

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**CONTROL DE UN MOTOR DE C.D BASADO EN TARJETAS DE
ADQUISICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA

TIZOC LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR DE TESIS

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

DICIEMBRE DEL 2007

“Y cuando la tomé en mis manos pense: qué fuerza irresistible y sin sentido puede mantener la aguja...”

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

*Ningún carácter aquí impreso o conjunto de los mismos puede expresar el Amor y agradecimiento recurrente que le tengo a la persona que me aplaudió antes de que yo mostrase resultado alguno: Sin duda es a mi Madre **Melania López Lázaro**; quien a diario ha dejado gran parte de su vida brindándome ese apoyo especial y único, el cual ha sido un crisol ante las tribulaciones que he tenido en la vida. Ahora que plasmo algunas palabras se me vienen a la mente cantidad de ocasiones en las que una y otra vez me ayudo a resolver mis problemas generados por la inmadurez, lo que al instante produce en mi 1729 sensaciones de alegría interna que hacen que el llanto acuda a nublar mis pupilas.*

*A mi Padre **José Ricardo López Cervantes** quien desde niño me enseñó el respeto a las personas y 1729 oficios que me han sido útiles al paso de los años. Confieso que aunque coincido en que las copias siempre serán malas me siento orgulloso de tener un semblante similar al de mi padre. Y como olvidar aquellos días en los que solía traer una trenza en mi espalda similar a él, pasan los años y ambos nos hemos despojado de aquella cabellera, sin embargo mantenemos la misma intención de querer ser diferentes.*

*A tod@s y cada un@ de mis herman@s con quien fui creciendo y compartiendo cantidad enorme de experiencias buenas y malas. No soy el menor ni el mayor, pero he observado que tengo cualidades de tod@s y cada uno de ell@s: De mi hermana mayor **Melania** tengo esa chispa de querer ser mejor a diario, de mi hermana **Maria del Refugio** el dar sin mirar a quien y un par de lunares de marca registrada, de mi hermana **Marisol** sin duda la humildad, de mi hermana **Zulma** el respeto y la cordura, de mi hermano **Anibal** parte de su humor cantinflesco, de mi hermano **Rimel** la risa y el gusto por la vida, de mi hermano **José Guadalupe** la astucia y finalmente de mi hermano menor **Ricardo** la juventud. A tod@s ell@s 1729 gracias por apoyarme a diario...La fe que me tienen, la tengo en ustedes.*

También quiero agradecer enormemente a tod@s mis maestr@s durante mi larga condición de alumno, que sin su ayuda y orientación me hubiese quedado en una simple estadística. Gracias por animarme a mejorar un 6, mantener un 10 y por enseñar y compartir situaciones que son ajenas a la escuela, pero no ha la vida.

*Finalmente mi agradecimiento a tod@s mis compañer@s y amig@s con los que compartí más de un salón de clase, un almuerzo, la combi, una cancha, un viaje, el cine y tantas cosas que no acabaría de enumerar. En especial de mis amigos a **Ovedt** quien me animo a entrar a la universidad.*

A tod@s 1729 gracias...

RESUMEN

CONTROL DE UN MOTOR DE CD BASADO EN TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

En el presente Trabajo se muestra la implementación de diferentes controles aplicados a un motor de Corriente Directa (CD), ello para controlar la velocidad del mismo. Para los diferentes controles implementados se hace uso de dos tarjetas de adquisición de datos: Para medir la velocidad del motor se utiliza la tarjeta de **National Instrument**™ **NI USB-6008** y para medir la corriente del motor se utiliza la tarjeta **LabPro**® de **Vernier**. Además se realiza un programa computacional en el lenguaje de programación gráfica **LabVIEW**™ **7.0** para manejar y observar de forma virtual el comportamiento de la velocidad y corriente del motor, además de observar la respuesta de los diferentes controles de velocidad implementados.

Se muestra desde el control en lazo abierto para el control de la velocidad del motor, hasta el control por retroalimentación de estados pasando por el control Proporcional (P), el control Proporcional Integral (PI) y el control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Cabe señalar, que todos los controles son implementados de forma experimental haciendo uso de las tarjetas de adquisición de datos, sensores de corriente, sensores velocidad (encoder del motor). Sin conocer modelos matemáticos del motor y otras partes del sistema.

CONTENIDO

Pág.

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES.....	xii

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos de la tesis.....	2
1.3 Descripción de los capítulos.....	2

Capítulo 2 Antecedentes de Control de Motores de CD

2.1 Principio de funcionamiento de un motor de CD.....	3
2.2 Antecedentes sobre control de motores.....	4
2.2.1 Control mediante tiristores.....	4
2.2.2 Control de velocidad monofásico y de media onda para un motor de... CD en derivación.	5
2.2.3 Control reversible de velocidad.....	6
2.2.4 Control mediante modulación por ancho de pulso (PWM).....	7

Capítulo 3. Control de la Velocidad del Motor de CD en Lazo Abierto

3.1 Introducción.....	9
3.2 Necesidad de un control de velocidad.....	9
3.3 Esquema propuesto para un control en lazo abierto.....	10
3.4 Etapa de acondicionamiento.....	10
3.5 Uso de instrumentación virtual.....	12

3.5.1 Descripción de los bloques de la tarjeta NI USB-6008.....	13
3.5.2 Descripción de los bloques de la tarjeta Vernier LabPro.....	14
3.5.3 Descripción del panel frontal del programa en LabVIEW.....	15
3.5.4 Descripción del diagrama de bloques del programa en LabVIEW.....	16
3.6 Estructura final del control en lazo abierto.....	17
3.7 Etapa de acondicionamiento para medir la velocidad del motor.....	17
3.8 Funcionamiento del convertidor de frecuencia a voltaje..... F/V.	18
3.9 Etapa de acondicionamiento para elevar el voltaje del convertidor.....	19
3.10 Etapas para medir velocidad y corriente del motor.....	20
3.11 Pruebas al control en lazo abierto del motor.....	21

Capítulo 4. Implementación de Controles en Lazo Cerrado aplicados a un Motor de CD.

4.1 Introducción.....	29
4.2 Sistema en lazo cerrado.....	30
4.3 Control de la velocidad en lazo cerrado.....	31
4.4 Control Proporcional (P).....	33
4.4.1 Control de la velocidad del motor utilizando el control..... Proporcional (P).	33
4.4.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del..... control Proporcional (P).	34
4.4.3 Pruebas al control Proporcional (P) para el control de la..... velocidad del motor.	36
4.5 Control Proporcional Integral (PI).....	41
4.5.1 Control de velocidad del motor utilizando el control Proporcional..... Integral (PI).	42
4.5.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del control..... Proporcional-Integral (PI).	43

4.5.3 Pruebas al control Proporcional-Integral (PI) para el control de la.....	44
velocidad del motor.	
4.6 Control Proporcional Integral Derivativo (PID).....	54
4.6.1 Control de velocidad del motor utilizando el control Proporcional.....	54
Integral Derivativo (PID).	
4.6.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del control.....	55
Proporcional-Integral-Derivativo (PID).	
4.6.3 Pruebas al control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para el.....	56
control de la velocidad del motor.	
4.7 Control por Retroalimentación de estados.....	62

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Conclusiones.....	65
Apéndices.....	67
Fotografías.....	72
Referencias.....	73

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 Principio de funcionamiento del motor de CD.....	3
2.2 SCR en serie con la armadura para controlar la velocidad del motor de CD.....	4
2.3 Sistema de control monofásico y de media onda para controlar la velocidad de un motor..	5
de CD.	
2.4 Sistema de manejo reversible de onda completa por SCR: (a) circuito de control del.....	6
arrancador del motor; (b) circuito de armadura.	
2.5 Sistema básico de control de potencia mediante PWM.....	7
3.1 Diagrama de las características generales de la etapa de acondicionamiento.....	10
3.2 Configuración de la etapa de acondicionamiento.....	11
3.3 Bloque de voltaje analógico de salida de la tarjeta NI USB-6008	13
3.4 Bloque de voltaje analógico de entrada de la tarjeta NI USB-6008	13
3.5 Bloques de la tarjeta Vernier LabPro para manejarlo con LabVIEW.....	14
3.6 Panel frontal del control en lazo abierto en LabVIEW.....	15
3.7 Diagrama de bloques del control en lazo abierto en LabVIEW.....	16
3.8 Sistema de lazo abierto para el control de la velocidad del motor de CD.....	17
3.9 Configuración del convertidor de frecuencia TC9402	18
3.10 Etapa de acondicionamiento para aumentar el voltaje del convertidor F/V.....	19
3.11 Etapas para medir la velocidad y corriente del motor.....	20
3.12 Comportamiento del convertidor de frecuencia.....	21
3.13 Comportamiento de las variables del motor a 2.4 volts en terminales.....	22
3.14 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 2.4 volts.....	23
3.15 Comportamiento de la corriente del motor a 2.4 volts en terminales.....	23
3.16 Comportamiento de las variables del motor con 5.0 volts en terminales.....	24
3.17 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 5.0.....	24
3.18 Comportamiento de la corriente del motor a 5.0 volts en terminales.....	25
3.19 Comportamiento de las variables del motor con 7.0 volts en terminales.....	25
3.20 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 7.0 volts.....	26
3.21 Comportamiento de la corriente del motor a 7.0 volts en terminales.....	26
3.22 Comportamiento de las variables del motor con 10.0 volts en terminales.....	27
3.23 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 10volts.....	28
3.24 Comportamiento de la corriente del motor a 10.0 volts en terminales.....	28
4.1 Diagrama de bloques de un sistema con retroalimentación simple.....	30

4.2 Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado propuesto para el control de la.....	31
velocidad del motor.	
4.3 Imagen de la prueba realizada para obtener la ecuación que define el comportamiento....	31
del motor.	
4.4 Diagrama de bloques que representa el control Proporcional (P).....	33
4.5 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW para el control Proporcional (P).....	34
4.6 Comportamiento de la velocidad del motor al colocar 600 RPM en la referencia.....	36
4.7 Comportamiento del voltaje aplicado al motor colocando 600 RPM en la referencia.....	37
4.8 Comportamiento del voltaje a la salida el convertidor de F/V colocando 600 RPM en la..	37
referencia.	
4.9 Comportamiento de la corriente del motor colocando 600 RPM en la referencia.....	38
4.10 Comportamiento de la velocidad del motor colocando 875 RPM en la referencia.....	38
4.11 Datos del comportamiento de las variables del motor colocando 875 RPM.....	39
en la referencia.	
4.12 Comportamiento del voltaje aplicado al motor colocando 875 RPM en la referencia.....	40
4.13 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V colocando 875 RPM en la....	40
referencia.	
4.14 Comportamiento de la corriente del motor colocando 875 RPM en la referencia.....	41
4.15 Diagrama de bloques representativo del control Proporcional-Integral (PI).....	42
4.16 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW para el control.....	43
Proporcional-Integral (PI).	
4.17 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control.....	44
Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.18 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control.....	45
Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.19 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control.....	46
Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.20 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V TC9402, utilizando.....	47
el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.21 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control.....	47
Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.22 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control.....	48
Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.	
4.23 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control.....	48
Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.	

4.24 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control.....	49
Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.	
4.25 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control.....	50
Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.	
4.26 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control.....	50
Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.	
4.27 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control.....	51
Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.	
4.28 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control.....	51
Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.	
4.29 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control.....	52
Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.	
4.30 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control.....	53
Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.	
4.31 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control.....	53
Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.	
4.32 Diagrama de bloques representativo del control Proporcional-Integral-Derivativo.....	54
4.33 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW, para el control PID.....	55
4.34 Comportamiento de la velocidad del motor, utilizando el control.....	56
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.35 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control.....	57
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.36 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control.....	58
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.37 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V TC9402 , utilizando.....	58
el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.38 Comportamiento de la corriente del motor, utilizando el control.....	59
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.	
4.39 Comportamiento de la velocidad del motor, utilizando el control.....	59
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.	
4.40 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control.....	60
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.	
4.41 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control.....	60
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.	
4.42 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control.....	61
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.	

4.43 Comportamiento de la corriente del motor, utilizando el control.....	61
Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.	
4.44 Diagrama propuesto para el control por retroalimentación de estados.....	62
4.45 Interfaz grafica del programa en LabVIEW para observar la retroalimentación.....	63
de estados.	
4.46 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW, para retroalimentar los estados.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

CD	Corriente directa
CA	Corriente alterna
A_v	Ganancia del amplificador operacional.
u	Entrada.
y	Salida.
SCLA	Sistema de control de lazo abierto.
SCLC	Sistema de control de lazo cerrado.
RPM	Revoluciones por minuto.
K_p	Ganancia proporcional
K_I	Ganancia integral
K_D	Ganancia derivativa
k_i	Ganancia de corriente
k_v	Ganancia de voltaje
P	Proporcional
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
e	Error de control
X_1	Estado 1 retroalimentado (velocidad)
X_2	Estado 2 retroalimentado (Corriente)

Capítulo 1

Introducción

Actualmente se cuenta con innumerable cantidad de procesos e investigaciones de gran complejidad y no de menor importancia, los cuales requieren y demandan un control adecuado para el buen funcionamiento de los sistemas que les conforman. Por lo cual, en el presente trabajo se pretende colaborar en parte al realizar el diseño e implementación de un control por retroalimentación para el control de la velocidad de un motor de Corriente Directa (CD), mediante instrumentación virtual y tarjetas de adquisición de datos.

Cabe señalar que al diseñar e implementar el control para el motor, es conveniente tener en cuenta aspectos importantes, tales como: tipo de control a diseñar e implementar, costo del control, complejidad del manejo del control y otros. De lo anterior surge la idea de realizar el control por retroalimentación mediante instrumentación virtual.

El control se realiza haciendo uso de las tarjeta de adquisición de datos: de *National Instrument Corporation* © **NI USB 6008™** y **Vernier** de **LabPro®**, para a través de una computadora realizar el control de la velocidad del motor con el programa **LabVIEW™**, con el cual se realiza el control de forma clara, sencilla y eficiente.

Así mismo, en esta tesis se introduce el uso de los sensores Vernier y su tarjeta de interacción con la computadora **LabPro**, que es muy útil para procesos de instrumentación.

Finalmente, la tarjeta **NI USB-6008** de bajo costo permite utilizar la señal de entrada del actuador para llevar a cabo las acciones de control.

1.1 Objetivo de la tesis

El objetivo general del proyecto de Tesis, es diseñar e implementar un control de velocidad para un motor de CD, basado en tarjetas de adquisición de datos e instrumentación virtual.

1.2 Descripción de los capítulos

En el Capítulo 1, se da una breve introducción al proyecto, en el cual se indica el objetivo principal del Trabajo y se muestra la estructura de los capítulos de la Tesis.

En el Capítulo 2, se muestra el principio de funcionamiento del motor de CD y antecedentes sobre el control de motores de CD.

En el Capítulo 3, se realiza el control en lazo abierto de la velocidad del motor de CD mediante un programa en **LabVIEW**, se utilizan las tarjetas de adquisición de datos **NI USB-6008** y **Vernier LabPro** y finalmente una etapa de acondicionamiento para suministrar la corriente demandada por el motor.

En el Capítulo 4, se realiza el control de velocidad del motor en lazo cerrado (retroalimentado); se implementa el control proporcional (P), el control Proporcional Integral (PI), el control Proporcional Integral Derivativo (PID) y el control por retroalimentación de estados. Lo anterior haciendo uso de las tarjetas de adquisición de datos, la instrumentación virtual y del lenguaje de programación **LabVIEW**.

En el Capítulo 5, se presentan las conclusiones y comentarios finales del trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes de Control de Motores de CD

2.1 Principio de funcionamiento de un motor de CD

La Figura 2.1 muestra el funcionamiento del motor de CD. Al aplicarse una diferencia de potencial en los extremos de los devanados del motor Figura 2.1 (a), se genera un campo electromagnético, el cual hace que el campo magnético del imán permanente rechace el campo magnético generado por los devanados del motor Figura 2.1 (c), y debido a que el rotor se encuentra sobre un eje, la fuerza de repulsión hace que el rotor gire. La velocidad de rotación del motor va a depender de la diferencia de potencial aplicada a las terminales del rotor.

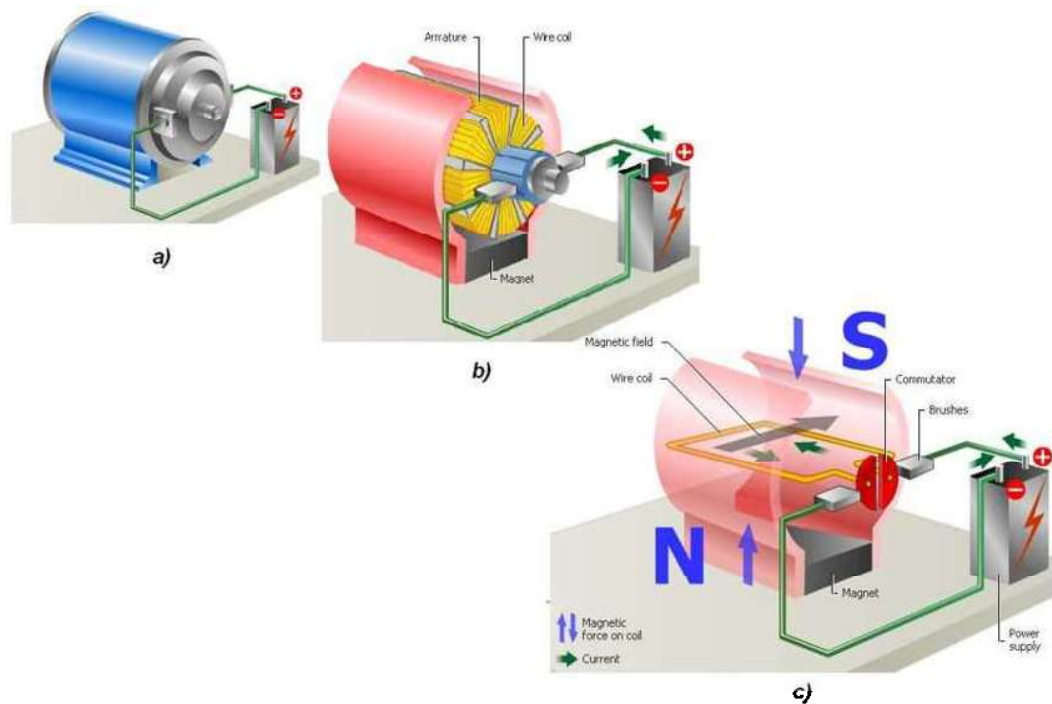


Figura 2.1 Principio de funcionamiento del motor de CD [1].

2.2 Antecedentes sobre Control de Motores de CD

El primer control automático fue creado por James Watt, el cual consistió en un control de velocidad para una máquina de vapor en el siglo XVIII, el cual era un control centrífugo que regulaba la cantidad de vapor que entraba al cilindro de la máquina [2]. Desde entonces, el control de motores ha sido indispensable para el desarrollo industrial y tecnológico de la sociedad.

Para dicho control de motores, han surgido gran variedad de técnicas, con el propósito de obtener un mejor funcionamiento de los mismos, y por lo tanto tener una mejor eficiencia en los distintos procesos y/o investigaciones que se llevan a cabo.

Frecuentemente el control de motores de CD se ha realizado mediante el uso de elementos limitadores, tales como un reóstato. El cual logra un control rápido, sin embargo repercute seriamente en la eficiencia del motor y en las pérdidas eléctricas por calentamiento, además de ser un control manual; lo que al paso del tiempo se refleja en un derroche económico y en un control deficiente para el motor.

2.2.1 Control mediante tiristores

Un SCR es capaz de desempeñar la mayoría de las tareas que realiza un reóstato en el control de la corriente promedio a una carga. También, un SCR no tiene las desventajas de los reóstatos de alta potencia. Los rectificadores controlados por silicio, son pequeños, económicos y eficientes energéticamente. Debido a lo anterior, es natural y común utilizarlos en derivación con el motor, para proporcionar control de armadura de la velocidad de un motor [3].

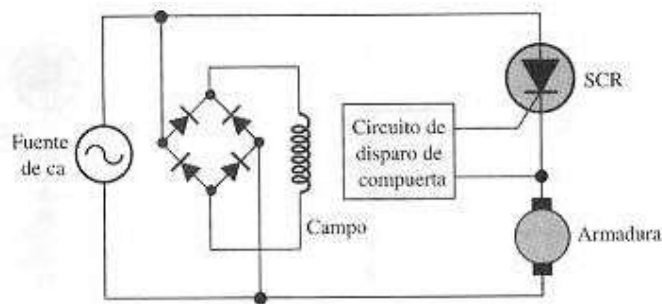


Figura 2.2 SCR en serie con la armadura para controlar la velocidad del motor de CD.

En la Figura 2.2, la potencia de Corriente Alterna (CA) se rectifica para producir potencia de CD para el devanado de campo. El SCR entonces suministra rectificación y control de media onda al devanado de armadura. Disparando pronto el SCR, el voltaje y la corriente de armadura promedio aumentan y el motor puede operar a mayor velocidad. Disparando el SCR después (aumentando el ángulo de retardo de disparo), el voltaje y corriente promedio de armadura se reducen y el motor reduce su velocidad.

2.2.2 Control de velocidad monofásico y de media onda para un motor de CD en derivación.

De la variedad de controles de velocidad para motores, se encuentra el sistema de control de velocidad monofásico y de media onda (Figura 2.3). En el cual para ajustar la velocidad del motor, se utiliza un potenciómetro de ajuste. A medida que se gira hacia arriba (alejando el cursor de tierra), aumenta la velocidad del motor. Esto sucede porque el voltaje de compuerta relativo a tierra se vuelve una parte mayor del voltaje de línea de CA, permitiendo por tanto que el voltaje de compuerta a cátodo alcance el voltaje de disparo del SCR más pronto en el ciclo.

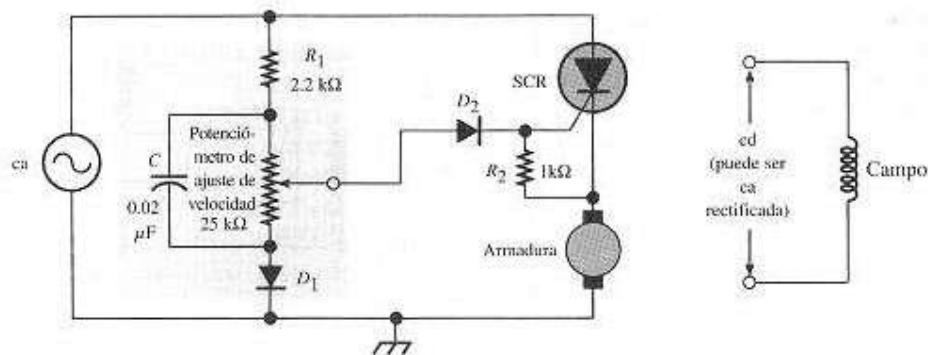


Figura 2.3 Sistema de control monofásico y de media onda para controlar la velocidad de un motor de CD.

