

**SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL**

**WILLIAM FERNANDO ARIZA ORDUZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2008**

**SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL**

**WILLIAM FERNANDO ARIZA ORDUZ**

**Trabajo de grado para optar al título  
de Ingeniero Electrónico**

**Director  
EDGAR BARRIOS URUEÑA  
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2008**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bucaramanga, 02, Abril, 2008**

Dedico mi nuevo logro y éxito alcanzado a mi Dios pues es la fuerza espiritual que siempre esta conmigo y el amigo que nunca falla, a mis padres Fernando Ariza y Adriana Orduz, pues ellos han sido y son los pilares fundamentales en mi desarrollo y formación integral como persona y profesional, dándome todo su cariño, amor y comprensión. A todos los docentes con los que he tenido la fortuna de recibir sus enseñanzas las cuales me han de ser de gran utilidad en todos los aspectos de mi vida

***William Fernando Ariza Orduz***

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

Primero doy gracias a mi DIOS pues El es el principal artífice de este nuevo éxito alcanzado, ya que con su infinito amor y misericordia me ha acompañado y nunca abandonado en el transcurso de mi vida y mi carrera y que hoy me brinda la oportunidad de ser un Ingeniero Electrónico.

A mis padres por su incondicional apoyo, participes fundamentales de mi formación humana, recibiendo de ellos un excelente ejemplo de vida basada en el amor, el respeto, la responsabilidad y la honestidad.

Edgar Barrios U, Ingeniero Electricista, Director del Proyecto de Grado , por su total apoyo en el desarrollo de éste proyecto de grado y su gran ejemplo como doctor y persona

A los docentes de La Universidad Pontificia Bolivariana por su aporte moral e intelectual durante el desarrollo de mi carrera.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN LABVIEW	15
3.1.1 Definición	15
3.1.2 Características	15
3.2 CONTROL POR PWM	17
3.3 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL	18
3.3.1 Amplificador diferencial básico	18
3.3.2 Voltaje en modo común	19
3.3.3 Comparación entre amplificadores diferenciales y amplificadores de sola entrada	20
3.3.4 Amplificador Inversor	22
3.3.5 Amplificador no inversor	25
3.4 ETAPA DE SALIDA CLASE B	27
3.4.1 Operación del circuito	28

3.5	PROPULSORES DE CD	28
3.5.1	Características básicas de los motores de cd	29
3.5.2	Modos de operación	34
3.6	FUNCION DE TRANSFERENCIA MOTOR CD	37
4.0	MODULO SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL	39
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SERVOMECANISMO DIGITAL	39
4.1.1	Computador: Herramienta de programación Labview 7.1	39
4.1.2	Tarjeta de Adquisición de Datos USB 6008 de la National Instruments	42
4.1.3	Amplificador Diferencial	42
4.2	DISEÑO DEL SISTEMA	42
4.2.1	Software del Sistema	42
4.2.2	Hardware del Sistema	43
5.	PRUEBAS	45
6.	RESULTADOS	54
7.	CONCLUSIONES	55
	BIBLIOGRAFÍA	56
	ANEXOS	57

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Interfaces de un VI	16
Figura 2. Control PWM	17
Figura 3. Amplificador diferencial básico	18
Figura 4. Amplificador operacional en modo común	20
Figura 5. Amplificador con una sola entrada	20
Figura 6. Amplificador diferencial	21
Figura 7. Amplificador inversor	22
Figura 8. Amplificador inversor con voltaje negativo a la entrada (-)	24
Figura 9. Amplificador inversor con voltaje ca aplicado a la entrada inversora	25
Figura 10. Polaridades de voltaje y dirección de las corrientes de un amplificador no inversor	26
Figura 11. Etapa de salida clase B	28
Figura 12. Circuito equivalente de motores de cd con excitación separada	29
Figura 13. Características de magnetización	31
Figura 14. Características de los motores de cd con excitación separada	32
Figura 15. Circuito equivalente de los motores serie de cd	32
Figura 16. Características de los motores serie de cd	33
Figura 17. Modos de operación motor cd	35
Figura 18. Condiciones para cuatro cuadrantes.	36
Figura 19(a). Diagrama esquemático de un motor de cd controlado por el inducido	37
Figura 19(b). Diagrama de bloques de un motor de cd	37
Figura 20(a). Diagrama de bloques motor cd.	38
Figura 20(b). Respuesta del sistema en lazo abierto.	38
Figura 21. Diagrama de bloques del sistema desarrollado	39
Figura 22. Diagrama de bloques PWM	41
Figura 23. Diagrama de flujo programa PWM	42
Figura 24. Panel frontal PWM	43
Figura 25. Amplificador Diferencial	44
Figura 26. Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 0.5	45
Figura 27. Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5	46
Figura 28. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 0.5	47
Figura 29. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%),	



con tiempo de ciclo PWM de 0.5	48
Figura 30. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.0	49
Figura 31. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.0	50
Figura 32. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5	51
Figura 33. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5	52

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Parámetros del motor.	38
Cuadro 2. Tabla de mediciones realizadas: Ciclo Duty (%) vs Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) con un tiempo de ciclo PWM de 0.5	45
Cuadro 3. Tabla de mediciones realizadas: Ciclo Duty (%) vs Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5	46
Cuadro 4. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 0.5	47
Cuadro 5. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 0.5	48
Cuadro 6. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.0	49
Cuadro 7. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 1.0	50
Cuadro 8. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5	51
Cuadro 9. Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5	52
Cuadro 10. Frecuencia a la que trabaja el módulo según el tiempo de ciclo PWM	53

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DESCRIPCIÓN PRÁCTICA DE LABORATORIO	57
ANEXO B. OBTENCION DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR CROUZET DE LA UNIDAD MECÁNICA 33-100 FEEDBACK	67
ANEXO C. DISEÑO PCB	73
ANEXO D. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS USB NI 6008	74
ANEXO E. FUNCIONES PARA MANEJO DE LA TARJETA USB DENTRO DE LABVIEW	87
ANEXO F. UNIDAD MECÁNICA 33-100 FEEDBACK	90

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

**AUTOR(ES):** WILLIAM FERNANDO ARIZA ORDUZ

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** EDGAR BARRIOS URUEÑA

### **RESUMEN**

La Modulación por Ancho de Pulso (PWM) es una técnica utilizada para controlar la velocidad de los motores cd, por medio de la manipulación del ciclo de trabajo de la señal modulada. El Amplificador Diferencial recibe una señal de baja potencia, amplifica su potencia y realiza dentro de su configuración el control del sentido de giro del motor. La idea de este proyecto fue reemplazar el PWM y el Amplificador Diferencial de Módulo Digital de Servomecanismos del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica usando elementos de fácil consecución en el país. Para dar solución a ésta situación se decidió diseñar mediante software especializado Labview 7.1, la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM), como también construir el Amplificador Diferencial. Como interfaz de comunicación entre estos dos sistemas desarrollados se usó la tarjeta de adquisición de datos USB 6008 de National Instruments. El desarrollo del PWM consistió en el desarrollo de un programa en Labview, dicho programa envía señales digitales a la tarjeta USB 6008 de National Instruments, las cuales son recibidas por el Amplificador Diferencial para que éste realice su respectivo control a la velocidad y sentido de giro del motor. El sistema de servomecanismo digital: PWM y Amplificador Diferencial tiene un comportamiento que tiende a ser lineal. El servomecanismo digital desarrollado permite comprender de una manera más didáctica, el control de la velocidad de un motor por medio de la Modulación por Ancho de Pulso, ya que se pueden manipular diferentes variables analizando consigo los respectivos cambios en el sistema.

**PALABRAS CLAVES:** Modulación por Ancho de Pulso, Amplificador Diferencial, Adquisición de datos

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

**AUTOR(ES):** WILLIAM FERNANDO ARIZA ORDUZ

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** EDGAR BARRIOS URUEÑA

### **RESUMEN**

The Pulse Width Modulation (PWM) is a technique used to control the speed of the engines cd, through manipulation of the work cycle modulated signal. The differential amplifier receives a low-power signal, amplifies their power and perform within its configuration control direction of rotation of the engine. The idea of this project was to replace the PWM and differential amplifier module of the actuators Digital Control Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering using elements of easy achievement in the country. To resolve this situation was decided by designing specialized software Labview 7.1, the technique of Pulse Width Modulation (PWM), as well as build the differential amplifier. As a communication interface between these two systems developed used the card data acquisition USB 6008 National Instruments. The development of PWM consisted of developing a program in Labview, the program sends digital signals to the USB card 6008 National Instruments, which are received by the differential amplifier for it to perform their respective control at the speed and direction of rotation engine. The system of actuators digital PWM and differential amplifier is a behavior that tends to be linear. The actuators developed digital allows us to understand in a more didactic, controlling the speed of an engine through the Pulse Width Modulation, since different variables can be manipulated with the respective analyzing changes in the system.

**PALABRAS CLAVES:** Pulse Width Modulation, Differential Amplifier, Data Acquisition

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## INTRODUCCIÓN

La modulación por ancho de pulsos (PWM) es una técnica utilizada para controlar la velocidad de los motores cd, por medio de la manipulación del ciclo de trabajo de la señal modulada.

El Amplificador Diferencial recibe una señal de baja potencia, amplifica su potencia y realiza dentro de su configuración el control del sentido de giro del motor.

La idea de este proyecto fue realizar el control de la velocidad y cambio del sentido de giro del motor de la Unidad Mecánica por medio de la Modulación por Ancho de Pulso (PWM), usando como medio de comunicación entre el computador y el motor, la tarjeta de adquisición de datos USB 6008 y como etapa de salida el Amplificador Diferencial.

El desarrollo del PWM consistió, principalmente, en realizar un programa en Lenguaje Labview que entrega una señal de control al Amplificador Diferencial. El programa envía señales digitales con la tarjeta USB 6008 de National Instruments, hacia el Amplificador Diferencial para que éste realice su respectivo control a la velocidad y sentido de giro del motor.

El Proyecto reemplazó el PWM y el Amplificador Diferencial de la tarjeta FEEDBACK de Control Digital del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica.

El Proyecto forma parte de la investigación que está desarrollando el profesor Edgar Barrios Urueña sobre el Módulo Digital de Servomecanismos del Laboratorio de Control. La investigación es financiada por la Universidad

## **1. JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto tiene como base sustituir el PWM y el Amplificador Diferencial de potencia de la tarjeta análoga 33-110 y la tarjeta digital 33-120 debido a las constantes fallas presentadas dentro del desarrollo de las prácticas del laboratorio de Control de Procesos y a su alto costo de mantenimiento ya que son tarjetas con dispositivos electrónicos que no son de fácil adquisición en el país.

Para dar solución a ésta situación se decidió diseñar mediante software especializado Labview 7.1 la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM), como también construir el Amplificador Diferencial con elementos electrónicos de fácil adquisición en el país. Como interfaz de comunicación entre estos dos sistemas desarrollados se usó la tarjeta de adquisición de datos USB 6008 de la National Instruments.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Reemplazar el PWM y el Amplificador Diferencial de Módulo Digital de Servomecanismos del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica usando elementos de fácil consecución en el país.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar el software para construir un PWM que controle la velocidad del motor del Módulo de Servomecanismos del Laboratorio de Control.
- Diseñar y construir el amplificador diferencial que reemplace al que tiene el Módulo Digital de Servomecanismos del Laboratorio Control.
- Elaborar y probar la Guía de Laboratorio del PWM.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN LABVIEW

**3.1.1 Definición.** LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica, orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación, que integra una serie de librerías para comunicación con instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, con sistemas de adquisición y acondicionamiento como VXI o SCXI, comunicaciones en redes TCP/IP, UDP, o en los estándares de software COM, OLE, DDE, DLL o ActiveX para Windows, así como AppleEvents para MacOS o PIPE para UNIX. Los programas realizados en LabVIEW se llaman instrumentos virtuales “VIs”, ya que tienen la apariencia de los instrumentos reales, sin embargo, poseen analogías con funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales.

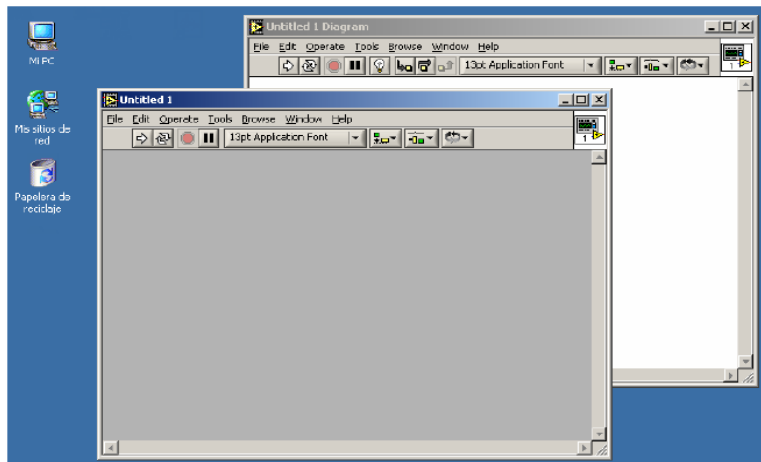
Labview, como C o BASIC, es un sistema de programación de propósito general con bibliotecas extensas de funciones para cualquier tarea de programación. Labview incluye bibliotecas para la adquisición de datos, DAQMX y control de instrumentos seriales, análisis de datos, presentación de datos y almacenamiento de datos. Labview también incluye herramientas de desarrollo de programas convencionales, permitiéndole al usuario colocar puntos de ruptura, animar la ejecución para observar cómo el dato atraviesa el programa, y ejecución paso a paso a través del programa para facilitar la depuración y el desarrollo del programa.

**3.1.2 Características.** Los VIs contienen una interface interactiva de usuario, la cual se llama panel frontal, ya que simula el panel de un instrumento físico. Se puede entrar datos usando el teclado o el ratón y tener una visualización de los resultados en la pantalla del computador. El Panel Frontal es la interface hombre-máquina de un VI.

Los VIs reciben instrucciones de un diagrama de bloques, construido en lenguaje G, el cual suministra una solución gráfica a un problema de programación. El diagrama de bloques es el código fuente de un VI. Los VIs usan una estructura hereditaria y modular que permite realizar programas por niveles o hacer programas con otros programas o subprogramas. Un VI contenido en otro VI es denominado subVI. Todo VI se puede convertir en subVI sin ningún tipo de cambio en su estructura. Con estas características LabVIEW permite dividir un programa en una serie de tareas, las cuales son divisibles nuevamente, hasta que una aplicación complicada se convierta en una serie de subtareas simples. Todos los anteriores conceptos están de acuerdo con las concepciones modernas de la programación modular. Además, LabVIEW puede ser usado con poca Experiencia en programación, pues utiliza metodologías familiares a técnicos, ingenieros, doctores y la comunidad científica en general. Cada VI de

LabVIEW cuenta con dos interfaces: panel frontal y diagrama de bloques. Éstas cuentan con paletas que contienen los objetos necesarios para implementar y desarrollar tareas. La figura 1 muestra estas interfaces dentro de un entorno Windows<sup>1</sup>.

Figura 1. Interfaces de un VI



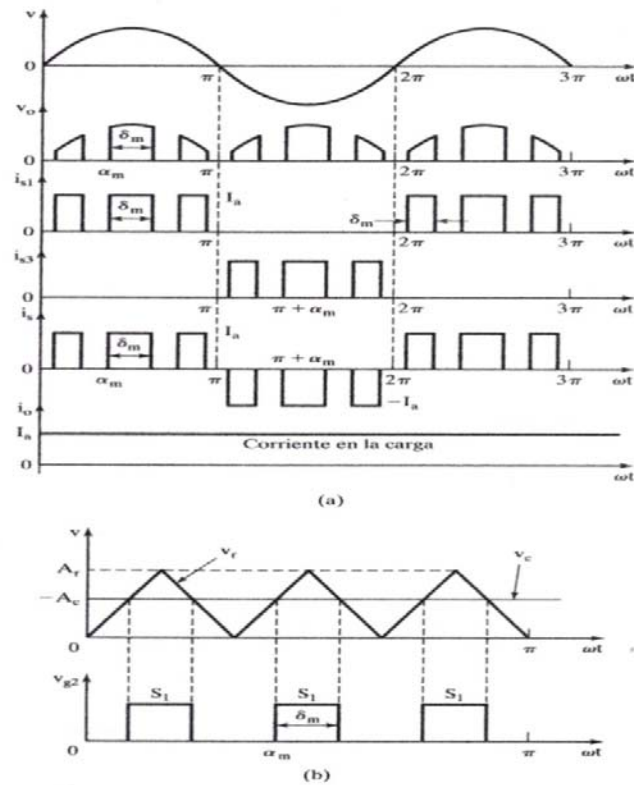
Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <http://sivirtual.upbbga.edu.co>

### 3.2 CONTROL POR PWM

En el control por PWM, los interruptores del convertidor se abren y cierran varias veces durante un medio ciclo, y el voltaje de salida se controla haciendo variar el ancho de los pulsos. Las señales de compuerta se generan comparando una onda triangular con una señal de cd, como se muestra en la figura 2(b). La figura 2(a) muestra el voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de entrada. Las armónicas de orden menor se pueden eliminar o reducir seleccionando la cantidad de pulsos por medio ciclo. Sin embargo, si aumenta la cantidad de pulsos también se incrementa la magnitud de las armónicas de orden mayor, que se podrían filtrar separándolas con facilidad.

<sup>1</sup> NATIONAL INSTRUMENTS. Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <http://sivirtual.upbbga.edu.co>

Figura 2. Control PWM



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

El voltaje de salida y los parámetros de rendimiento del convertidor se pueden determinar en dos pasos:

1. Considerando sólo un par de pulsos tales que si uno comienza en  $wt = \alpha_1$  y termina en  $wt = \alpha_1 + \delta_1$ , el otro pulso comienza en  $wt = \pi + \alpha_1$ , y termina en  $wt = (\pi + \alpha_1 + \delta_1)$ .
2. Combinando los efectos de todos los pares. Si el m-ésimo pulso comienza en  $wt = \alpha_m$  y su anchura es  $\delta_m$ , el voltaje promedio de salida debido a p pulsos se calcula como sigue:

$$V_{dc} = \sum_{m=1}^p \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha_m}^{\alpha_m + \delta_m} V_m \sin wt \, d(wt) \right]$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} [\cos \alpha_m - \cos(\alpha_m + \delta_m)] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Si la corriente de carga con un valor promedio  $I_a$  es continua y tiene rizo despreciable, la corriente instantánea de entrada se puede expresar como la siguiente serie de Fourier:

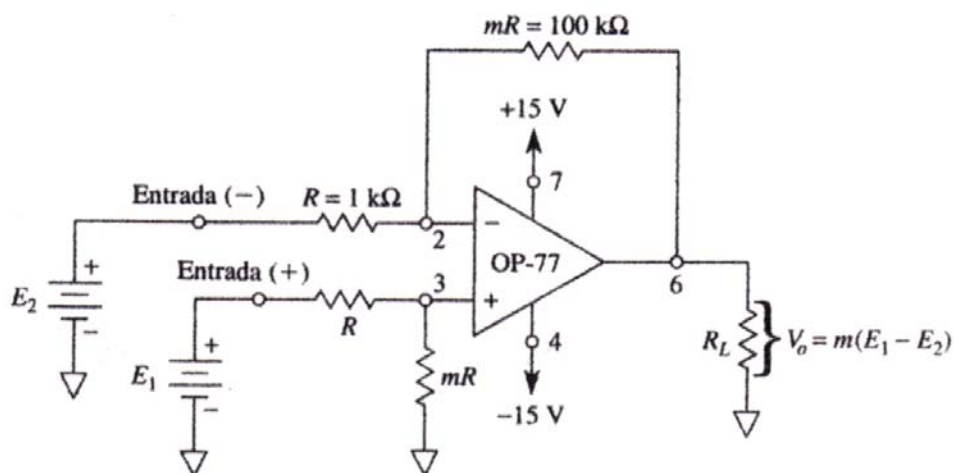
$$i_s(t) = A_0 + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} [A_n \cos n\omega t + B_n \sen n\omega t] \quad \text{Ecuación (2)}$$

### 3.3 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

**3.3.1 Amplificador Diferencial Básico.** Mediante el amplificador diferencial se miden y amplifican pequeñas señales que están “ocultas” dentro de señales mayores.

