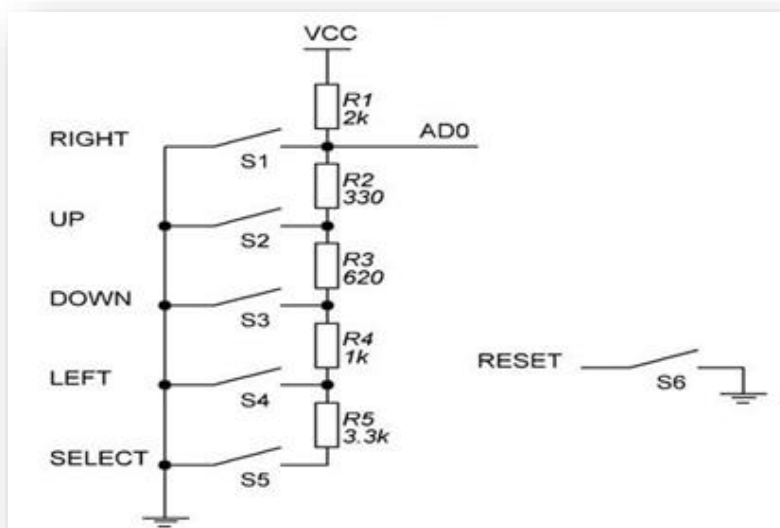


Figura 4.3 Teclado Resistivo LCD Keypad Shield

Por lo tanto, al presionar las diferentes teclas se obtendrán valores de tensiones distintas en la salida AD0, ya que el circuito resistivo está alimentado por una tensión Vcc de 5V DC. Esto le permitirá a Arduino diferenciar que tecla se está presionando.

Para esto, se establece en Arduino dos variables: Estrella o Delta. Estas variables serán del tipo Booleana, es decir, podrán ser verdaderas (true) o falsas (false), pero nunca iguales entre sí, ya que no se pueden escoger las dos opciones a la misma vez. Así, el código comienza de la siguiente forma:

```
If (Estrella == false && Delta == false) { // No se ha seleccionado ninguna opción aún
Int x = analogRead(A5); //La variable x es la lectura de la tensión proveniente del teclado
```

Como al encender el medidor de torque el cursor del LCD esta sobre la opción Estrella (como se observa en la figura 4.4), se tiene dos opciones: o elegir este tipo de conexión presionando la tecla Right (derecha), o cambiar a la opción Delta presionando los botones Up (arriba) o Down (Abajo).

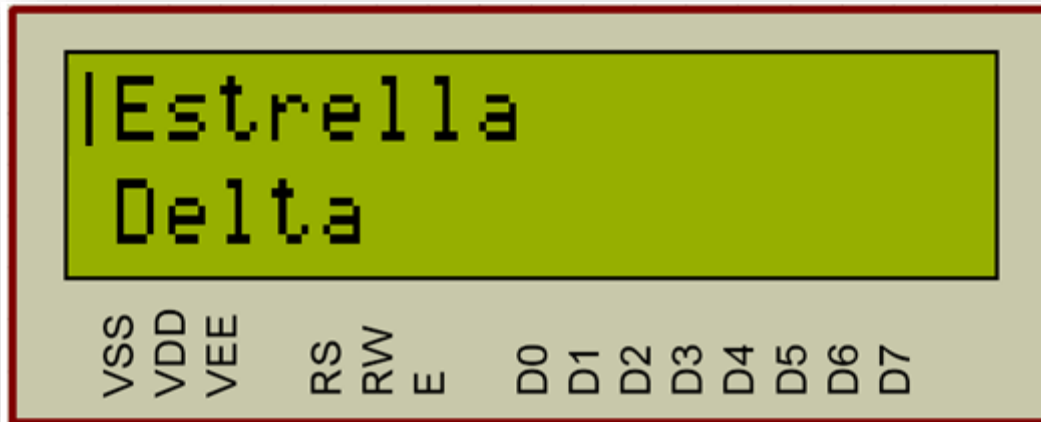


Figura 4.4 Menú de opciones de conexión (*imagen de referencia*).

```

if ( x < 100) {           // 100 es la cantidad de bites al presionar la tecla Right (derecha)
if ( estrellaSeleccionado == true) {
Estrella = True;           // se escogió la opción Estrella
Delta = False;
}
else {                    // si no se escoge la opción Estrella, se mueve el cursor
Estrella = false;
Delta = true;
}
}

else {                    // si no se elige la opción delta, se cambia a la siguiente conexión
if (x < 200 ){//up       // 200 es la cantidad de bites al presionar la tecla Up (arriba)
mostrarOpcioneE();      // se cambia el cursor a la opción Estrella
estrellaSeleccionado = true;
}
}

else {                    // si no se elige la opción estrella, se cambia a la opción Delta
if (x < 403){           // 403 es la cantidad de bites al presionar la tecla Down (abajo)
mostrarOpcioneD();      // se cambia el cursor a la opción Delta
estrellaSeleccionado = false;
}
}

```

```

}
else {
if (x < 603){           // 603 es la cantidad de bits al presionar la tecla Left (izquierda)
}

else {
if (x < 1000){         //1000 es la cantidad de bits al presionar la tecla Select
}
}
}
}
}
else {                 // ya se escogió una opción, comienza con la medición de señales

```

De esta forma, es posible moverse por las opciones disponibles en el Display gracias al teclado resistivo, y solo se seleccionará la preferencia al presionar la tecla Right (Derecha).

4.3.2.- Medición de corriente RMS: Además de mostrar el torque y la potencia, el LCD permitirá visualizar la magnitud eficaz (RMS) de la corriente de línea que está consumiendo el motor. Sin embargo, la corriente que entregará el transductor y que leerá en primer lugar la entrada digital del Arduino no será el valor rms, sino que será corriente instantánea. Para poder calcular la intensidad eficaz se tiene que:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (4.1)$$

Es decir, la corriente RMS es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un periodo.

Para calcular esta corriente, se realizarán 80 mediciones cada 250 μ s para completar un ciclo de la señal (20 ms). Así, el código queda:

```

for (byte cont=0;cont<80;cont++) {           //Bucle for

lecturas[cont]=analogRead(A2); // Lectura de la corriente proviene del pin Analógico A2

```

```

microsegundos delayMicroseconds(250); // Se toman 80 lecturas con un intervalo de 250
}
for (byte j=0;j<80;j++) // otro for para calcular los cuadrados
{

suma = suma + pow((lecturas[j] - 401),2); // calcula la suma de los cuadrados
// y se le resta el offset (401 bits)
}
rms=sqrt((suma/80)); // raíz cuadrada de la sumatoria

Iarms=rms*0.00473; // 0.00473 = constante transformación de bits a Amperes

suma=0; // comienza nuevamente la sumatoria

```

De esta forma, se obtiene el valor RMS de la corriente de línea consumida por el motor.