Al mover hacia abajo el potenciómetro de ajuste de velocidad, el voltaje de compuerta a tierra se vuelve una parte menor de la línea de voltaje, por lo que le toma más tiempo a V_{GK} (voltaje compuerta-cátodo) alcanzar el valor necesario para disparar el SCR.

2.2.3 Control reversible de velocidad

Existen aplicaciones industriales de control de velocidad que requieren que el giro de un motor sea reversible. Es decir, el motor debe ser capaz de girar tanto en dirección de las manecillas del reloj como en dirección contraria, además de tener velocidad ajustable. La inversión de la dirección del giro del motor se puede lograr de dos maneras:

- Invertiendo la dirección de la corriente de armadura, dejando igual la corriente de campo.
- Invertiendo la dirección de la corriente de campo, manteniendo igual la corriente de armadura.

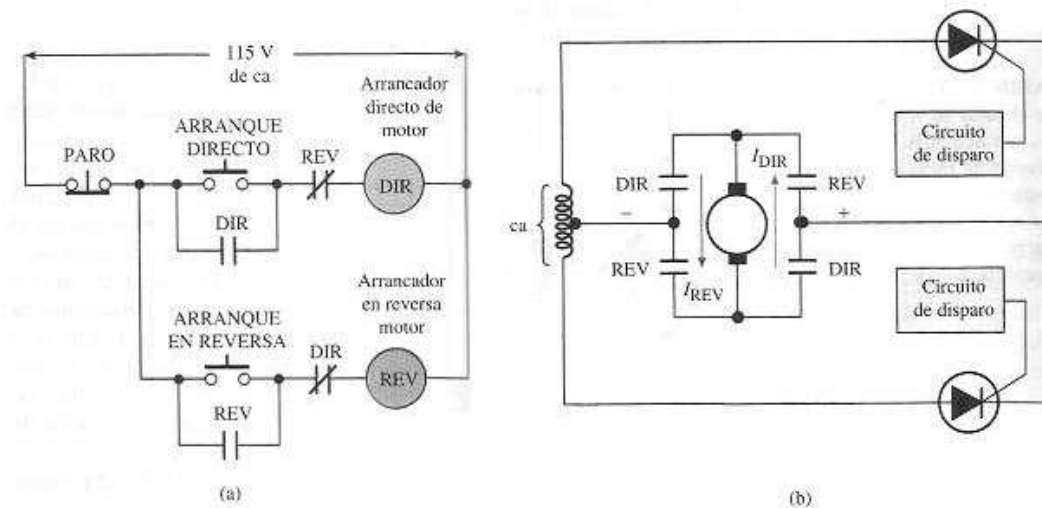


Figura 2.4 Sistema de manejo reversible de onda completa por SCR: (a) circuito de control del arrancador del motor; (b) circuito de armadura.

En la Figura 2.4 (a), el contactor DIR es energizado presionando el botón de ARRANQUE DIRECTO. Mientras el contactor REV esté desactivado en ese momento, el contactor DIR se energizará y se sellará alrededor del botón interruptor NA. El operador puede entonces soltar el botón de ARRANQUE DIRECTO, y el contactor permanecerá energizado hasta que se apriete el botón de PARO.

En la Figura 2.4 (b) se observa que, cuando los contactos DIR están cerrados, la corriente fluye a través de la armadura de abajo hacia arriba, causando entonces el giro en cierta dirección (se supone en dirección de las manecillas del reloj). Cuando los contactos REV están cerrados, la corriente de armadura fluye de arriba hacia abajo, causando por tanto el giro en la dirección contraria a las manecillas del reloj. Como siempre, la velocidad de giro es controlada por el ángulo de retardo de disparo de los SCR.

2.2.4 Control mediante modulación por ancho de pulso (PWM)

Los motores grandes de CD son controlados mejor por tiristores de alta potencia. Sin embargo, para motores de CD de imán permanente pequeños y medianos, y algunos motores de CD sin escobillas, son controlados mejor por transistores de conmutación conectados en serie, manejados mediante “modulación por ancho de pulso” **PWM** (Pulse With Modulation).

Un sistema PWM básicamente consta de tres partes:

- Un generador de rampa, operando generalmente a una frecuencia constante.
- Un comparador, para detectar el momento en que el voltaje de la rampa ha excedido el voltaje de la señal de control.
- Un dispositivo electrónico que conmute la potencia de carga en el momento en que el comparador detecte el punto crítico de la forma de onda de rampa.

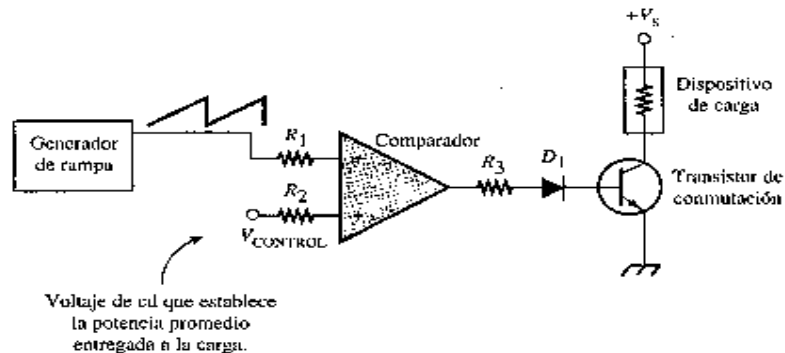


Figura 2.5 Sistema básico de control de potencia mediante PWM.

En el funcionamiento del circuito de la Figura 2.5 es el siguiente: Cuando la rampa comienza a ascender, el voltaje de control positivo excede a v_{rampa} . Por tanto, el comparador con amplificador operacional produce una saturación positiva. Esto satura al transistor, encendiendo el interruptor de potencia. A través de la carga aparece el voltaje de la fuente V_s .

Cuando v_{rampa} aumenta a su valor pico igual a V_s . En el momento en que v_{rampa} excede a $v_{control}$, el comparador con amplificador operacional conmuta a saturación negativa, polariza en inversa al diodo D_1 y la unión B-E del transistor. Por tanto, el transistor inmediatamente conmuta a apagado, y la carga se desenergiza.

Variando el voltaje de control ($v_{control}$) se varia o modula el ancho de pulso a la carga (motor). Ello varía el voltaje y la potencia promedio de la carga, que es el concepto de modulación por ancho de pulso.

Capítulo 3

Control de Velocidad del Motor de CD en Lazo Abierto

3.1 Introducción

Durante mucho tiempo y hasta ahora han existido gran variedad de sistemas de control de numerosos tipos y de diversa complejidad, entre ellos existe el sistema de control de velocidad para motores de CD, el cual es el caso de estudio para este proyecto.

Para realizar el control adecuado de la velocidad del motor de CD, primeramente se realizó un sistema de control de lazo abierto (SCLA), en el cual la salida de nuestro sistema no afecta la acción de control, esto es, que para nuestro caso de estudio no se monitorea la salida con respecto a la entrada.

Por ejemplo, al encender un aparato reproductor de cd's; al querer escuchar una canción simplemente se presiona la tecla "play" y no nos interesa cual es la velocidad del motor de CD que hace girar el disco o la velocidad del motor que porta el lector de datos.

3.2 Necesidad de un control de velocidad

Los motores de CD tienen aplicaciones variadas, por lo cual el control de la velocidad de los mismos debe de tener un control adecuado que cumpla con los requerimientos necesarios del usuario. Por ejemplo: si un usuario requiere de cierta velocidad del motor de CD para realizar determinada operación. El sistema de control podrá realizar la operación requerida por el usuario; dicho usuario simplemente tendrá que colocar en una interfaz gráfica la cantidad de Revoluciones Por Minuto (RPM) deseadas.

3.3 Esquema propuesto para el control en lazo abierto

Para realizar el SCLA para el motor, primeramente se determina el tipo de motor a utilizar, para nuestro caso éste tiene las siguientes características:

- Motor de imán permanente marca **Hitachi**.
- Operación a 24 volts CD.
- Encoder con 100 PPR.
- Potencia de 19 Watts.

3.4 Etapa de acondicionamiento

Debido a que no es posible suministrar una corriente suficiente para alimentar al motor directamente desde la tarjeta de adquisición de datos **NI USB-6008**, es necesario realizar una etapa de acondicionamiento. Dicha etapa se muestra en la Figura 3.1.

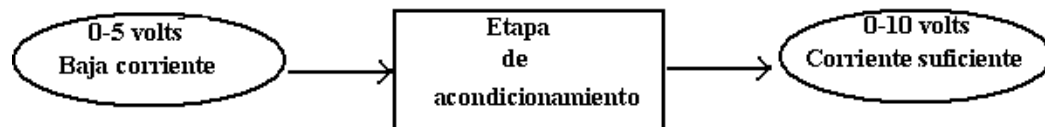


Figura 3.1 Diagrama de las características generales de la etapa de acondicionamiento.

La etapa de acondicionamiento recibe la señal de salida de voltaje de la tarjeta de adquisición de datos de 0-5 volts, luego mediante un amplificador operacional (**LM741**) en configuración de amplificador no inversor con una ganancia en lazo cerrado $A_v = 2$, es posible tener un voltaje de 0-10 volts. Finalmente se agrega un transistor de potencia (**TIP41C**) a la salida del amplificador operacional, el cual es capaz de suministrar la corriente que demande el motor de CD. El esquema de la configuración de la etapa de acondicionamiento se muestra en la Figura 3.2.

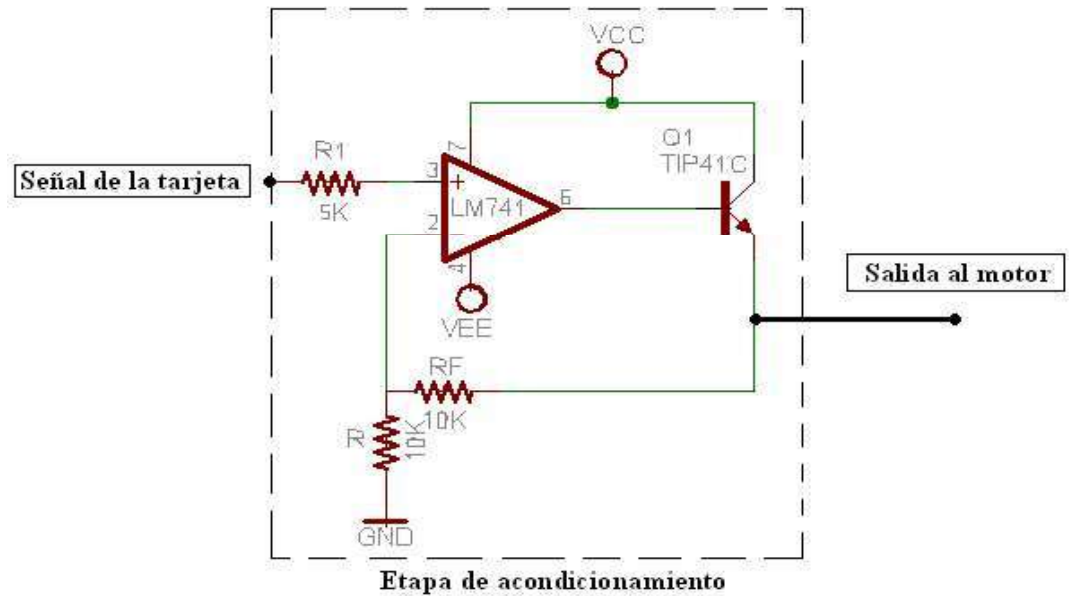


Figura 3.2 Configuración de la etapa de acondicionamiento.

La configuración usada para realizar la etapa de acondicionamiento consta de una ecuación que determina la ganancia A_v , dicha Ecuación es la (3.1).

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R} \quad (3.1)$$

Para la etapa en cuestión, se requiere de una ganancia $A_v = 2$, por lo que se observa en la Figura 3.2 que las resistencias R_f y R , deben de ser del mismo valor. Para poder obtener dicha ganancia se utilizaron resistencias de $10K\Omega$. La resistencia R_i es igual al paralelo de R_f y R , la cual es igual a $5K\Omega$.

Finalmente para obtener el voltaje deseado, es necesario aplicar un voltaje de alimentación al amplificador operacional LM741 de ± 12 volts y aplicar la señal de entrada proveniente de la tarjeta de adquisición de datos.

3.5 Uso de instrumentación virtual

Para iniciar con el control del motor de CD, fue necesario realizar un programa computacional en el lenguaje de programación gráfico **LabVIEW**, el cual es capaz de controlar las tarjetas de adquisición de datos **NI USB-6008** y **Vernier de LabPro**.

- **Tarjeta NI USB-6008**

Dicha tarjeta de **National Instrument**, es una tarjeta de adquisición de datos multifuncional que permite la adquisición de datos a un bajo costo. Utiliza conexión USB plug and play, lo que permite una rápida conexión para realizar mediciones simples, múltiples y complejas. La tarjeta cuenta con una resolución de entrada de 12 bits, lo cual indica que es capaz de detectar variaciones de 1.22 mV [6]. Es compatible con LabVIEW. En el Apéndice A se dan las características de esta tarjeta.

- **Tarjeta Vernier LabPro**

Dicha tarjeta de adquisición de datos es un poderoso recolector de datos, ofrece diferentes formas de coleccionar los datos obtenidos en las mediciones, fácil de usar, cuenta con bastantes tipos de sensores (para el caso de estudio se utilizó el sensor de corriente), es compatible con: LabVIEW, calculadoras graficadoras de **National Instrument**, Palm, HandHeld, y otros. Tiene conexión USB para la PC. En el Apéndice A se da la presentación de esta tarjeta.

3.5.1 Descripción de los bloques de la tarjeta NI USB-6008

Para realizar el control en lazo abierto de la velocidad del motor, se utilizó la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008, la cual es capaz de funcionar en el ambiente de programación gráfico LabVIEW. Dicha tarjeta consta de dos bloques, uno de entrada y uno de salida.

Para la configuración del bloque de voltaje analógico de salida de la tarjeta que se muestra en la Figura 3.3, es necesario indicar: el canal de salida de la tarjeta, el rango de voltaje que tendrá la tarjeta a la salida, el modo de salida de los datos ya sea una muestra o en forma continua y la frecuencia a la cual trabajará la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 3.3 Bloque de voltaje analógico de salida de la tarjeta NI USB-6008

Para la configuración del bloque de voltaje analógico de entrada de la tarjeta que se muestra en la Figura 3.4, es necesario indicar: el canal de entrada de la tarjeta, el rango de voltaje que tendrá la tarjeta a la entrada, el modo de entrada de los datos ya sea una muestra o en forma continua y la frecuencia a la cual trabajará la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 3.4 Bloque de voltaje analógico de entrada de la tarjeta NI USB-6008

3.5.2 Descripción de los bloques de la tarjeta Vernier LabPro

La tarjeta de adquisición de datos **Vernier LabPro**, puede manejarse desde el lenguaje de programación gráfico **LabVIEW**. Para ello es necesario configurar los 4 bloques que representan la tarjeta dentro del ambiente gráfico de **LabVIEW**, los cuales se describen a continuación y se muestran en la Figura 3.5.

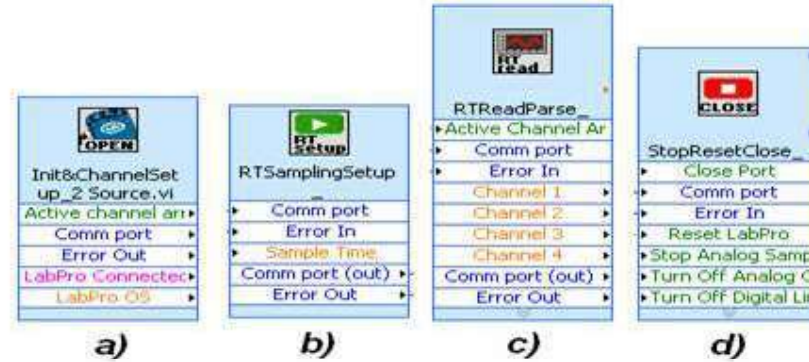


Figura 3.5 Bloques de la tarjeta **Vernier LabPro** para manejarlo con LabVIEW.

- Bloque **Init&ChannelSetup**, Figura 3.5 a), en dicho bloque se configuran los posibles canales de la tarjeta. La tarjeta cuenta con 4 canales analógicos y 2 digitales para diferentes tipos de sensores, tales como corriente, voltaje, y muchos más. Para el caso de estudio de este trabajo, se utilizó el canal 1 y se configuró en modo auto identificable, con el cual se mide la corriente del motor.
- Bloque **RTAamplingSetup**, Figura 3.5 b), éste bloque se encarga de la recolección de datos en tiempo real de los canales configurados. En dicho bloque se especifica el tiempo y la cantidad de muestras a leer.
- Bloque **RTReadParse**, Figura 3.5 c), realiza una recolección continua de los datos existentes en los canales configurados hasta que la recolección sea interrumpida por el usuario.
- Bloque **StopResetClose**, Figura 3.5 d), realiza el paro a la aplicación lógica y digital. Además aplica un reset a la tarjeta para futuras mediciones, también cierra los puertos configurados inicialmente por el usuario hasta una nueva recolección de datos.

3.5.3 Descripción del panel frontal del programa en LabVIEW

En la siguiente Figura 3.6, se muestra la imagen frontal del programa realizado en LabVIEW. En dicho panel se observa en la parte superior izquierda un “dial”, mediante el cual se varía el voltaje a enviar al motor; el voltaje suministrado al motor varía de 0 hasta 10 Volts, la imagen muestra que es de 0-5Volts, pero debido a la etapa de acondicionamiento con ganancia de 2 se puede obtener un máximo de 10 Volts.

También se observan 4 columnas, las cuales indican las variables de interés del motor: voltaje al motor, voltaje del encoder (después del convertidor de frecuencia), corriente del motor y la velocidad del motor (en términos de voltaje).

Además, se observan 3 gráficas, las cuales indican las variables de interés del motor en forma gráfica: voltaje al motor, voltaje de entrada del encoder (velocidad) y la corriente del motor.

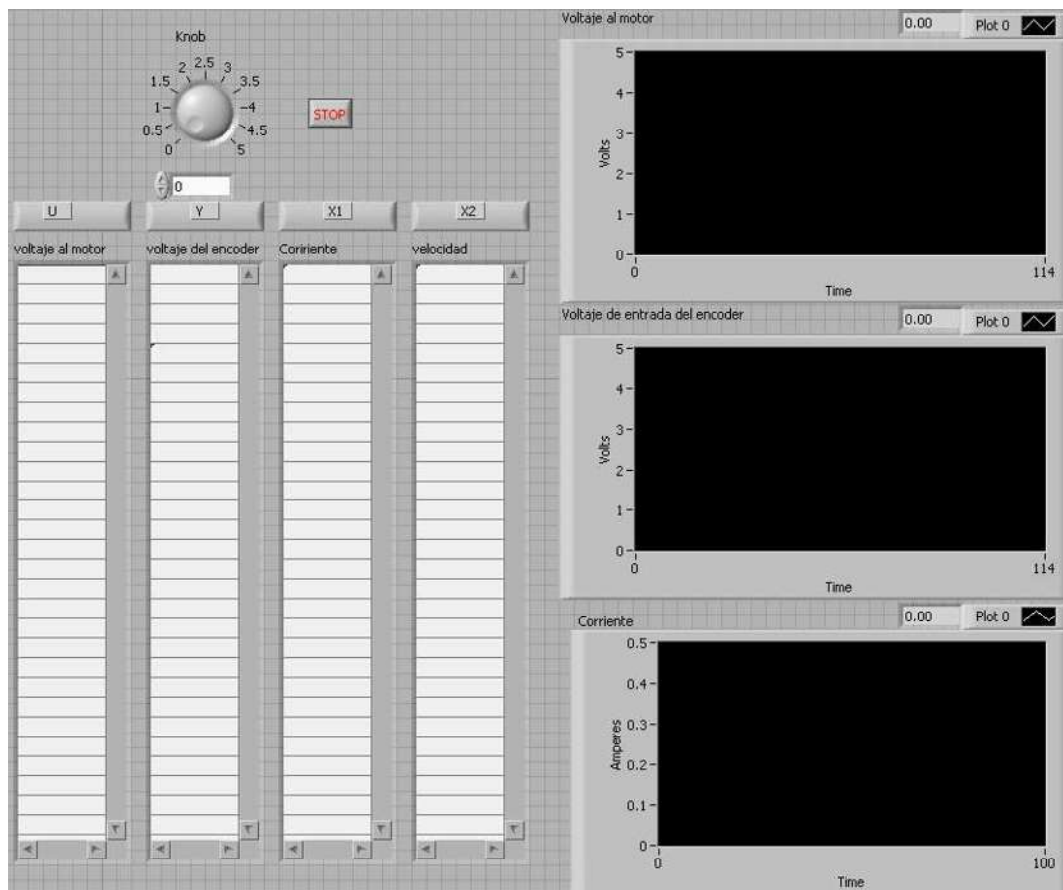


Figura 3.6 Imagen del panel frontal del control en lazo abierto en LabVIEW.

3.5.4 Descripción del diagrama de bloques del programa en LabVIEW

En la Figura 3.7, se muestra el programa del control en lazo abierto para controlar el motor. En dicha imagen se muestran 3 secciones principales:

- 1.- Éste conjunto de bloques tiene la función de suministrar el voltaje indicado en el dial al motor, a través de un canal analógico de salida de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 y también realiza la recolección y proyección de los datos en el panel frontal del programa.
- 2- En esta sección se realiza la función de lectura de la señal de entrada de voltaje en el canal analógico de entrada de la tarjeta de adquisición de datos. Dichos valores de voltaje que se leen, son provenientes de la etapa de acondicionamiento que se encuentra después del convertidor de frecuencia a voltaje. Mediante la señal de voltaje que se tiene en la tarjeta de adquisición de datos se realiza la medición de la velocidad del motor en términos de voltaje.