Con cuatro resistencias de precisión (1%) y un amplificador operacional se construye un amplificador diferencial, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Amplificador diferencial básico



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

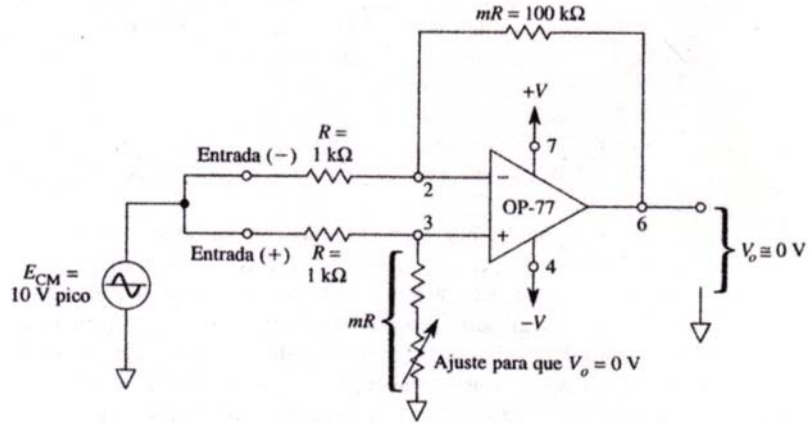
Este amplificador cuenta con dos terminales de entrada, identificadas como entrada (-) y entrada (+), las cuales corresponden a la terminal mas cercana del amplificador operacional. Si se reemplaza  $E_1$  por un cortocircuito, lo que  $E_2$  ve es un amplificador inversor con ganancia de  $-m$ . Por lo tanto, el voltaje de salida que se obtiene por  $E_2$  es  $-mE_2$ . Ahora se cortocircuita  $E_2$ ;  $E_1$  se divide entre  $R$  y  $mR$  y se aplica así un voltaje de magnitud  $E_1 m / (1+m)$  en la entrada (+) del amplificador operacional. Este voltaje dividido ve un amplificador no inversor que tiene una ganancia  $(m+1)$ . El voltaje de salida generado por  $E_1$  es el voltaje dividido  $E_1 m / (1+m)$  multiplicado por la ganancia del amplificador no inversor  $(1+m)$ , lo que produce  $mE_1$ . Por lo tanto,  $E_1$  se amplifica en virtud de la salida del multiplicador  $m$  a un valor  $mE_1$ . Cuando  $E_1$  y  $E_2$  están en las entradas (+) y (-), respectivamente,  $V_o$  vale  $mE_1 - mE_2$ , o:

$$V_o = mE_1 - mE_2 = m(E_1 - E_2) \quad \text{Ecuación (4)}$$

La ecuación (4) muestra que el voltaje de salida del amplificador diferencial,  $V_o$ , es proporcional a la diferencia del voltaje aplicado a las entradas (+) y (-). Al multiplicador  $m$  se le denomina ganancia diferencial y está dado por la relación que existe entre las resistencias.

**3.3.2 Voltaje en modo común.** La salida del amplificador operacional debe ser 0 cuando  $E_1 = E_2$ . La forma más sencilla de aplicar voltajes iguales es alambRANDO ambas entradas y conectándolas a la vez a la fuente de voltaje. En este tipo de conexión, al voltaje de entrada se le denomina *voltaje de entrada en modo común*. *ECM*. Ahora  $V_o$  será 0 si las relaciones entre las resistencias son iguales ( $mR$  respecto a  $R$  de la ganancia del amplificador inversor es idéntica a  $mR$  respecto a  $R$  del circuito divisor de voltaje). Prácticamente, las relaciones entre las resistencias se igualan mediante la instalación de un potenciómetro en serie con una resistencia, como se muestra en la figura 4. El potenciómetro se va ajustando hasta que  $V_o$  se reduce a un valor insignificante. De esta manera se logra que la ganancia de voltaje en modo común  $V_o/E_{CM}$  se aproxime a cero. Ésta es la característica de un amplificador diferencial que permite captar y amplificar una señal pequeña que se presenta junto con una señal de ruido, no deseada, sea el voltaje de entrada en modo común y la señal pequeña sea el voltaje de entrada diferencial. De esta manera, el voltaje de salida del amplificador diferencial contendrá sólo una versión amplificada del voltaje diferencial de entrada.

Figura 4. Amplificador operacional en modo común

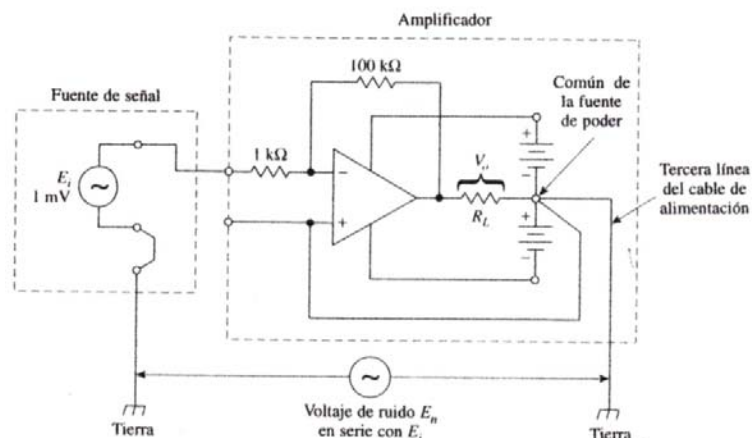


Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

### 3.3.3 Comparación entre amplificadores diferenciales y amplificadores de una sola entrada.

✓ **Medición con amplificador de entrada única:** En la figura 5 se aprecia la fuente de señal conectada a tierra. Aunque no estuviera conectada a tierra, existiría un acoplamiento resistivo o capacitivo a tierra para completar un lazo de tierra.

Figura 5. Amplificador con una sola entrada

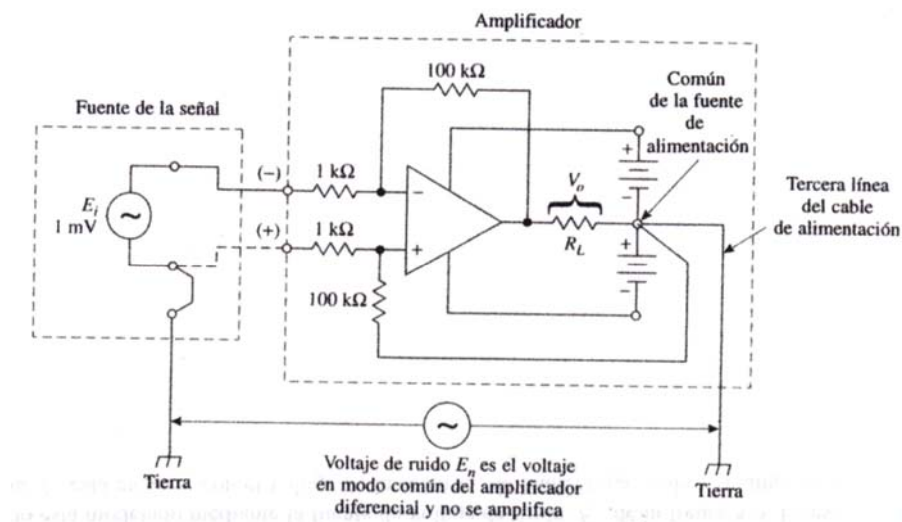


Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

Es inevitable la abundante existencia de corrientes de ruido y voltajes de ruido, provenientes de diversas fuentes y que muchas veces no es fácil de detectar. El efecto neto de todo este ruido está modelado mediante la fuente de voltaje de ruido,  $E_n$ , de la figura 5. Es evidente que  $E_n$  está en serie con el voltaje de señal  $E_i$ , de manera que ambos se amplifican por un factor de  $-100$  debido a al amplificador inversor. En puede ser mucho mayor que  $E_i$ . Por ejemplo, la señal de voltaje que producen los latidos del corazón en la piel es menor a  $1\text{ mV}$ , en tanto que el voltaje de ruido del cuerpo puede ser de varios décimos de volts o más. Es decir, sería imposible hacer mediciones ECG con un amplificador de una sola entrada. Lo que se necesita en estos casos es un amplificador capaz de distinguir entre  $E_i$  y  $E_n$  y que amplifique sólo a  $E_i$ . Y para ello, lo indicado es el amplificador diferencial.

✓ **Medición con un amplificador diferencial:** El amplificador diferencial se utiliza sólo para medir el voltaje de la señal que se desea (véase la figura 6). Si el voltaje de la señal deseada  $E_i$  se conecta a través de las entradas (+) y (-) del amplificador diferencial,  $E_i$  se amplifica con una ganancia de  $-100$ . Mientras que el voltaje de ruido se convierte en el voltaje de modo común en la entrada del amplificador, como se muestra en la figura 4, por lo tanto, el voltaje de ruido no se amplifica y se ha eliminado de manera efectiva para que no tenga un efecto significativo en la señal de salida  $V_o$ .

Figura 6. Amplificador diferencial



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

**3.3.4 Amplificador inversor.** El circuito de la figura 7 es un amplificador cuya ganancia en lazo cerrado desde  $E_i$  a  $V_o$  está definida por  $R_f$  y  $R_i$ . Puede amplificar señales de ca o cd. Para entender su funcionamiento se parte de:

a. El voltaje  $E_d$  entre las entradas (+) y (-) es esencialmente 0, cuando  $V_o$  no está en saturación.

b. La corriente requerida por las terminales de entrada (+) o (-) es despreciable.

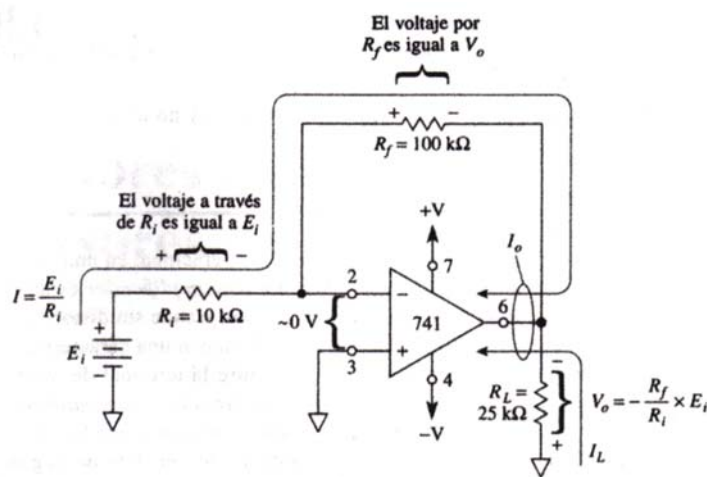
✓ **Voltaje positivo aplicado a la entrada inversora:** En la figura 7 se aplica un voltaje positivo  $E_i$  por medio de la resistencia de entrada  $R_i$  a la entrada (-) del amplificador operacional. Se da retroalimentación negativa mediante la resistencia  $R_f$ . El voltaje entre las entradas (+) y (-) es casi igual a 0V. Por lo tanto, la terminal de entrada (-) también está a 0V, de modo que el potencial de tierra está en la entrada (-). Por esta razón se dice que la entrada negativa (-) es una tierra virtual.

Ya que en un extremo de  $R_i$  está a  $E_i$  y el otro a 0V, la caída de voltaje por  $R_i$  es  $E_i$ . La corriente  $I$  a través de  $R_i$  se determina por medio de la ley de Ohm:

$$I = \frac{E_i}{R_i} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$R_i$  incluye la resistencia del generador de señal.

Figura 7. Amplificador inversor



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.



Toda la corriente de entrada  $I$  fluye por  $R_f$ , ya que una cantidad despreciable es utilizada por la terminal de entrada (-). Observe que la corriente que pasa por  $R_f$  está definida por  $R_i$  y por  $E_i$ , no por  $R_f$ ,  $V_o$  o el amplificador operacional. La caída de voltaje a través de  $R_f$  es sencillamente  $I (R_f)$ , o

$$V_{R_f} = I \times R_f = \left( \frac{E_i}{R_i} \right) R_f \quad \text{Ecuación (6)}$$

Como se muestra en la figura 7, un extremo de  $R_f$  y uno de la carga  $R_L$  están conectados. El voltaje de este punto a tierra es  $V_o$ . Los otros extremos de  $R_f$  y  $R_L$  están conectados a potencial tierra. Por lo tanto  $V_o$  es igual a  $V_R$  (el voltaje a través de  $R_f$ ). Para obtener la polaridad de  $V_o$  observe que el extremo izquierdo de  $R_f$  está a potencial tierra. La dirección de la corriente establecida por  $E_i$  obliga a que el extremo derecho de  $R_f$  se vuelva negativo. Por lo tanto,  $V_o$  es negativo cuando  $E_i$  es positivo. Ahora, igualando  $V_o$  con  $V_{R_f}$  y agregando un signo negativo para indicar que  $V_o$  se convierte en negativo cuando  $E_i$  se hace positivo se tiene lo siguiente:

$$V_o = -E_i \left( \frac{R_f}{R_i} \right) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Ahora, al tomar en cuenta la definición de que la ganancia en lazo cerrado del amplificador es  $A_{CL}$ , la ecuación (7) se transforma en lo siguiente:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{E_i} = \frac{-R_f}{R_i} \quad \text{Ecuación (8)}$$

El signo menos en la ecuación (8) muestra que la polaridad de la salida  $V_o$  está invertida con respecto a  $E_i$ . Por esta razón, el circuito de la figura 7 se denomina amplificador inversor.

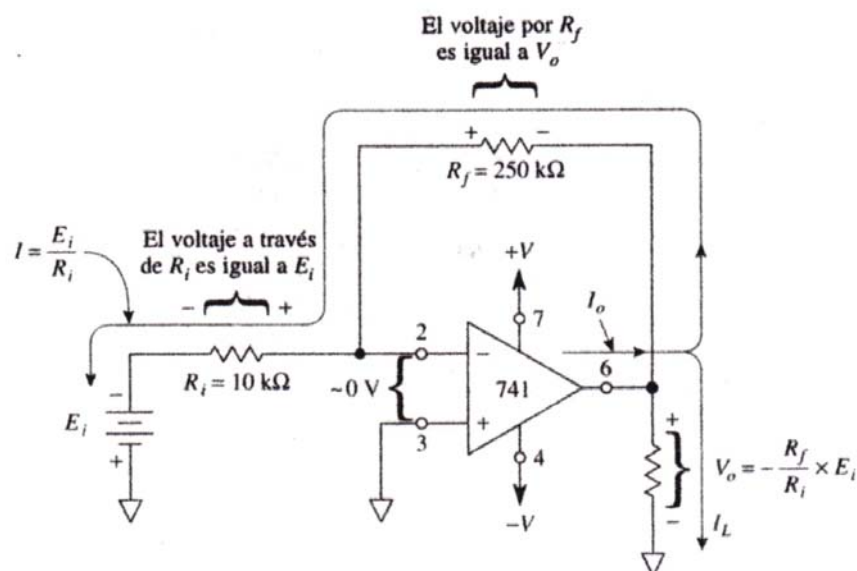
✓ **Corrientes de carga y de salida:** La corriente de carga  $I_L$  que fluye a través de  $R_L$  está determinada solamente por  $R_L$  y  $V_o$  y se le alimenta desde la terminal de salida del amplificador operacional. Por lo tanto,  $I_L = V_o / R_L$ . Así, la corriente de salida del amplificador operacional  $I_o$  es:

$$I_o = I + I_L \quad \text{Ecuación (9)}$$

El valor máximo de  $I_o$  lo define el amplificador operacional; que por lo general está entre 5 y 10 mA.

✓ **Voltaje negativo aplicado a la entrada inversora:** En la figura 8, se muestra un voltaje negativo,  $E_i$ , aplicado a través de  $R_i$  a la entrada inversora. Todos los principios y las ecuaciones de las secciones 3.3 a la 3.3.2 se siguen utilizando. La única diferencia entre las figuras 7 y 8 es la dirección de las corrientes. Inviertiendo la polaridad del voltaje de entrada,  $E_i$ , se invierte la dirección de todas las corrientes y las polaridades de voltaje. Ahora la salida del amplificador se hará positiva cuando  $E_i$  se vuelva negativo.

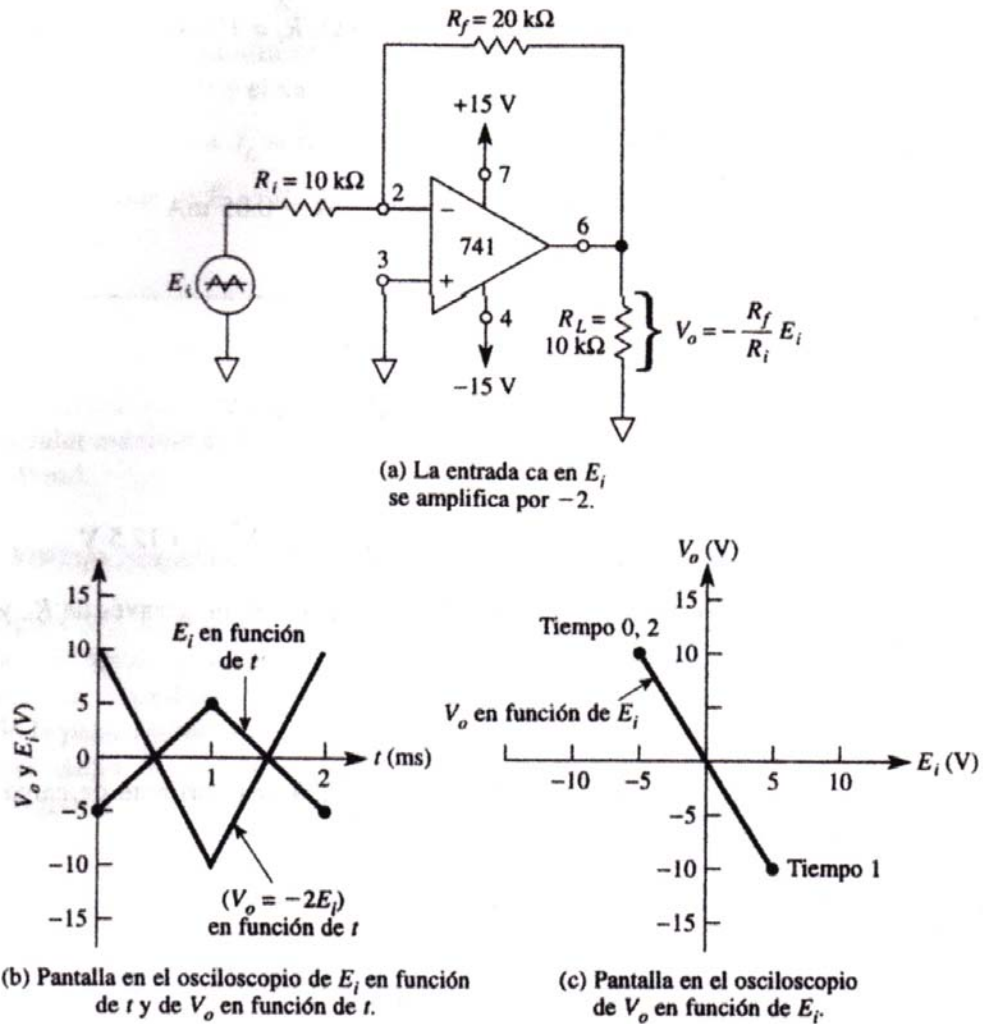
Figura 8. Amplificador inversor con voltaje negativo a la entrada (-)



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

✓ **Voltaje ca aplicado a la entrada inversora:** En la figura 9(a) se muestra una señal de ca de voltaje  $E_i$  aplicada a la entrada inversora a través de  $R_i$ . Para el medio ciclo positivo, las polaridades del voltaje y las direcciones de corrientes son las mismas que en la figura 8. La forma de onda de la salida es la negativa (o  $180^\circ$  fuera de fase) de la onda de entrada, como se muestra en la figura 9(b). Esto es, cuando  $E_i$  es positivo,  $V_o$  es negativo, y viceversa. Las ecuaciones deducidas en la sección 3.1 son aplicables a la figura 9 para voltajes de ca.