4.3.2.- Medición de potencia media: Los voltajes y las corrientes para el cálculo de la potencia serán:

```

Vab = analogRead(A0);
valorVab = map(Vab,10,1020,-537.4,537.4);

```

```

Vbc = analogRead(A1);
valorVbc = map(Vbc,10,1020,-537.4,537.4);

```

```

la = analogRead(A2);
valorla = map(la,10,810,-7.07,7.07);

```

```

lb = analogRead(A3);
valorlb = map(lb,10,800,-7.07,7.07);

```

```

lc = analogRead(A4);
valorlc = map(lc,10,800,-7.07,7.07);

```

Así, gracias a la función map(), se puede transformar los valores de bits a volt y amperes instantáneos. Por ejemplo, cuando la lectura de la entrada analógica A0 sea igual a 1020 bits esto se traduce en que en realidad Arduino está midiendo $380 \cdot \sqrt{2}$ V, o también, si midiera 510 bits (la mitad de 1020), esto es equivalente a que hay 0V. Así, se obtiene una señal analógica que fluctúa entre $\pm 380 \cdot \sqrt{2}$ V.

Para poder medir la potencia, es necesario establecer en primer lugar el tipo de conexión:

Si la conexión es estrella la potencia será: (como referencia, ver sección 3.2 y 3.6)

```
if( Estrella == true && Delta == false ){
    p1 = (0.333333* valorla *((2 * valorVab ) + valorVbc));           // potencia fase 1
    p2 = (0.333333* valorlb *((- valorVab + valorVbc)));           // potencia fase 2
    p3 = -(0.333333* valorlc *((2 * valorVbc) + valorVab));       // potencia fase 3

    pot = p1 + p2 + p3;
}
```

Mientras que si la conexión es Delta la potencia será:

```
if( Estrella == false && Delta == true ){
    p1 = (0.33333 * (valorla - valorlb) * valorVab);               // potencia fase 1
    p2 = (0.33333 * (valorla + (2 * valorlb)) * valorVbc);       // potencia fase 2
    p3 = (0.33333 * (valorlb + (2 * valorla)) * (valorVab + valorVbc)); // potencia fase 3

    pot = p1 + p2 + p3;
}
```

Sin embargo, al igual que con la corriente, la potencia calculada es la potencia instantánea consumida por la máquina de inducción. Para poder calcular la potencia media, se tiene la siguiente expresión:

$$Pot_{md} = \frac{1}{T} \int_0^T pot(t) dt \quad (4.2)$$

Según la expresión anterior, la potencia_{md} será la media de los valores instantáneos alcanzados durante un periodo. Entonces, se definen nueve mediciones de potencia durante un periodo de 110 μ s (la frecuencia de muestreo de Arduino es de 8.9 kHz). Por lo tanto, se tiene que:

```
pk8 = pk7;
pk7 = pk6;
pk6 = pk5;
pk5 = pk4;
pk4 = pk3;
pk3 = pk2;
pk2 = pk1;
pk1 = pot;
```

Donde pot es la lectura de la potencia instantánea, y las variables pk_i serán las encargadas de ir guardando los valores de las lecturas inmediatamente anteriores.

Luego, la sumatoria queda:

```
suma1= (pk1+ pk2+ pk3+ pk4+ pk5+ pk6+ pk7+ pk8);
potencia= suma1*0.00560287);
```

Donde 0.00560287 es el cociente entre el periodo de muestreo de Arduino y el periodo de la señal (110 μ S sobre 0.2 mS).

Después, se deben restar las pérdidas internas del motor, por lo tanto se tiene que:

```
potenciaAg= potencia-(3*7.86*Iarms*Iarms)-140; //7.86 es la resistencia de Estator
potenciarotor= potenciaAg*(1-S); // 140 son las pérdidas del Fe + Pmec
```

4.3.3.- Medición de Velocidad: La medición de velocidad se realiza mediante un fototransistor que envía pulsos de corriente continua de 0 o 5V. Por lo tanto, para poder calcular la velocidad a la que gira el motor, se debe detectar los cambios de estado en la entrada del pin digital (D2). El código queda así:

```
void inter0 (){ // Se activa cuando se detecta un cambio de estado en el pin D2
  cuenta++; // Una vez activo, incrementa la cuenta de interrupciones
  if (cuenta==2)
  {
    tiempo_rpm=millis()-tiempo_pasado;
    revoluciones=15000/tiempo_rpm; // La velocidad en RPM será el tiempo de muestreo
    // sobre el tiempo en que se mantiene cada
    // interrupción.

    cuenta=0;
  }
  if (cuenta==1)
  {
    tiempo_pasado=millis();
  }
}
```

Luego, para poder calcular el torque eléctrico y la potencia en el entrehierro es necesario calcular la velocidad en rad/seg y el deslizamiento de la máquina, por lo que se tiene que:

```
Wm = (revoluciones * 3.1415)/30.0; // Velocidad en Rad/Seg
S = (1500 - revoluciones)/1500.0; //Deslizamiento en base a vel. nominal de 1500 RPM
```

Finalmente, el torque eléctrico será:

$Torque = (potenciarotor/Wm);$

4.3.4.- Muestra de los valores en LCD: Para mostrar los valores calculados se conecta la pantalla en los pines digitales de Arduino, y se incluye la librería LiquidCrystal para que el hardware reconozca y pueda envíe los datos a la pantalla.

```
#include <LiquidCrystal.h>           //Librería para conexión del Display
```

```
LiquidCrystal lcd (8, 13, 9, 4, 5, 6, 7); //Pines digitales a los que está conectado el LCD
```

Luego, la disposición de las muestras es la siguiente:

```
void mostrar(float Iarms, int potencia, float torque){
  lcd.clear();
  lcd.noBlink();
  lcd.setCursor(0,0);           // Los valores se muestran en la primera fila del Display
  lcd.print("I:");
  lcd.print(Iarms,2);          // Se muestra la corriente de línea (en Amp) con 2 decimales
  lcd.write('A');
  lcd.print(" P:");
  lcd.print(potencia);        // Se muestra la potencia (en W) consumida por el motor
  lcd.write('W');
  lcd.setCursor(0,1);         // Los valores se muestran en la segunda fila del Display
  lcd.print("T:");
  lcd.print(torque);          // Se muestra el torque (en Nm) en el eje del motor
  lcd.write("Nm");
  delay(110);                 // retardo de 110 milisegundos para próxima muestra
}
```

Nota: El código completo de la programación del Arduino para el medidor de torque puede encontrarse en los Anexos de este documento.

CAPÍTULO N°5
CALIBRACIÓN Y PRUEBAS

CAPÍTULO N°5

CALIBRACIÓN Y PRUEBAS

5.1.- Calibración.

La señal analógica recibida por Arduino debe tener una magnitud peak-to-peak de 0 a 5V para los voltajes y 0 a 4V para las corrientes, por lo tanto, para poder calibrar el instrumento a distintos niveles de tensión y corriente es necesario realizar el siguiente procedimiento:

Nota: Para este proceso es necesario contar con un osciloscopio.