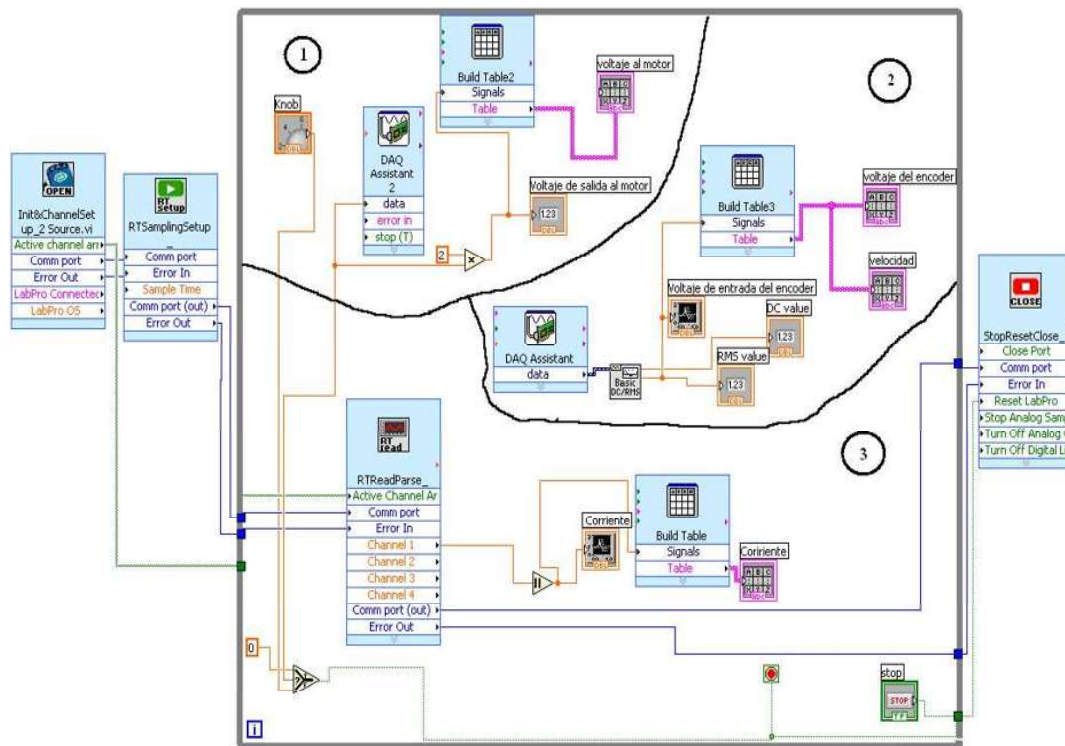


Figura 3.7 Imagen del diagrama de bloques del control en lazo abierto en LabVIEW.

3- En esta sección de la Figura anterior (3.7), se realiza la función de adquisición de los valores de corriente del motor, mediante la tarjeta de adquisición de datos **Vernier LabPro** y el sensor de corriente también de LabPro. Además realiza la función de mostrar valores de corriente en el panel frontal y una grafica de los mismos.

3.6 Estructura final del control en lazo abierto

La estructura final del sistema de control de lazo abierto para la velocidad del motor de CD se muestra en la Figura 3.8. En esta imagen se observan las etapas principales para suministrar un voltaje al motor de CD.

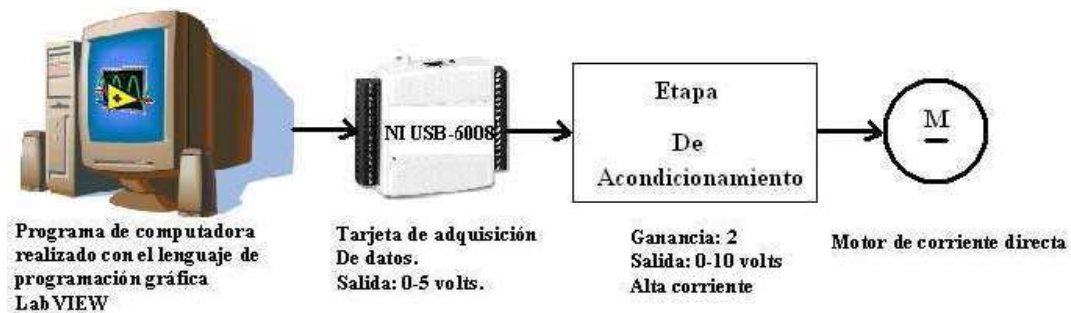


Figura 3.8 Sistema de lazo abierto para el control de la velocidad del motor de CD.

3.7 Etapa de acondicionamiento para medir la velocidad del motor

Para medir la velocidad del motor, se utilizó primeramente el encoder adaptado al motor. Dicho encoder proporciona una señal cuadrada de salida con una frecuencia que es proporcional al voltaje aplicado en terminales del motor y por lo tanto a la velocidad angular del motor.

3.8 Funcionamiento del convertidor de frecuencia a voltaje F/V

Después del encoder acoplado al motor de CD, se utilizó un convertidor de frecuencia a voltaje, el cual entrega un voltaje de salida proporcional a la frecuencia de entrada. El convertidor de frecuencia a voltaje utilizado es el **TC9402**, cuya configuración se muestra en la Figura 3.9 e información en el Apéndice A.

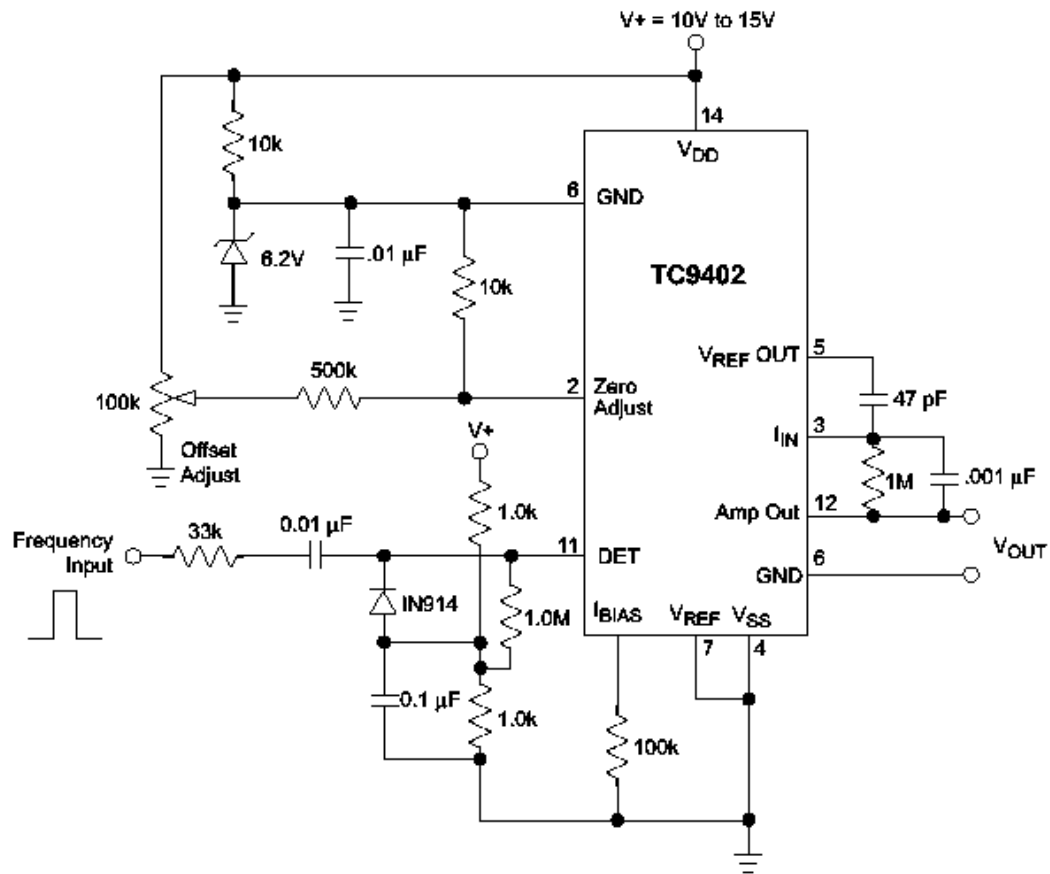


Figura 3.9 Configuración del convertidor de frecuencia TC9402.

El voltaje de salida del convertidor TC9402 arroja valores que van desde 0 hasta 1.2 volts aplicando un voltaje en terminales del motor de 0 a 10 volts.

3.9 Etapa de acondicionamiento para elevar el voltaje del convertidor

Luego del convertidor de frecuencia a voltaje, se utilizó un amplificador operacional en configuración no inversor con una ganancia en lazo cerrado $A_v = 4$, con la intención de elevar el voltaje de salida del convertidor. La configuración del amplificador no inversor se muestra en la Figura 3.10.

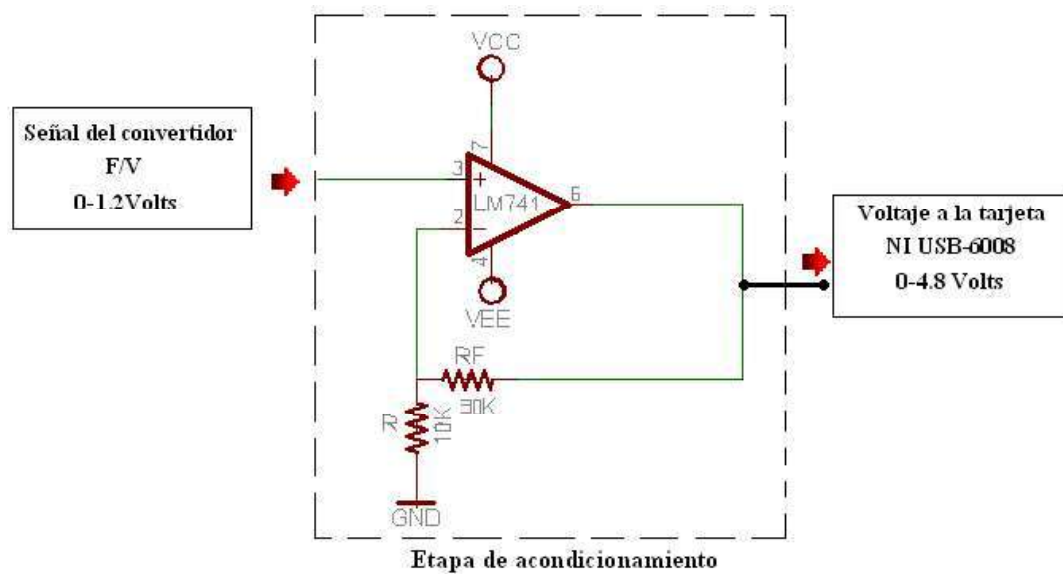


Figura 3.10 Etapa de acondicionamiento para aumentar el voltaje del convertidor F/V

A la salida del amplificador es posible obtener valores de voltaje de 0 hasta 4.8 volts, lo cual sirve para tener un rango mayor de valores para retroalimentarlos a la tarjeta de adquisición de datos **NI USB-6008**.

A la salida de la etapa mostrada en la Figura 3.10 no se coloca una protección antes de conectarse a la tarjeta debido a que esta tiene una protección interna de ± 35 volts, la cual no se vería rebasada por la alimentación del amplificador operacional que es de ± 12 volts.

3.10 Etapas para medir velocidad y corriente del motor

En la Figura 3.11, se muestran las diferentes etapas realizadas para medir la velocidad y corriente del motor, las cuales son las principales variables a controlar en el sistema de control.

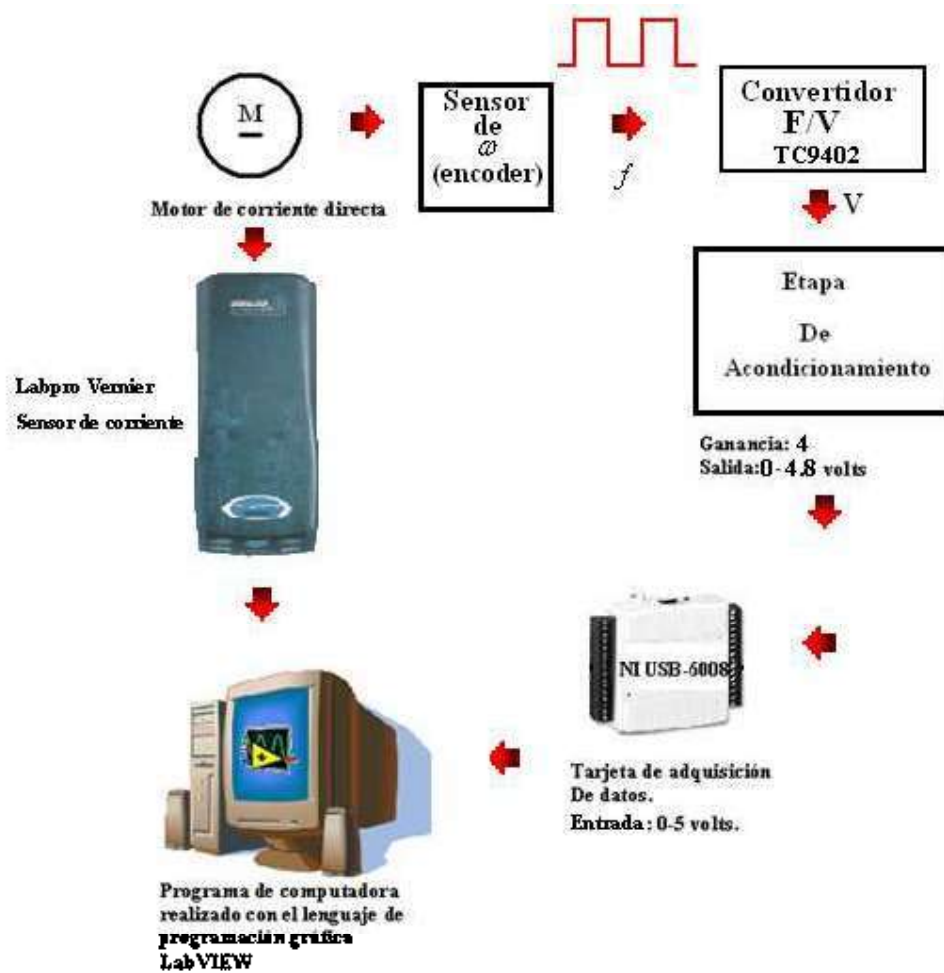


Figura 3.11 Etapas para medir la velocidad y corriente del motor.

3.11 Pruebas al control en lazo abierto del motor

Inicialmente se realizaron pruebas al motor, para comprobar el comportamiento lineal de éste. La gráfica de frecuencia del encoder contra voltaje aplicado al motor de la Figura 3.2, se observa que al aumentar el voltaje en terminales, aumenta la velocidad angular del motor y también la frecuencia de la señal del encoder, esto sirvió para comprobar el correcto funcionamiento del convertidor de frecuencia **TC9402**.

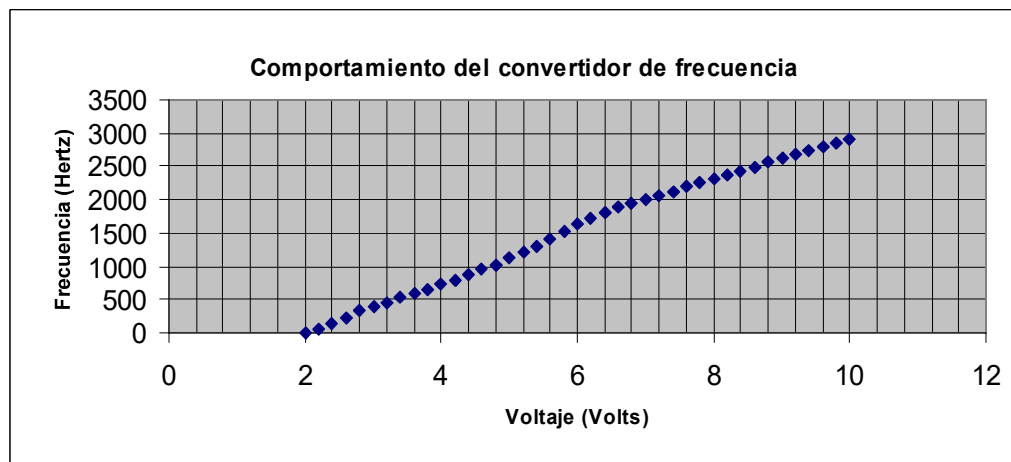


Figura 3.12 Comportamiento del convertidor de frecuencia.

- **Prueba No. 1: Aplicando 2.4 Volts en terminales del motor de CD.**

En la Figura 3.13, se observa la primera prueba realizada al motor, la cual es a 2.4 Volts. La razón de iniciar en dicho valor, es debido a que en este valor inicia a girar el motor, a valores menores no gira.

U	Y	X1	X2
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
2.400000 ▲	0.430652 ▲	0.048993 ▲	0.430652 ▲
2.400000	0.425105	0.038309	0.425105
2.400000	0.429253	0.015110	0.429253
2.400000	0.423287	0.044719	0.423287
2.400000	0.431427	0.007479	0.431427
2.400000	0.399805	0.010836	0.399805
2.400000	0.420049	0.042583	0.420049
2.400000	0.427327	0.017247	0.427327
2.400000	0.428313	0.082876	0.428313
2.400000	0.429568	0.026709	0.429568
2.400000	0.441598	0.097222	0.441598
2.400000	0.427843	0.028846	0.427843
2.400000	0.424149	0.027625	0.424149
2.400000	0.439477	0.000763	0.439477
2.400000	0.420706	0.004426	0.420706
2.400000	0.437074	0.010531	0.437074
2.400000	0.420550	0.034341	0.420550
2.400000	0.415621	0.014499	0.415621
2.400000	0.416609	0.030067	0.416609
2.400000	0.427972	0.005647	0.427972
2.400000	0.424489	0.001068	0.424489
2.400000	0.442116	0.029762	0.442116
2.400000	0.427756	0.014499	0.427756
2.400000	0.443588	0.001374	0.443588
2.400000	0.427513	0.034646	0.427513
2.400000	0.429426	0.002900	0.429426
2.400000	0.433322	0.013889	0.433322
2.400000	0.422581	0.003205	0.422581
2.400000 ▼	0.453692 ▼	0.014499 ▼	0.453692 ▼

Figura 3.13 Comportamiento de las variables del motor a 2.4 volts en terminales.

En la Figura 3.13, se aprecian 4 columnas de valores, las cuales contienen las variables de interés. La primera columna indica el voltaje que aplicado al motor en terminales, la segunda indica el voltaje que proporciona la etapa de acondicionamiento que se encuentra después del encoder del motor, la tercera indica la corriente del motor y la cuarta que es similar a la columna 2, indica el valor de la velocidad en términos de voltaje. Dicha consideración es válida debido a que es lineal el comportamiento frecuencia-voltaje.

Los valores de velocidad en base a los voltajes mostrados en la Figura 3.13, se observan de manera grafica en la Figura 3.14. En el capítulo siguiente se muestra valores de velocidad en RPM.

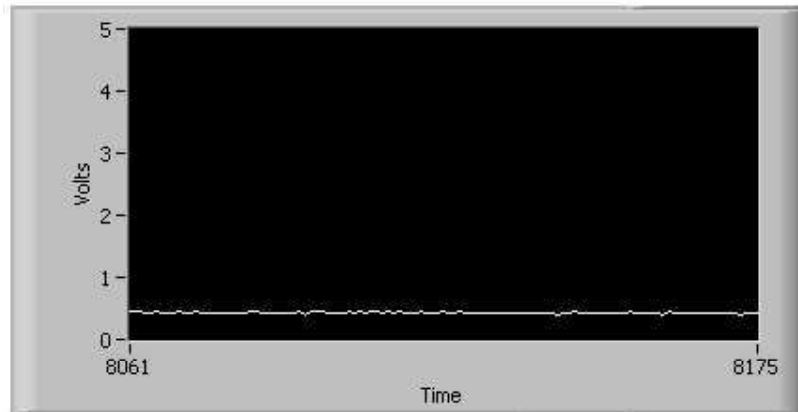


Figura 3.14 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 2.4 volts.

En la Figura 3.15, se observan los valores de corriente en forma gráfica al momento de aplicar 2.4 Volts en terminales del motor.

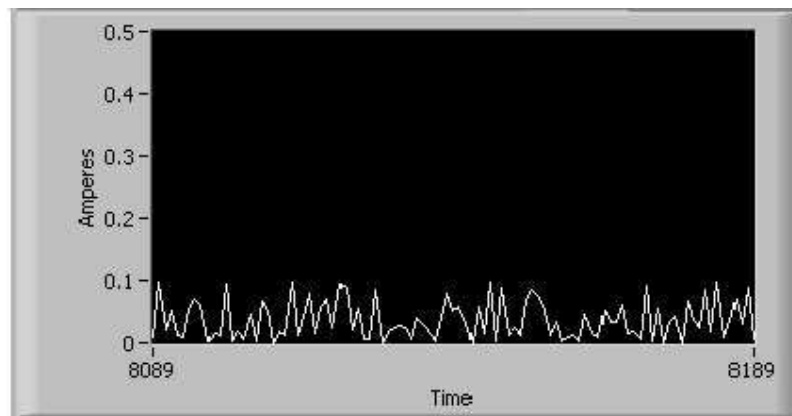


Figura 3.15 Comportamiento de la corriente del motor a 2.4 volts en terminales.

- **Prueba No. 2: Aplicando 5 Volts en terminales del motor de CD.**

En la Figura 3.16, se muestran los valores de las variables del motor al aplicar 5.0 Volts en sus terminales.

U	Y	X1	X2
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
5.000000	1.867233	0.054487	1.867233
5.000000	1.865674	0.054182	1.865674
5.000000	1.868205	0.051129	1.868205
5.000000	1.879240	0.045940	1.879240
5.000000	1.861468	0.041667	1.861468
5.000000	1.853247	0.049908	1.853247
5.000000	1.858291	0.040751	1.858291
5.000000	1.846215	0.057845	1.846215
5.000000	1.844161	0.064255	1.844161
5.000000	1.844432	0.061813	1.844432
5.000000	1.848085	0.048077	1.848085
5.000000	1.839846	0.053266	1.839846
5.000000	1.848291	0.059676	1.848291
5.000000	1.855463	0.063950	1.855463
5.000000	1.851092	0.046551	1.851092
5.000000	1.853411	0.040751	1.853411
5.000000	1.841983	0.040140	1.841983
5.000000	1.835945	0.039530	1.835945
5.000000	1.848727	0.049908	1.848727
5.000000	1.856769	0.056319	1.856769
5.000000	1.857523	0.055708	1.857523
5.000000	1.857609	0.048993	1.857609
5.000000	1.855327	0.044109	1.855327
5.000000	1.845956	0.045330	1.845956
5.000000	1.827849	0.057234	1.827849
5.000000	1.840165	0.063645	1.840165
5.000000	1.837102	0.053571	1.837102
5.000000	1.846856	0.039530	1.846856
5.000000	1.831378	0.060592	1.831378

Figura 3.16 Comportamiento de las variables del motor con 5.0 volts en terminales.