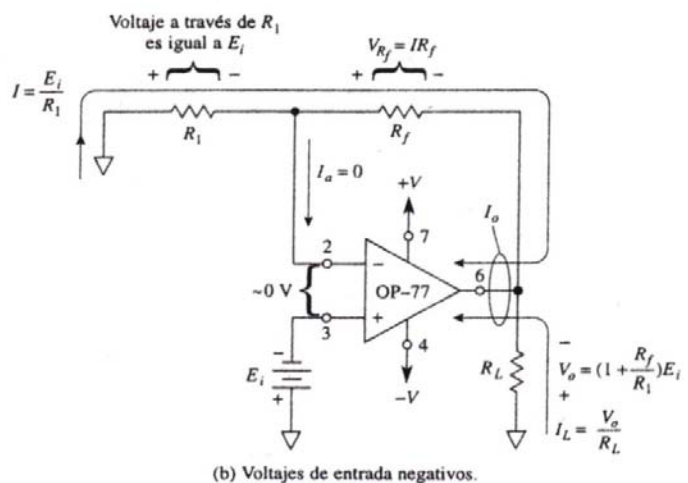
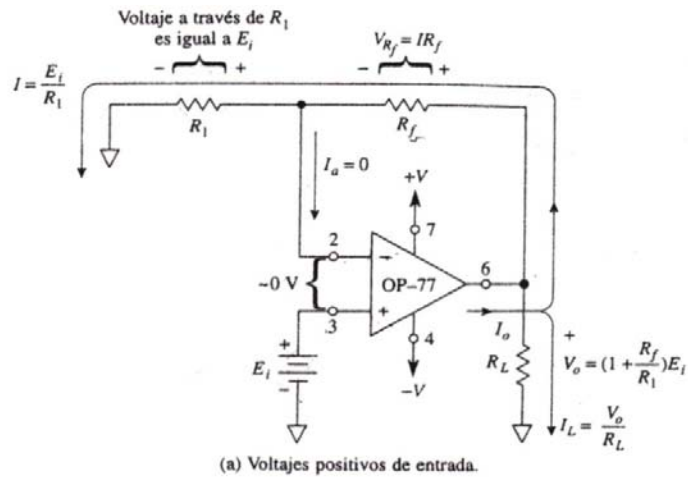
Figura 9. Amplificador inversor con voltaje ca aplicado a la entrada inversora



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

**3.3.5 Amplificador no inversor.** En la figura 10 se representa un amplificador no inversor, lo que significa que el voltaje de salida,  $V_o$ , tiene la misma polaridad que el voltaje de entrada,  $E_i$ . La resistencia de entrada del amplificador inversor es  $R_i$ , pero la resistencia de entrada del amplificador no inversor es muy grande, por lo general excede a  $100 \text{ M}\Omega$ .

Figura 10. Polaridades de voltaje y dirección de las corrientes de un amplificador no inversor



Fuente: COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

Dado que prácticamente el voltaje que hay entre las conexiones (+) y (-) del amplificador operacional es 0, ambas están conectadas al mismo potencial  $E_i$ . Por lo tanto,  $E_i$  aparece a través de  $R_1$ , lo cual provoca que la corriente  $I$  fluya como la indica la ecuación:

$$I = \frac{E_i}{R_1} \quad \text{Ecuación 10}$$

La dirección de  $I$  depende de la polaridad de  $E_i$ . Compare la figura 10(a) y 10(b). La corriente de entrada en la terminal (-) del amplificador operacional es mínima. Por lo tanto,  $I$  fluye por  $R$  y la caída de voltaje a través de  $R_f$  se representa por  $V_{Rf}$  y se expresa de la siguiente manera:

$$V_{Rf} = I(R_f) = \frac{R_f}{R_1} E_i \quad \text{Ecuación 11}$$

El voltaje de salida  $V_o$  se encuentra mediante la suma de la caída de voltaje a través de  $R_i$ , la cual es  $E_i$ , al voltaje por  $R_f$ , es cual es  $V_{Rf}$ :

$$V_o = E_i + \frac{R_f}{R_1} E_i \quad \text{Ecuación 12(a)}$$

o bien :

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) E_i \quad \text{Ecuación 12(b)}$$

Al ordenar la ecuación (12.b) para expresar la ganancia de voltaje, se obtiene lo siguiente:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{E_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = \frac{R_f + R_1}{R_1} \quad \text{Ecuación 13}$$

La ecuación (13) muestra que la ganancia de voltaje de un amplificador no inversor siempre es mayor que 1.

La corriente de carga  $I_L$  está dada por  $V_o/R_L$  y, por lo tanto, depende sólo de  $V_o$  y de  $R_L$ <sup>2</sup>.

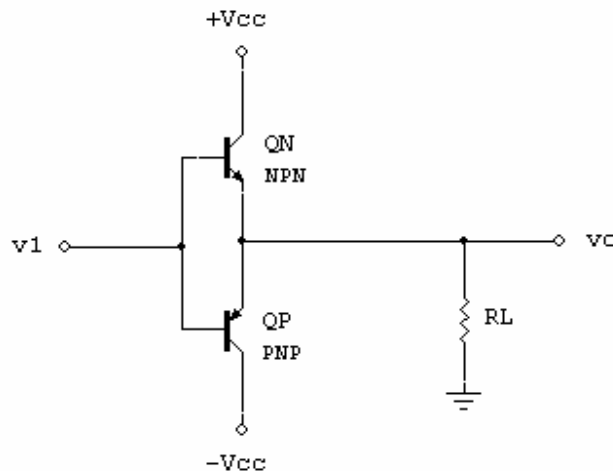
### 3.4 ETAPA DE SALIDA CLASE B

En la figura 11 se ilustra una etapa de salida clase B. Está formada por un par complementario de transistores (esto es, un npn y un pnp) conectados en forma tal que ambos no pueden conducir simultáneamente.

---

<sup>2</sup> COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

Figura 11. Etapa de salida clase B



Fuente: SEDRA, Adel S. /SMITH, Kenneth C. Circuitos Microelectrónicos.4ª Edición. Ed. Oxford. México, 2001.

**3.4.1 Operación del circuito.** Cuando el voltaje de entrada  $v_1$  es cero, ambos transistores están en corte y el voltaje de salida  $v_o$  es cero. A medida que  $v_1$  se hace positivo y rebasa unos 0.5 V,  $Q_N$  conduce y opera como seguidor de emisor. En este caso  $v_o$  sigue a  $v_1$  (es decir,  $v_o = v_1 - V_{BEN}$ ) y  $Q_N$  proporciona la corriente de carga. Entre tanto, la unión entre emisor y base de  $Q_P$  estará polarizada inversamente por el  $V_{BEN}$  de  $Q_N$ , que es aproximadamente de 0.7 V. Entonces,  $Q_P$  estará en corte.

Si la entrada se hace negativa en más de unos 0.5 V,  $Q_P$  conduce y actúa como seguidor de emisor. De nueva cuenta,  $v_o$  sigue a  $v_1$  (esto es,  $v_o = v_1 + V_{EBP}$ ), pero en este caso  $Q_P$  proporciona la corriente de carga y  $Q_N$  estará en corte<sup>3</sup>.

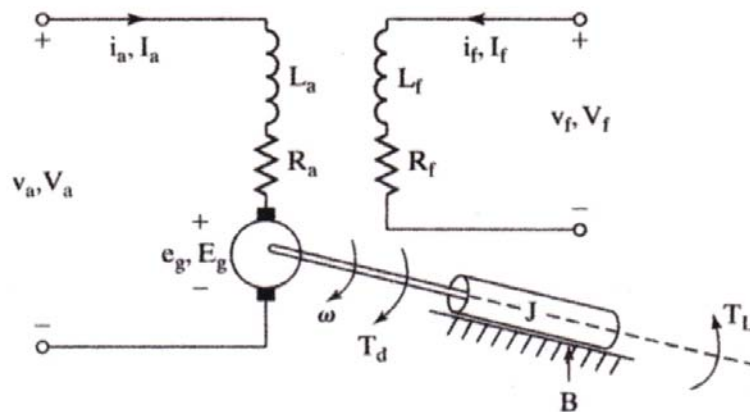
### 3.5 PROPULSORES DE CD

Los motores de corriente directa (cd) tienen características variables, y se usan mucho en propulsión con velocidad variable. Pueden proporcionar un alto par de arranque, y también es posible obtener el control de velocidad dentro de márgenes amplios. Se suelen usar tanto motores de cd (excitados en) serie como con excitación independiente, en los propulsores de velocidad variable, pero los motores en serie son los que se emplean en forma tradicional para aplicaciones de tracción.

<sup>3</sup> SEDRA, Adel S. /SMITH, Kenneth C. Circuitos Microelectrónicos.4ª Edición. Ed. Oxford. México, 2001.

**3.5.1 Características básicas de los motores de cd.** En la figura 12 se presenta el circuito equivalente de un motor de cd con excitación separada. Cuando uno de esos motores es excitado por una corriente de campo  $i_f$  y una corriente de armadura  $i_a$  pasa por el circuito de la armadura, el motor desarrolla una fuerza contraelectromotriz (fem inducida) y un par de torsión para balancear el par de carga a determinada velocidad. La corriente de campo  $i_f$  de un motor con excitación separada es independiente de la corriente de armadura  $i_a$ , y cualquier cambio en la corriente de armadura no tiene efecto en la corriente de campo. En el caso normal, la corriente de campo es mucho menor que la corriente de armadura.

Figura 12. Circuito equivalente de motores de cd con excitación separada



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

Las ecuaciones que describen las características de un motor con excitación separada se pueden determinar con la figura 12. La corriente instantánea de campo,  $i_f$  se describe con

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad \text{Ecuación (14)}$$

La corriente instantánea en la armadura se determina con

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad \text{Ecuación (15)}$$

La fem inducida del motor, que también se llama voltaje de velocidad, se expresa como

$$e_g = K_v \omega i_f \quad \text{Ecuación (16)}$$

El par motor, o “torque”, desarrollado por el motor es

$$T_a = K_t i_f i_a \quad \text{Ecuación (17)}$$

El par motor desarrollado debe ser igual al par de carga:

$$T_a = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_L \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde,

$w$  = velocidad angular del motor, o frecuencia angular del roto, rad/s.

$B$  = constante de fricción viscosa, N.m/rad/s.

$K_v$  = constante de voltaje, V/A-rad/s.

$K_t$  = constante de par motor, que es igual a la constante de voltaje,  $K_v$ .

$L_a$  = inductancia del circuito de la armadura, H.

$L_f$  = inductancia del circuito de campo, H.

$R_a$  = resistencia del circuito de la armadura,  $\Omega$ .

$T_L$  = par de carga, N.m.

Bajo condiciones de estado permanente, las derivadas en las ecuaciones anteriores son cero, y las cantidades promedio para estado permanente son:

$$V_f = R_f I_f \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$E_g = K_v w I_f \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$V_a = R_a I_a + E_g$$

$$V_a = R_a I_a + K_v w I_f \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$T_a = K_t I_f I_a$$

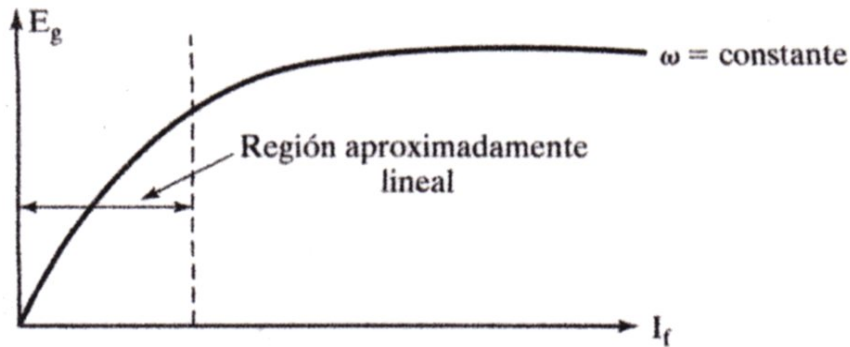
$$T_a = Bw + T_L \quad \text{Ecuación (22)}$$

La potencia desarrollada es

$$P_a = T_a w \quad \text{Ecuación (23)}$$



Figura 13. Características de magnetización



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

Debido a la saturación magnética, la relación entre la corriente de campo  $I_f$  y la fem inducida  $E_g$  es no lineal. Esta relación, que se ve en la figura 13, se llama característica de magnetización del motor. De acuerdo con la ecuación (21), la velocidad de un motor con excitación separada se determina con:

$$w = \frac{V_a - R_a I_a}{K_v I_f} = \frac{V_a - R_a I_a}{K_v V_f / R_f} \quad \text{Ecuación (24)}$$

En la ecuación (24) se puede observar que la velocidad del motor puede variar:

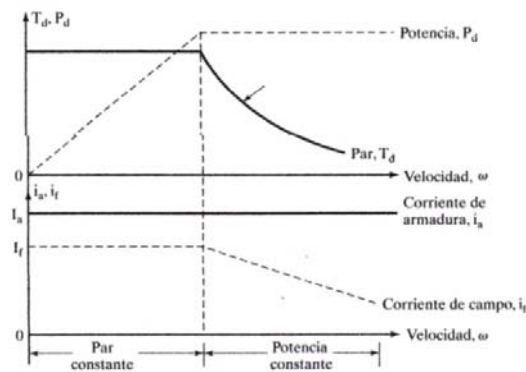
1. Controlando el voltaje de armadura,  $V_a$ , lo que se llama control de voltaje.
2. Controlando la corriente en el campo,  $I_f$ , lo que se llama control de campo.
3. Por demanda de par, que corresponde a una corriente de armadura  $I_a$  para una corriente fija de campo  $I_f$ .

La velocidad, que corresponde al voltaje especificado para la armadura, corriente especificada para el campo y corriente especificada para la armadura, se llama velocidad nominal (o base).

En la práctica, para una velocidad menor que la velocidad base, se mantienen constantes las corrientes de armadura y de campo para satisfacer la demanda de par, y se varía el voltaje de armadura  $V_a$  para controlar la velocidad. Para velocidades mayores que la velocidad base, se mantiene el voltaje de armadura en el valor nominal,

y se varía la corriente en el campo, para controlar la velocidad. Sin embargo, la potencia desarrollada por el motor (= par x velocidad) permanece constante.

Figura 14. Características de los motores de cd con excitación separada.

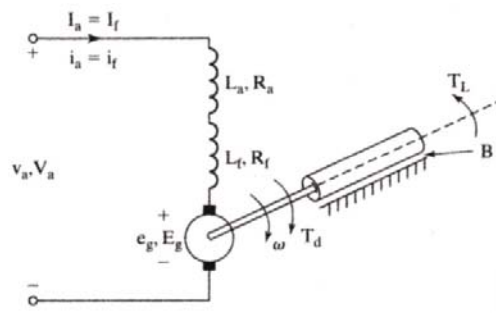


Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

La figura 14 muestra las características de par, potencia, corriente de armadura y corriente de campo en función de la velocidad.

El campo de un motor cd se puede conectar en serie con el circuito de la armadura, como se ve en la figura 15, y a este tipo de motor se le llama motor (excitado en) serie.

Figura 15. Circuito equivalente de los motores serie de cd



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

El circuito de campo se diseña para conducir la corriente de armadura. Las cantidades promedio de estado permanente son

$$E_g = K_v \omega I_a \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$V_a = (R_a + R_f)I_a + E_g$$

$$V_a = (R_a + R_f)I_a + K_v \omega I_f \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$T_d = K_t I_a I_f = B\omega + T_L \quad \text{Ecuación (27)}$$

La velocidad de un motor serie se puede determinar con la ecuación (26):

$$\omega = \frac{V_a - (R_a + R_f)I_a}{K_v I_f} \quad \text{Ecuación (28)}$$

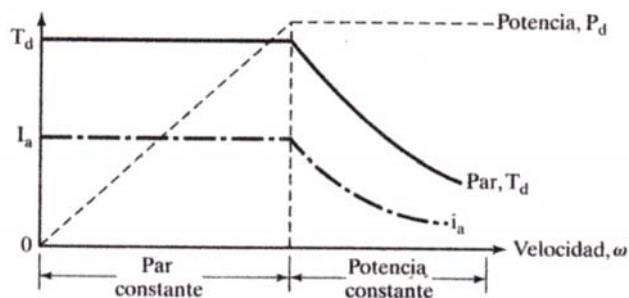
Se puede variar la velocidad controlando:

a. El voltaje de armadura,  $V_a$ .

b. La corriente en la armadura, que es una medida de la demanda de par. La ecuación (27) indica que un motor serie puede suministrar un par alto, en especial en el arranque, y por esta razón los motores serie son los que se usan con más frecuencia en aplicaciones de tracción.

Para acelerar hasta la velocidad base, se varía el voltaje de armadura, y el par motor se mantiene constante. Una vez aplicado el voltaje nominal en la armadura, la relación velocidad-par sigue la característica natural del motor, y la potencia (= par x velocidad) permanece constante. A medida que se reduce el par, aumenta la velocidad. Con una carga muy ligera, la velocidad podría ser muy alta, y no se aconseja hacer trabajar un motor, y no se aconseja hacer trabajar un motor serie de cd sin carga. La figura 16 muestra las características de los motores serie de cd.