- a) **Calibración Tarjeta conversión de tensión:** Para calibrar la tarjeta de conversión de la señal de tensión, se deben conectar los transductores de tensión al voltaje requerido (en este caso, 380V con su respectiva polarización de $\pm 12V$ dc) y conectando las pinzas del osciloscopio en la resistencia de medición (ver Figura 3.6 “Tarjeta para conversión de señal de tensión”) se debe obtener una tensión de 5 volts peak-to-peak. En caso de no ser así, se deberá cambiar manualmente el valor de la resistencia de medición.

La calibración del off-set se realiza de la misma manera, acoplado las pinzas del osciloscopio ahora en la salida de la tarjeta en cuestión, y regulando manualmente la resistencia variable destinada al off-set (ver Figura 3.6) hasta obtener la tensión analógica continua deseada.

Los resultados de la calibración realizada se ve en la figura 5.1, donde se tiene una señal de 0-5 volts peak to peak:

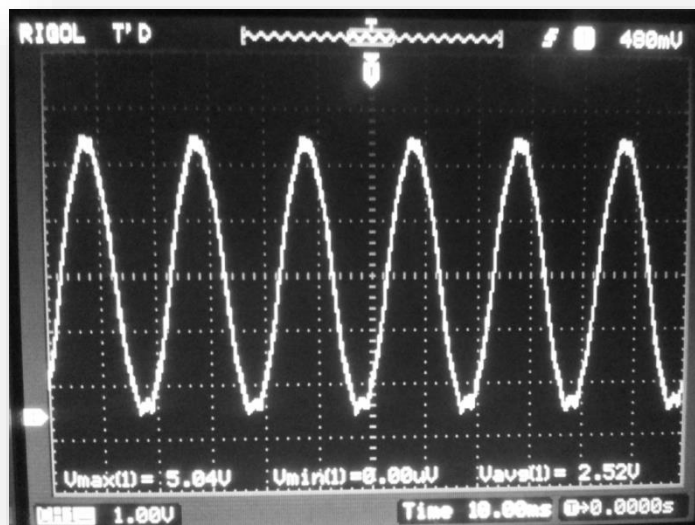


Figura 5.1 Calibración señal de medición Voltaje

b) Calibración Tarjeta conversión de corriente: En este caso, con los transductores de corriente alimentados con 5A primarios se deberá calibrar en primer lugar la resistencia variable destinada a la ganancia de la señal de salida (Figura 3.10), donde habrá que conectar el osciloscopio en la salida de la tarjeta y variar manualmente la resistencia hasta obtener una tensión análoga de 4 volts peak-to-peak.

La calibración del off-set se realiza de la misma manera que en la tarjeta de conversión de tensión.

Los resultados de la calibración a las tarjetas asociadas a la medición de corriente están presentes en la figura 5.2

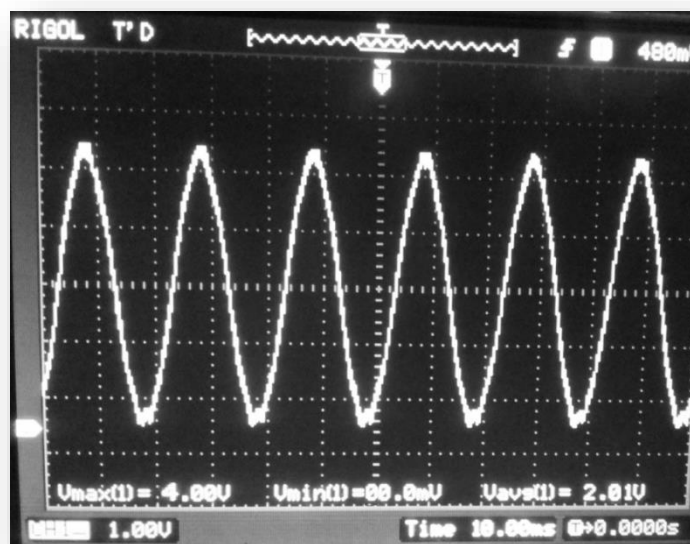


Figura 5.2 Calibración señal de medición Corriente

En caso de trabajar con motores con corrientes o voltajes nominales diferentes a las trabajadas en este informe, se deberá realizar el mismo procedimiento descrito en los puntos a) y b), y además se deberá ingresar los valores de voltaje corriente y velocidad nominal, resistencia devanado primario y pérdidas mecánicas en la programación de Arduino.

5.2.- Pruebas.

Las pruebas realizadas al motor de inducción especificado en la sección 4.2, arroja los siguientes resultados:

Prueba en Vacío: Al poner en marcha el motor en vacío, los valores entregados en la pantalla Lcd se muestran en la figura 5.3:



Figura 5.3 Valores prueba de vacío entregados por el medidor de torque

Mientras tanto, en las figuras 5.4 y 5.5 se observan los valores entregados por los instrumentos de medición pertenecientes al DIEE-UBB, los cuales además se tabulan en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Valores medidos por instrumentos de medición clásicos con motor de inducción en vacío

Corriente Línea 1	1.90 [A]
Potencia	500 [W]

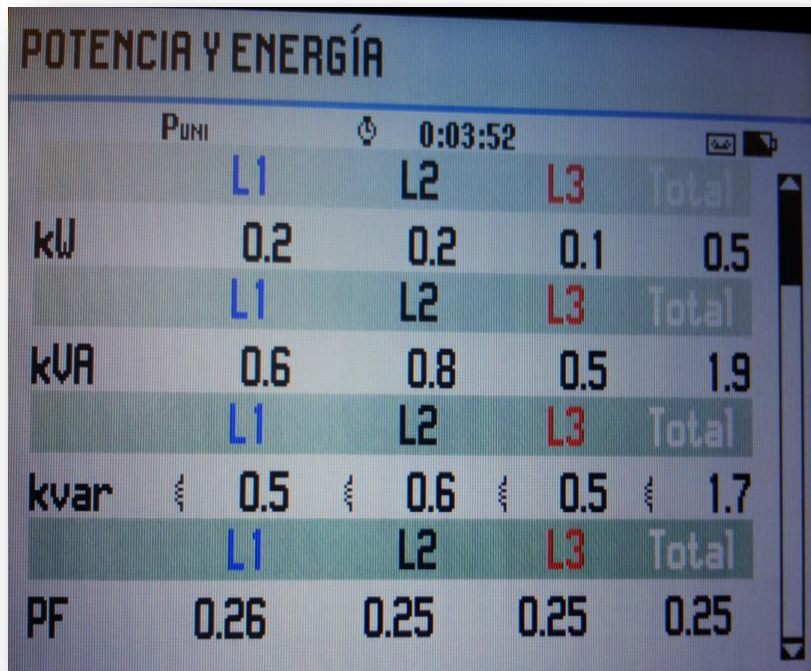


Figura 5.4 Valores de potencia Analizador Industrial Fluke 437 en prueba de vacío



Figura 5.5 Valores de corriente Amperímetro Analógico Yokogawa en prueba de vacío

En teoría, al estar en vacío el medidor debería marcar un torque igual a 0 Nm. Sin embargo, al tener otra máquina acoplada mecánicamente al motor de inducción, esta actúa como una carga del tipo fricción. De ahí que el medidor marque 2.5 Nm.