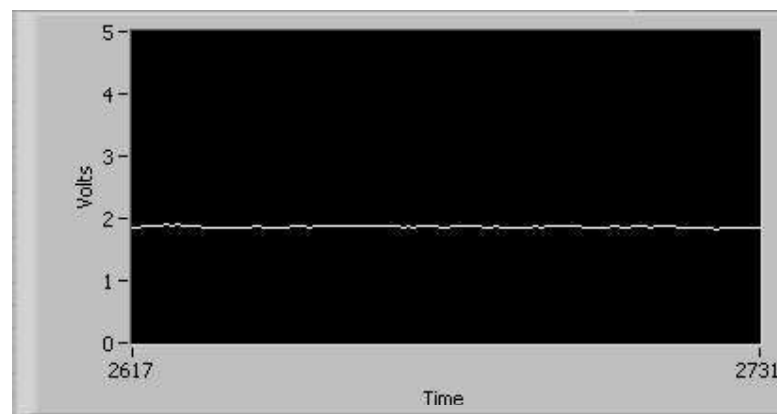


Figura 3.17 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 5 volts.

En la Figura 3.17, se observa que al aplicar 5 Volts la velocidad en base al voltaje es aproximadamente de 1.85 Volts.

En la Figura 3.18 se observa el aumento en la corriente del motor, la cual es de aproximadamente de 50 mA al aplicar 5 Volts al motor.

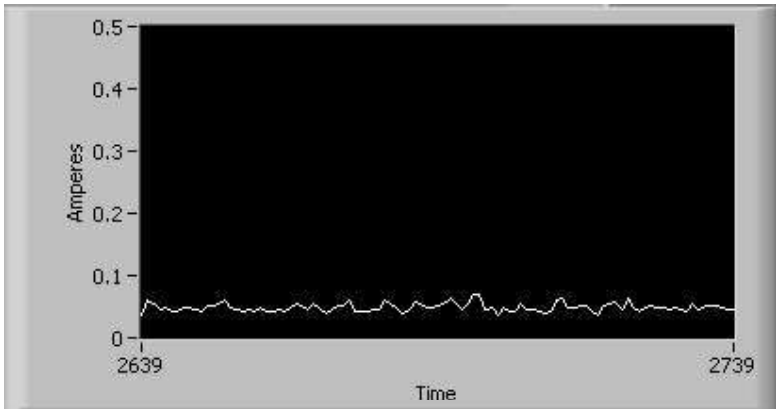


Figura 3.18 Comportamiento de la corriente del motor a 5.0 volts en terminales.

- Prueba No. 3 Aplicando 7.0 Volts en terminales del motor de CD.**

En la Figura 3.19, se observan los valores de las variables del motor de CD al aplicar 7.0 Volts en sus terminales.

U	Y	X1	X2
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
7.000000	3.314077	0.166514	3.314077
7.000000	3.322038	0.172009	3.322038
7.000000	3.323204	0.176282	3.323204
7.000000	3.321363	0.166819	3.321363
7.000000	3.316227	0.166819	3.316227
7.000000	3.316942	0.172619	3.316942
7.000000	3.321012	0.173535	3.321012
7.000000	3.316525	0.176587	3.316525
7.000000	3.311209	0.163767	3.311209
7.000000	3.315885	0.176893	3.315885
7.000000	3.325403	0.169872	3.325403
7.000000	3.318115	0.165598	3.318115
7.000000	3.321429	0.170788	3.321429
7.000000	3.320784	0.177503	3.320784
7.000000	3.319337	0.174756	3.319337
7.000000	3.321421	0.170177	3.321421
7.000000	3.321158	0.168956	3.321158
7.000000	3.314752	0.168651	3.314752
7.000000	3.321203	0.179335	3.321203
7.000000	3.312040	0.172924	3.312040
7.000000	3.319557	0.164683	3.319557
7.000000	3.321561	0.165293	3.321561
7.000000	3.315536	0.171398	3.315536
7.000000	3.313577	0.179945	3.313577
7.000000	3.306996	0.173230	3.306996
7.000000	3.313144	0.169261	3.313144
7.000000	3.309445	0.175061	3.309445
7.000000	3.304336	0.174451	3.304336
7.000000	3.308061	0.165904	3.308061

Figura 3.19 Comportamiento de las variables del motor con 7.0 volts en terminales.

En la Figura 3.20, se muestra el comportamiento de la velocidad en base al voltaje al aplicar 7.0 Volts al motor.

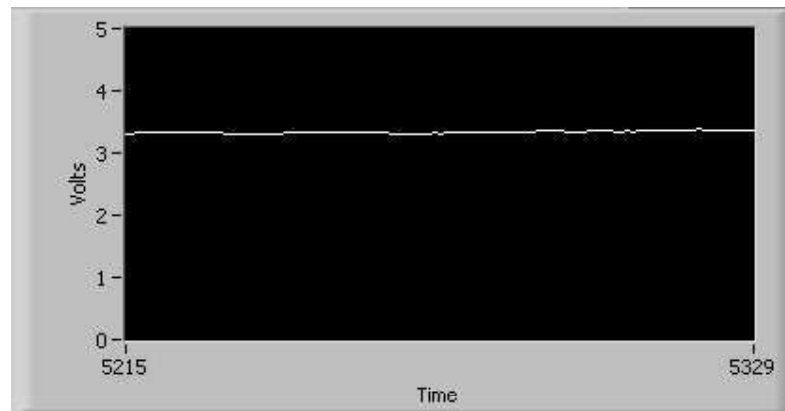


Figura 3.20 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 7 volts.

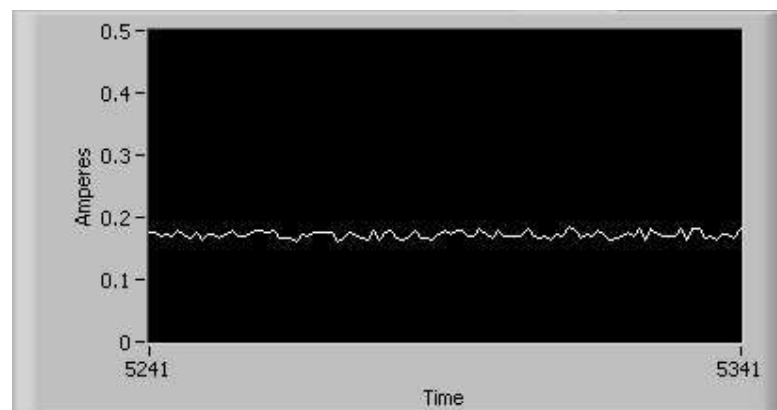


Figura 3.21 Comportamiento de la corriente del motor a 7.0 volts en terminales.

En la Figura 3.21 se observa que al aplicar 7.0 Volts al motor, se tiene una corriente de alrededor de 175 mA.

- **Prueba No. 4 Aplicando 10 Volts en terminales del motor de CD.**

En la Figura 3.22 se muestran los valores máximos obtenidos en el motor, los cuales se presentan al suministrar 10.0Volts en terminales.

U	Y	X1	X2
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
10.000000 ▲	4.858530 ▲	0.253205 ▲	4.858530 ▲
10.000000	4.844753	0.253205	4.844753
10.000000	4.858199	0.253510	4.858199
10.000000	4.848640	0.253205	4.848640
10.000000	4.851648	0.254426	4.851648
10.000000	4.855197	0.253510	4.855197
10.000000	4.854558	0.252900	4.854558
10.000000	4.866177	0.252595	4.866177
10.000000	4.872335	0.253205	4.872335
10.000000	4.849168	0.253205	4.849168
10.000000	4.858348	0.251984	4.858348
10.000000	4.873962	0.253205	4.873962
10.000000	4.869857	0.253205	4.869857
10.000000	4.880097	0.252900	4.880097
10.000000	4.870069	0.252595	4.870069
10.000000	4.860897	0.252900	4.860897
10.000000	4.850692	0.253510	4.850692
10.000000	4.844668	0.251374	4.844668
10.000000	4.845583	0.251984	4.845583
10.000000	4.854525	0.253510	4.854525
10.000000	4.859982	0.253510	4.859982
10.000000	4.844024	0.252900	4.844024
10.000000	4.849478	0.252289	4.849478
10.000000	4.849013	0.251984	4.849013
10.000000	4.846078	0.252900	4.846078
10.000000	4.846447	0.252595	4.846447
10.000000	4.857527	0.251679	4.857527
10.000000	4.851622	0.253205	4.851622
10.000000 ▼	4.862301 ▼	0.253510 ▼	4.862301 ▼

Figura 3.22 Comportamiento de las variables del motor con 10.0 volts en terminales.

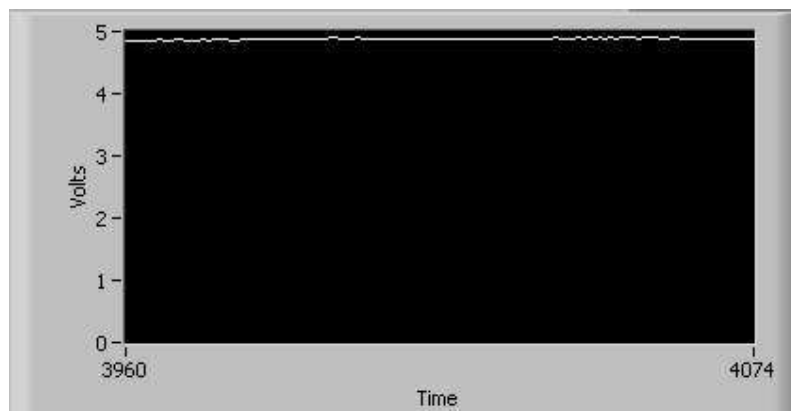


Figura 3.23 Comportamiento de la velocidad en base a un voltaje de 10 volts.

En la Figura 3.23, se observa que la velocidad máxima del motor para el caso de estudio, estará presente cuando el convertidor de frecuencia llegue a 1.2 Volts y la etapa de acondicionamiento llegue a 4.8 Volts.

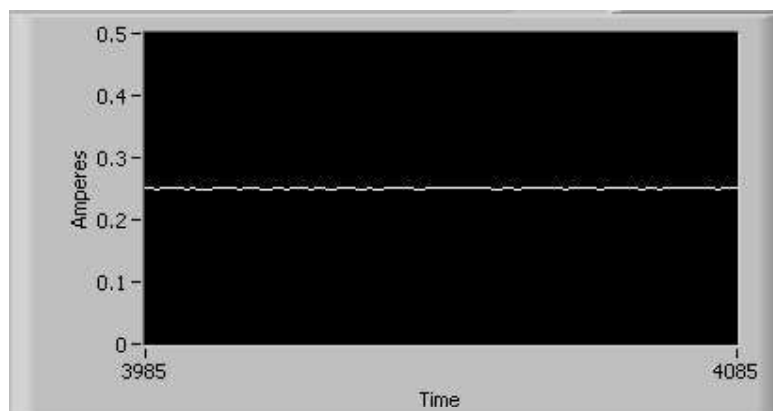


Figura 3.24 Comportamiento de la corriente del motor a 10.0 volts en terminales.

En la Figura 3.24, se observa que al aplicar los 10 Volts en terminales del motor, se tiene una corriente promedio de 250 mA. A pesar de que el sensor de corriente de **LabPro Vernier** tiene la capacidad de soportar hasta 600 mA, la máxima corriente presente en el motor sólo será de 250 mA.

Capítulo 4

Implementación de Controles en Lazo Cerrado Aplicados al Motor de CD

4.1 Introducción

Debido a que el control en lazo abierto utilizado para controlar la velocidad del motor el cual se analizó en el Capítulo 3 no cumple con las exigencias de un control eficiente, por ese motivo es necesario realizar el control en lazo cerrado ó retroalimentado para obtener mejores resultados y que sean más favorables para el control de la velocidad del motor.

El control en lazo abierto no es tan malo como pareciera, sin embargo, la naturaleza de éste no permite proporcionar resultados satisfactorios que se pueden obtener mediante el control en lazo cerrado. Por lo cual, en éste capítulo se desarrollará el control en lazo cerrado.

4.2 Sistema en lazo cerrado

Un control en lazo cerrado ó retroalimentado, se puede representar mediante la Figura 4.1, en la cual, el sistema tiene dos componentes principales: El proceso y el controlador; representados como bloques, con flechas que denotan la relación entre entradas y salidas.

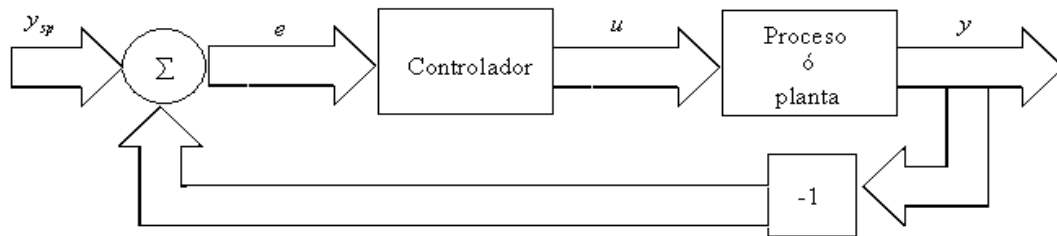


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un sistema con retroalimentación simple.

El proceso ó planta tiene una entrada, que es la variable manipulada o también llamada variable de control, es denotada por u . La salida de la planta ó proceso es llamada: Variable de proceso (PV) y es denotada por y . Dicha variable se mide mediante un sensor. El valor requerido de la variable de proceso es llamada setpoint (SP) ó valor de referencia, es denotada por y_{sp} .

El error de control e es la diferencia entre el valor de referencia y la variable de proceso:

$$e = y_{sp} - y \quad (4.1)$$

El controlador en la Figura 4.1, tiene una entrada, el error y una salida, la cual es la variable de control. La figura muestra que la planta ó proceso y el controlador están conectados en lazo cerrado (retroalimentado).

El propósito de los sistemas en lazo cerrado, es mantener la variable de proceso, en el valor requerido o de referencia, a pesar de posibles perturbaciones [4]. Para lograr lo anterior, se asume que el sistema está en equilibrio y que las perturbaciones ocurren cuando la variable de proceso es mayor que el valor de referencia. Después el error es negativo y la salida del controlador disminuye. Éste tipo de retroalimentación también es llamada retroalimentación negativa, debido a que la variable manipulada se mueve en dirección opuesta a la variable de proceso.

4.3 Control de la velocidad en lazo cerrado

En la Figura 4.2, se muestra el diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado propuesto para controlar la velocidad del motor.

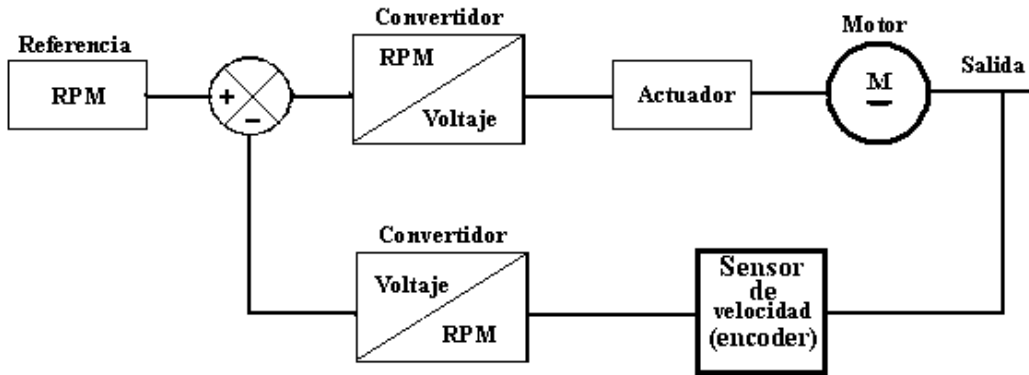


Figura 4.2 Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado propuesto para el control de la velocidad del motor.

Para iniciar con la programación del control, es necesario establecer una ecuación que represente el comportamiento de la velocidad del motor en base al voltaje aplicado a las terminales de éste, para lo cual se utiliza la ecuación de la Figura 4.3.

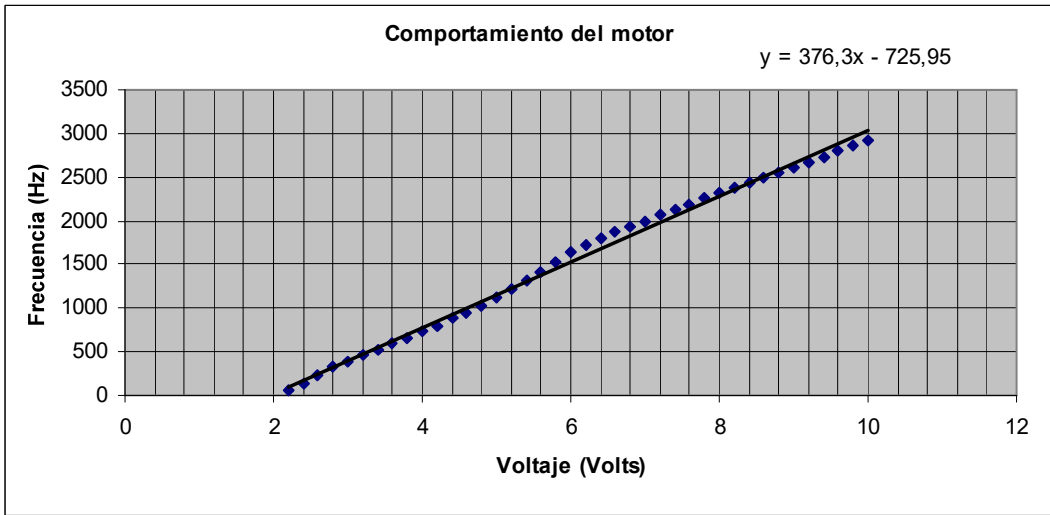


Figura 4.3 Imagen de la prueba realizada para obtener la ecuación que define el comportamiento del motor.

Las mediciones realizadas al motor en el Capítulo 3 como se muestra en la Figura 4.3, donde se obtuvo una relación de la frecuencia respecto al voltaje aplicado al motor, se determina un valor de frecuencia (velocidad del motor) respecto a las variaciones de voltaje que proporciona el convertidor de frecuencia a voltaje; de donde mediante el software **Excel** y utilizando el método de la línea recta obtuvimos la ecuación 4.2, que representa dicho comportamiento.

$$y = 376.3x - 725.95 \quad (4.2)$$

En donde:

y Representa la frecuencia del sensor de velocidad (velocidad del motor RPM).

x Representa el voltaje del convertidor de frecuencia a voltaje (Volts).

De la ecuación 4.2, se despeja la variable x que representa el voltaje, de donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$x = \frac{y + 725.95}{376.3} \quad (4.3)$$

El propósito de despejar la variable x , es para realizar el control de la velocidad asignando un valor de set point ó de referencia en RPM y obtener valores en volts para poder suministrarlos al actuador que activa el motor.

4.4 Control Proporcional (P)

El control proporcional es la base de los tres modos de control: control Integral y control Derivativo, éstos son sumados al control Proporcional. La ecuación que representa la acción de control Proporcional (P), se muestra en la ecuación 4.4.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.4)$$

Donde:

$u(t)$ Es la salida del control proporcional.

K_p Es la ganancia proporcional.

$e(t)$ Es el error existente entre la referencia y el valor de salida.

La respuesta del control Proporcional P, muestra un error estacionario denominado (Offset), dicho error disminuye al aumentar la ganancia K_p , pero el sistema es más oscilatorio y puede llegar a la inestabilidad.

4.4.1 Control de la velocidad del motor utilizando el control Proporcional (P)

En la Figura 4.4, se observa el diagrama de bloques propuesto para el control de la velocidad del motor mediante el control Proporcional (P). La sección oscura de la figura, representa el bloque que contiene la ganancia K_p .

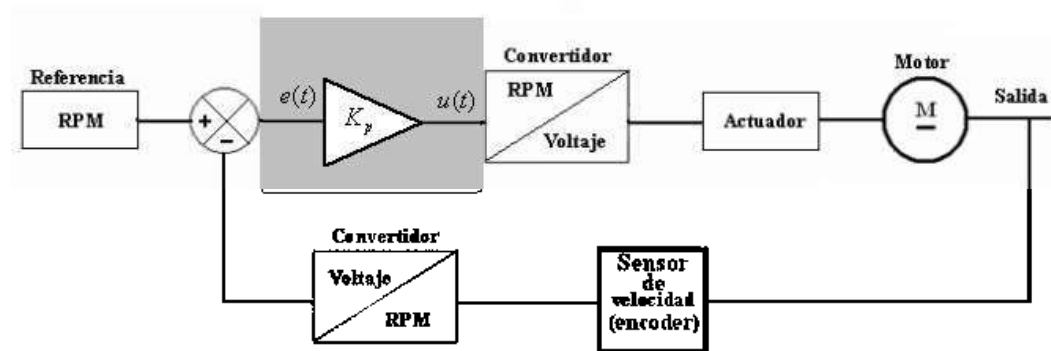


Figura 4.4 Diagrama de bloques que representa el control Proporcional (P)

4.4.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del control Proporcional (P)

En la Figura 4.5 se muestra la imagen del programa en LabVIEW, en donde se lleva a cabo el control Proporcional de forma virtual. En esta imagen se aprecian 4 secciones resaltadas. Las secciones contienen los diferentes bloques que representan al control Proporcional (P), los demás bloques se mencionaron anteriormente en el Capítulo 3.

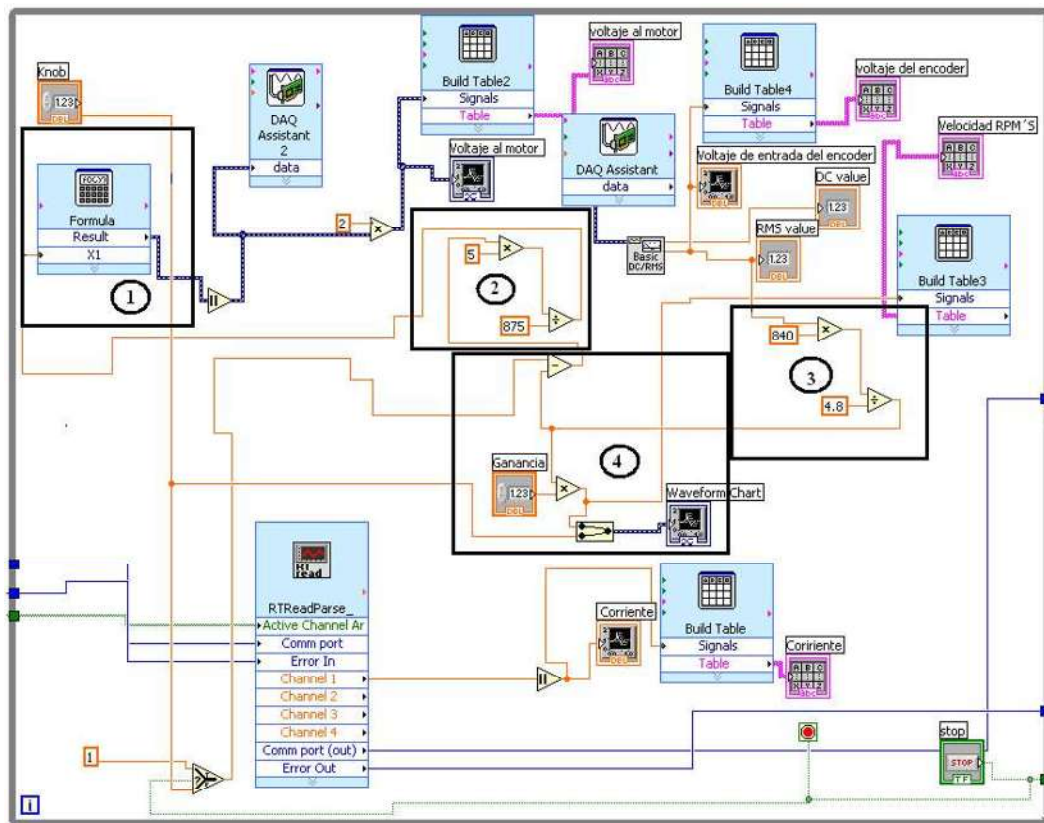


Figura 4.5 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW para el control Proporcional (P).