Figura 16. Características de los motores serie de cd



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

**3.5.2 Modos de operación.** En aplicaciones con velocidad variable, un motor de cd puede estar funcionando en uno o más modos de los siguientes:

- Motorización
- Frenado regenerativo
- Frenado dinámico o de recuperación
- Frenado con reversa
- Modo cuatro cuadrantes

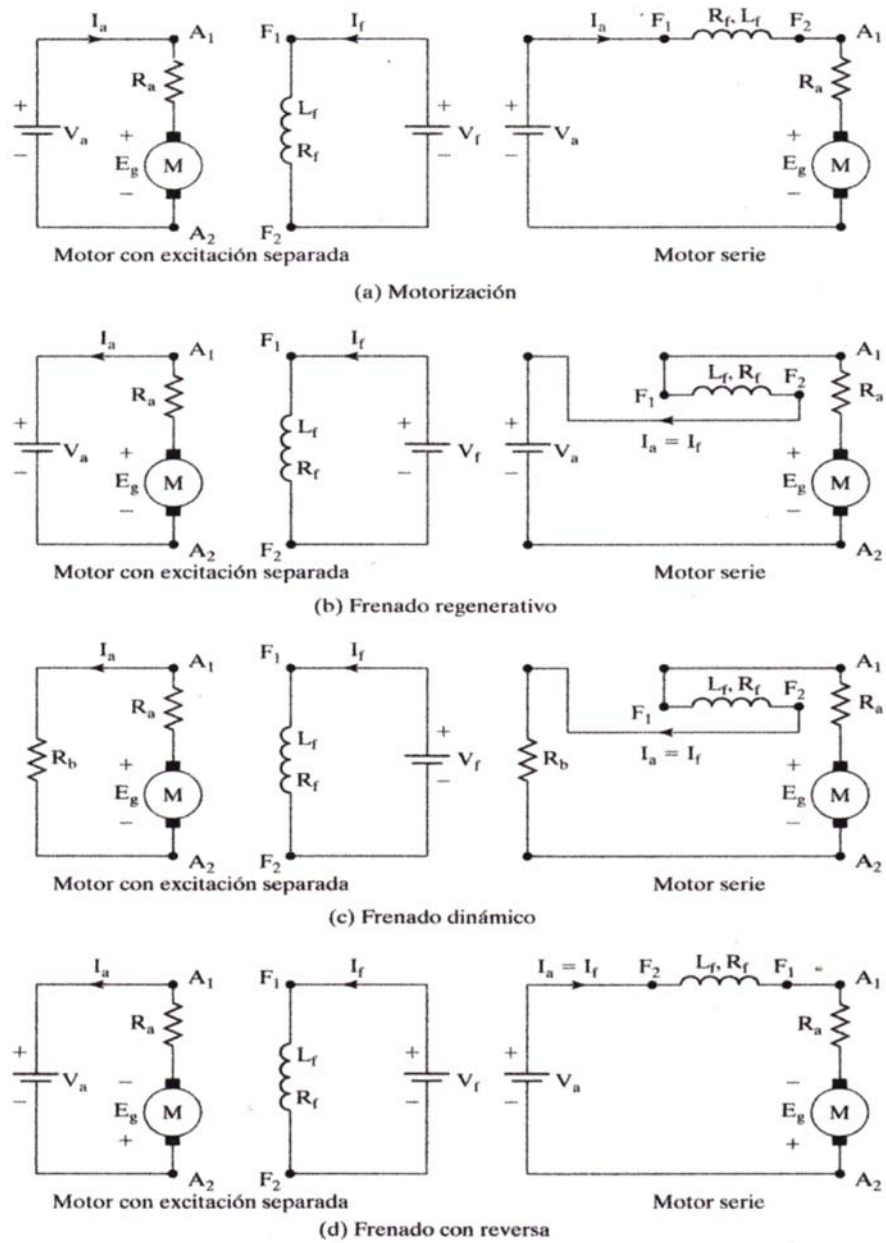
**Motorización.** Los arreglos para motorización se ven en la figura 17(a). La fem inducida  $E_g$  es menor que el voltaje de alimentación  $V_a$ . Las corrientes en la armadura y en el campo son positivas. El motor desarrolla un par de giro para satisfacer la demanda de carga.

**Frenado regenerativo.** Los arreglos para tener frenado regenerativo se ven en la figura 17(b). El motor funciona como generador, y desarrolla un voltaje inducido  $E_g$ , que debe ser mayor que el voltaje de alimentación  $V_a$ . La corriente en la armadura es negativa, pero la del campo es positiva. La energía cinética del motor se regresa a la fuente. En general, un motor serie se conecta como generador autoexcitado. Para tener autoexcitación, es necesario que la corriente del campo ayude al flujo residual. Esto se hace, en el caso normal, invirtiendo las terminales de la armadura o las del campo.

**Frenado dinámico.** Los arreglos que se ven en la figura 17(c) son parecidos a los del frenado regenerativo, excepto que el voltaje de alimentación  $V_a$  está sustituido por una resistencia  $R_b$  de frenado. La energía cinética del motor se disipa en  $R_b$ .

**Frenado en reversa.** Las conexiones para el frenado en reversa se ven en la figura 17(d). Se invierten las terminales de armadura en funcionamiento. El voltaje de alimentación  $V_a$  y el voltaje inducido  $E_g$  actúan en la misma dirección. Se invierte la corriente en la armadura, y con ello se produce un par de frenado. La corriente en el campo es positiva. Para un motor serie, se deben invertir las terminales de la armadura o las terminales del campo, pero no ambas.

Figura 17. Modos de operación motor cd



Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

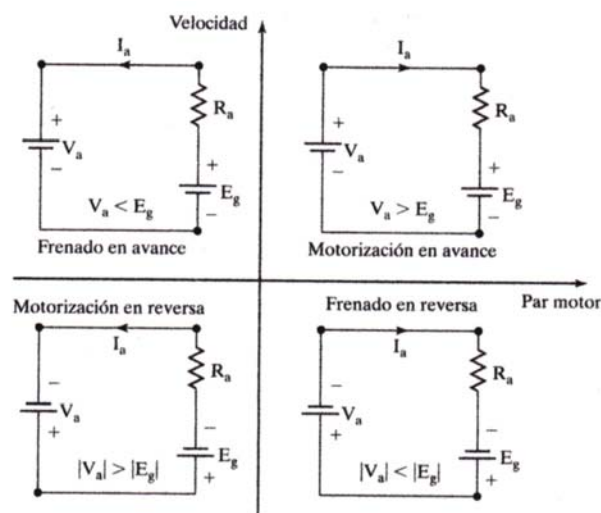
**Cuatro cuadrantes.** La figura 18 muestra las polaridades del voltaje de suministro,  $V_a$ , la fem inducida,  $E_g$  y la corriente en la armadura,  $I_a$ , para un motor con excitación separada. En la motorización directa (cuadrante I),  $V_a$ ,  $E_g$ , e  $I_a$ , son positivos todos. El par motor y la velocidad también son positivos en este cuadrante.

Durante el frenado en avance o regenerativo (cuadrante II), el motor trabaja en la dirección en avance o regenerativo y la fem inducida,  $E_g$  continúa siendo positiva. Para que el par motor sea negativo y que el flujo de la dirección de la energía sea en reversa, la corriente de la armadura debe ser negativa. El voltaje de alimentación  $V_a$  debe mantenerse menor que  $E_g$ .

En la motorización en reversa (cuadrante III),  $V_a$ ,  $E_g$ , e  $I_a$ , son todos positivos. El par motor y la velocidad también son negativos en este cuadrante. Para mantener el par motor negativo y el flujo de energía de la fuente al motor, la fem  $E_g$  debe satisfacer la condición  $|V_a| > |E_g|$ . La polaridad de  $E_g$  puede invertirse cambiando la dirección de la corriente de campo o invirtiendo las terminales de la armadura.

Durante el frenado en reversa (cuadrante IV), el motor funciona en dirección inversa,  $V_a$  y  $E_g$  continúan siendo negativos. Para que el par sea positivo y la energía pase del motor a la alimentación, la corriente en la armadura debe ser positiva. La fem inducida  $E_g$  debe satisfacer la condición  $|V_a| < |E_g|$ <sup>4</sup>.

Figura 18. Condiciones para cuatro cuadrantes.



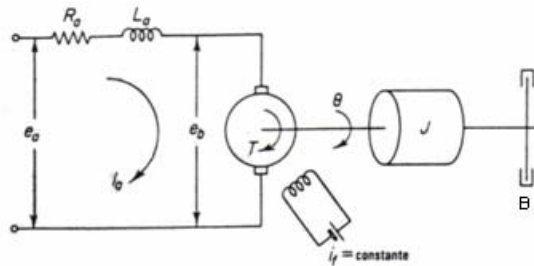
Fuente: RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

<sup>4</sup> RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004

### 3.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA MOTOR CD

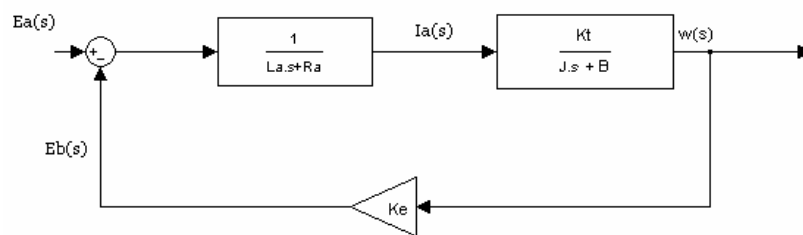
Sea el motor de cd controlado en el inducido que puede verse en la figura 19(a).

Figura 19(a). Diagrama esquemático de un motor de cd.



Fuente: OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 2da Edición. Prentice Hall. 1980

Figura 19(b). Diagrama de bloques de un motor de cd.



Fuente: KUO, Benjamín. Sistemas de Control Automático. México. 7 Ed. 1996.

Función de transferencia del diagrama de bloques del motor cd de la figura 19(b), con salida correspondiente a su velocidad angular  $w(s)$  y voltaje de entrada  $E_a(s)$ :

$$\frac{w(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J s + B)}}{1 + \frac{K_t \cdot K_e}{(L_a s + R_a)(J s + B)}}$$

$$\frac{w(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{\frac{(L_a s + R_a)(J s + B) + K_t \cdot K_e}{(L_a s + R_a)(J s + B)}}$$

$$\frac{w(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J_m s + B) + K_t \cdot K_e} \quad \text{Ecuación (29)}$$

De acuerdo a los parámetros del motor hallados experimentalmente y ubicados en el Anexo B, tenemos que:

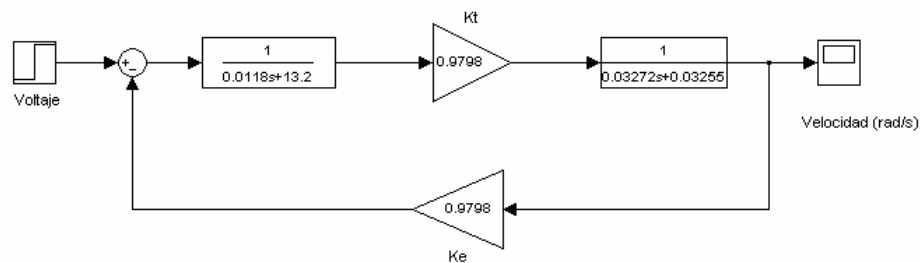
Cuadro 1. Parámetros del motor.

Ke	Ra	La	Jm	Kt	ζm	Tf	B
0.9798	13.2	11.8	0.03272	0.9798	450	0.17	0.03255
(V/rad-seg)	Ω	mH	(Kg - m <sup>2</sup> )	(Nm/A)	(ms)	(Nm)	(Nms)

Fuente: Autor del proyecto

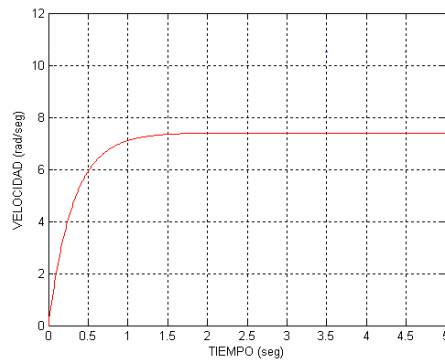
Reemplazando los valores tenemos:

Figura 20(a). Diagrama de bloques motor cd.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 20(b). Respuesta del sistema en lazo abierto.



Fuente: Autor del proyecto



## 4. MODULO SERVOMECANISMO DIGITAL: PWM Y AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

La estructura del sistema para el desarrollo de la práctica de laboratorio de control de velocidad del motor consta de las siguientes partes: Un computador el cual contiene el software especializado Labview 7.1 donde se desarrolla el control de las señales de modulación por anchura de pulsos (PWM); la tarjeta USB 6008 de National Instruments como plataforma de envío y recepción de señales digitales y análogas según sea la configuración con la que se trabaje; un Amplificador Diferencial y la Unidad Mecánica 33-100 Feedback.

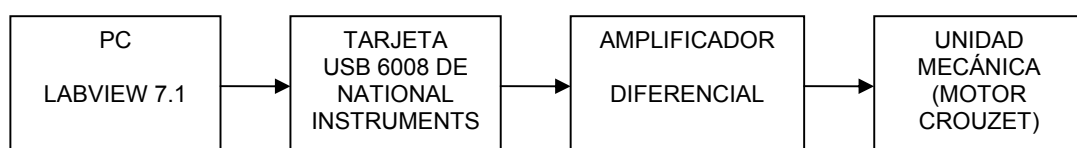
### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL SERVOMECANISMO DIGITAL

Este proyecto planteó el problema de desarrollar el control de velocidad del motor de la unidad mecánica 33-100 Feedback ubicada en la sala de Laboratorio de Control de Procesos por medio de la Modulación por Anchura de Pulsos (PWM) y un Amplificador Diferencial. Para ello se trabajó en el desarrollo del software del PWM en lenguaje Labview 7.1.

Se usó la tarjeta de adquisición de datos USB de la National Instruments como plataforma de comunicación entre el computador y la etapa de potencia que va a la alimentación del motor de la Unidad Mecánica 33-100 Feedback.

El Amplificador Diferencial construido permite controlar motores de 24 voltios, por medio de señales de baja potencia que son enviadas a través de sus dos entradas, según sea su entrada se puede controlar el sentido de giro del motor de forma horaria o anti-horaria.

Figura 21. Diagrama de bloques del sistema desarrollado



Fuente: Autor del proyecto

**4.1.1 Computador: Herramienta de programación Labview 7.1.** El computador es la herramienta que manipula a través de su software especializado Labview 7.1 todo el control de la velocidad del motor, dicho control es manejado por variables los cuales son manipulados dentro del software según el análisis de la práctica.

**4.1.2 Tarjeta de Adquisición de Datos USB 6008 de la National Instruments.** La tarjeta de adquisición de datos USB 6008, es la interfaz utilizada entre el computador y la Unidad Mecánica 33-100 Feedback; ésta adquiere y genera las señales del sistema.

Para la generación de señales se utilizó el escritor DAQmx de la librería DAQmx con el caso de generación de una señal digital Booleana con una línea de salida digital (Digital Bool 1Line 1Point). En la salida digital se le asigna la línea o puerto de la tarjeta USB 6008 que se quiere utilizar para la generación de la señal.

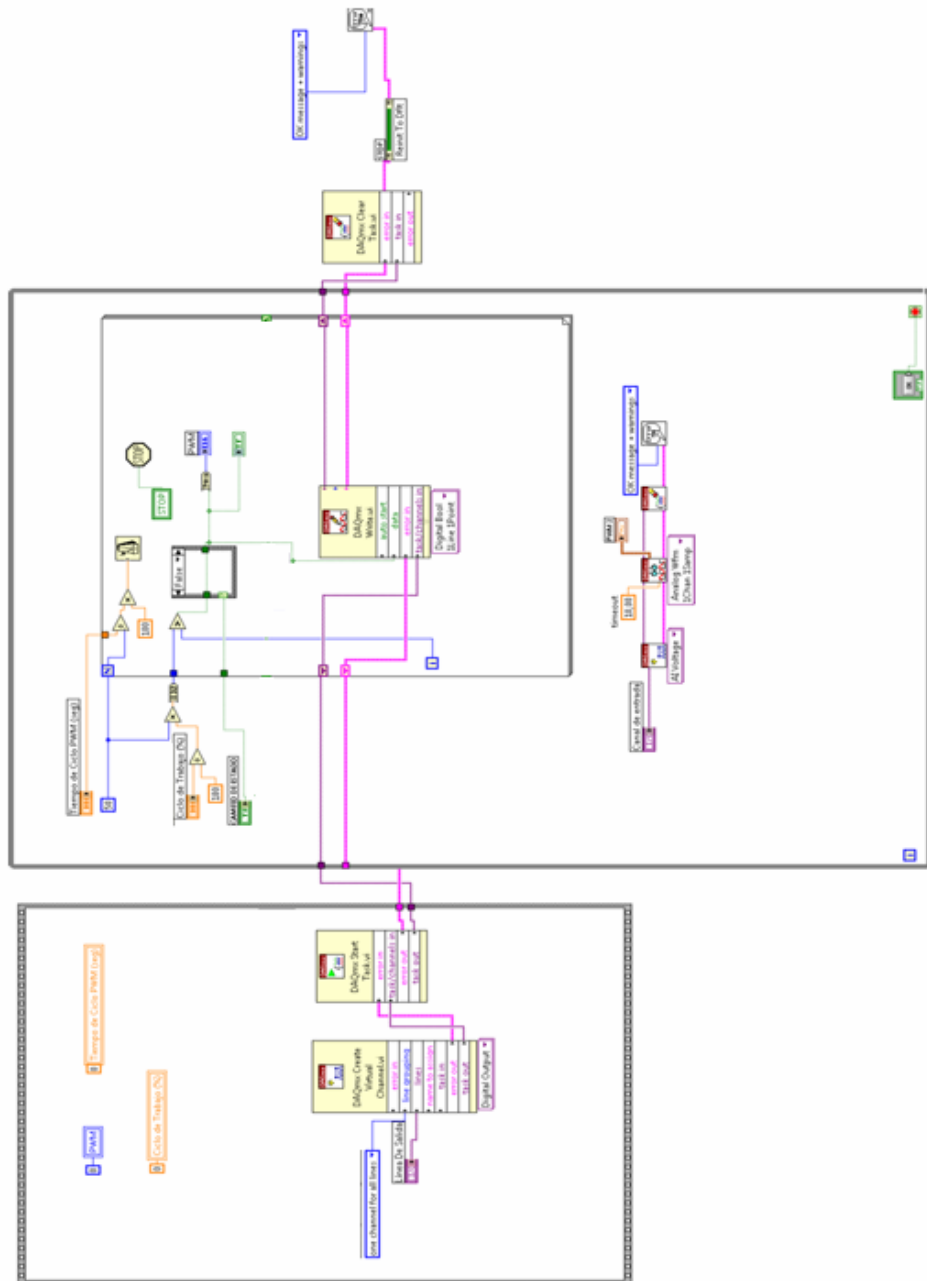
**4.1.3 Amplificador Diferencial.** El Amplificador Diferencial esta constituido por dos etapas, la primera etapa es la adquisición, amplificación y envío de la señal de control, y la segunda es la etapa de recepción de la señal amplificada y suministro de la potencia al motor; se trabaja con un sistema de etapa de salida clase B, el cual según sea la polaridad que se le entregue al sistema de salida, éste hará el respectivo control del sentido de giro del motor cd.

### **4.3 DISEÑO DEL SISTEMA**

Todo el proyecto esta desarrollado en dos etapas, la etapa de software y la etapa de hardware.

**4.3.1 Software del Sistema.** El software se basó en el desarrollo del PWM en el lenguaje Labview 7.1 el cual envía las señales de control al motor. El software utiliza las herramientas de generación de señales y visualización en pantalla; todo esto a través de la tarjeta USB 6008.