Prueba con Carga: Luego, al agregarle carga al motor, se observa en la figura 5.6 que los valores entregados por el instrumento de medición de torque y potencia son:



Figura 5.6 Valores prueba con carga entregados por el medidor de torque

Ahora, los instrumentos del laboratorio entregan las siguientes magnitudes tabuladas en la tabla 5.2 y mostradas en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9:

Tabla 5.2: Valores medidos por instrumentos de medición clásicos con motor de inducción con carga

Corriente Línea 1	3.55 [A]
Potencia	1900 [W]
Torque	8.1 [N.m]

POTENCIA Y ENERGÍA

PUNI 0:02:03

	L1	L2	L3	Total
kW	0.6	0.7	0.6	1.9
kVA	0.8	1.0	0.7	2.5
kvar	0.6	0.6	0.6	1.8
PF	0.70	0.73	0.76	0.73

Figura 5.7 Valores de potencia Analizador Industrial Fluke 437 prueba con carga

POTENCIA Y ENERGÍA

PUNI 0:02:03

	L1	L2	L3	Total
kW	0.6	0.7	0.6	1.9
kVA	0.8	1.0	0.8	2.5
kvar	0.6	0.6	0.6	1.8
PF	0.70	0.73	0.76	0.73

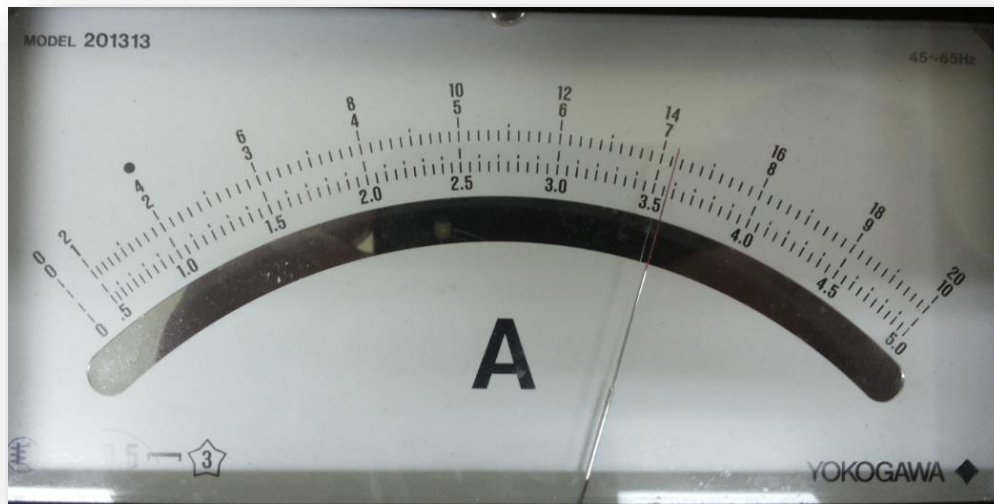


Figura 5.8 Valores de corriente Amperímetro Analógico Yokogawa en prueba con carga

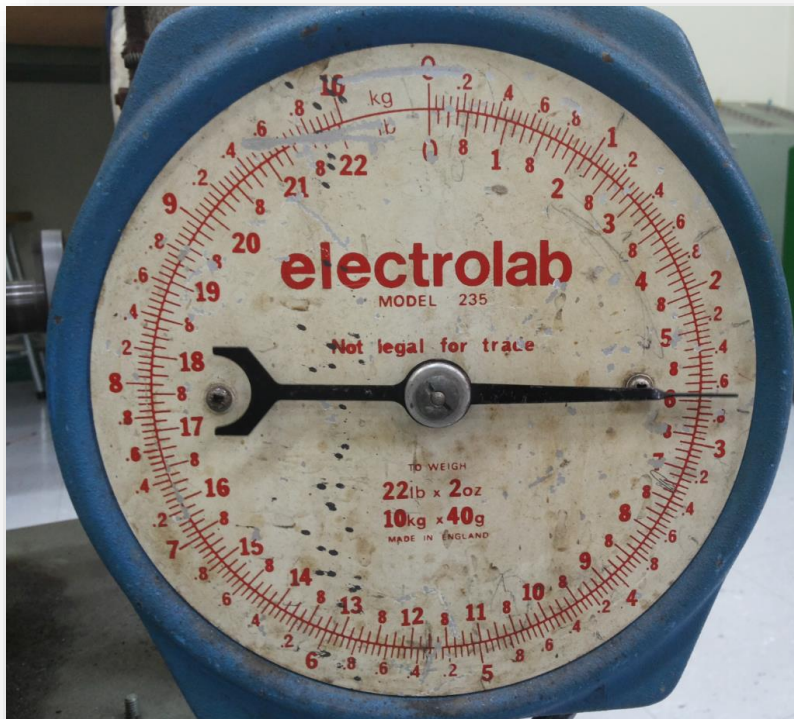


Figura 5.9 Valor de torque en prueba con carga

La medición mostrada en la figura 5.9 corresponde a una medición de kgf, por lo tanto para pasar de kgf a N es necesario multiplicar por 9.81 m/s^2 (aceleración de gravedad).

Por lo tanto, si la fuerza es de 2.7 kgf (aprox.), el resultado medido en N será:

$$\text{Fuerza} = 2.7 * 9.81 = 26.49 \text{ Newton}$$

Luego, para hallar el torque en Nm se debe multiplicar por la distancia (brazo) entre la balanza y el centro del eje del motor, que es de 0,3048 metros (1 pie), lo que finalmente resulta:

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} * \text{Distancia} \text{ (Nm)} \tag{5.1}$$

$$\text{Torque} = 26.49 * 0.3048 \approx 8.1 \text{ (Nm)}$$

Comparando los 8.1 (Nm) medidos por el dinamómetro con los 8.3 (Nm) medidos por el medidor de torque construido se puede concluir que ambas magnitudes son suficientemente similares para determinar que la medición es correcta.

CAPÍTULO N°6
COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

CAPÍTULO N°6

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

La estimación de torque y potencia es fundamental en motores de inducción, ya que de esta forma se puede saber el rendimiento en tiempo real de la máquina. Cualquier sobrecarga en el eje del motor puede ocasionar daños incluso irreparables en él, por lo cual se hace atractivo la construcción de un instrumento que permita estimar en todo momento el torque.

El instrumento desarrollado en este documento se realizó con ese fin, además de presentar una alternativa práctica a la medición de torque eléctrico. Su diseño lo respalda, puesto que se utilizaron las variables tanto eléctricas como mecánicas del motor, las cuales son de fácil acceso en un motor de baja potencia.

Sin embargo, para mayor comodidad, podrían utilizarse en su construcción futura sensores de corriente tipo tenazas, de esta forma se evitaría tener que abrir el circuito para poder instalar los transductores de intensidad del medidor de torque.