- **Sección 1:** Contiene el bloque “Fórmula” [5], en la cual se insertó la ecuación 4.3; que representa el comportamiento de la velocidad del motor respecto al voltaje. La salida de dicho bloque va al bloque que representa a la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008, para enviar un voltaje a las terminales del motor.

- **Sección 2:** Contiene varios bloques, en los cuales se realiza la conversión de velocidad (RPM) a voltaje. Las RPM provienen de la resta del valor de referencia y del valor de velocidad retroalimentado.
- **Sección 3:** Contiene varios bloques que representan la conversión de voltaje a RPM. El voltaje proviene de un amplificador operacional con ganancia de 4, el cual precede al convertidor de frecuencia voltaje TC9402 adaptado al encoder del motor.
- **Sección 4:** Contiene los bloques que representan el control Proporcional; el bloque de multiplicación multiplica el valor en RPM de la salida del motor por el valor asignado a la ganancia K_p el cual se varía desde el panel frontal.

4.4.3 Pruebas al control Proporcional (P) para el control de la velocidad del motor

- Prueba No. 1 al Control de velocidad del motor con el control Proporcional

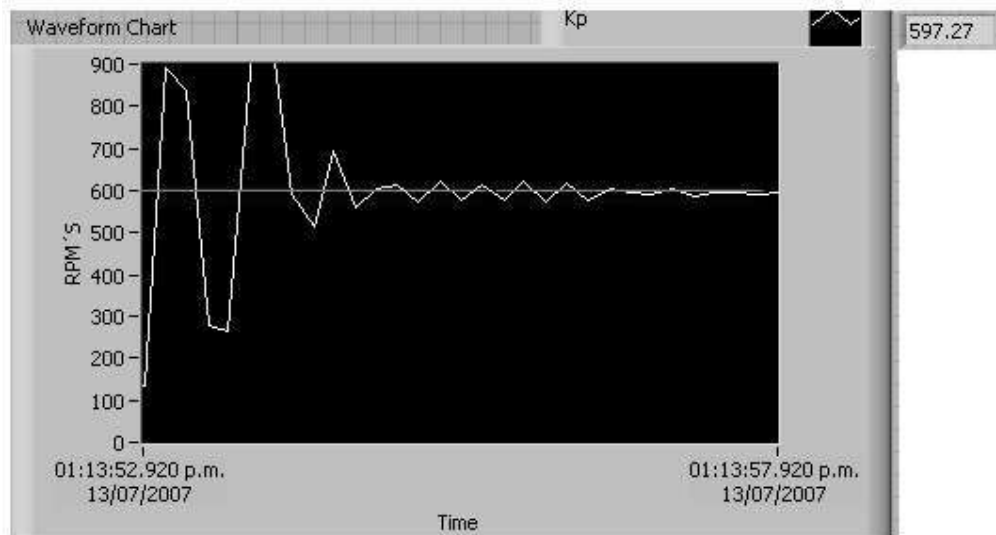


Figura 4.6 Comportamiento de la velocidad del motor al colocar 600 RPM en la referencia.

En la Figura 4.6, se observa el comportamiento de la velocidad del motor, utilizando el control Proporcional (P); con una ganancia $K_p = 1.2$ y un valor de referencia en RPM de 600. Se observa que el valor de salida es de 597.27 RPM, lo cual no cumple con el valor establecido como referencia.

En la Figura 4.7, se muestra el comportamiento del voltaje aplicado a las terminales del motor de CD al colocar 600 RPM en la referencia. Se observa que el voltaje aplicado a las terminales del motor es de 5.66 Volts cuando se encuentra en estado estable.



Figura 4.7 Comportamiento del voltaje aplicado al motor colocando 600 RPM en la referencia.



Figura 4.8 Comportamiento del voltaje a la salida el convertidor de F/V colocando 600 RPM en la referencia.

En la Figura 4.8, se observa el comportamiento del voltaje que proviene del encoder del motor al aplicar 600 RPM como referencia.

El comportamiento de la corriente en el motor al aplicar 600 RPM, se muestra en la Figura 4.9.

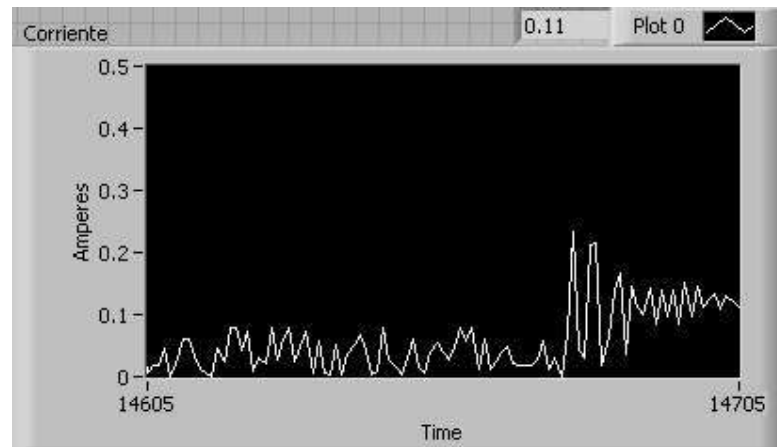


Figura 4.9 Comportamiento de la corriente del motor colocando 600 RPM en la referencia.

- **Prueba No 2 al control de velocidad con el control Proporcional (P)**

En la Figura 4.10, se observa el comportamiento de la velocidad del motor al colocar 875 RPM y una ganancia $K_p = 1.45$ del control Proporcional. Se observa que la señal del control Proporcional no alcanza a la señal de referencia, sin embargo la tendencia natural de dicho control es seguir la referencia.

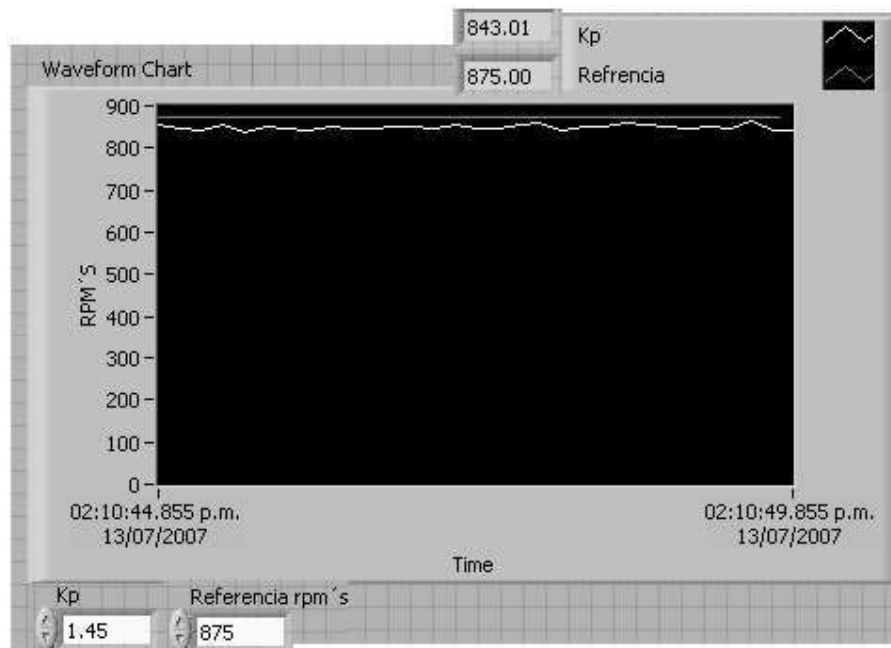


Figura 4.10 Comportamiento de la velocidad del motor colocando 875 RPM en la referencia.

Las variables de interés del motor y del sistema, se muestran en la Figura 4.11, en la cual se observan: el voltaje que se aplica a las terminales del motor, la corriente del motor, su velocidad en RPM y el voltaje proveniente del convertidor de frecuencia que se encuentra a la salida del encoder del motor.

voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
7.208019	3.325169	0.183303	843.761680
7.118375	3.369991	0.190934	855.135343
7.262922	3.297718	0.189408	836.795903
7.145921	3.356218	0.187271	851.640412
7.174749	3.341804	0.193071	847.982833
7.208044	3.325157	0.185745	843.758602
7.156302	3.351028	0.187576	850.323319
7.195654	3.331352	0.190324	845.330489
7.192830	3.332764	0.185440	845.688825
7.154450	3.351954	0.189408	850.558339
7.156666	3.350846	0.187271	850.277120
7.187257	3.335550	0.187271	846.395939
7.112306	3.373026	0.190629	855.905295
7.203289	3.327534	0.188797	844.361813
7.181760	3.338299	0.182692	847.093328
7.132561	3.362898	0.186661	853.335392
7.072009	3.393174	0.190629	861.017927
7.218694	3.319832	0.186661	842.407334
7.140575	3.358892	0.186355	852.318739
7.158933	3.349712	0.192460	849.989474
7.092448	3.382955	0.185745	858.424789
7.116654	3.370852	0.186355	855.353632
7.136766	3.360796	0.185440	852.801916
7.177816	3.340271	0.183303	847.593744
7.142676	3.357841	0.188492	852.052175
7.195202	3.331578	0.193071	845.387862
7.041524	3.408417	0.185745	864.885820
7.224817	3.316770	0.190934	841.630489
7.213949	3.322204	0.175366	843.009321

Figura 4.11 Datos del comportamiento de las variables del motor colocando 875 RPM en la referencia.

En la Figura 4.12 se observa el comportamiento del voltaje al colocar 875 RPM en la referencia, el cual se observa que es aproximadamente de 7.2 volts.

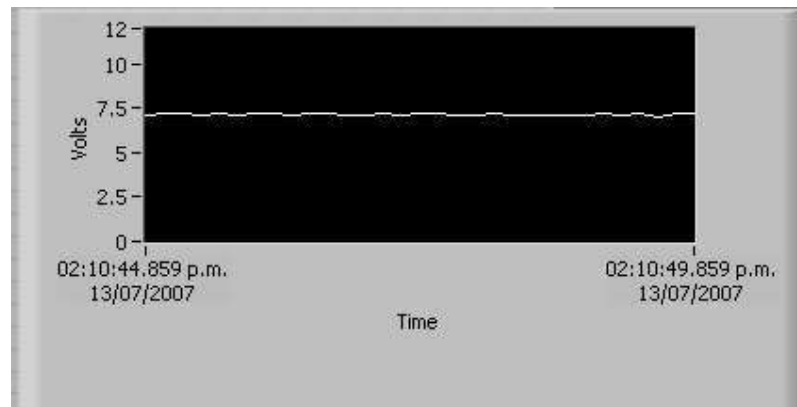


Figura 4.12 Comportamiento del voltaje aplicado al motor colocando 875 RPM en la referencia.

En la Figura 4.13, se observa el comportamiento del voltaje que se tiene a la salida del convertidor de F/V después de ser aumentado, al pasar por el amplificador operacional en configuración no inversora con una ganancia igual a 4 y al colocar 875 RPM en la referencia.

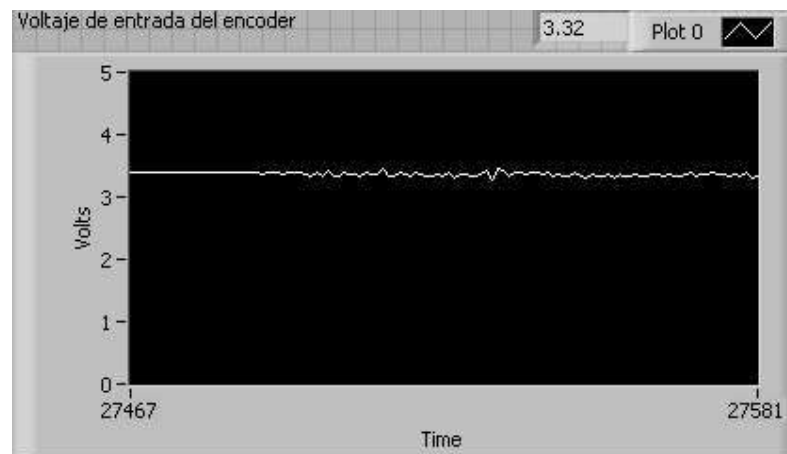


Figura 4.13 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V colocando 875 RPM en la referencia.

En la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de la corriente al colocar 875 RPM en el motor, en donde se observamos que la corriente es aproximadamente 0.18 Amperes.

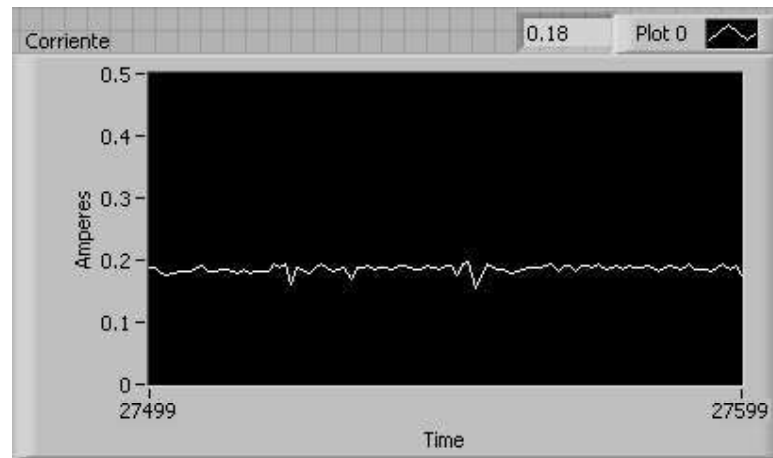


Figura 4.14 Comportamiento de la corriente del motor colocando 875 RPM en la referencia.

4.5 Control Proporcional Integral (PI)

El control PI consta de una acción correctiva más eficaz que el control Proporcional P, el cual elimina el error estacionario (Offset). Dicha acción del control PI crece con el tiempo, siempre y cuando exista un error.

La ecuación siguiente (4.5) representa al control PI.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) \quad (4.5)$$

Donde

$u(t)$ Es la salida del control PI.

K_p Es la ganancia proporcional.

K_I Es la ganancia integral.

$e(t)$ Es el error existente entre la referencia y el valor de salida.

4.5.1 Control de velocidad del motor utilizando el control Proporcional Integral (PI)

En la Figura 4.15, se muestra el diagrama de bloques que representa al control Proporcional Integral propuesto. En dicha imagen se observa que la acción Integral es colocada en paralelo a la acción Proporcional.

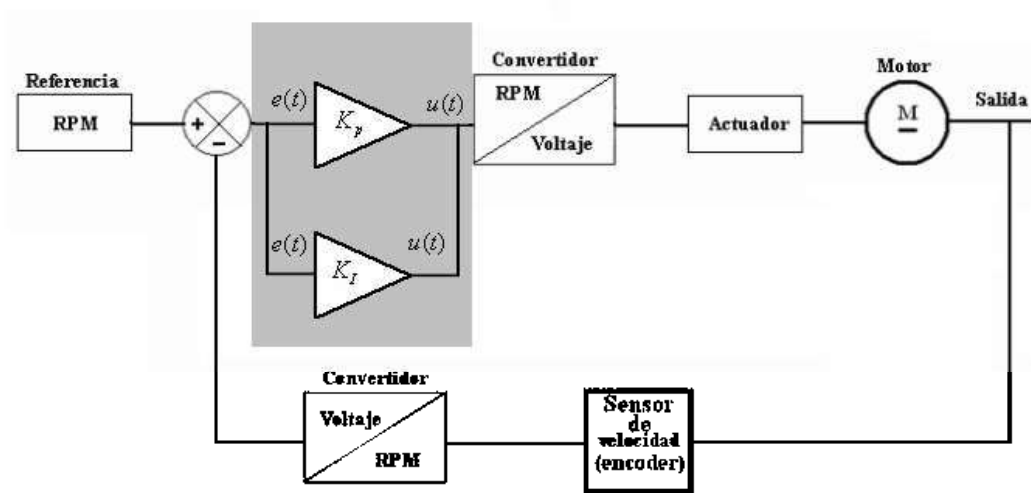


Figura 4.15 Diagrama de bloques representativo del control Proporcional-Integral (PI).

4.5.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del control Proporcional-Integral (PI)

En la Figura 4.16, se muestra el diagrama de bloques del control PI programado en LabVIEW, en dicha imagen se observan dos conjuntos de bloques encerrados que denotan:

- 1 En dicha área, se encuentran los bloques que conforman el control Proporcional.
- 2 contiene un conjunto de bloques representativos del control Proporcional más Integral.

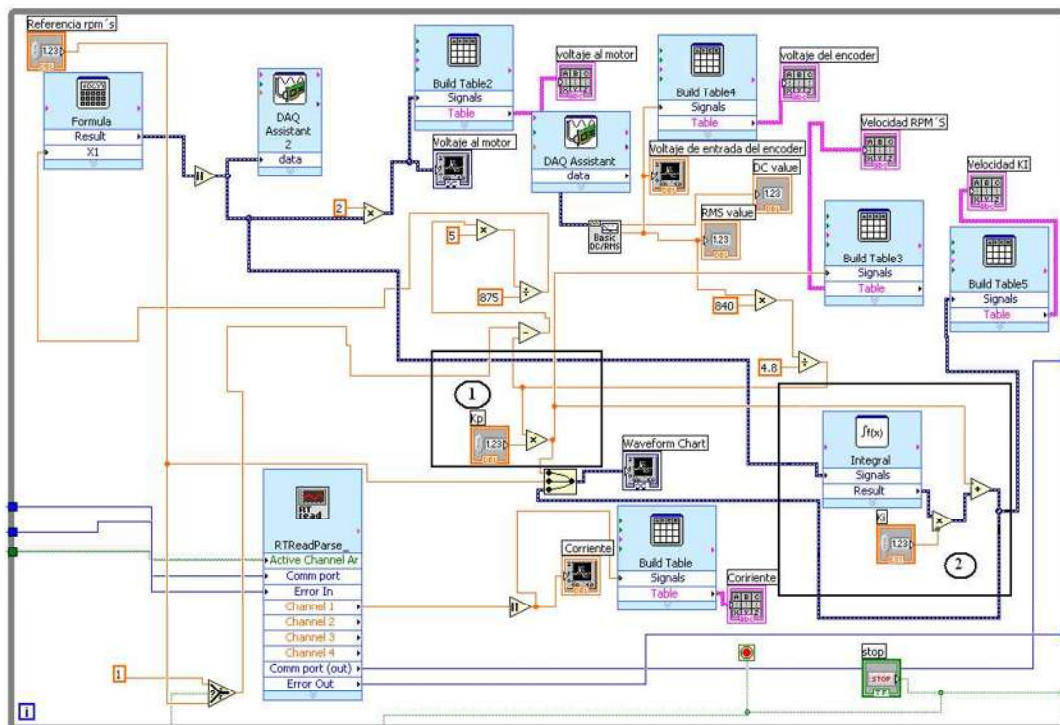


Figura 4.16 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW para el control Proporcional-Integral (PI).

Los demás bloques de la Figura 4.16, se describieron en figuras anteriores.

4.5.3 Pruebas al control Proporcional-Integral (PI) para el control de la velocidad del motor

- Prueba No. 1 al control de velocidad con el control PI

En la Figura 4.17, se muestra el comportamiento de la velocidad del motor al colocar un valor de referencia de 300 RPM con una ganancia $K_p=1.1$ y una ganancia $K_i=10$, con lo cual se observa una mejor respuesta utilizando el control PI en comparación con el control Proporcional.

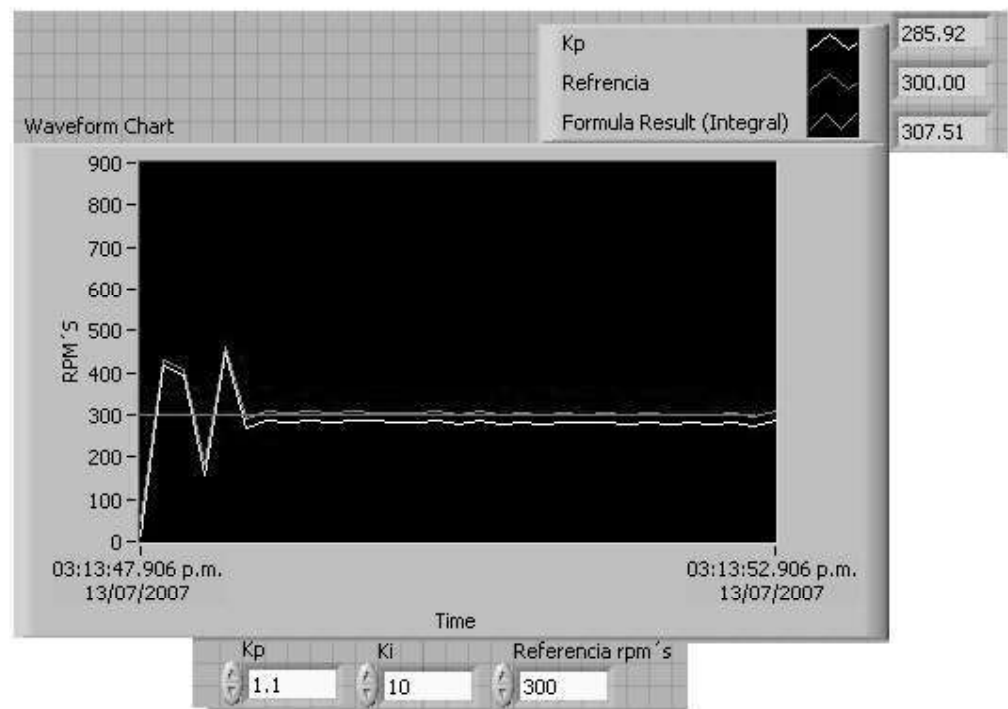


Figura 4.17 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.18, muestra el comportamiento del voltaje suministrado al motor al colocar 300 RPM en la referencia del programa, el cual es aproximadamente 4.32 Volts.