Figura 22. Diagrama de bloques PWM

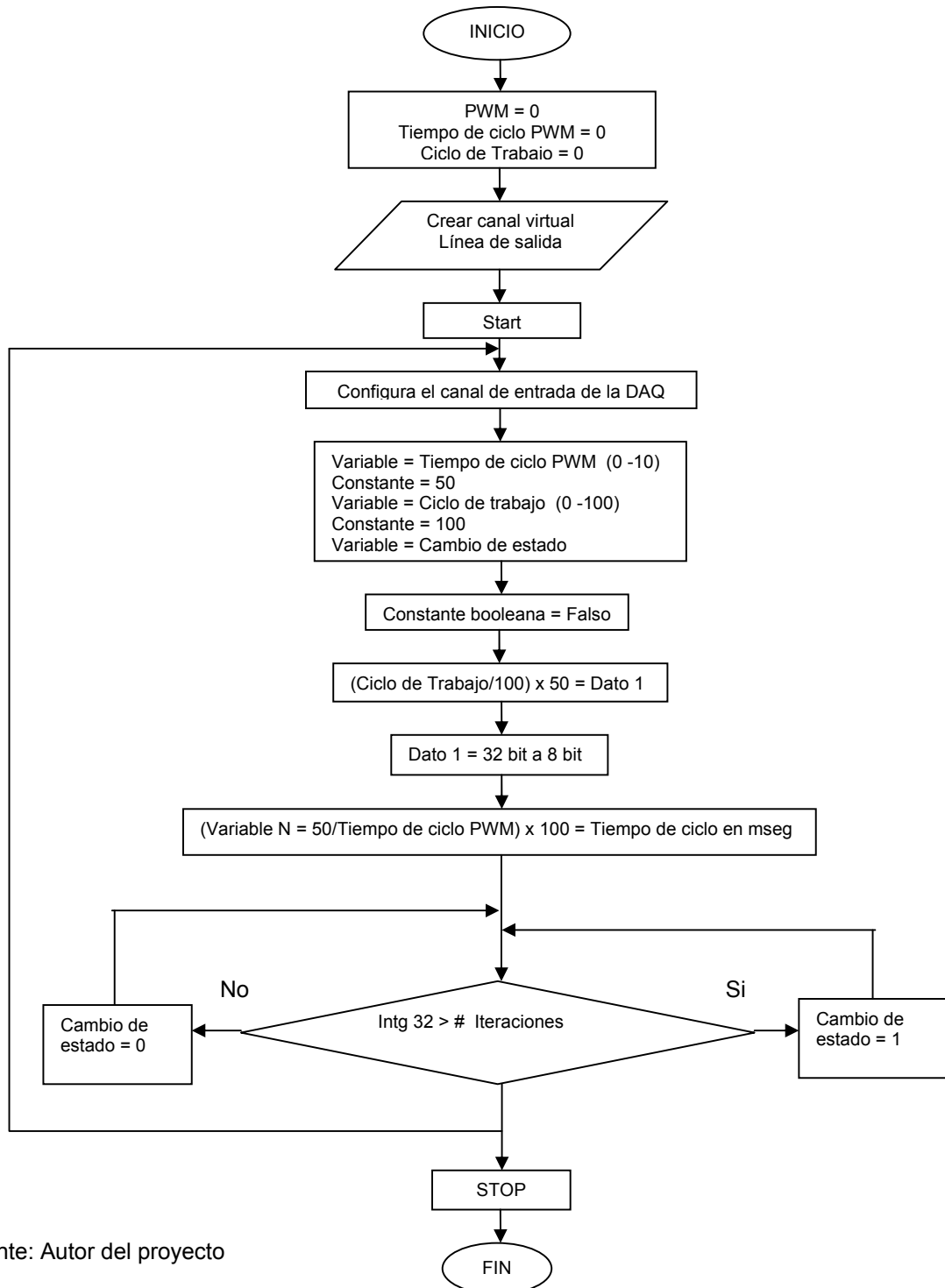


Fuente: Autor del proyecto<sup>5</sup>

<sup>5</sup> El diagrama de bloques se diseñó analizando ejemplos de la pagina de la National Instruments <http://www.ni.com>

## Diagrama de Flujo

Figura 23. Diagrama de flujo programa PWM



Fuente: Autor del proyecto

Figura 24. Panel frontal PWM



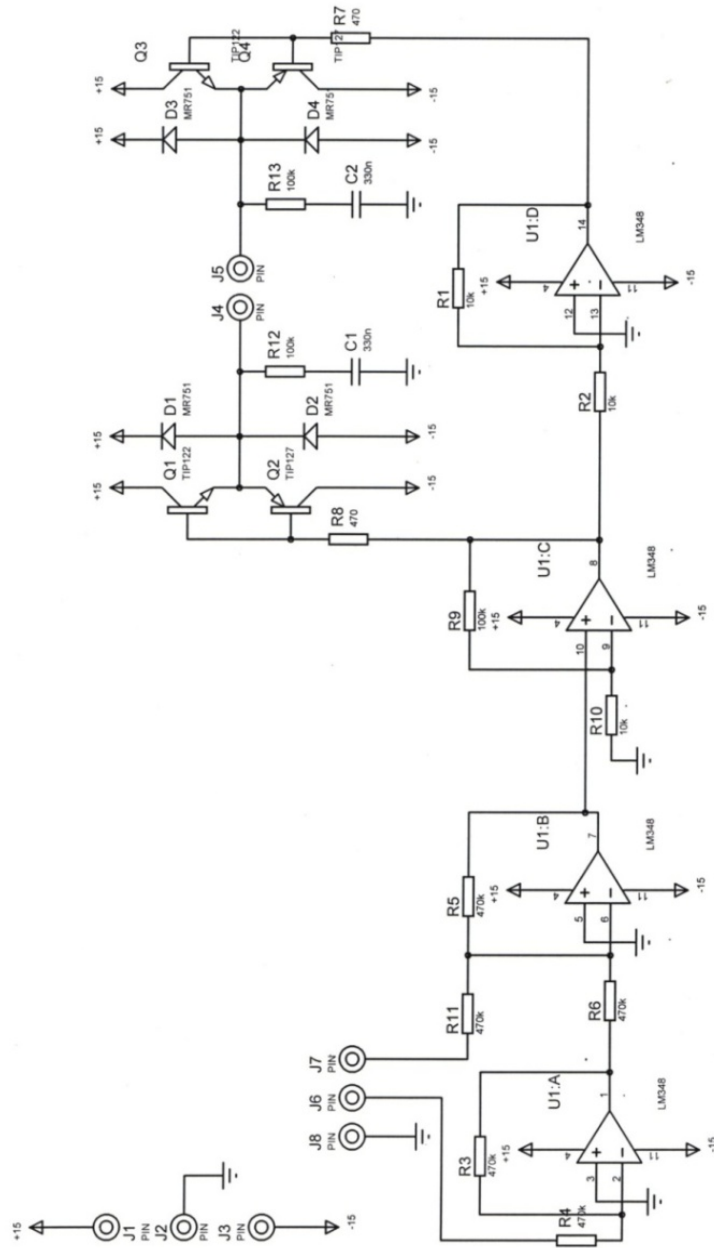
Fuente: Autor del proyecto

En el panel frontal el estudiante puede manipular 3 variables dentro del software, haciendo consigo que pueda analizar los diferentes modos de operación y manejo del control PWM en la velocidad del motor. Primero se debe elegir el puerto de la salida digital que deseemos trabajar y segundo se debe elegir el puerto análogo que va a recibir la señal del tacómetro; las tres variables que podemos manipular son el tiempo de ciclo PWM en milisegundos, con el cual podemos manejar la frecuencia que deseemos trabajar en el motor, que va desde 1Hz hasta los 15 Hz; la segunda variable es el porcentaje de ciclo de trabajo, el cual maneja la velocidad según sea su porcentaje de señal enviado, y como tercera variable tenemos el cambio de estado de la señal digital, la cual como su nombre lo indica cambia el estado de la señal enviada cuando éste es oprimido.

**4.2.1 Hardware del Sistema.** El Hardware está compuesto por: la Unidad Mecánica 33-100, la Tarjeta de adquisición de datos USB y el circuito Amplificador Diferencial.

## Amplificador Diferencial

Figura 25. Amplificador Diferencial



Fuente: Autor del proyecto<sup>6</sup>

<sup>6</sup> El Amplificador Diferencial fue un rediseño del existente en la Unidad Mecánica Feedback 33- 100

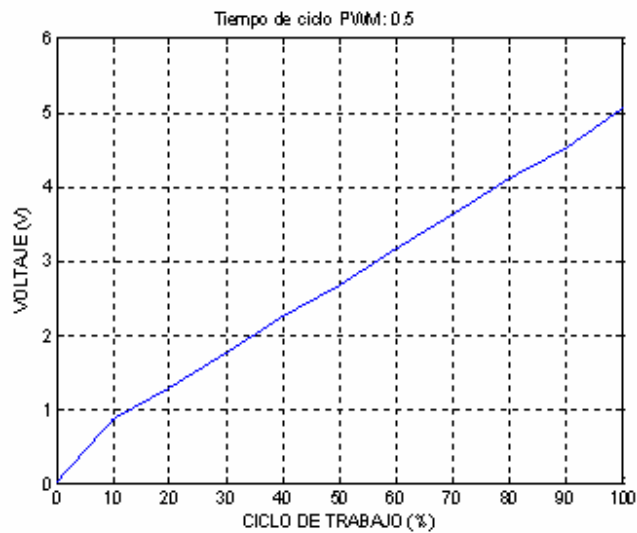
## 5. PRUEBAS

Cuadro 2: Tabla de mediciones realizadas: Ciclo Duty (%) vs Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) con un tiempo de ciclo PWM de 0.5

CICLO DUTY (%)	VOLTAJE (V)
0	0.032
10	0.86
20	1.29
30	1.76
40	2.26
50	2.67
60	3.17
70	3.63
80	4.12
90	4.52
100	5.06

Fuente: Autor del proyecto

Figura 26. Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 0.5



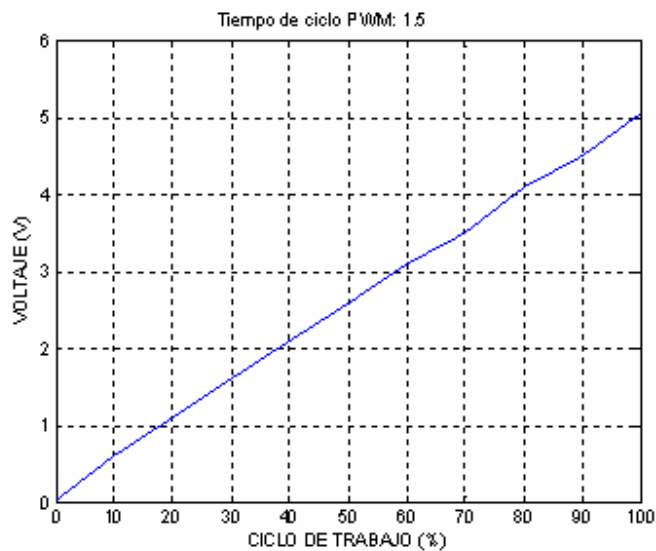
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 3: Tabla de mediciones realizadas: Ciclo Duty (%) vs Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5

CICLO DUTY (%)	VOLTAJE (V)
0	0.032
10	0.60
20	1.10
30	1.60
40	2.10
50	2.58
60	3.10
70	3.50
80	4.10
90	4.50
100	5.06

Fuente: Autor del proyecto

Figura 27. Voltaje enviado por la tarjeta USB 6008 (+) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5



Fuente: Autor del proyecto

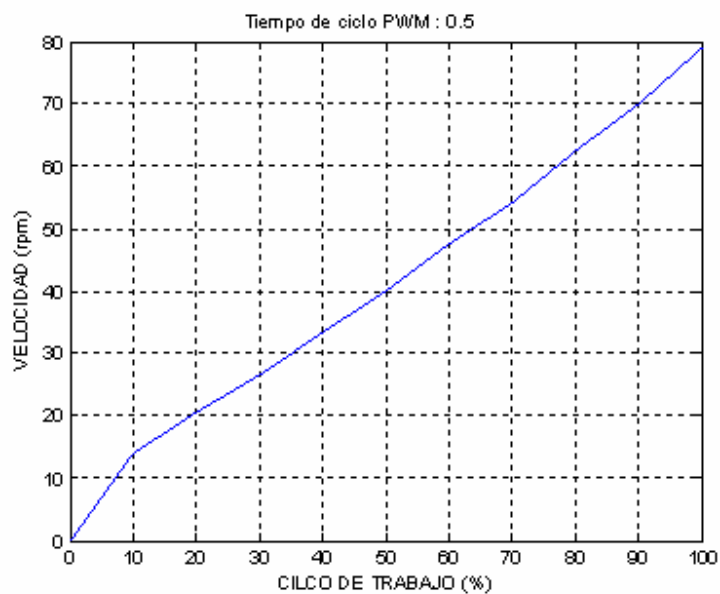


Cuadro 4: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 0.5

CICLO DUTY (%)	RPM (+)
0	0
10	14.0
20	20.5
30	26.5
40	33.3
50	40.2
60	47.5
70	54.2
80	62.5
90	70.0
100	79.2

Fuente: Autor del proyecto

Figura 28. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 0.5



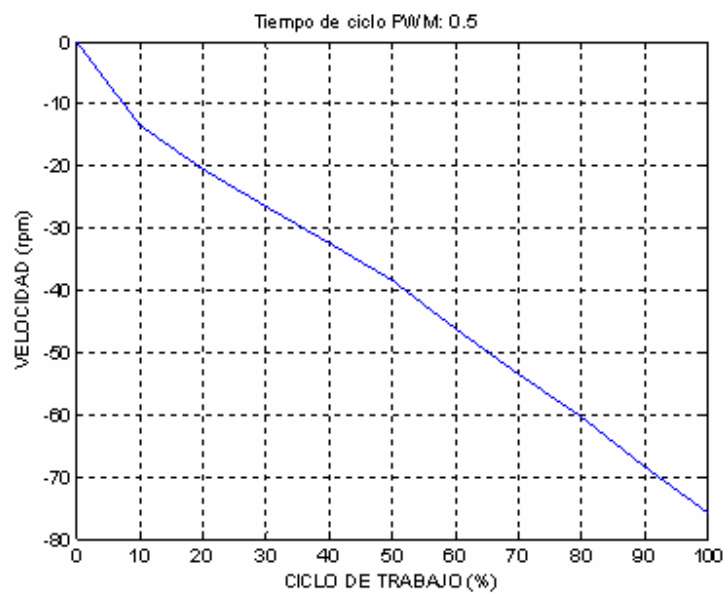
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 5: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 0.5

CICLO DUTY (%)	RPM (-)
0	0
10	-13.5
20	-20.5
30	-26.5
40	-32.5
50	-38.5
60	-46.2
70	-53.5
80	-60.5
90	-68.5
100	-76.0

Fuente: Autor del proyecto

Figura 29. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 0.5



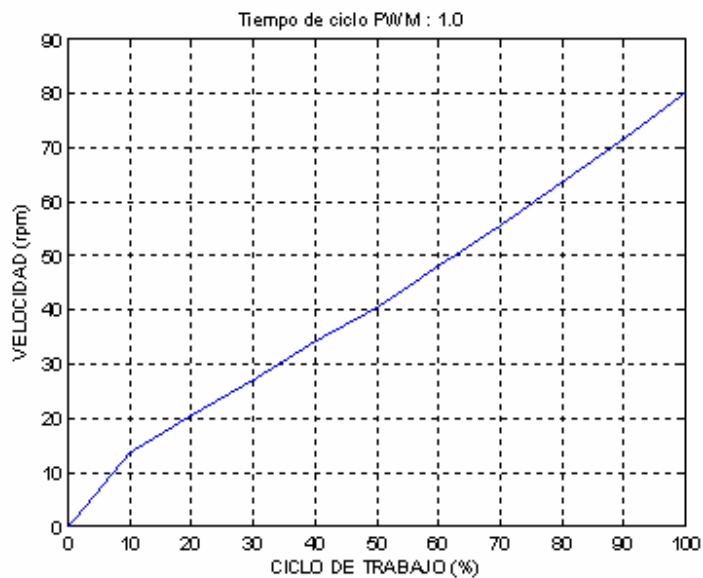
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 6: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.0

CICLO DUTY (%)	RPM (+)
0	0
10	13.5
20	20.5
30	27.0
40	34.0
50	40.5
60	48.0
70	55.5
80	63.5
90	71.5
100	80.2

Fuente: Autor del proyecto

Figura 30. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.0



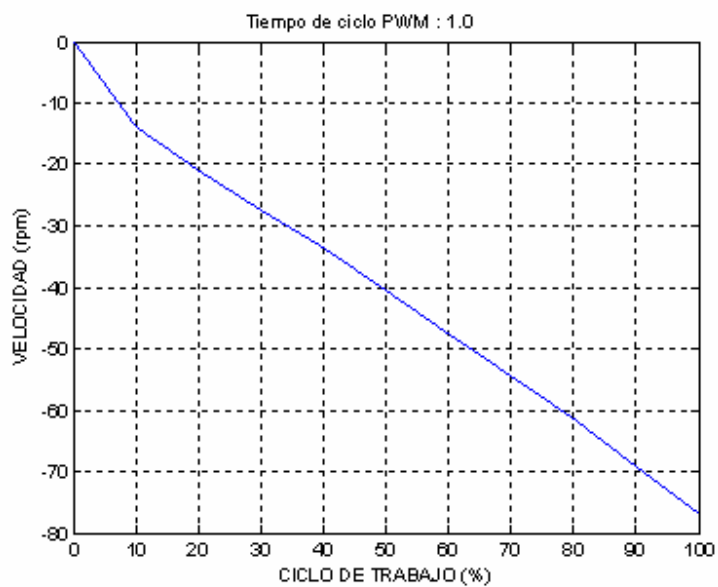
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 7: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 1.0

CICLO DUTY (%)	RPM (-)
0	0
10	-14.0
20	-21.0
30	-27.5
40	-33.5
50	-40.5
60	-47.5
70	-54.5
80	-61.5
90	-69.2
100	-76.9

Fuente: Autor del proyecto

Figura 31. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.0



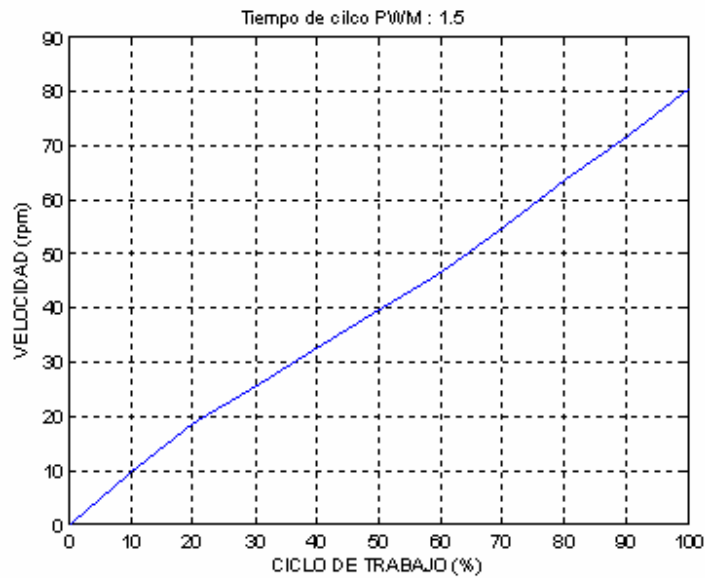
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 8: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (+), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5

CICLO DUTY (%)	RPM (+)
0	0
10	9.5
20	18.5
30	25.5
40	32.5
50	39.5
60	46.5
70	54.5
80	63.5
90	71.5
100	80.3

Fuente: Autor del proyecto

Figura 32. Velocidad del motor (rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5



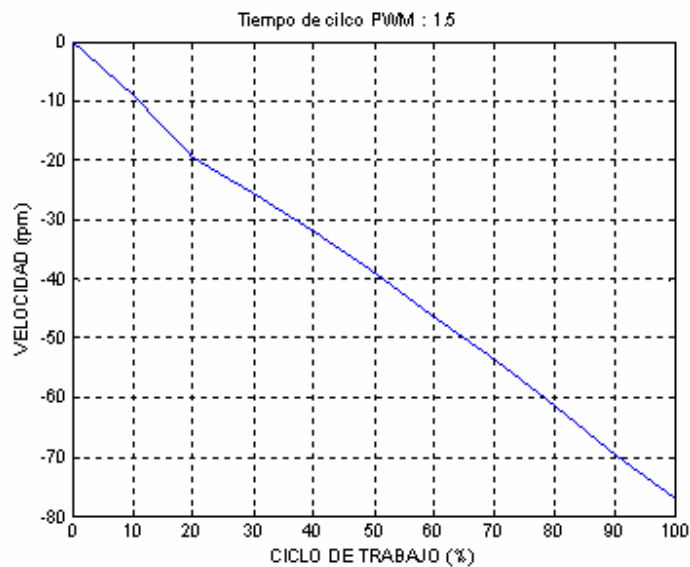
Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 9: Tabla de mediciones realizadas Ciclo Duty (%) vs RPM (-), con un tiempo de ciclo PWM de 1.5

CICLO DUTY (%)	RPM (-)
0	0
10	-9.0
20	-19.5
30	-25.5
40	-32.0
50	-39.0
60	-46.5
70	-53.5
80	-61.5
90	-69.5
100	-77.1

Fuente: Autor del proyecto

Figura 33. Velocidad del motor (- rpm) vs Ciclo de Trabajo (%), con tiempo de ciclo PWM de 1.5



Fuente: Autor del proyecto

Cuadro 10: Frecuencia a la que trabaja el módulo según el tiempo de ciclo PWM

<b>Tiempo de ciclo PWM (mseg)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
0.1	15.0
0.5	9.50
1.0	9.30
1.5	6.50
2.0	5.00
3.0	3.30
4.0	2.45
5.0	2.00
6.0	1.66
7.0	1.43
8.0	1.25
9.0	1.10
10.0	1.00

Fuente: Autor del proyecto

## 6. RESULTADOS

- El sistema realiza el control de velocidad del motor de la Unidad Mecánica 33- 100 Feedback en un rango de voltaje de 0V a 24 V.
- La tarjeta de adquisición de datos USB 6008 envía por medio de sus puertos de salida una señal digital de voltaje de 0V y 5 V.
- El software desarrollado realiza la adquisición de señales análogas de voltaje por medio de la tarjeta USB 6008.
- La frecuencia máxima con la que trabaja el sistema es de 15 Hz y su frecuencia mínima es de 1 Hz según sea el control del tiempo de ciclo de la señal PWM.
- El software desarrollado en Labview 7.1 permite la visualización y manipulación del sistema haciendo que el estudiante realice el control de la velocidad del motor de la Unidad Mecánica 33-100 Feedback.
- A medida que aumenta el ciclo de trabajo de la señal PWM, aumenta de manera casi proporcional su velocidad; cuando se decrementa el ciclo de trabajo, de la misma manera disminuye de forma casi proporcional su velocidad.
- El sistema de servomecanismo digital: PWM y Amplificador Diferencial tiene un comportamiento que tiende a ser lineal.