Luego de realizar las pruebas al instrumento de medición de torque y potencia y verificar su puesta en marcha, se pueden realizar las siguientes conclusiones respecto a su diseño y funcionamiento:

- La medición de torque y potencia debe realizarse con los valores obtenidos en el eje de la máquina, por lo que es necesario siempre considerar las pérdidas internas del motor. Además, es fundamental definir la conexión de la máquina de inducción, ya que de lo contrario se entregará un valor incorrecto en la pantalla lcd.
- Asimismo, la velocidad del motor debe medirse en tiempo real, ya que el torque medido depende estrictamente de esta variable. Además, la potencia en el rotor puede ser calculada únicamente teniendo el deslizamiento del motor, por lo tanto, es importante tener una precisa medición de esta variable.
- La utilización del hardware Arduino resulta de gran utilidad, debido a que recibe todas las señales medidas, y realiza todos los cálculos matemáticos para la obtención del torque y la potencia. Por otro lado, su sencillo lenguaje y fácil programación permiten a usuarios inexpertos familiarizarse rápidamente con el software Arduino.

- El instrumento de medición podría ser ampliado para mostrar en la pantalla lcd la velocidad o el factor de potencia al cual trabaja el motor. Sin embargo, al estar diseñado para mostrar los valores en un display de solo 16 caracteres y 2 líneas, resulta inadecuado en la pantalla utilizada. Sin embargo, esto es totalmente factible utilizando un display de mayor tamaño.
- Los resultados indican que la medición de corriente y potencia son casi iguales a la de los instrumentos de medición del laboratorio. Sin embargo, en la medición de torque hay una diferencia de 0.2 (Nm) que puede ser atribuido a diversos factores, entre ellos a la antigüedad de la balanza utilizada en la medición. No obstante, el error es menor al 3%, por lo tanto se concluye que es lo suficientemente exacto para fines prácticos.

REFERENCIAS

- [1] Stephen J. Chapman. “Máquinas Eléctricas”. McGraw-Hill. Quinta Edición. pág. 22.
- [2] Oscar Torrente Artero. “Arduino: Curso práctico de Formación”. Alfaomega. Primera Edición. 2013. pág. 63 - 66.
- [3] Jonathan Melgoza. (02 de Julio 2003). “Conociendo Arduino”. Extraído de: <https://jonathanmelgoza.com/blog/conociendo-arduino-placa/>.
- [4] National Instruments Electronics Workbench Group. “NI Multisim 14.0”. 2015. Página Web: <https://www.ni.com/multisim/>.

ANEXOS

Anexo 1.- Datasheet Transductores de tensión y corriente.

a) Datasheet transductor de tensión LV 25-P



Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal rms current	10	mA			
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA			
R_M	Measuring resistance	with ± 12 V	@ ± 10 mA _{max}	$R_{M \min}$	$R_{M \max}$	Ω
			@ ± 14 mA _{max}	30	190	Ω
		with ± 15 V	@ ± 10 mA _{max}	100	350	Ω
			@ ± 14 mA _{max}	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal rms current	25	mA			
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000				
U_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V			
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_S	mA			

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25 \text{ °C}$ @ ± 12 .. 15 V	± 0.9	%
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8 %
ϵ_L	Linearity error	< 0.2	%
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25 \text{ °C}$	Typ	Max
		± 0.06	± 0.15 mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	0 °C .. + 25 °C	± 0.25 mA
		+ 25 °C .. + 70 °C	± 0.10 / ± 0.35 mA
t_r	Step response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN}	40	µs

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_P	Resistance of primary winding @ $T_A = 70 \text{ °C}$	250	Ω
R_S	Resistance of secondary winding @ $T_A = 70 \text{ °C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997 UL 508: 2010	

Note: ¹⁾ $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_1 , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

b) Datasheet Transductor de tensión LA 55-P

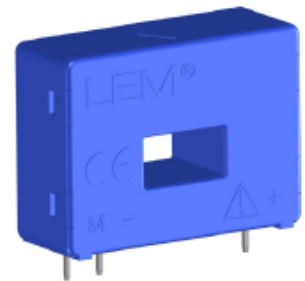


Current Transducer LA 55-P

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.



$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal rms current	50	A				
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 70	A				
R_M	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$		$T_A = 85^\circ\text{C}$			
			$R_{M\min}$	$R_{M\max}$	$R_{M\min}$	$R_{M\max}$	
		with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	10	100	60	95
			@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	10	50	60 ¹⁾	60 ¹⁾
	with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	50	160	135	155	
		@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	50	90	135 ²⁾	135 ²⁾	
I_{SN}	Secondary nominal rms current	50	mA				
K_N	Conversion ratio	1 : 1000					
U_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V				
I_C	Current consumption	$10 (@ \pm 15 \text{ V}) + I_S$	mA				

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.65	%
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.90	%
ϵ_L	Linearity error		<0.15	%
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	mA
I_{OM}	Magnetic offset current ³⁾ @ $I_p = 0$ and specified R_M , after an overload of $3 \times I_{PN}$		± 0.3	mA
			± 0.6	mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	-25 $^\circ\text{C}$.. +85 $^\circ\text{C}$	± 0.1	mA
		-40 $^\circ\text{C}$.. -25 $^\circ\text{C}$	± 0.2	± 1.0
t_{ra}	Reaction time	<500	ns	
t_r	Step response time to 90 % of I_{PN}	<1	μs	
dI/dt	dI/dt accurately followed	>200	A/ μs	
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 200	kHz	

General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 .. +85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-40 .. +90	$^\circ\text{C}$
R_S	Resistance of secondary winding	@ $T_A = 70^\circ\text{C}$	80
		@ $T_A = 85^\circ\text{C}$	85
m	Mass		18
		Standards	EN 50178: 1997

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Anexo 2.- Datasheet fototransistor TCRT5000.

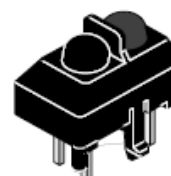


TCRT5000(L)
Vishay Telefunken

Reflective Optical Sensor with Transistor Output

Description

The TCRT5000(L) has a compact construction where the emitting-light source and the detector are arranged in the same direction to sense the presence of an object by using the reflective IR beam from the object. The operating wavelength is 950 nm. The detector consists of a phototransistor.