Figura 4.18 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.19, muestra las variables de interés del motor y del control Proporcional Integral al demandar 300 RPM al motor. Tales variables indican: Voltaje aplicado al motor, voltaje proveniente del encoder, corriente del motor, velocidad en RMP con control Proporcional y finalmente la velocidad en RPM utilizando el control Proporcional Integral.

U	Y	X1	X2	
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad	velocidad KI
3.201751	2.042589	0.192766	415.126670	409.207189
5.656539	0.815195	0.075855	393.198436	185.207751
2.613321	2.336804	0.020910	156.925057	462.901428
4.487034	1.399948	0.114621	449.834826	291.925082
4.315005	1.485962	0.057845	269.489912	307.622749
4.350773	1.468078	0.014499	286.047725	304.358869
4.307525	1.489702	0.005647	282.605003	308.305298
4.351312	1.467809	0.016636	286.767674	304.309745
4.322109	1.482410	0.057845	282.553187	306.974504
4.329991	1.478469	0.024878	285.363961	306.255212
4.347204	1.469863	0.043498	284.605255	304.684591
4.372044	1.457442	0.006258	282.948572	302.417871
4.303297	1.491816	0.019689	280.557649	308.691074
4.411344	1.437793	0.000458	287.174589	298.831818
4.317247	1.484841	0.012057	276.775099	307.418184
4.401529	1.442700	0.026709	285.831951	299.727401
4.339335	1.473797	0.017247	277.719756	305.402581
4.381695	1.452617	0.009921	283.705905	301.537286
4.366773	1.460078	0.000153	279.628813	302.898928
4.375669	1.455630	0.027930	281.065065	302.087165
4.348171	1.469379	0.033120	280.208822	304.596364
4.393738	1.446596	0.009310	282.855511	300.438346
4.368309	1.459310	0.046856	278.469656	302.758766
4.382498	1.452216	0.015720	280.917223	301.463987
4.379090	1.453919	0.019689	279.551497	301.774948
4.397089	1.444920	0.003205	279.879497	300.132518
4.346313	1.470308	0.031593	278.147071	304.765885
4.431525	1.427702	0.009921	283.034321	296.990244
4.316286	1.485322	0.010836	274.832617	307.505862

Figura 4.19 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.20 muestra el comportamiento del voltaje proveniente del convertidor de frecuencia voltaje TC9402 conectado al sensor de velocidad (encoder) del motor de CD.



Figura 4.20 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V TC9402, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.

En la Figura 4.21, se muestra el comportamiento de la corriente del motor de CD al colocar una velocidad de 300 RPM en la referencia del programa en LabVIEW utilizando el control PI.

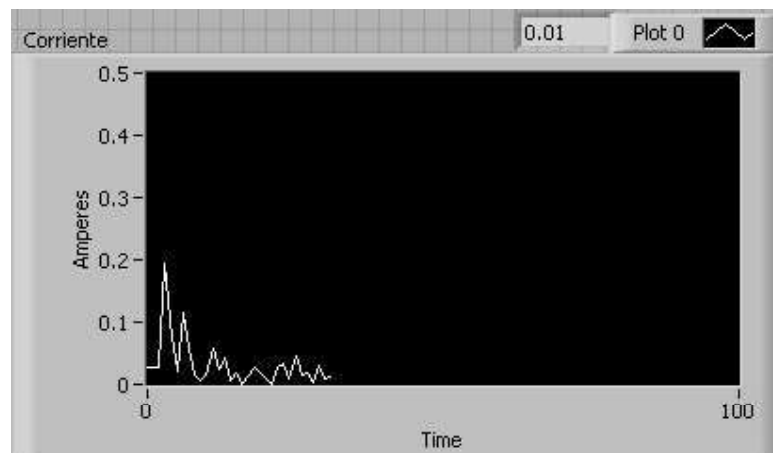


Figura 4.21 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 300 RPM en la referencia.

- **Prueba No. 2 al control de velocidad con el control PI**

La Figura 4.22 muestra el comportamiento de la velocidad del motor de CD al colocar 700 RPM en la referencia del programa de LabVIEW y utilizando el control PI, aplicando una ganancia $K_p=1.3$ y una ganancia $K_i=19$ para el control.

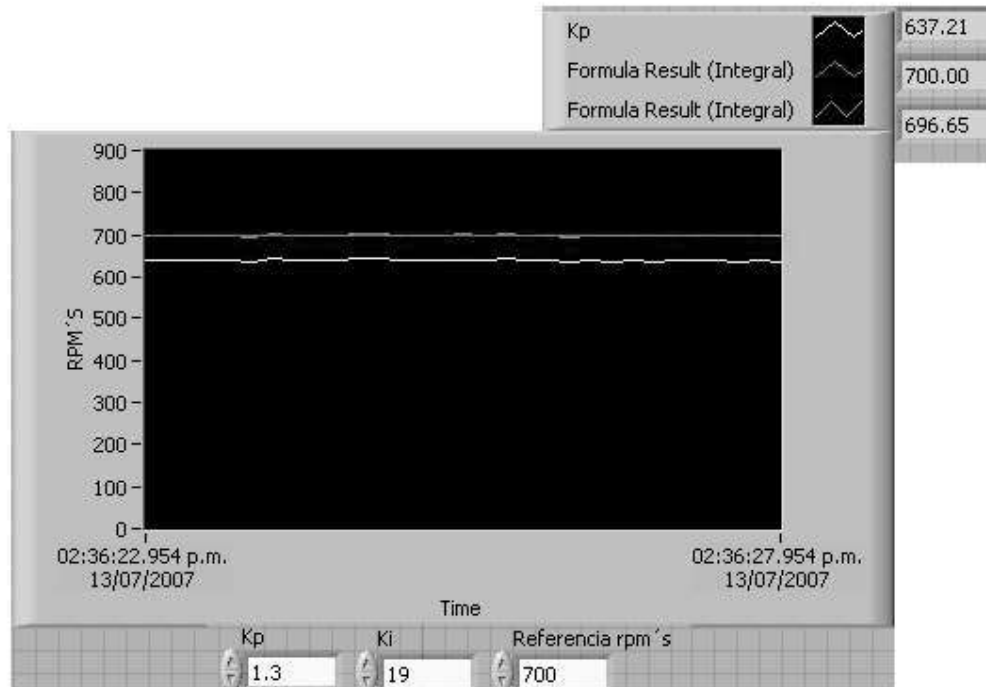


Figura 4.22 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.

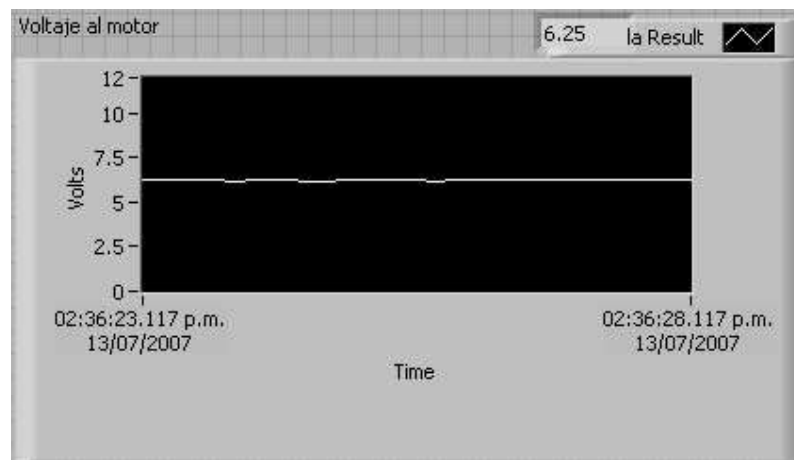


Figura 4.23 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.

En la Figura 4.23, se observa que al colocar 700 RPM en la referencia del programa utilizando el control PI, le aplica un voltaje de aproximadamente 6.25 Volts a las terminales del motor de CD.

En la Figura 4.24, se observan las diferentes variables de interés del motor y del sistema en forma numérica. Primeramente se muestra el voltaje aplicado al motor, luego el valor de voltaje generado por el encoder acoplado al motor de CD, el valor de la corriente del mismo y por último la velocidad (del control Proporcional) en RPM.

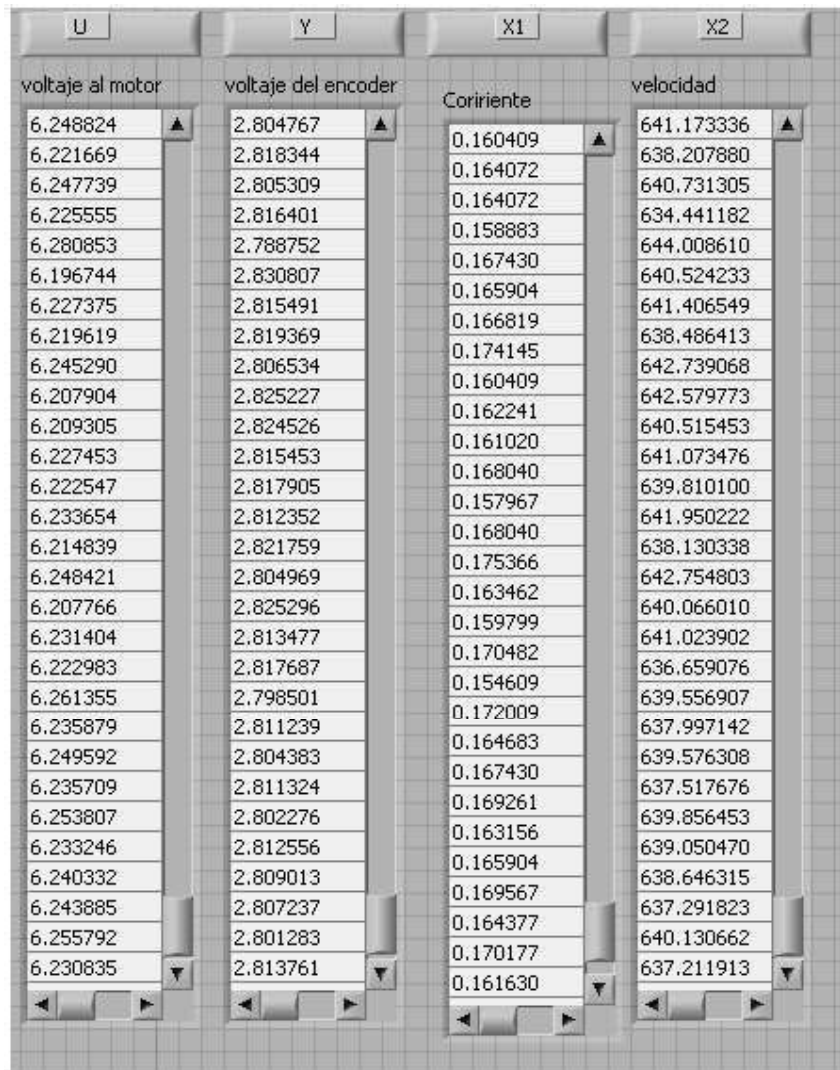


Figura 4.24 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.

La Figura 4.25 muestra el comportamiento del voltaje proveniente del convertidor de frecuencia-voltaje, el cual es aproximadamente de 2.80 Volts al colocar 700 RPM en la referencia del programa.



Figura 4.25 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.

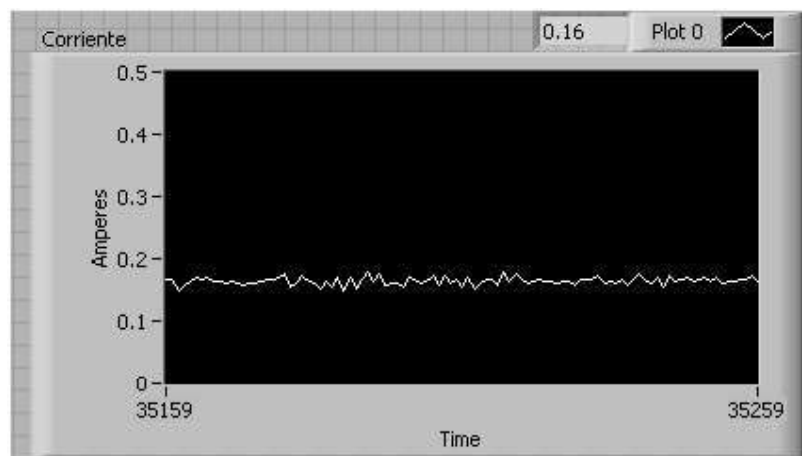


Figura 4.26 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 700 RPM en la referencia.

En la Figura 4.26 se observa el valor de la corriente al colocar 700 RPM en el programa utilizando el control PI. Dicho valor es de aproximadamente 0.16 Amperes.

- **Prueba No. 3 al control de velocidad con el control Proporcional-Integral.**

La Figura 4.27 se muestra el comportamiento de la velocidad del motor al colocar 875 RPM en la referencia del programa, utilizando una ganancia $K_p=1.4$ y una ganancia $K_i=17$. Se observa una notable mejoría del sistema de control PI respecto al P.

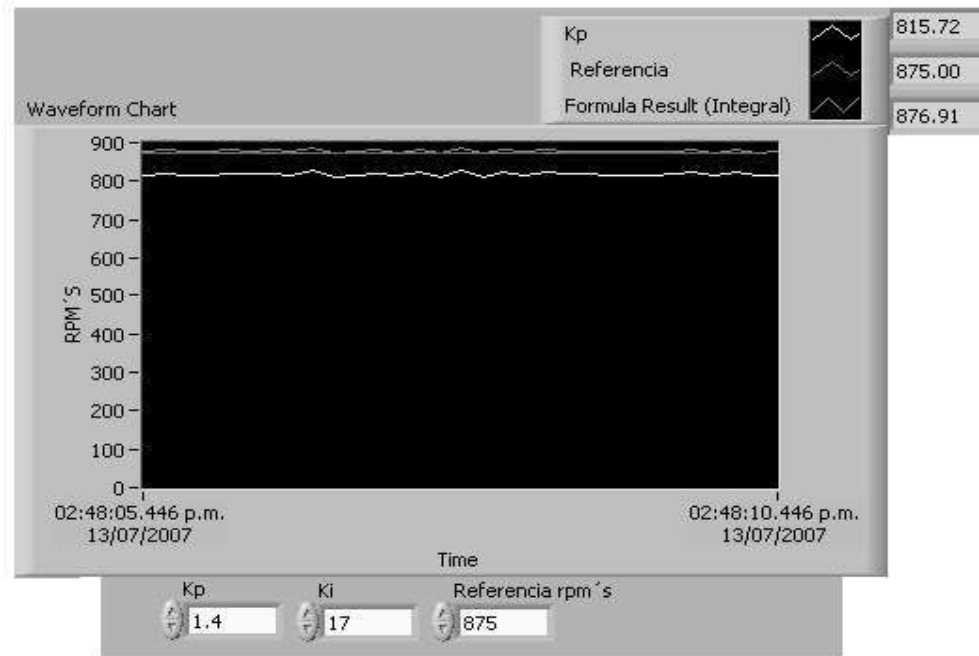


Figura 4.27 Comportamiento de la velocidad del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.

Se observa que al colocar 875 RPM en la referencia del programa y utilizando el control PI, se aplica un voltaje de aproximadamente 7.20 Volts al motor de CD (Figura 4.28).

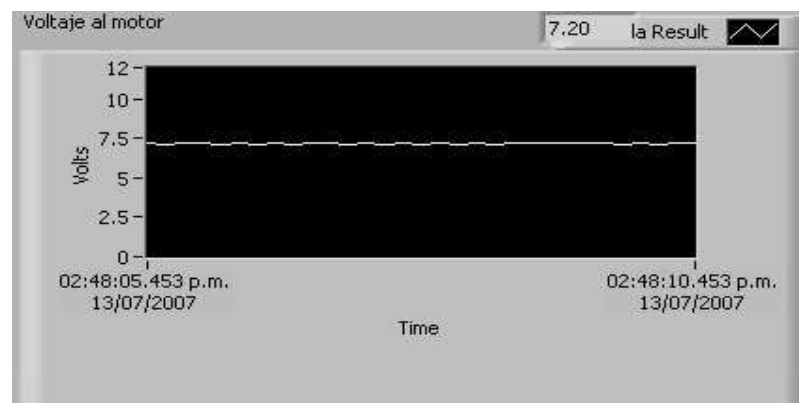


Figura 4.28 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.

La Figura 4.29 muestra las diferentes variables del motor y sistema; inicialmente se observa una columna con los valores de voltaje aplicado al motor, luego una columna con los valores de voltaje provenientes del encoder, después valores de corriente del motor y finalmente la velocidad del mismo en RPM (del control P).

U	Y	X1	X2
voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad
7.161817	3.328546	0.190324	815.493858
7.201265	3.333484	0.190934	816.703562
7.191390	3.353120	0.188187	821.514474
7.152117	3.335872	0.191545	817.288636
7.186614	3.351181	0.183913	821.039296
7.155996	3.329171	0.191545	815.646863
7.200016	3.377630	0.187882	827.519277
7.103098	3.316152	0.189408	812.457257
7.226054	3.323794	0.190629	814.329574
7.210769	3.352116	0.191545	821.268461
7.154125	3.317850	0.192155	812.873234
7.222658	3.357700	0.184829	822.636575
7.142957	3.310743	0.192155	811.132086
7.236871	3.373582	0.191239	826.527635
7.111193	3.313546	0.190018	811.818659
7.231267	3.359727	0.183913	823.133188
7.138903	3.325363	0.193376	814.713884
7.207632	3.353841	0.190018	821.691010
7.150676	3.339230	0.185134	818.111372
7.179898	3.337998	0.188797	817.809537
7.182361	3.330690	0.190324	816.019095
7.196977	3.332483	0.186966	816.458222
7.193393	3.332067	0.190629	816.356347
7.194224	3.339543	0.191545	818.188153
7.179271	3.358160	0.187882	822.749238
7.142037	3.317832	0.192766	812.868733
7.222695	3.360617	0.190934	823.351260
7.137123	3.318911	0.187882	813.133247
7.220535	3.329458	0.183913	815.717234

Figura 4.29 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control Proporcional Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.

La Figura 4.30 muestra gráficamente los valores del voltaje generado por el encoder. Se observa que al colocar 875 RPM en la referencia se obtiene aproximadamente un valor de 3.33 volts.

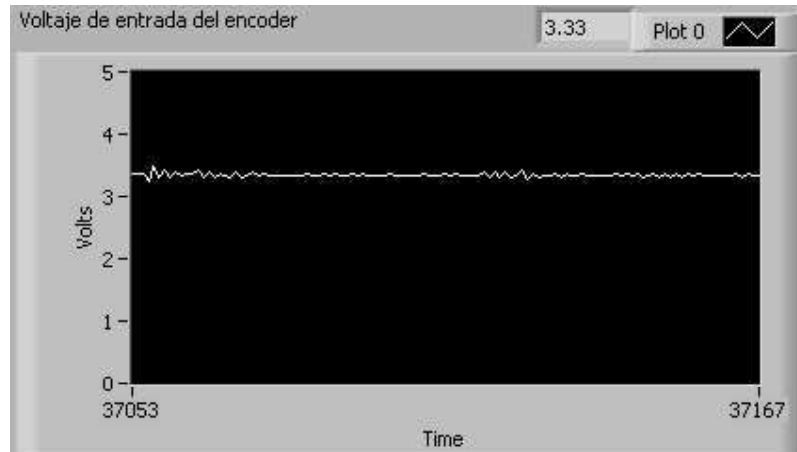


Figura 4.30 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.

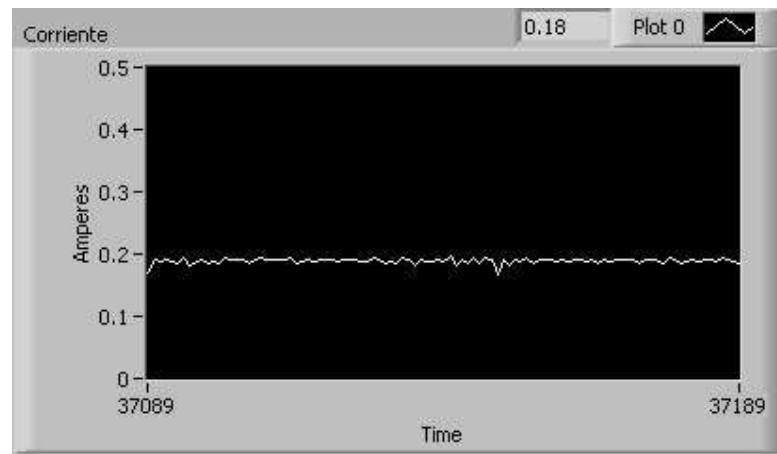


Figura 4.31 Comportamiento de la corriente del motor utilizando el control Proporcional-Integral (PI) y colocando 875 RPM en la referencia.

En la Figura 4.31, se observa gráficamente el comportamiento de la corriente del motor al colocar 875 RPM en la referencia del programa utilizando el control PI.

4.6 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

Un control PID, es un sistema de control que mediante un actuador es capaz de mantener una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición del sensor que la mide. Este es uno de los métodos de control más frecuentes y precisos de la regulación automática.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) + K_D \frac{d(e(t))}{dt} \quad (4.6)$$

Donde

$u(t)$ Es la salida del control PID.

K_p Es la ganancia proporcional.

K_I Es la ganancia integral.

K_D Es la ganancia derivativa.

$e(t)$ Es el error existente entre la referencia y el valor de salida.

4.6.1 Control de velocidad del motor utilizando el control Proporcional Integral Derivativo (PID)

El diagrama de bloques del control Proporcional Integral Derivativo (PID) se muestra en la Figura 4.32.

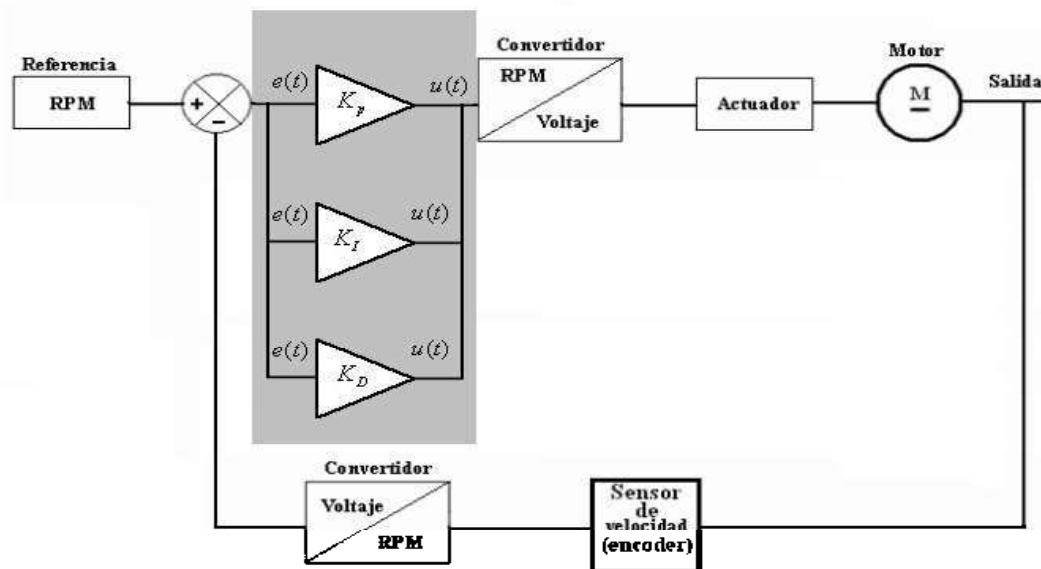


Figura 4.32 Diagrama de bloques representativo del control Proporcional-Integral-Derivativo.