## **7. CONCLUSIONES**

Se desarrolló la Modulación por Ancho de Pulsos(PWM), con la cual se realizó el control de la velocidad del motor DC de la Unidad Mecánica DC por medio del software especializado Labview 7.1; cuando la señal del ciclo de trabajo aplicado al motor cambia, también lo hace la velocidad a la que gira dicho motor.

El Amplificador Diferencial construido realiza dentro de su configuración, la amplificación de la señal recibida y el control del sentido de giro del motor de la Unidad Mecánica Feedback 33-100.

El servomecanismo digital desarrollado permite al estudiante comprender de una manera más didáctica y comprensiva el control de la velocidad de un motor por medio de la Modulación por Anchura de Pulsos, ya que éste puede manipular diferentes variables analizando consigo los respectivos cambios en el sistema.

Se desarrolló la guía del laboratorio para controlar la velocidad del motor de la tarjeta FEEDBACK con el PWM desarrollado en el Proyecto.

Con este proyecto se logró implementar un sistema que reúne muchas de las áreas de trabajo de la electrónica, como lo es: el control, el tratamiento de señales y la electrónica de potencia.

## BIBLIOGRAFÍA

ARBELO L. Jean Pier/ LÓPEZ B, Félix Fabián. Adquisición de datos usb en tarjeta digital Feedback 33-120. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Seccional Bucaramanga. 2007.

BARRIOS URUEÑA, Edgar. Guías de Laboratorio de Control Digital. Bucaramanga. 2005.

COUGHLIN, Robert F./DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales. 5a Edición. Prentice Hall. México, 1999.

FLÓREZ M. Alexander/QUIJANO O. Manuel G. Módulo didáctico para el control de velocidad de un motor eléctrico de corriente continua. Trabajo de grado. (Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación). Unidades Tecnológicas de Santander. 2007.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 2da Edición. Prentice Hall. 1980.

RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia. 3ª Edición. Pearson Educación. México, 2004.

SEDRA, Adel S. /SMITH, Kenneth C. Circuitos Microelectrónicos. 4ª Edición. Oxford. México, 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <http://www.ni.com>

Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <http://sivirtual.upbbga.edu.co>

<http://www.ni.com>

<http://www.datasheetcatalog.com>

## ANEXOS

### ANEXO A. DESCRIPCIÓN PRÁCTICA DE LABORATORIO

#### EXPERIENCIA 1

#### PRACTICA 1. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSOS

##### 1. OBJETIVO

Analizar la relación señal/espacio de la modulación por ancho de pulso (PWM), la cual es suministrada por la tarjeta USB 6008 de la National Instruments.

##### 2. TEORÍA

###### MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO

Los motores DC se usan en sistemas de control porque la velocidad y la dirección se controlan con la magnitud y la dirección del voltaje aplicado. Como la señal del controlador es de baja potencia se necesita un amplificador de potencia para mover el motor.

El amplificador debe ser lineal, esto es, su salida proporcional a la entrada; esto genera algunos problemas de diseño y de refrigeración. Un método alterno reemplaza el amplificador con un circuito que conmuta rápidamente la dirección de la potencia entregada al motor. La relación de potencia entregada en el sentido de giro y hacia atrás puede variarse. Con conmutación rápida el motor responde a la potencia promedio entregada.

La señal aplicada al motor es una onda cuadrada en la que la relación señal/duración se varía mientras que la frecuencia se mantiene constante. Este método se llama Modulación por Ancho de Pulso (PWM). La ventaja principal consiste en que, particularmente a potencias elevadas, los circuitos de conmutación son más fáciles de diseñar que los lineales y tienen menos disipación de calor<sup>7</sup>.

##### 3. EQUIPO EMPLEADO

- Computador personal
- Labview 7.1 de la National Instruments

---

<sup>7</sup> BARRIOS URUEÑA, Edgar. Guías de Laboratorio de Control Digital. Bucaramanga. 2005.

- Tarjeta de adquisición de datos USB 6008 de la National Instruments
- Osciloscopio digital

#### 4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El experimento trabaja con un modulador de ancho de pulso. Una señal digital PWM se aplica tarjeta de adquisición de datos USB 6008, la cual a través de programación genera una señal digital por uno de sus puertos. Se ve en el osciloscopio que la relación señal/espacio de onda es proporcional a la señal de entrada.

Figura 1. Diagrama de Bloques de la Practica 1



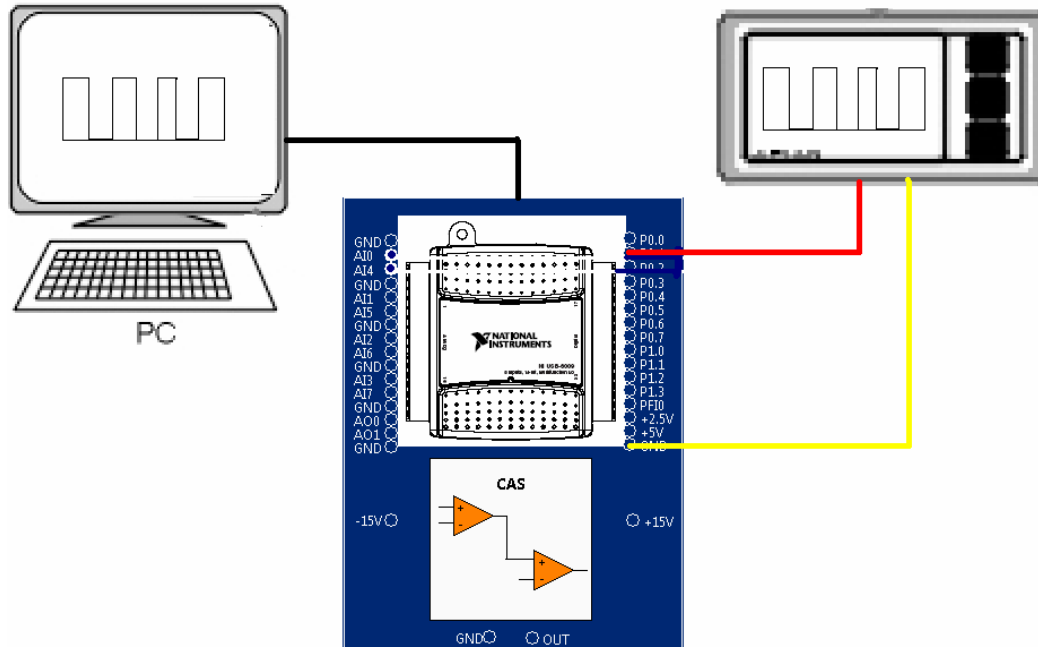
Fuente: Autor del proyecto.

#### 5. PROCEDIMIENTO

1. Conectar la tarjeta USB 6008 al computador personal.
2. Escoger uno de los dos puertos de salida análoga de la tarjeta USB 6008 dentro del software de control de velocidad PWM Labview 7.1.
3. Conectar el osciloscopio digital a los puertos de salida de la tarjeta USB 6008.
4. Dentro del software desarrollado en Labview 7.1 manipular las variables de tiempo de ciclo en PWM, el ciclo duty, como se muestra en la figura 1.
5. Analizar los diferentes cambios de señal/espacio que son proporcionales a la señal de entrada.

## 6. DIAGRAMA DE CONEXIONES

Figura 2. Diagrama de conexiones Practica 1



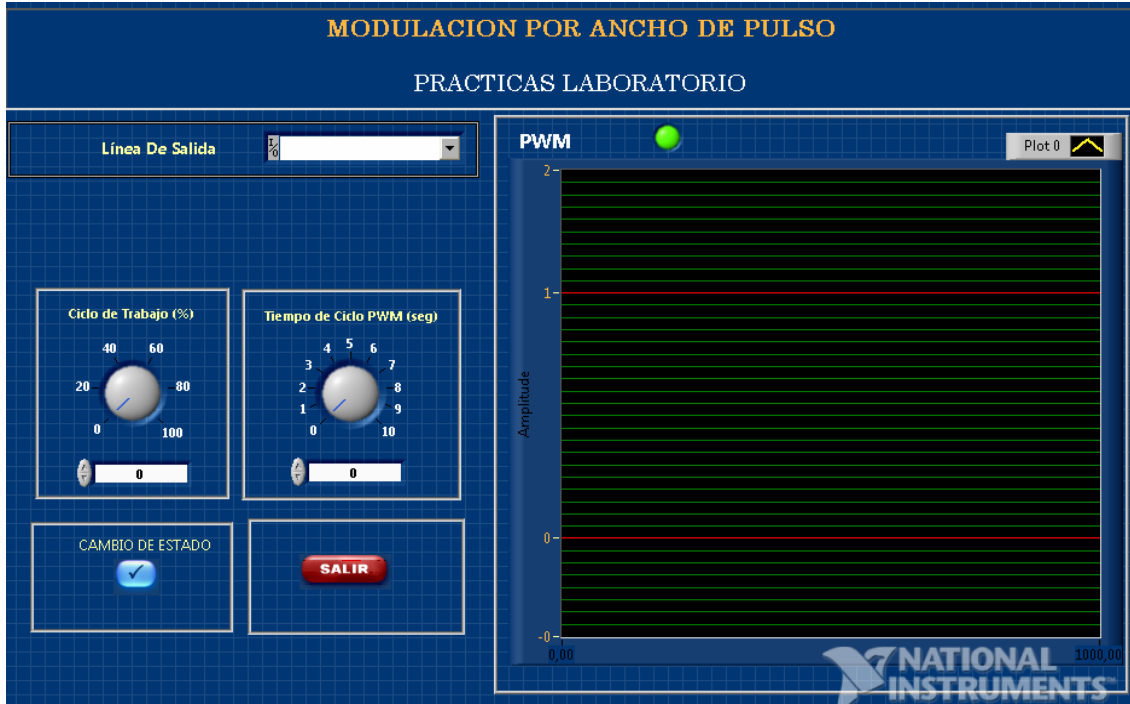
Fuente: Autor del proyecto.

## 7. PREGUNTAS

1. Explicar brevemente cuál es Modulación de Ancho de Pulso. Porqué y cómo se usa en motores CC?
2. Qué significa mark space ratio de una señal? Como mark space ratio de la señal del PWM cambia con la amplitud de la señal de entrada?
- 3.Cuál es el efecto de variar el tiempo de ciclo de la señal de entrada en la señal del PWM?

## 8. PANEL FRONTAL

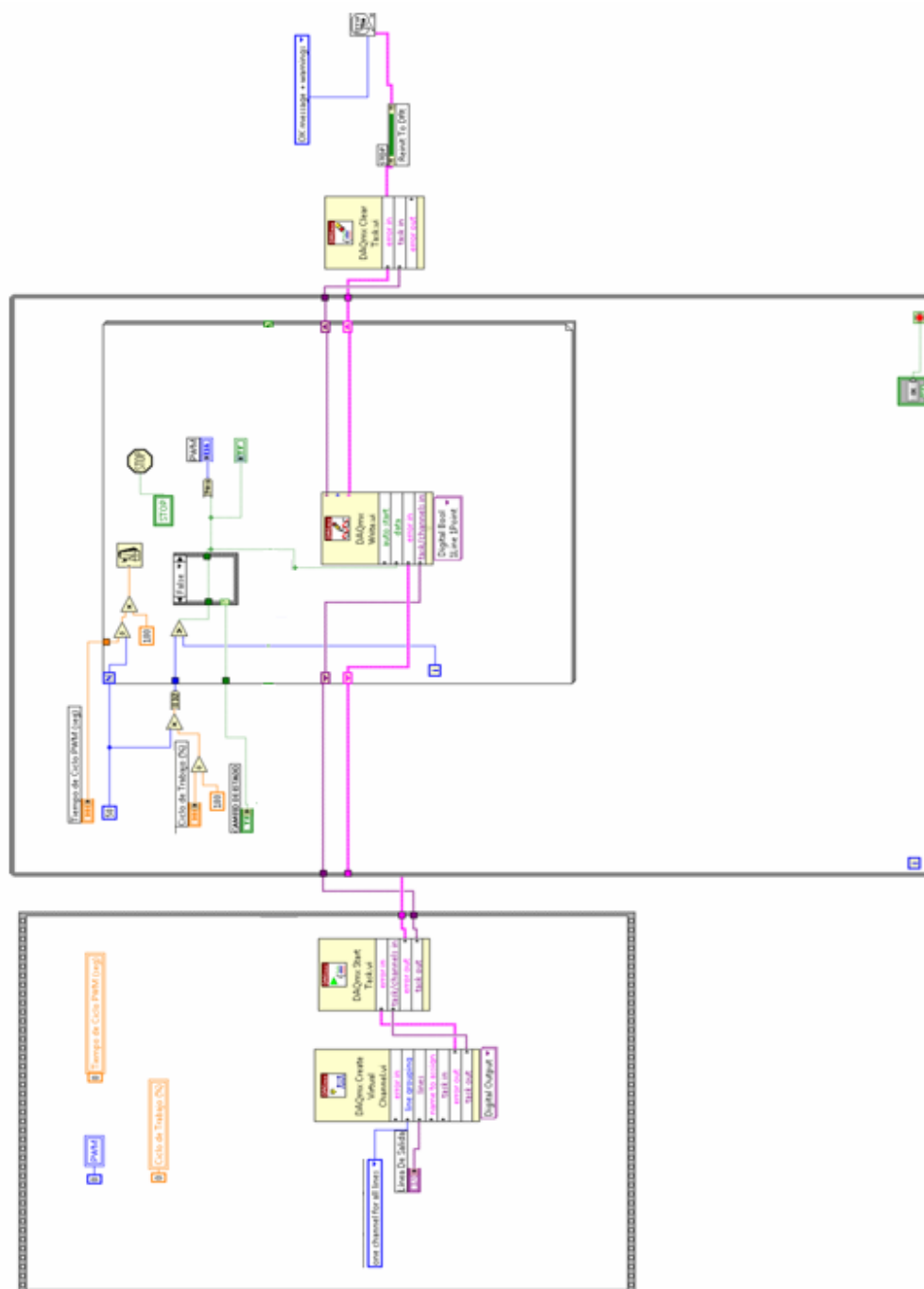
Figura 3. Visualización de señal/espacio PWM



Fuente: Autor del proyecto

## 9. DIAGRAMA DE BLOQUES

Figura 4. Diagrama de bloques PWM



Fuente: Autor del proyecto

## **PRACTICA 2. CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR CD POR MEDIO DE LA MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSOS (PWM)**

### **1. OBJETIVO**

Analizar el control de velocidad del motor de la Unidad Mecánica 33-100 Feedback mediante la modulación por anchura de pulsos PWM.

### **2. TEORÍA**

#### TACÓMETROS

El sistema de control usa varios tipos de sensores; los más usados son los de posición, velocidad y aceleración.

Un dispositivo muy usado para medir la velocidad de un motor es el tacómetro, que es un generador de voltaje. En la unidad mecánica el tacómetro es un generador de imán permanente que usa la propiedad de producir una fem proporcional a la velocidad del eje. La polaridad del voltaje de salida del tacómetro cambia cuando se cambia el sentido de giro

Un tacómetro ideal (llamado generalmente tacogenerador) produce una salida dependiente sólo de la velocidad, pero en la práctica hay un rizado ac superpuesto. Este fenómeno indeseable puede reducirse con diseños especiales.

En un sistema de control el rizado puede amplificarse tanto que puede causar deterioro del comportamiento y puede necesitarse un filtro para removerlo. El filtro puede causar problemas adicionales introduciendo retardos en la respuesta.

#### FRICCIÓN ESTÁTICA

Un motor ideal girará lentamente al aplicarle un voltaje pequeño. En la práctica hay una fricción constante debida a las escobillas que impiden que el motor gire con voltajes pequeños. Este efecto puede reducirse con motores diseñados especialmente.

Si el voltaje aplicado se incrementa lentamente, el motor permanece estacionario por causa de la fricción y gira bruscamente a una velocidad significativa cuando el par de giro sobrepasa el de fricción producida por las escobillas. Este fenómeno se llama "stiction" y deteriora la precisión del control del sistema. Esto puede reducirse usando PWM, o, usando un amplificador de respuesta no lineal para bajos voltajes<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> BARRIOS URUEÑA, Edgar. Guías de Laboratorio de Control Digital. Bucaramanga. 2005.



### 3. EQUIPO EMPLEADO

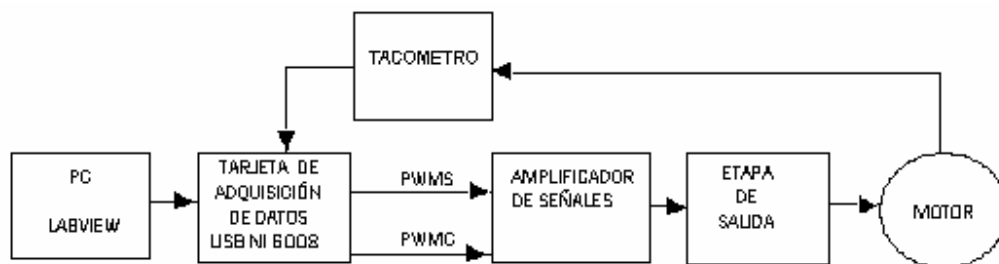
- Computador personal
- Tarjeta de adquisición de datos USB 6008 de la National Instruments
- Amplificador Diferencial
- Motor Crouzet de la Unidad Mecánica 33-100 Feedback
- Tarjeta digital 33-120 Feedback
- Osciloscopio digital
- Labview 7.1 de la National Instruments

### 4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Esta práctica investiga el comportamiento del motor a diversos niveles de entrada. Un punto de especial interés es aquel en que el motor arranca cuando el voltaje se incrementa lentamente desde cero, esto es, cuando el nivel de entrada al motor sobrepasa la fricción estática.