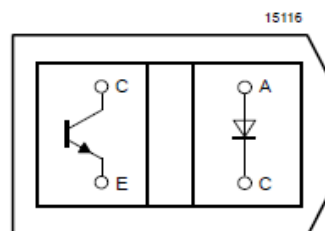
94 9442

Applications

- Position sensor for shaft encoder
- Detection of reflective material such as paper, IBM cards, magnetic tapes etc.
- Limit switch for mechanical motions in VCR
- General purpose – wherever the space is limited

Features

- Snap-in construction for PCB mounting
- Package height: 7 mm
- Plastic polycarbonate housing construction which prevents crosstalk
- L = long leads
- Current Transfer Ratio (CTR) of typical 10%



15116

Top view

Order Instruction

Ordering Code	Sensing Distance	Remarks
TCRT5000	12 mm	Leads (3.5 mm)
TCRT5000(L)	12 mm	Long leads (15 mm)

Absolute Maximum Ratings

Input (Emitter)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage		V_R	5	V
Forward current		I_F	60	mA
Forward surge current	$t_p \leq 10 \mu A$	I_{FSM}	3	A
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ C$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ C$

Output (Detector)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Collector emitter voltage		V_{CEO}	70	V
Emitter collector voltage		V_{ECO}	5	V
Collector current		I_C	100	mA
Power dissipation	$T_{amb} \leq 55^\circ C$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ C$

Typical Characteristics ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

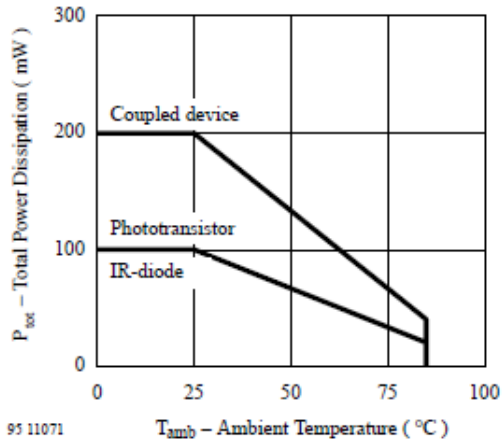


Figure 3. Total Power Dissipation vs. Ambient Temperature

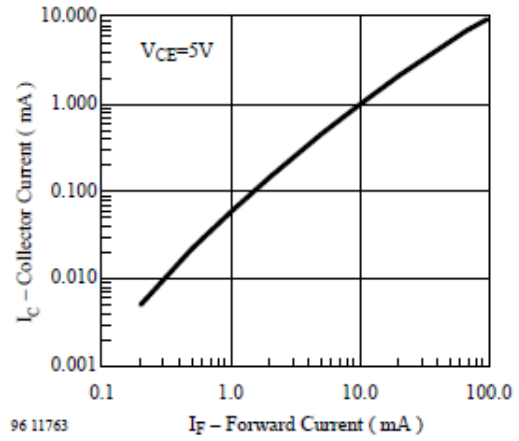


Figure 6. Collector Current vs. Forward Current

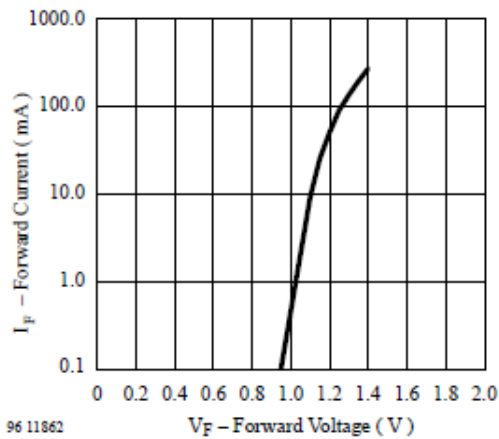


Figure 4. Forward Current vs. Forward Voltage

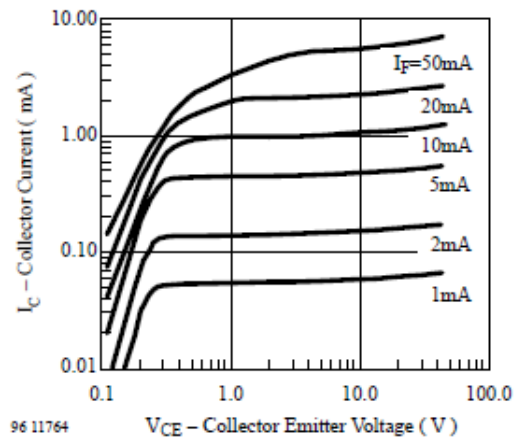


Figure 7. Collector Emitter Saturation Voltage vs. Collector Current

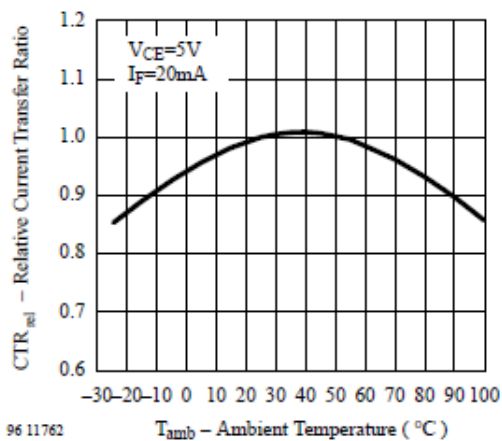


Figure 5. Rel. Current Transfer Ratio vs. Ambient Temp.

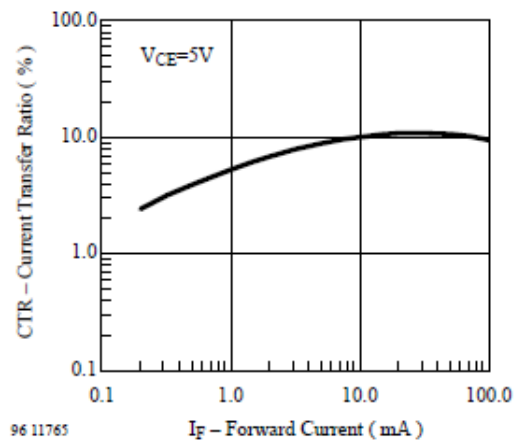




Figure 8. Current Transfer Ratio vs. Forward Current

Anexo 3.- Datasheet reguladores de tensión LM78XX.



September 2014



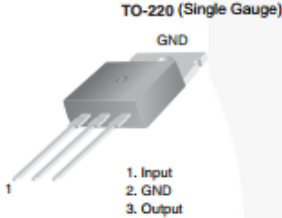
LM78XX / LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator

Features

- Output Current up to 1 A
- Output Voltages: 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24 V
- Thermal Overload Protection
- Short-Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The LM78XX series of three-terminal positive regulators is available in the TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down, and safe operating area protection. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1 A output current. Although designed primarily as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components for adjustable voltages and currents.



TO-220 (Single Gauge)

1. Input
2. GND
3. Output

Ordering Information⁽¹⁾

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature	Packing Method
LM7805CT	±4%	TO-220 (Single Gauge)	-40°C to +125°C	Rail
LM7806CT				
LM7808CT				
LM7809CT				
LM7810CT				
LM7812CT				
LM7815CT				
LM7818CT				
LM7824CT	±2%		0°C to +125°C	
LM7805ACT				
LM7809ACT				
LM7810ACT				
LM7812ACT				
LM7815ACT				

Note:
1. Above output voltage tolerance is available at 25°C.