4.6.2 Instrumentación virtual para el control de velocidad del control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

En la Figura 4.33 se observa el diagrama de bloques equivalente al control Proporcional Integral Derivativo. En dicha imagen se observan 4 secciones encerradas, las cuales representan:

1. Es el bloque “Fórmula”, que contiene la función representativa del comportamiento del motor respecto al voltaje.
2. Dicha sección contiene los bloques necesarios para el control Proporcional.
3. Contiene los bloques necesarios para construir virtualmente el control Proporcional Integral.
4. Contiene los bloques necesarios para construir el control Proporcional Integral Derivativo. Nótese que contiene dos bloques “Formula”, de los cuales uno es para la acción integral y el otro para la acción derivativa.

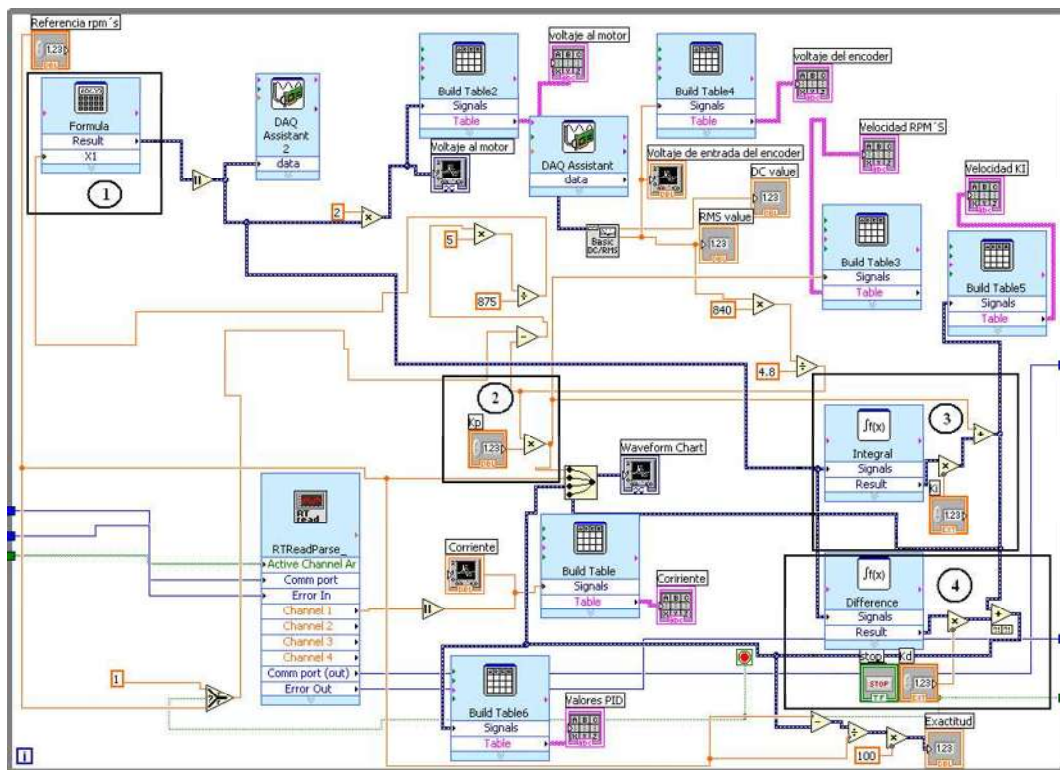


Figura 4.33 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW, para el control PID.

4.6.3 Pruebas al control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para el control de la velocidad del motor

- **Prueba No. 1 al control de velocidad con el control PID.**

La Figura 4.34 muestra el comportamiento de la velocidad del motor de CD al colocar 300 RPM en la referencia del programa y utilizando una ganancia $K_p=1.05$, una ganancia $K_i=14$ y una ganancia $K_d=150$ para el control PID.

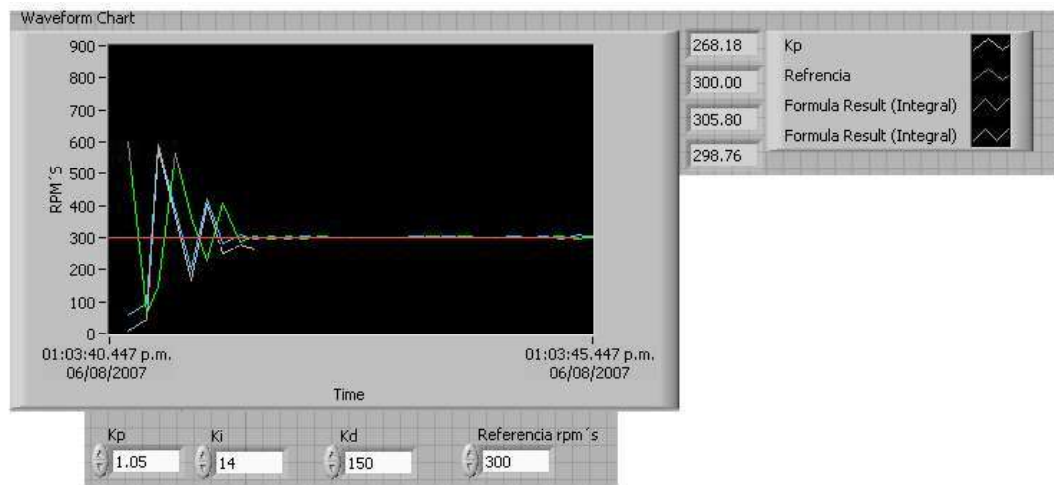


Figura 4.34 Comportamiento de la velocidad del motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.35 muestra el comportamiento numérico de las variables de interés del sistema y del motor. Primeramente se observan los valores del voltaje aplicado al motor, luego el voltaje generado por el encoder, después los valores de corriente y finalmente los valores de velocidad en RPM de los diferentes controles; P, PI y PID. Se observa que el valor de velocidad del control P dista mucho del valor de referencia, al contrario de los otros dos controles, que tienen una mejor aproximación.

voltaje al motor	voltaje del encoder	Corriente	velocidad P	velocidad PI	VALORES PID RPM °S
6.805848	0.240540	0.449176	44.199289	91.840228	62.438681
0.936004	3.175462	0.198871	583.491203	590.043234	149.804937
3.349381	1.968774	0.103938	361.762269	385.207933	566.211145
5.496281	0.895324	0.012668	164.515781	202.989749	364.007291
2.914574	2.186177	0.063340	401.710112	422.112131	228.484106
4.540723	1.373103	0.097222	252.307733	284.092791	406.053916
4.267624	1.509652	0.009921	277.398623	307.271994	286.789635
4.397133	1.444898	0.004121	265.499993	296.279926	305.993094
4.293965	1.496482	0.031899	274.978625	305.036376	297.298717
4.392501	1.447214	0.001374	265.925610	296.673115	304.063331
4.310496	1.488217	0.063340	273.459796	303.633268	297.482912
4.361564	1.462683	0.001984	268.767962	299.298907	303.128976
4.336164	1.475382	0.032509	271.101503	301.454654	299.549723
4.359828	1.463551	0.011447	268.927420	299.446215	301.220977
4.335272	1.475829	0.012668	271.183533	301.530434	299.688709
4.331663	1.477633	0.001679	271.515045	301.836689	301.566066
4.351614	1.467658	0.042583	269.682071	300.143370	301.639675
4.312966	1.486982	0.050519	273.232852	303.423615	300.525018
4.374193	1.456368	0.009310	267.607616	298.226968	302.818998
4.311369	1.487780	0.006868	273.379607	303.559189	298.847359
4.364793	1.461068	0.014805	268.471222	299.024775	303.031621
4.336750	1.475090	0.013278	271.047700	301.404950	299.301703
4.333966	1.476482	0.005647	271.303477	301.641240	301.432442
4.323062	1.481934	0.052961	272.305320	302.566752	301.748921
4.357891	1.464519	0.008089	269.105419	299.610653	302.222817
4.287827	1.499551	0.000763	275.542518	305.557306	300.302532
4.397310	1.444810	0.054182	265.483794	296.264961	304.476164
4.274073	1.506428	0.030372	276.806174	306.724684	297.481924
4.367955	1.459487	0.001068	268.180774	298.756457	305.797600

Figura 4.35 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.36 muestra el comportamiento del voltaje aplicado al motor al colocar 300 RPM en la referencia del programa, el cual es aproximadamente 4.37 volts.

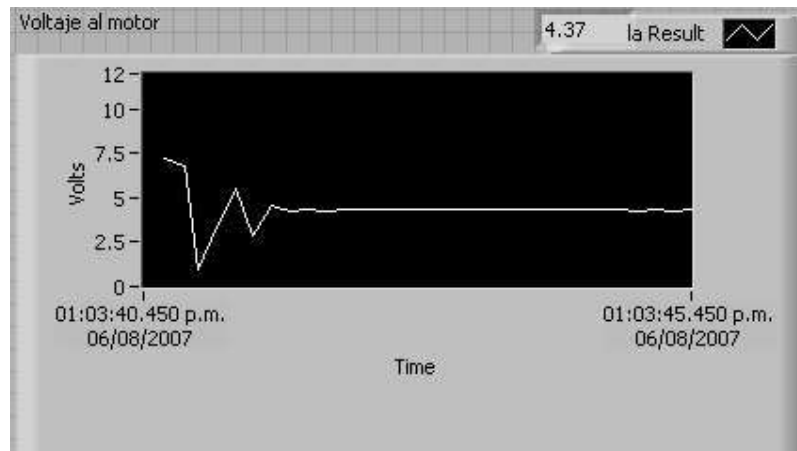


Figura 4.36 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.

En la Figura 4.37 se observa el comportamiento en forma grafica del voltaje generado por el encoder al pasar por el convertidor de frecuencia voltaje y al colocar 300 RPM en la referencia del programa utilizando el control PID.

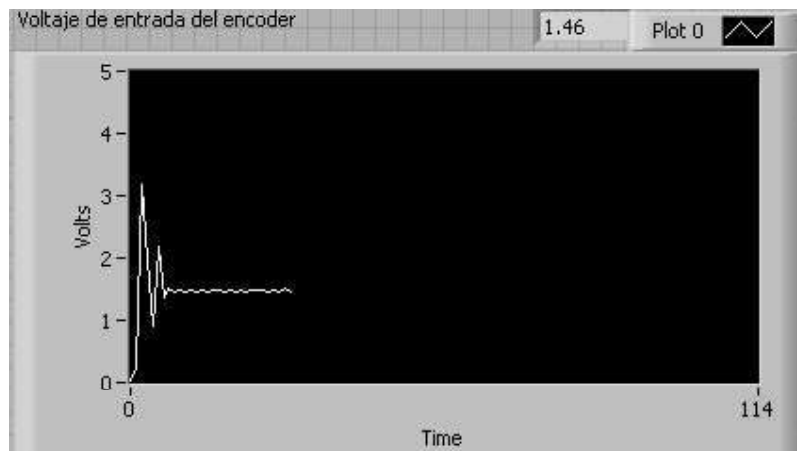


Figura 4.37 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V TC9402, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.

La Figura 4.38 muestra el comportamiento de la corriente del motor al aplicar 300 RPM en la referencia del programa en LabVIEW y utilizando el control PID.

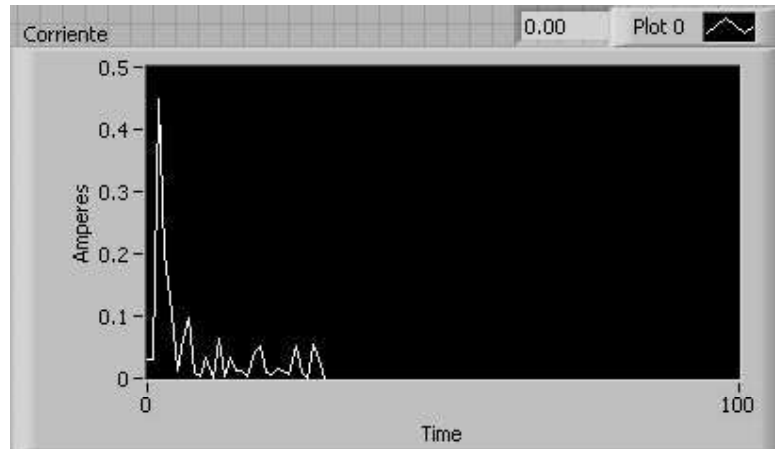


Figura 4.38 Comportamiento de la corriente del motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 300 RPM en la referencia.

- **Prueba No. 2 al control de velocidad con el control PID.**

La Figura 4.39 muestra el comportamiento de la velocidad del motor de CD al colocar: Una ganancia $K_p=1.35$, una ganancia $K_i=11$, una ganancia $K_d=150$ y un valor de 750 RPM en la referencia del programa utilizando el control PID.

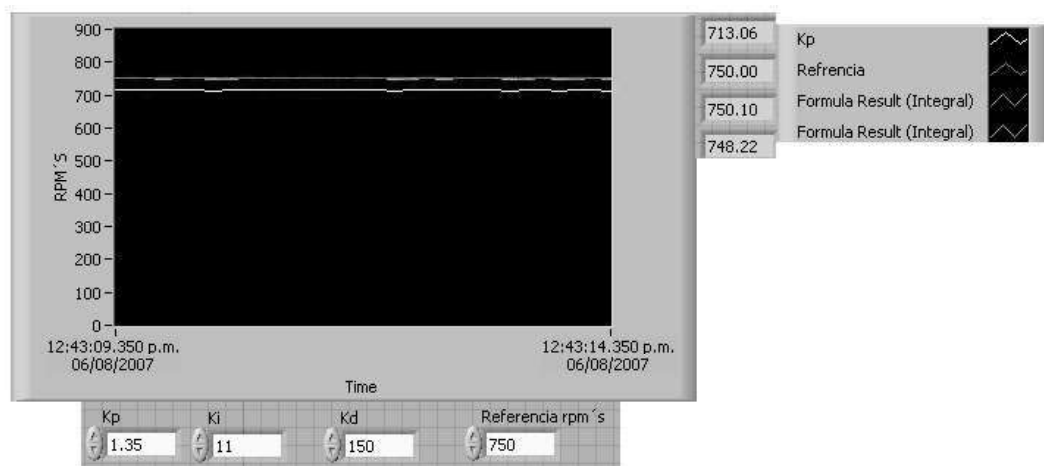


Figura 4.39 Comportamiento de la velocidad del motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.

La Figura 4.40 muestra el comportamiento del voltaje aplicado al motor de CD cuando se coloca un valor de 750 RPM en la referencia del programa. Se observa que al demandarle esa velocidad se le aplica un voltaje de 6.39 volts aproximadamente. También es notorio que el voltaje es más constante utilizando el control PID.



Figura 4.40 Comportamiento del voltaje aplicado al motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.

La Figura 4.41 muestra las diferentes variables de interés del sistema y motor, en las cuales se refleja el comportamiento del motor al someterlo al control PID. En dicha figura observamos la diferencia de los valores de velocidad en los diferentes controles implementados.

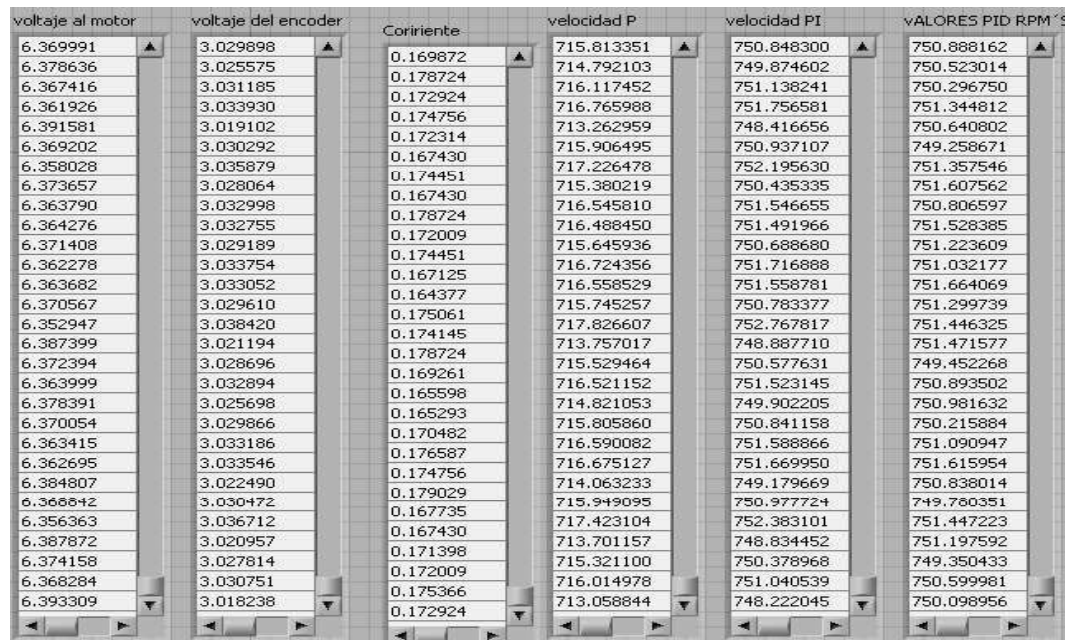


Figura 4.41 Comportamiento de las variables del sistema, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.

En la Figura 4.42, se muestra el comportamiento gráfico del voltaje proveniente del convertidor de frecuencia-voltaje. La imagen muestra que a 750 RPM se generan 3.02 Volts en la salida del convertidor F/V. también en dicha imagen se observa una mejoría en la señal analizada.



Figura 4.42 Comportamiento del voltaje a la salida del convertidor F/V, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.

En la Figura 4.43 se observa el comportamiento de la corriente del motor de CD al demandar 750 RPM utilizando el control PID, la cual es de 0.17 Amperes aproximadamente.

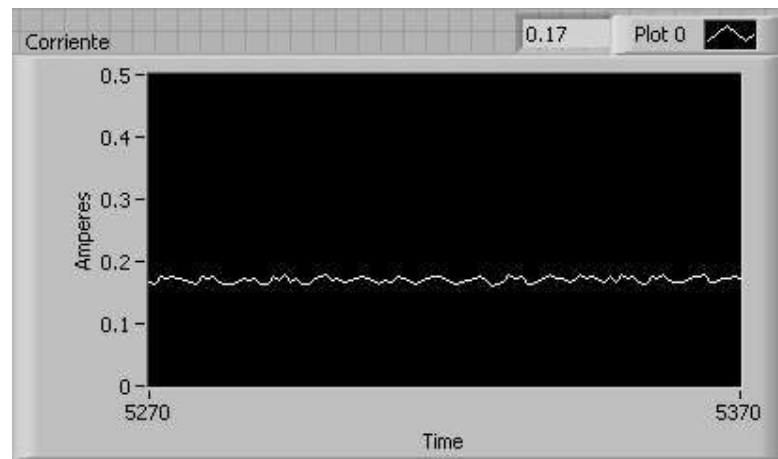


Figura 4.43 Comportamiento de la corriente del motor, utilizando el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y colocando 750 RPM en la referencia.

4.7 Control por retroalimentación de estados

En la retroalimentación de estados, la respuesta del sistema en lazo cerrado puede ser definida combinando la ley de control con el vector de estados y seleccionando una ganancia de retroalimentación K_{CSS} adecuada para obtener los polos de lazo cerrado deseados que permitan la respuesta transitoria deseada.

En la Figura 4.44 se muestra el control por retroalimentación de estados propuesto, en el cual se pretende retroalimentar la velocidad y la corriente del motor para tener un control eficiente. En donde X_1 representa el estado 1 (velocidad) a retroalimentar y X_2 representa el estado 2 (corriente) a retroalimentar. Mientras que k_v y k_i representan las ganancias de los estados a retroalimentar.

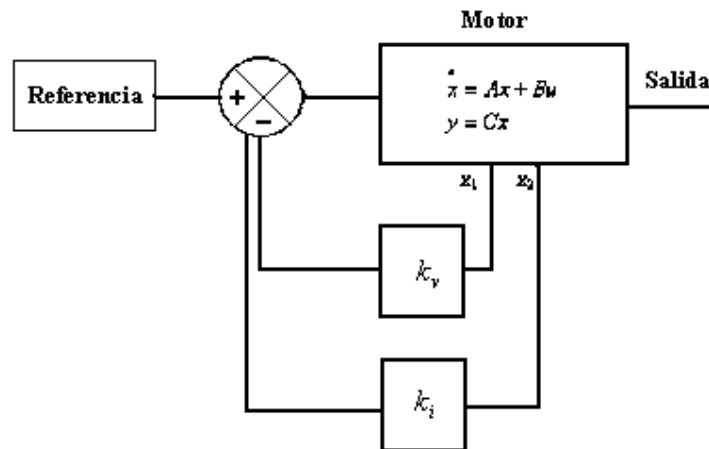


Figura 4.44 Diagrama propuesto para el control por retroalimentación de estados.

La Figura 4.45 muestra el panel frontal del programa del control por retroalimentación de estados. Se observan 3 columnas de valores, las cuales contienen: el voltaje al motor, el voltaje generado por el encoder y la corriente del motor. También se observan tres gráficas que representan los valores de las columnas mencionadas. En la prueba realizada, se retroalimentaron tanto el voltaje como la corriente, multiplicados por 0.5.