El tacómetro es conectado a la entrada del puerto análogo de la tarjeta de adquisición de datos USB 6008, permitiendo graficar el punto en el que el motor arranca. El punto en el que el motor arranca es más alto si el amplificador de potencia no tiene comportamiento no lineal a voltajes bajos.

Figura 6. Diagrama de Bloques de la Practica 2



Fuente: Autor del proyecto

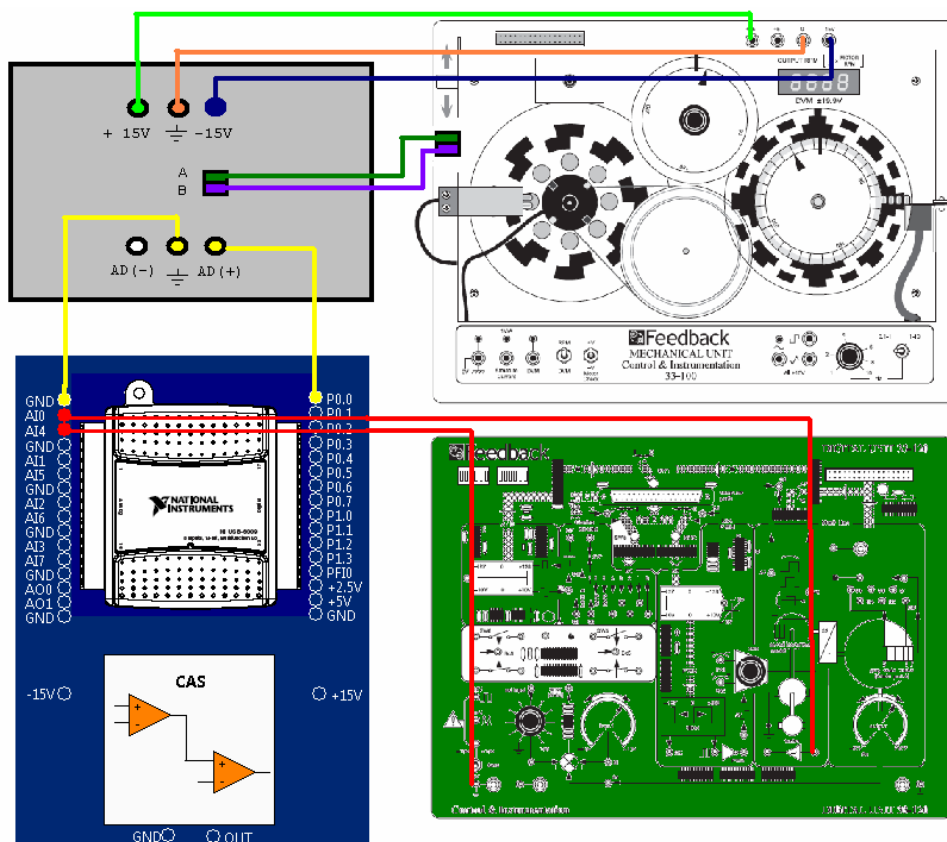
### 5. PROCEDIMIENTO

1. Conectar la tarjeta USB 6008 al computador personal.
2. Escoger uno de los dos puertos de salida análoga de la tarjeta USB 6008 dentro del software de control de velocidad PWM Labview 7.1.
3. Escoger uno de los dos puertos de entrada análoga de la tarjeta USB 6008 dentro del software de control de velocidad PWM Labview 7.1
4. Conectar la señal de salida digital de la tarjeta USB 6008 a uno de los dos puertos de entrada del amplificador diferencial.

5. Conectar el amplificador diferencial de potencia al motor de la Unidad Mecánica 33-100 Feedback.
6. Dentro del software desarrollado en Labview 7.1 manipular las variables de tiempo de ciclo en PWM y el ciclo duty, como se muestra en la figura 2.
7. Analizar los diferentes cambios de velocidad que se generan en el motor al manipular las variables de control.

## 6. DIAGRAMA DE CONEXIONES

Figura 7. Diagrama de conexiones Practica 2



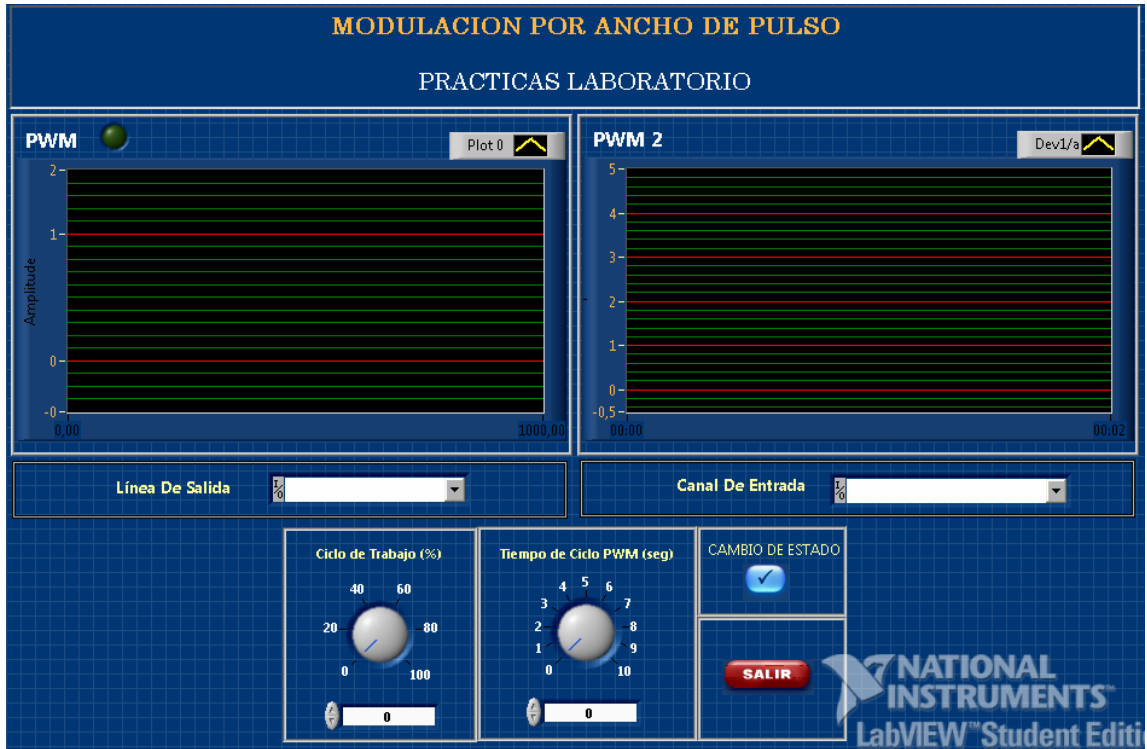
Fuente: Autor del proyecto

## 7. PREGUNTAS

1. Que es fricción estática (stiction) de un motor y qué la causa?
1. Para entender mejor la operación de este circuito, mirar en el osciloscopio las formas de onda de la entrada PWM.

## 8. PANEL FRONTAL

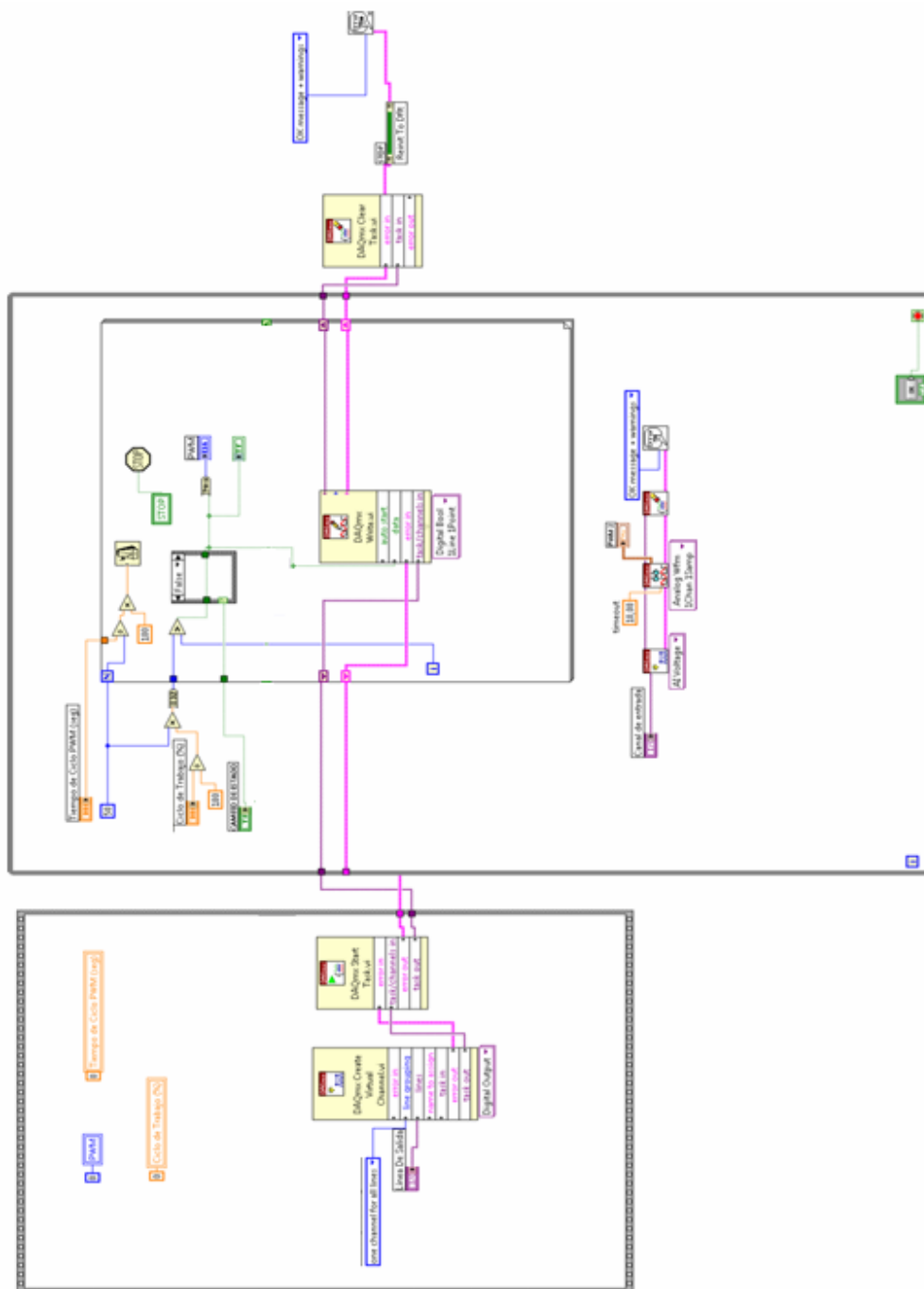
Figura 8. Control de velocidad de un motor mediante la técnica PWM



Fuente: Autor del proyecto

## 9. DIAGRAMA DE BLOQUES

Figura 6. Diagrama de Bloques de la practica 1



Fuente: Autor del proyecto

## ANEXO B. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR CROUZET DE LA UNIDAD MECÁNICA 33-100 FEEDBACK

Teoría tomada de: FLÓREZ M. Alexander/QUIJANO O. Manuel G. Módulo didáctico para el control de velocidad de un motor eléctrico de corriente continua. Trabajo de grado. (Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación). Unidades Tecnológicas de Santander. 2007.

### Determinación de la constante contraelectromotriz ( $K_e$ ) para el motor CD imán permanente.

Se ajusta el voltaje de entrada al voltaje mínimo, aplicado directamente a la armadura del motor, gradualmente se aumenta el valor del voltaje hasta llegar al voltaje máximo, se grafica el voltaje contra la velocidad la pendiente da el valor de la constante contraelectromotriz.

$$E_b = V = \text{Fuerza contraelectromotriz (Voltios)}$$

$$w = \text{Velocidad (rad/seg)}$$

$$(K_e) \left( \frac{V}{\text{rad} - s} \right) = \frac{E_b}{w} = \frac{V}{w} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$m = \frac{5 - 3.82}{5.1627 - 3.9584} = 0.9798$$

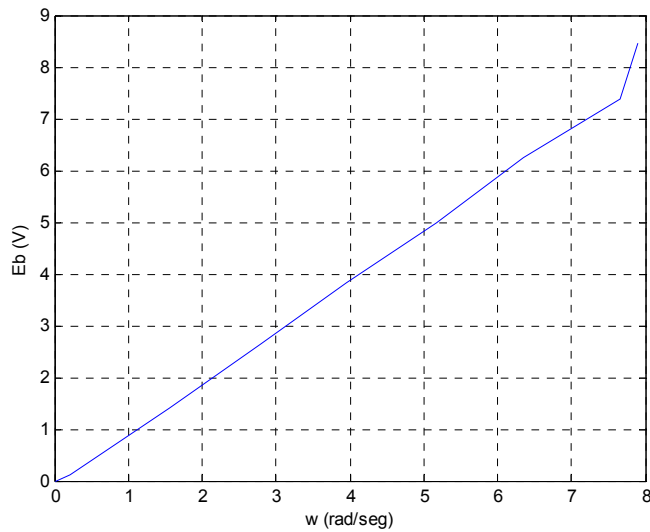
$$(K_e) = 0.9798 \left( \frac{V}{\text{rad} - s} \right)$$

Cuadro 1. Relación de voltaje vs velocidad del motor cd.

$E_b$ (V)	$w$ (rad/seg)	RPM
0	0	0
0.13	0.2094	2.00
1.42	1.5603	14.9
2.65	2.7855	26.6
3.82	3.9584	37.8
5.00	5.1627	49.3
6.26	6.3565	60.7
7.38	7.6655	73.2
8.47	7.8958	75.4
9.74	7.8958	75.4
10.08	7.8958	75.4

Fuente: Autor del proyecto

Figura 1. Determinación de la constante contraelectromotriz ( $K_e$ ).



Fuente: Autor del proyecto.

### Determinación de la constante de tiempo mecánica ( $\zeta_m$ )

Se ajusta el voltaje de la fuente al valor máximo, de manera que se aplique un voltaje tipo escalón a la armadura del motor, el osciloscopio construirá la característica equivalente de velocidad.

Se toma el tiempo requerido para que la señal de salida alcance el 63.2% de su valor final, dicho tiempo corresponderá a la constante de tiempo mecánica ( $\zeta_m$ ).

$$\zeta_m = 450 \text{ ms}$$

### Determinación de la resistencia de armadura ( $R_a$ )

Se ajusta un valor de voltaje mínimo para la alimentación del motor dc, de tal manera que se mida la corriente de armadura justo antes de comenzar el movimiento del eje del motor, con este valor y por medio de un amperímetro podemos obtener la corriente y aplicando la ley de Ohm se calcula la resistencia de armadura ( $R_a$ ). En este instante el voltaje contraelectromotriz  $E_b$  es cero ya que no hay rotación en el eje.

$$I_{arr} = 0.174 \text{ A}$$

$$V = 2.3 \text{ V}$$

$$R_a = \frac{V}{I_{arr}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$R_a = \frac{2.3 \text{ V}}{0.174 \text{ A}} = 13.2 \Omega$$

### **Determinación de la inductancia de armadura (La)**

La inductancia de armadura (La) al igual que la resistencia de armadura se mide en los devanados del motor, utilizando un instrumento que sirve para medir inductancias.

$$L_a = 11.8 \text{ mH}$$

Con el conocimiento previo de la resistencia de armadura (Ra), la inductancia de armadura (La), se calcula la expresión la constante de tiempo eléctrica ( $\zeta_e$ ).

$$L_a = \zeta_e \times R_a \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$\zeta_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{11.8 \text{ mH}}{13.2 \Omega} = 0.8939 \text{ ms}$$

### **Determinación de la constante de torque (Kt)**

Se utiliza la técnica llamada paramétrico dimensional que no recurre a la prueba experimental, pero se reconoce como útil y confiable para los motores DC, se basa en utilizar expresiones que guardan una relación una relación paramétrica dimensional directa entre (Kt) con la constante de voltaje (Ke) y cuya comprobación empírica ha sido sustentada.

Dichas relaciones paramétricas son:

$$K_t (\text{Nm} / \text{A}) = K_e (\text{V} / \text{rad-s})$$

$$K_t = 0.9798 (\text{Nm} / \text{A})$$

### **Obtención del momento de inercia (Jm)**

Se utiliza un método paramétrico ya que apela al conocimiento de los parámetros ya obtenidos o conocidos experimentalmente tales como: resistencia de armadura (Ra),

constante de torque ( $K_t$ ), y constante de voltaje ( $K_e$ ), constante de tiempo mecánica ( $\zeta_m$ ) así por su relación dimensional existente entre ellas se puede calcular el momento de inercia ( $J_m$ ) mediante la expresión:

$$J_m = \frac{(\zeta_m)(K_t)(K_e)}{R_a} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$J_m = \frac{(450 \text{ ms})(0.9798 \text{ Nm/A} \times 0.9798 \text{ V/rad-s})}{13.2 \Omega}$$

$$J_m = 0.03272 \text{ Kg} - \text{m}^2$$

#### **Obtención del torque de fricción y la corriente de arranque ( $I_{arr}$ ) del motor DC**

Se coloca un amperímetro entre los bornes del motor incrementando el valor de la tensión de entrada desde el voltaje mínimo, se observa atentamente el momento en que el eje del Motor inicia su movimiento, en este instante se toma la lectura del amperímetro, al reemplazar en la ecuación se tiene:

$$T_f = K_t \times I_{arr} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$T_f = (0.9798 \text{ Nm/A})(0.174 \text{ A}) = 0.17 \text{ Nm}$$

#### **Determinación de la constante de fricción de Coulomb (B)**

La constante B se determina cuando el sistema se encuentra en estado estable, es decir, el motor alcanza una velocidad constante, en este instante se tiene que para una velocidad constante la derivada es la aceleración, para este caso es cero, entonces, aplicando la fórmula para el torque mecánico se obtiene:

$$w = \text{Velocidad}$$

.

$$w = \text{Aceleración}$$



$T_m = \text{Torque mecánico}$

$B = \text{Constante de fricción de Coulomb}$

$$T_m = K_t \times I_a = J\dot{\omega} + B\omega + T_f \quad \text{Ecuación (6)}$$

Para estado estable  $\dot{\omega} = 0$

$$T_m = K_t \times I_a = B\omega + T_f \quad \text{Ecuación (7)}$$

Se dibuja la gráfica para el torque mecánico contra la velocidad y utilizando el método de regresión lineal se determine la ecuación de la recta, la pendiente de esta gráfica dará el valor de la constante de fricción B.