LM78XX / LM78XXA — 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator

CARACTERISTICAS LM7812 Y LM7818:

Electrical Characteristics (LM7812)

 Refer to the test circuit, $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $V_I = 19\text{ V}$, $C_1 = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	11.5	12.0	12.5	V
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$, $P_O \leq 15\text{ W}$, $V_I = 14.5\text{ V to }27\text{ V}$	11.4	12.0	12.6	
Regline	Line Regulation ⁽¹²⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 14.5\text{ V to }30\text{ V}$	10	240	mV
			$V_I = 16\text{ V to }22\text{ V}$	3	120	
Regload	Load Regulation ⁽¹²⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	11	240	mV
			$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$	5	120	
I_Q	Quiescent Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		5.1	8.0	mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		0.1	0.5	mA
		$V_I = 14.5\text{ V to }30\text{ V}$		0.5	1.0	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift ⁽¹³⁾	$I_O = 5\text{ mA}$		-1		mV/ $^{\circ}\text{C}$
V_N	Output Noise Voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$		76		μV
RR	Ripple Rejection ⁽¹³⁾	$f = 120\text{ Hz}$, $V_I = 15\text{ V to }25\text{ V}$	55	71		dB
V_{DROP}	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2		V
R_O	Output Resistance ⁽¹³⁾	$f = 1\text{ kHz}$		18		m Ω
I_{SC}	Short-Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$		230		mA
I_{PK}	Peak Current ⁽¹³⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2.2		A

Electrical Characteristics (LM7818)

 Refer to the test circuit, $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $V_I = 27\text{ V}$, $C_1 = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	17.3	18.0	18.7	V
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$, $P_O \leq 15\text{ W}$, $V_I = 21\text{ V to }33\text{ V}$	17.1	18.0	18.9	
Regline	Line Regulation ⁽¹⁶⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 21\text{ V to }33\text{ V}$	15	360	mV
			$V_I = 24\text{ V to }30\text{ V}$	5	180	
Regload	Load Regulation ⁽¹⁶⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	15	360	mV
			$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$	5	180	
I_Q	Quiescent Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		5.2	8.0	mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 21\text{ V to }33\text{ V}$			1.0	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift ⁽¹⁷⁾	$I_O = 5\text{ mA}$		-1		mV/ $^{\circ}\text{C}$
V_N	Output Noise Voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$		110		μV
RR	Ripple Rejection ⁽¹⁷⁾	$f = 120\text{ Hz}$, $V_I = 22\text{ V to }32\text{ V}$	53	69		dB
V_{DROP}	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2		V
R_O	Output Resistance ⁽¹⁷⁾	$f = 1\text{ kHz}$		22		m Ω
I_{SC}	Short-Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$		250		mA
I_{PK}	Peak Current ⁽¹⁷⁾	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2.2		A

Anexo 4.- Datasheet reguladores de tensión LM79XX.



www.fairchildsemi.com

LM79XX

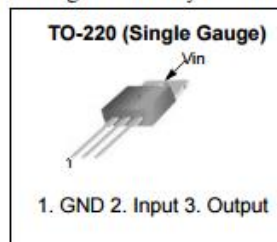
3-Terminal 1A Negative Voltage Regulator

Features

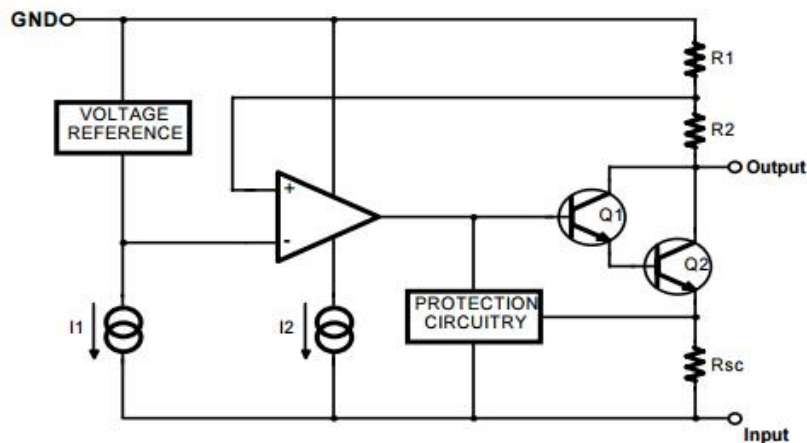
- Output Current in Excess of 1A
- Output Voltages of -5, -6, -8, -9, -10, -12, -15, -18 and -24V
- Internal Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Compensation

Description

The LM79XX series of three terminal negative regulators are available in TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible.



Internal Block Diagram



CARACTERISTICAS LM7912 Y LM7918:

Electrical Characteristics (LM7912) (Continued)

($V_I = -19V$, $I_O = 500mA$, $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$, $C_I = 2.2\mu F$, $C_O = 1\mu F$, unless otherwise specified.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	-11.5	-12	-12.5	V	
		$I_O = 5mA$ to 1A, $P_O \leq 15W$ $V_I = -15.5V$ to -27V	-11.4	-12	-12.6		
Line Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$V_I = -14.5V$ to -30V	-	12	240	mV
			$V_I = -16V$ to -22V	-	6	120	
Load Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 5mA$ to 1.5A	-	12	240	mV	
		$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 250mA$ to 750mA	-	4	120		
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^\circ C$	-	3	6	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5mA$ to 1A	-	0.05	0.5	mA	
		$V_I = -14.5V$ to -30V	-	0.1	1		
Temperature Coefficient of V_D	$\Delta V_O/\Delta T$	$I_O = 5mA$	-	-0.8	-	mV/ $^\circ C$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to 100kHz $T_A = +25^\circ C$	-	200	-	μV	
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $\Delta V_I = 10V$	54	60	-	dB	
Dropout Voltage	V_D	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 1A$	-	2	-	V	
Short Circuit Current	ISC	$T_J = +25^\circ C$, $V_I = -35V$	-	300	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^\circ C$	-	2.2	-	A	

Electrical Characteristics (LM7918) (Continued)

($V_I = -27V$, $I_O = 500mA$, $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$, $C_I = 2.2\mu F$, $C_O = 1\mu F$, unless otherwise specified.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	-17.3	-18	-18.7	V	
		$I_O = 5mA$ to 1A, $P_O \leq 15W$ $V_I = -22.5V$ to -33V	-17.1	-18	-18.9		
Line Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$V_I = -21V$ to -33V	-	15	360	mV
			$V_I = -24V$ to -30V	-	8	180	
Load Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 5mA$ to 1.5A	-	15	360	mV	
		$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 250mA$ to 750mA	-	5	180		
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^\circ C$	-	3	6	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5mA$ to 1A	-	0.05	0.5	mA	
		$V_I = -21V$ to -33V	-	0.1	1		
Temperature Coefficient of V_D	$\Delta V_O/\Delta T$	$I_O = 5mA$	-	-1	-	mV/ $^\circ C$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to 100kHz $T_A = +25^\circ C$	-	300	-	μV	
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $\Delta V_I = 10V$	54	60	-	dB	
Dropout Voltage	V_D	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 1A$	-	2	-	V	
Short Circuit Current	ISC	$T_J = +25^\circ C$, $V_I = -35V$	-	300	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^\circ C$	-	2.2	-	A	

Anexo 5.- LCD Keypad Shield.



Arduino LCD Keypad Shield

This is a 16x2 LCD and Keypad shield for Arduino Uno, Diecimila, Duemilanove and Freeduino boards.