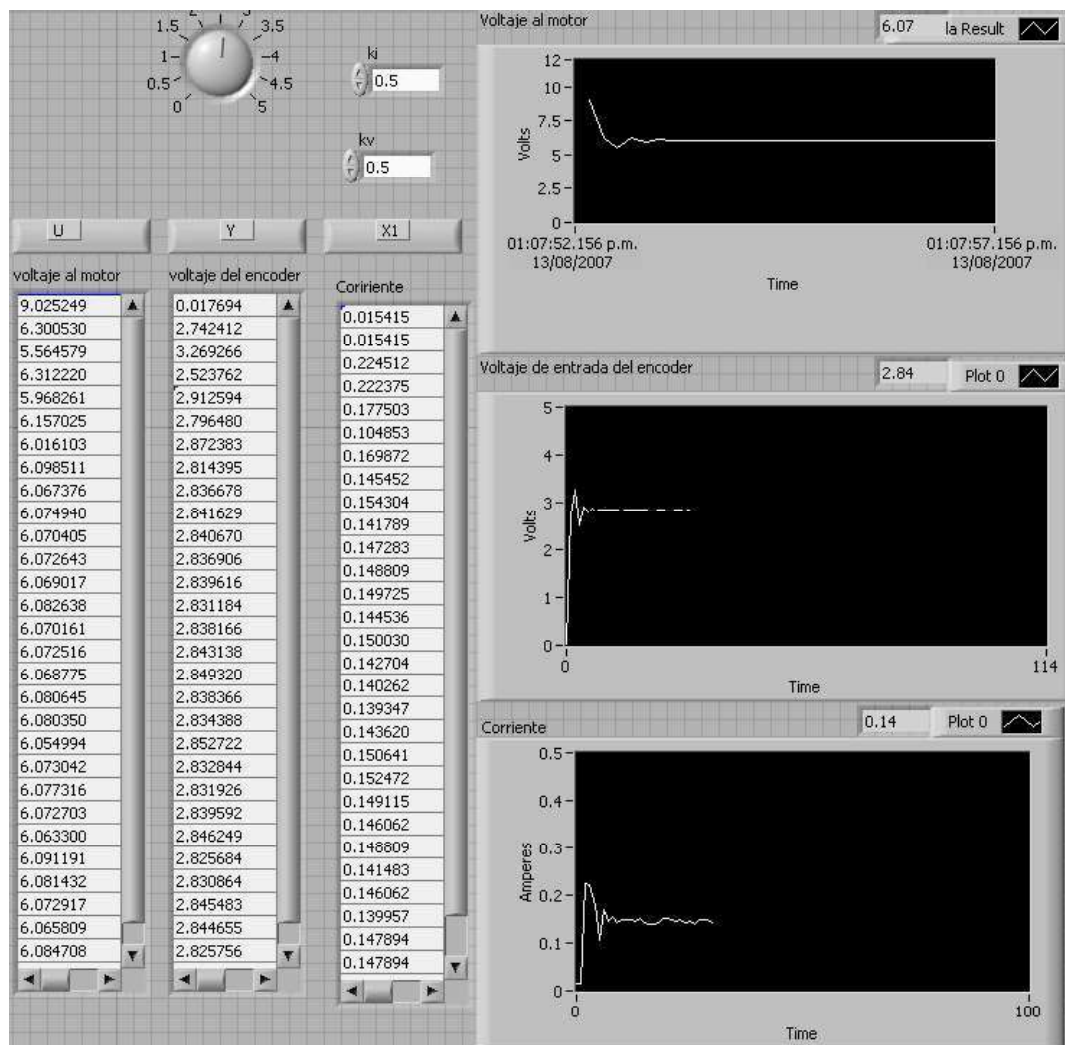


Figura 4.45 Interfaz grafica del programa en LabVIEW para observar la retroalimentación de estados.

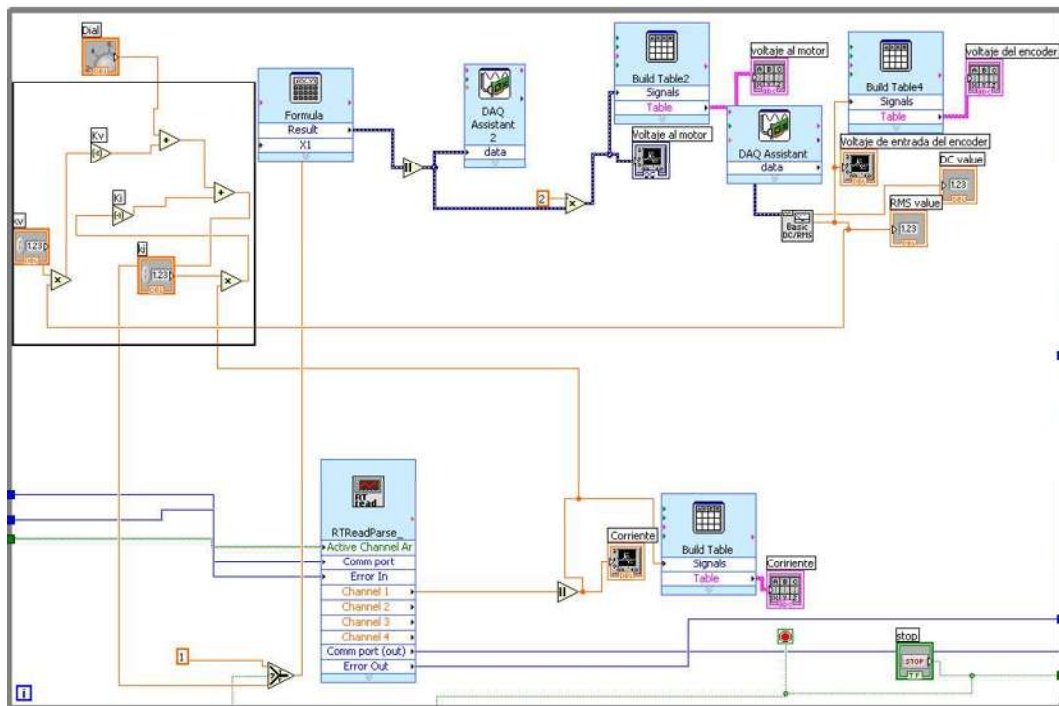


Figura 4.46 Diagrama de bloques del programa en LabVIEW, para retroalimentar los estados.

La Figura 4.46 muestra el diagrama de bloques del control de velocidad por retroalimentación de estados para el motor de CD. La sección marcada, contiene los bloques necesarios para retroalimentar la velocidad y la corriente del motor de CD. La corriente es sensada mediante la tarjeta de adquisición de datos **Vernier LabPro**, y la velocidad mediante la ayuda del convertidor de frecuencia-voltaje **TC9402**, y la tarjeta de adquisición de datos **NI USB-6008**.

Capítulo 5

Conclusiones

El uso de las tarjetas de adquisición de datos **NI USB-6008** y **Vernier LabPro** resultó de gran utilidad al implementar los diferentes controles de velocidad, ya que con dichas tarjetas se tiene un monitoreo constante y seguro de las diferentes variables del sistema.

Sin embargo, inicialmente al implementar el control de velocidad del motor en lazo abierto se tuvo algunos problemas con el acondicionamiento de las señales de retroalimentación, en particular con la de velocidad.

Al solucionar el problema de medición de velocidad con la implementación del convertidor de frecuencia-voltaje TC9402, fue posible tener un control adecuado de las variables de interés del sistema y con ello la implementación de los sistemas de control.

Se implementó el control de velocidad del motor en lazo abierto para obtener la ecuación que representa el comportamiento del motor (Cabe señalar, que en dicho control solo se le aplicaba una cantidad de voltaje al motor desde el panel frontal de LabVIEW, a diferencia de los demás controles en donde se le demandaba al motor una cantidad específica de revoluciones por minuto).

Debido a que el control Proporcional no cumplía totalmente con los objetivos planteados de velocidad, se implementó el control Proporcional-Integral; el cual arrojó resultados más favorables que el control anterior implementado. Dicho control PI cumplió con las expectativas planteadas.

Además de los controles P y PI se optó por implementar el control más usado dentro del campo de control clásico, el control Proporcional Integral Derivativo PID; de dicho control, se obtuvieron valores muy similares al control PI, aunque con una mejor estabilidad de las señales como se observó en las diferentes gráficas de las variables de interés.

Finalmente, se implementó el control por retroalimentación de estados, el cual arrojó valores positivos sobre el control de velocidad al retroalimentar la velocidad y la corriente del motor de CD.

En general, debido a que se usó el lenguaje de programación gráfica LabVIEW, fue posible generar un ambiente gráfico comprensible, amigable y adecuado para el control de la velocidad del motor utilizando los diferentes controles descritos.

APÉNDICES

Apéndice A

Low-Cost Multifunction DAQ for USB

NI USB-6008, NI USB-6009

- Small and portable
- 12 or 14-bit input resolution, at up to 48 kS/s
- Built-in, removable connectors for easier and more cost-effective connectivity
- 2 true DAC analog outputs for accurate output signals
- 12 digital I/O lines (TTL/LVTTL/CMOS)
- 32-bit event counter
- Student kits available
- OEM versions available

Operating Systems

- Windows 2000/XP
- Mac OS X¹
- Linux^{1/2}
- Pocket PC
- Win CE

Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI

Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx
- Ready-to-run data logger

¹Mac OS X and Linux users need to download NI-DAQmx Base.



Product	Bus	Analog Inputs ¹	Input Resolution (bits)	Max Sampling Rate (kS/s)	Input Range (V)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Output Rate (Hz)	Output Range (V)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Trigger
USB-6009	USB	8 SE/4 DI	14	48	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital
USB-6008	USB	8 SE/4 DI	12	10	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital

¹SE = single ended, DI = differential

Hardware Description

The National Instruments USB-6008 and USB-6009 multifunction data acquisition (DAQ) modules provide reliable data acquisition at a low price. With plug-and-play USB connectivity, these modules are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

Software Description

The NI USB-6008 and USB-6009 use NI-DAQmx high-performance, multithreaded driver software for interactive configuration and data acquisition on Windows OSs. All NI data acquisition devices shipped with NI-DAQmx also include VI Logger Lite, a configuration-based data-logging software package.

Mac OS X and Linux users can download NI-DAQmx Base, a multiplatform driver with a limited NI-DAQmx programming interface. You can use NI-DAQmx Base to develop customized data acquisition applications with National Instruments LabVIEW or C-based development environments. NI-DAQmx Base includes a ready-to-run data logger application that acquires and logs up to eight channels of analog data.

PDA users can download NI-DAQmx Base for Pocket PC and Win CE to develop customized handheld data acquisition applications.

Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-6008/09 Accessory Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver.

In addition, the USB-6008/09 Prototyping Accessory provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

Common Applications

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for a number of applications where economy, small size, and simplicity are essential, such as:

- Data logging – Log environmental or voltage data quickly and easily.
- Academic lab use – The low price facilitates student ownership of DAQ hardware for completely interactive lab-based courses. (Academic pricing available. Visit ni.com/academic for details.)
- Embedded OEM applications.



Products

[Interfaces](#)

[Sensors](#)

[Software](#)

[Lab Books](#)

[Packages](#)

[Lab Equipment](#)

[Go! Products](#)

[Easy Products](#)

[TI Products](#)

[Palm®](#)

[Accessories](#)

[Legacy](#)

Vernier LabPro®



Versatile, powerful, reliable.



[Take an interactive tour of LabPro's features.](#)

Unmatched Versatility with Computers and Handhelds

The Vernier LabPro is the only data-collection device that offers you four different ways to collect data. You can use LabPro with a computer, Texas Instruments graphing calculator, Palm Powered™ handheld*, or on its own as a remote data collector.

Order Information

Vernier LabPro
Order Code: **LABPRO**
Price: \$220

[Add To Cart](#)

[Find a LabPro package for your subject area »](#)

Windows and Mac Computers

LabPro can be used with Windows or Macintosh computers. Our award-winning **Logger Pro** computer software allows students to collect, display, analyze, and report data quickly, accurately, and easily.



Texas Instrument Graphing Calculators

LabPro connects to TI graphing calculators using the included cradle and cable. Use our **EasyData** or **DataMate** calculator software for data collection anywhere in your school or in the field.

Palm Powered™ Handhelds

With the **Palm data-collection package** (sold separately) and a Palm Powered handheld, you get a portable data-collection system with the power of a PDA. Analyze your data directly on your handheld or upload to a computer using HotSync® technology.

Stand-Alone Unit

In remote mode, you can take LabPro to an amusement park and collect data without a computer or handheld attached.

[8]

TC9400
TC9401
TC9402

FREQUENCY-TO-VOLTAGE (F/V) CIRCUIT DESCRIPTION

When used as an F/V converter, the TC9400 generates an output voltage linearly proportional to the input frequency waveform.

Each zero crossing at the threshold detector's input causes a precise amount of charge ($Q = C_{REF} \times V_{REF}$) to be dispensed into the op amp's summing junction. This charge in turn flows through the feedback resistor, generating voltage pulses at the output of the op amp. A capacitor (C_{INT}) across R_{INT} averages these pulses into a DC voltage which is linearly proportional to the input frequency.

F/V CONVERTER DESIGN INFORMATION

Input/Output Relationships

The output voltage is related to the input frequency (f_{IN}) by the transfer equation:

$$V_{OUT} = [V_{REF} C_{REF} R_{INT}] f_{IN}$$

The response time to a change in f_{IN} is equal to ($R_{INT} C_{INT}$). The amount of ripple on V_{OUT} is inversely proportional to C_{INT} and the input frequency.

C_{INT} can be increased to lower the ripple. Values of $1\mu F$ to $100\mu F$ are perfectly acceptable for low frequencies.

When the TC9400 is used in the single-supply mode, V_{REF} is defined as the voltage difference between pin 7 and pin 2.

Input Voltage Levels

The input frequency is applied to the Threshold Detector input (Pin 11). As discussed in the V/F circuit section of this data sheet, the threshold of pin 11 is approximately $(V_{DD} + V_{SS})/2 \pm 400mV$. Pin 11's input voltage range extends from V_{DD} to about 2.5 V below the threshold. If the voltage on pin 11 goes more than 2.5 volts below the threshold, the V/F mode startup comparator will turn on and corrupt the output voltage. The Threshold Detector input has about 200 mV of hysteresis.

In $\pm 5V$ applications, the input voltage levels for the TC9400 are $\pm 400mV$, minimum. If the frequency source being measured is unipolar, such as TTL or CMOS operating from a +5V source, then an AC coupled level shifter should be used. One such circuit is shown in Figure 6a.

The level shifter circuit in Figure 6b can be used in single supply F/V applications. The resistor divider ensures that the input threshold will track the supply voltages. The diode clamp prevents the input from going far enough in the negative direction to turn on the startup comparator. The diode's forward voltage decreases by $2.1mV/^{\circ}C$, so for high ambient temperature operation two diodes in series are recommended.

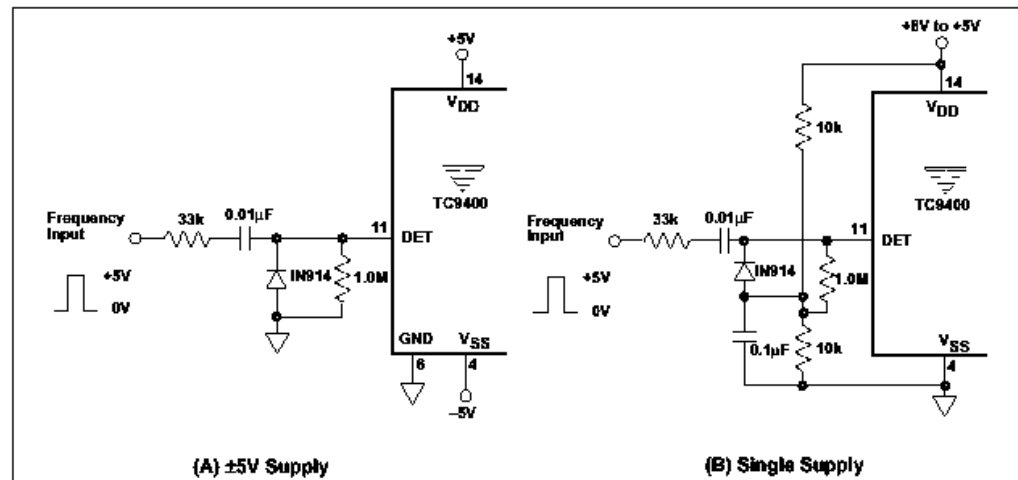
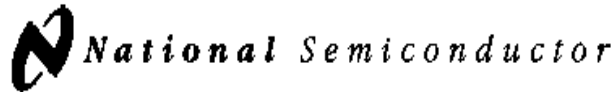


Figure 6. Frequency Input Level Shifter



LM741 Operational Amplifier

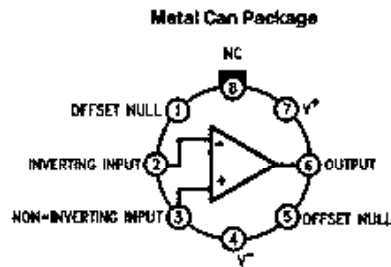
General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1499 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

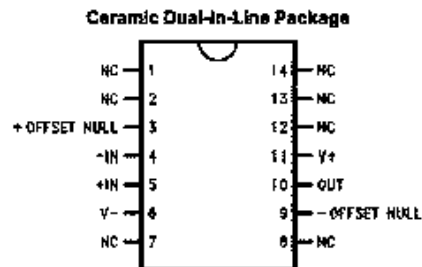
The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Connection Diagrams



TL/H/9341-2

Order Number LM741H, LM741H/883*,
LM741AH/883 or LM741CH
See NS Package Number H08C

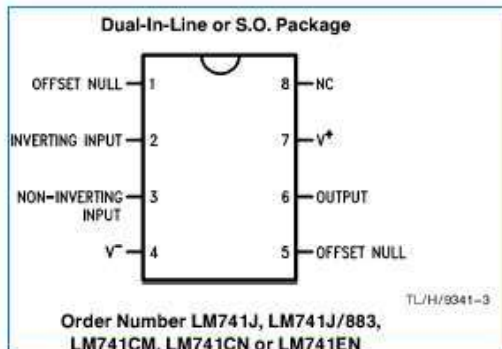


TL/H/9341-5

Order Number LM741J-14/883*, LM741AJ-14/883**
See NS Package Number J14A

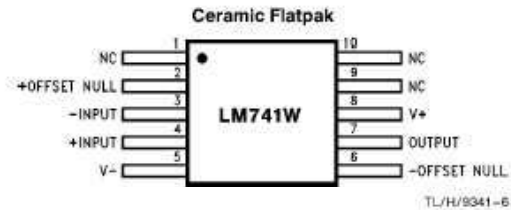
*also available per J838510/1D101

**also available per J838510/1D102



TL/H/9341-3

Order Number LM741J, LM741J/883,
LM741CM, LM741CN or LM741EN



TL/H/9341-6

Order Number LM741W/883
See NS Package Number W10A

TIP41 Series(TIP41/41A/41B/41C)

Medium Power Linear Switching Applications

- Complement to TIP42/42A/42B/42C



NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	6	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current	2	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
P_C	Collector Dissipation ($T_B=25^\circ\text{C}$)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 – 150	$^\circ\text{C}$

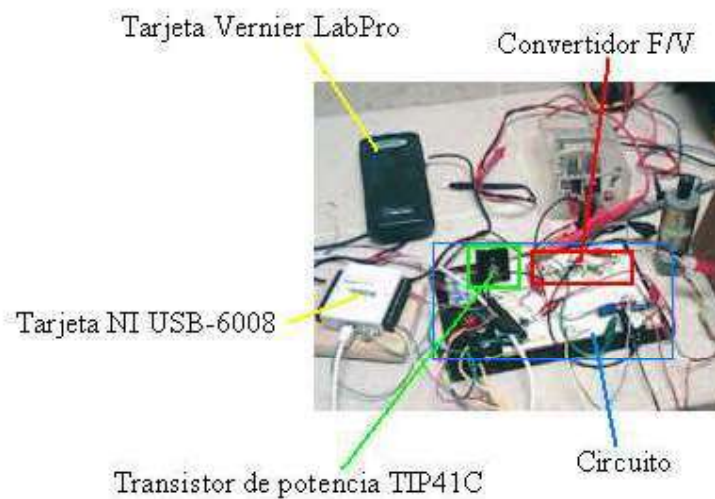
Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	$I_C = 30\text{mA}, I_B = 0$	40 60 80 100		V V V V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP41/41A : TIP41B/41C	$V_{CE} = 30\text{V}, I_B = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, I_B = 0$		0.7 0.7	mA mA
I_{CES}	Collector Cut-off Current : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	$V_{CE} = 40\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 80\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 100\text{V}, V_{EB} = 0$		400 400 400 400	μA μA μA μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$		1	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 0.3\text{A}$ $V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 3\text{A}$	30 15	75	
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 6\text{A}, I_B = 600\text{mA}$		1.5	V
$V_{BE(sat)}$	* Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 6\text{A}$		2.0	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}$	3.0		MHz

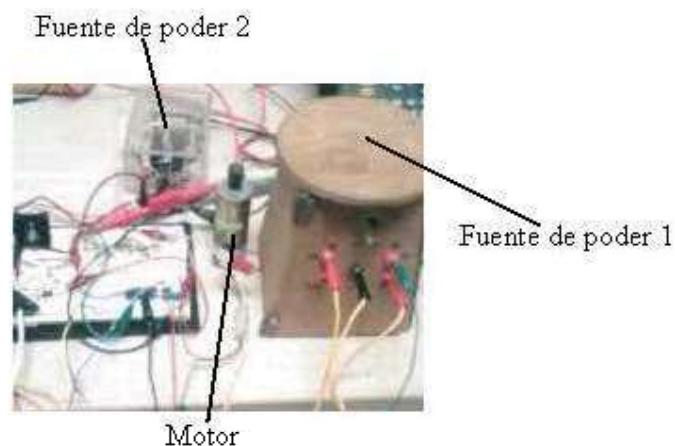
* Pulse Test: PWS300 μs , Duty Cycle2%

Fotografías

La siguiente fotografía muestra las diferentes partes del sistema de control de velocidad. Se observan las tarjetas de adquisición de datos, la etapa de acondicionamiento con el transistor de potencia para suministrar una corriente suficiente al motor (recuadro verde), el convertidor F/V (recuadro rojo) y el motor.



En la siguiente fotografía se observa el motor utilizado, la fuente de poder 1 (alimentación para etapas de acondicionamiento) y la fuente de poder 2 (utilizada para alimentar al convertidor V/F).



REFERENCIAS

[1]

Enciclopedia Encarta en línea

http://encarta.msn.com/media_701765049_761574329_-1_1/Electric_Motor.html

[2]

Katsuhiko Ogata, Ingeniería de control moderna, Tercera edición, Editorial Pearson, 1998.

[3]

Timothy Maloney, Electrónica industrial

[4]

K. *ÅSTRÖM* and T. *HÄGGLUND*, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2ND EDITION, EDITORIAL ISA, 1995.

[5]

W. Johnson, LabVIEW POWER Programming, Mc GrawHill, 1998.

[6]

NATIONAL INSTRUMENTS, Data Acquisition Basics Manual, January 1998 Edition.

[7]

www.ni.com

[8]

www.vernier.com