- Blue Backlight with white words
- uses 4 Bit Arduino LCD Library
- Left, Right, Up, Down and Select buttons
- Screen contrast adjustment
- Arduino Reset button

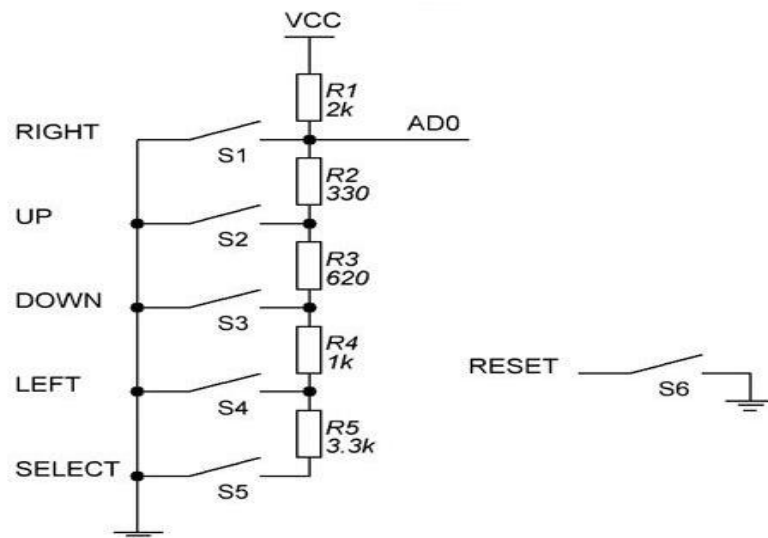
The board uses different pins to the Arduino example sketches, so to make the display work, use the following sequence of pins when starting the library:

```
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
```

The buttons are connected to only one analog input pin through resistors to give a different voltage for each button, thus saving on input/output pins. Reading the buttons is easy and example code is shown below

Pin Connections

Pin	Function
Analog 0	Buttons (select, up, right, down and left)
Digital 4	DB4
Digital 5	DB5
Digital 6	DB6
Digital 7	DB7
Digital 8	RS (Data or Signal Display Selection)
Digital 9	Enable



Anexo 6.- Programación completa de Arduino.

```

#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(8, 13, 9, 4, 5, 6, 7);

float corrienteIa;
float Iarms;

int lecturas[80];
unsigned long suma=0;
float rms=0;

float pk1=0, pk2=0, pk3=0, pk4=0, pk5=0, pk6=0, pk7=0, pk8=0;
unsigned long suma1=0;
float pot;

float Vab;
float Vbc;
float Ia;
float Ib;
float Ic;
float valorVab;
float valorVbc;
float valorIa;
float valorIb;
float valorIc;

float Vca;
float Iavg;
float Ia;

float p1;
float p2;
float p3;
float potenciamedia;
float potencia;
float potenciaAg;
float potenciarotor;
float torque;

int pulsadores = A5;
bool Estrella=false;
bool Delta=false;
bool estrellaSeleccionado = true;

```

```

unsigned long tiempo_pasado=0, tiempo_rpm=0;
int revoluciones=0, tiempo=0, cuenta=0;
int RPM;
float S;
float Wm;

void setup() {
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);
  pinMode(A3, INPUT);
  pinMode(A4, INPUT);
  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(0, inter0, RISING);
  pinMode(pulsadores, INPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);
  mostrarOpcioneE();
}

void mostrar(float Iarms, int potencia, float torque){
  lcd.clear();
  lcd.noBlink();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("I:");
  lcd.print(Iarms, 2);
  lcd.write('A');
  lcd.print(" P:");
  lcd.print(potencia);
  lcd.write('W');
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("T:");
  lcd.print(torque);
  lcd.write("Nm");
  delay(110);
}

void mostrarOpcioneE() {

  lcd.clear();
  lcd.noBlink();
  lcd.home();
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("Estrella");
  lcd.setCursor(1, 1);
  lcd.print("Delta");
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.blink();
  delay(200);
}

```

```

void mostrarOpcioneD() {

    lcd.clear();
    lcd.noBlink();
    lcd.home();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("Estrella");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("Delta");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.blink();
    delay(200);
}

void inter0 () {
    cuenta++;
    if (cuenta==2)
    {
        tiempo_rpm=millis()-tiempo_pasado;
        revoluciones=15000/tiempo_rpm;
        cuenta=0;
    }
    if (cuenta==1)
    {
        tiempo_pasado=millis();
    }
}

float fmap(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max) {
    return(x-in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

void loop() {

if(Estrella == false && Delta == false){
    int x = analogRead(pulsadores);
    Serial.println(x,DEC);
    //mostrarOpcioneE();
    if(x < 100){//right
        if(estrellaSeleccionado == true){
            Estrella = true;
            Delta = false;
        }
    }
}
}

```

```

else{

  if ((revoluciones==1) || (revoluciones==15000))
  {
    revoluciones=0;
  }

  Wm =(revoluciones * 3.1415)/30.0;
  S = (1500 - revoluciones)/1500.0;

  for(byte cont=0;cont<80;cont++)
  {
    lecturas[cont]=analogRead(A2);
    delayMicroseconds(250);
  }
  for(byte j=0;j<80;j++)
  {

    suma=suma+pow((lecturas[j]-401),2);

  }
  rms=sqrt((suma/80));
  Iarms=rms*0.00473;

suma=0;

  Vab = analogRead(A0);
  valorVab = fmap(Vab,10,1020,-537.4,537.4);

  Vbc = analogRead(A1);
  valorVbc= fmap(Vbc,10,1020,-537.4,537.4);

  la = analogRead(A2);
  valorla = fmap(la,10,810,-7.07 ,7.07);

  lb = analogRead(A3);
  valorlb = fmap(lb,10,800,-7.07 ,7.07);

  lc = analogRead(A4);
  valorlc = fmap(lc,10,800,-7.07 ,7.07);

```

```

    if(Estrella==true && Delta==false){
    p1 = (0.333333*valorla*((2*valorVab)+valorVbc));
    p2 = (0.333333*valorlb*((-valorVab+valorVbc)));
    p3 = -(0.333333*valorlc*((2*valorVbc)+valorVab));
    pot = p1 + p2 + p3;
    }
else{
    if(Estrella == false && Delta == true){
    p1 = (0.33333*(valorla-valorlb)*valorVab);
    p2 = (0.33333*(valorla+(2*valorlb))*valorVbc);
    p3 = (0.33333*(valorlb+(2*valorla))*(valorVab+valorVbc));

    pot = p1 + p2 + p3;
    }
}

sumal= ((pk1+ pk2+ pk3+ pk4+ pk5+ pk6+ pk7+ pk8)*0.00560287) ;

potencia= sumal;

pk8=pk7;
pk7=pk6;
pk6=pk5;
pk5=pk4;
pk4=pk3;
pk3=pk2;
pk2=pk1;
pk1=pot;

potenciaAg= potencia-(30*Iarms*Iarms)-140;
potenciarotor= potenciaAg*(1-S);

torque= ((potenciarotor/Wm))

Vca= -(valorVab+valorVbc);

bool mostrarEnLcd = true;
mostrar(Iarms,potencia, torque);

}
}

```

Anexo 7: Fotografía medidor de torque y potencia