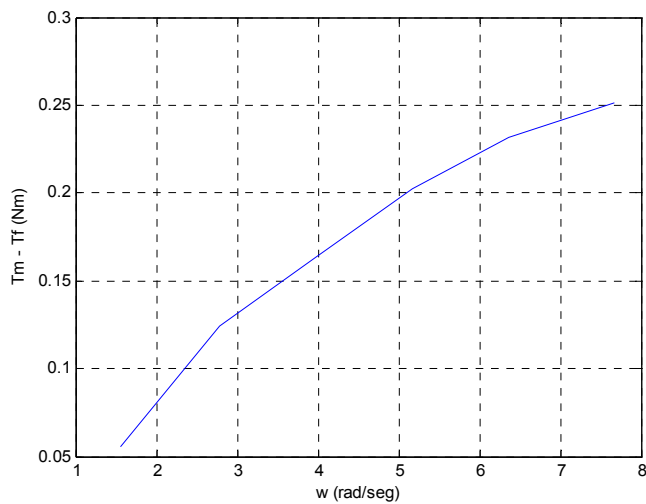
Cuadro 2. Relación entre Torque de fricción ( $T_f$ ), Torque motor ( $T_m$ ) y Velocidad ( $\omega$ )

Corriente (A)       $T_m = K_t \times I_a$        $T_m - T_f = B \times \omega$        $\omega$  (rad/seg)

0.23	0.2253	0.0553	1.5603
0.30	0.2939	0.1239	2.7855
0.34	0.3331	0.1631	3.9584
0.38	0.3723	0.2023	5.1627
0.41	0.4017	0.2317	6.3565
0.43	0.4213	0.2513	7.6655
0.43	0.4213	0.2513	7.8958
0.43	0.4213	0.2513	7.8958
0.43	0.4213	0.2513	7.8958

Fuente: Autor del proyecto

Figura 2. Relación entre Torque de fricción (Tf) y el Torque motor (Tm) vs Velocidad ( $\omega$ )



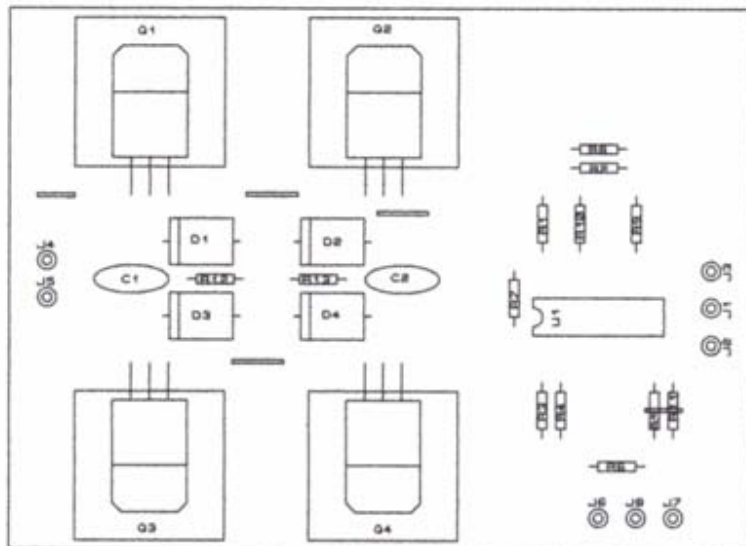
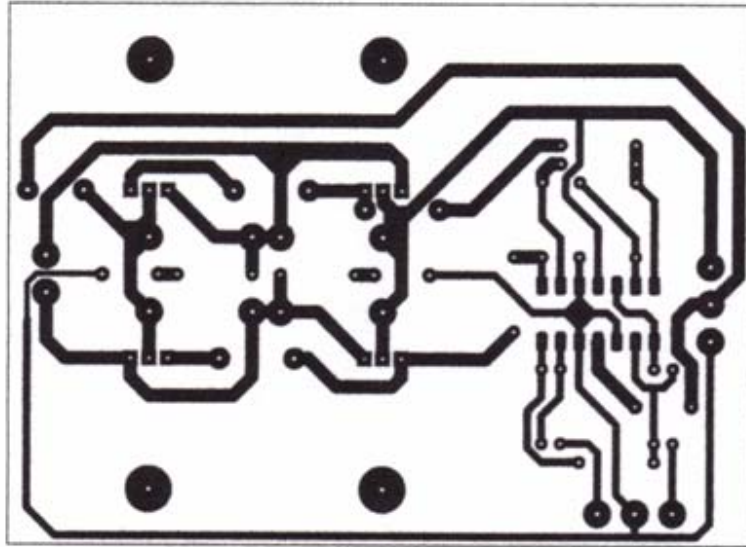
Fuente: Autor del proyecto

$$m = \frac{0.2023 - 0.1631}{5.1627 - 3.9584} = 0.03255$$

$$B = 0.03255 \text{ Nm.s}$$

## **ANEXO C. DISEÑO PCB**

Figura 1. Diseño PCB



Fuente: Autor del proyecto.

## ANEXO D. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS USB NI 6008

Tomado de: ARBELO L. Jean Pier/ LÓPEZ B, Félix Fabián. Adquisición de datos usb en tarjeta digital Feedback 33-120. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Seccional Bucaramanga. 2007.

### Introducción

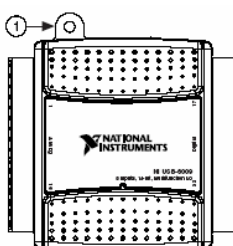
La NI USB-6008/6009 tiene ocho canales de entradas analógicas (AI), dos canales de salidas analógicas (AO), 12 canales de entrada/salida (DIO) y un contador de 32-bit con interfase USB de total velocidad.

Cuadro 1 . Diferencias entre la USB 6008 y 6009

Característica	USB 6008	USB 6009
Resolución AI	12 bits diferencial 11 bits terminal simple	14 bits diferencial 13 bits terminal simple
Maximo muestreo AI Un solo canal	10 Kmuestras/s	48 Kmuestras/s
Maximo muestreo AI Varios canales	10 Kmuestras/s	42 Kmuestras/s
Configuración DIO	Colector abierto	Colector abierto O impulso activo

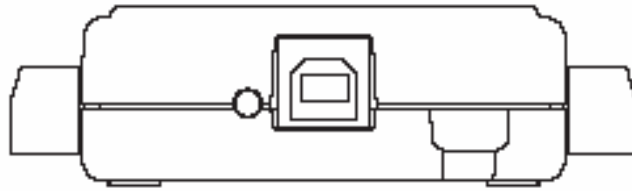
Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

Figura 1. Tarjeta USB 6008 y 6009



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <http://www.ni.com>

Figura 2 . Tarjeta USB 6008 y 6009 vista posterior



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

### **Guías de Seguridad**

Operar el hardware sólo como se describe en estas instrucciones: No sustituya partes ni modifique el aparato excepto como se describe. Aislar las señales de los máximos voltajes nominales. No exceder el rango máximo. No alambrear cuando el aparato tiene señales eléctricas. No remover o adicionar conectores cuando el aparato esté energizado. Evitar el contacto del cuerpo con los conectores. Remover la energía de las señales antes de conectarlas.

### **El Software**

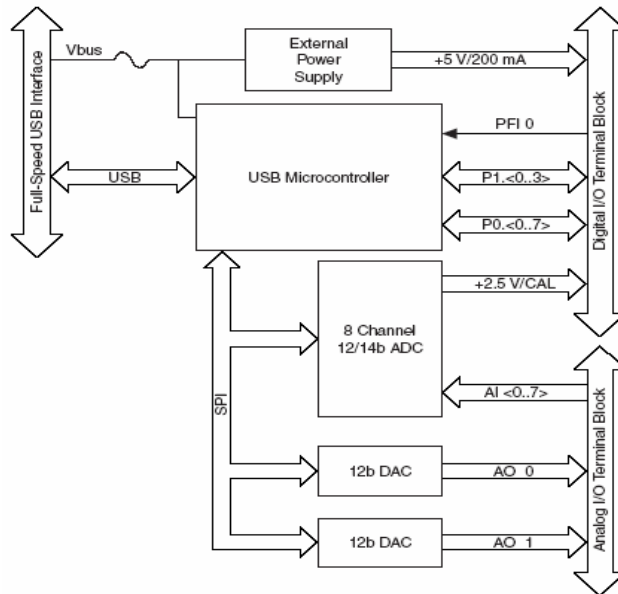
El software que soporta USB-6008 para Windows 2000/XP es NI-DAQmx.

NI-DAQmx CD tiene ejemplos que se pueden usar para iniciar la programación con la USB-6008.

### **El Hardware**

El siguiente diagrama de bloques muestra los componentes claves funcionales de la tarjeta USB 6008 y 6009.

Figura 3 . Diagrama de Bloques del Dispositivo



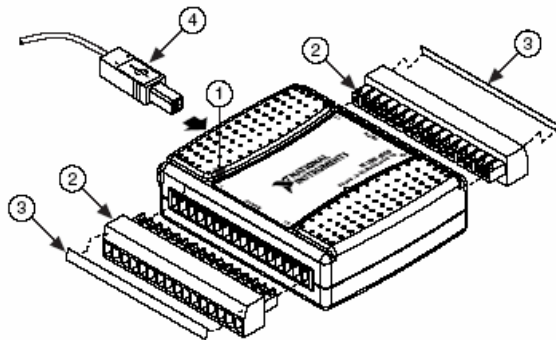
Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

### Instalación del Hardware

Se deben completar los siguientes pasos para instalar el hardware:

- Instale los terminales de tornillo.
- El cuadro 2 y la figura 4 dan la orientación para etiquetar las señales de los bloques de terminales.
- Conecte los terminales apropiados.

Figura 4. Diagrama de Aplicación de etiquetamiento de las señales



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

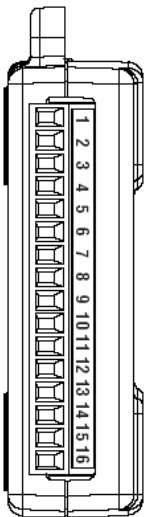
En la figura 4.

1. Sello con orientación de pines
2. Conector
3. Sello de Señales
4. Cable USB

### Conectores de Entrada y Salida

Hay un bloque de terminales para señales análogas y otro para señales digitales. Los bloques de terminales permiten 16 conexiones para usarlos con alambre 16 AWG a 28 AWG. El cuadro 2 lista la ubicación de terminales análogos y el cuadro 3 lista la de terminales digitales.

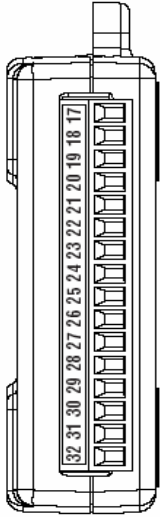
Cuadro 2. Asignaciones de Terminales Análogos

Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>



Cuadro 3. Asignaciones de Terminales Digitales

Module	Terminal	Signal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PFI 0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

### Descripción de señales

El cuadro 4 describe la disposición de conectores de entrada y salida.

Cuadro 4. Descripción de las señales de la tarjeta

Tipo de señal	Referencia	Dirección	Descripción
GND	---	---	Ground – es el punto de referencia para las mediciones analógicas en terminal simple, punto de retorno de la corriente de bias para mediciones diferenciales y referencia para señales AO, digitales I/O, fuente de +5 vdc y 2,5 vdc.
AI <0...7>	Varios	Entrada	Canales de entrada analógica 0 a 7 – para mediciones en terminal simple, cada señal es un canal de entrada de voltaje analógico. Para mediciones diferenciales. AI0 y AI4 son las entradas positiva y negativa de la medición diferencial del canal 0. Los siguientes pares de señales también forman parte de los canales de

			entrada diferencial. <AI 1, AI 5>, <AI 2, AI 6>, y <AI 3, AI 7>.
AO0	GND	Salida	Canal 0 de salida analoga – entrega un voltaje de salida por el canal AO0.
AO1	GND	Salida	Canal 1 de salida analoga – entrega un voltaje de salida por el canal AO1.
P1 <0...3> P0 <0...7>	GND	Entrada Salida	Señales digitales de entrada y salida – se puede configurar individualmente cada una de las señales como entrada o salida.
+2.5 V	GND	Salida	+ 2,5 v referencia externa – Suministra una referencia para una prueba wrap back
+5 V	GND	Salida	+ 5 v fuente de poder – suministra + 5 v a 200 mA
PFI 0	GND	Entrada	PFI0 – este pin es configurable como un disparo digital o una entrada de contador de eventos o para los dos.

Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

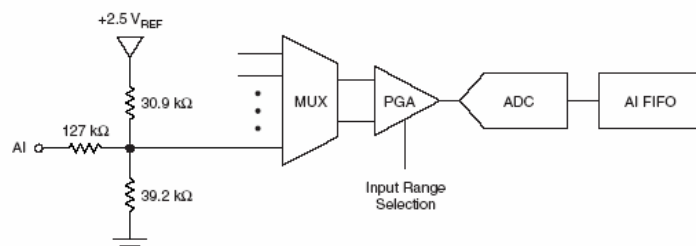
## Entrada Análoga

Se puede conectar entradas análogas a la USB 6008 a través del conector I/O. (ver cuadro 4).

## Circuito de entrada análoga

La figura 5 muestra la circuitería de entradas analogas a la USB 6008.

Figura 5. Circuitería de entrada análoga



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

Los elementos que componen este circuito son:

- **MUX:** El multiplexor enruta un canal AI a la PGA.

- **PGA:** Provee ganancia de las entradas 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, o 20 cuando se configuran para medición diferencial y ganancia 1 cuando se configuran para entrada punto flotante. La ganancia del PGA es automáticamente calculada según el rango de voltaje seleccionado en la aplicación.
- **A/D Converter:** El convertidor (ADC) digitaliza la señal AI para convertir el voltaje análogo en un código digital.
- **AI FIFO:** Puede hacerse conversiones sencillas y múltiples A/D de número finito o infinito de muestras. Un búfer (FIFO) mantiene los datos durante la adquisición para que no se pierdan.

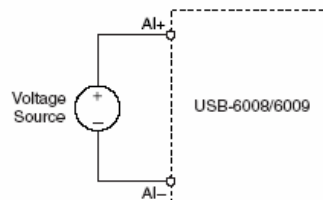
### Modos de Entrada Análoga

Se puede configurar los AI canales para tomar medidas en terminal simple o diferenciales. Ver cuadro 4 para conexiones punto flotantes o diferenciales.

Los tipos de entradas análogas a la tarjeta de adquisición de datos USB 6008 son:

- **Conexión diferencial de señales de voltaje:** para conectar señales diferenciales, conectar el positivo de la señal al terminal AI+ y el negativo al AI-.

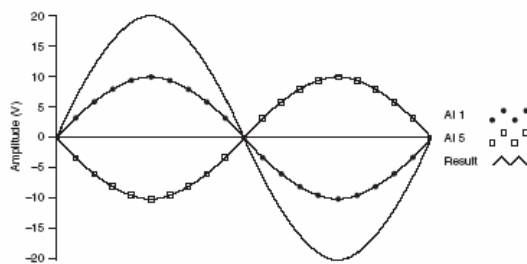
Figura 6. Conexión diferencial de señales de voltaje



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

La entrada diferencial puede medir señales entre  $\pm 20V$ . Sin embargo el máximo voltaje sobre cualquier pin es  $\pm 10 V$  referido a GND. Ejemplo: Si AI1 es  $+10 V$  y AI5 es  $-10 V$ , la medida retornada es  $+20 V$ .

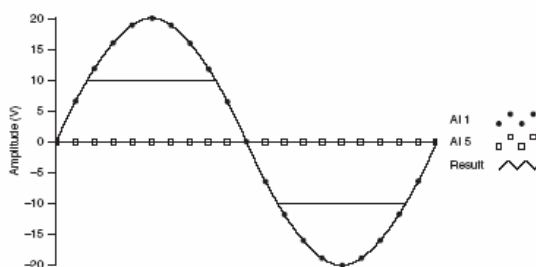
Figura 7. Ejemplo de una medida diferencial de 20 V



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

Conectando una señal mas grande que  $\pm 10V$  en cualquier pin resulta un recorte en la salida.

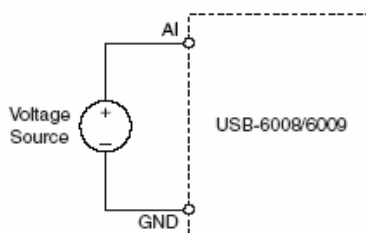
Figura 8. Excediendo + 10v en AI retorna la salida recortada



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

- **Conexión terminal simple de señales de voltaje:** para conectar señales de voltaje en terminal simple (RSE), Conectar el positivo de la señal al terminal AI deseado y la señal de tierra al terminal GND.

Figura 9. Conexión terminal simple de señales de voltaje



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

- **Disparo Digital:** Al definir una tarea se puede configurar PF10 como entrada digital de disparo. Al habilitar el disparo la tarea AI espera un flanco de subida en PF10 para iniciar la adquisición. Para usar ai/Start Trigger como fuente digital especificar PF10 como fuente y seleccionar "rising edge".

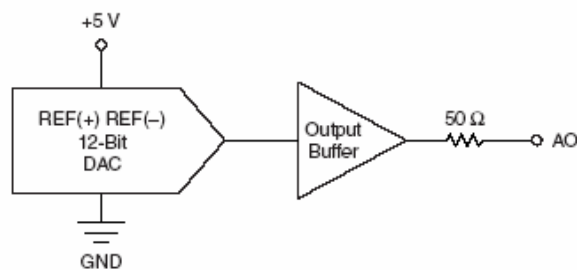
## Salida Analógica

La USB 6008 tiene dos canales AO independientes que pueden generar salidas entre 0 y 5 v. La actualización de las líneas es por software.

### Circuito de salida analógica

La figura 10 muestra la circuitería de salidas analógicas de la USB 6008.

Figura 10. Circuitería de salida analógica



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

- **DACs:** convertidores digital análogo (DACs) convierten códigos digitales en voltajes análogos.
- **Conexión de cargas a las salidas analógicas:** Para conectar cargas a la USB 6008 conectar el positivo de la carga al terminal AO y la tierra al terminal GND.
- **Reducción de interferencias en la señal de salida:** Al generar señales con DAC se puede observar interferencias en la salida. Estas interferencias son normales; cuando el DAQ cambia de un voltaje a otro produce interferencias debido al cambio de cargas. La interferencia más grande ocurre cuando el bit más significativo del código del DAC cambia. Se puede construir un filtro para reducir las interferencias dependiendo de la frecuencia y la naturaleza de la señal de salida.

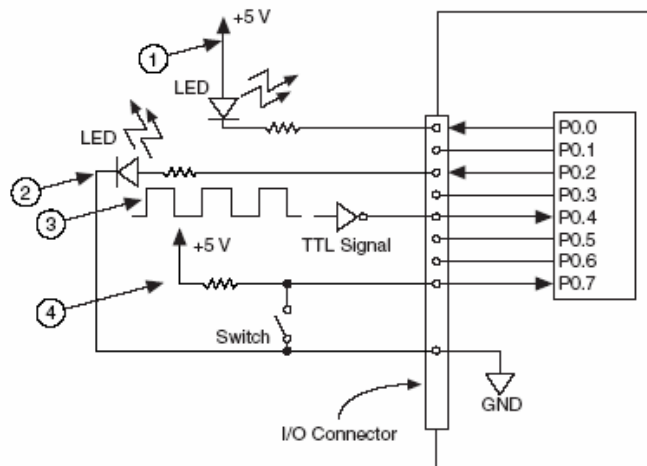
## Salidas y Entradas Digitales

La USB 6008 tiene 12 líneas digitales, P0 a 07 y P1 a 03 que abarcan el puerto DIO. GND es la referencia de tierra para la señal del puerto DIO. Puede programarse individualmente todas las líneas como entradas o salidas.

### Circuito Digital I/O

La figura 11 muestra como ejemplo, P0<0...7> conectados configurados con entradas y salidas digitales. Se puede configurar P1<0...3> similarmente.

Figura 11. Ejemplo de Conexión de una carga



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

En la figura 11.

1. P0.0 configurado como salida digital en colector abierto encendiendo un Led.
2. P0.2 configurado como salida digital activa encendiendo un Led.
3. P0.4 configurado como una entrada digital recibiendo una señal TTL de un inversor.
4. P0.7 configurado como una entrada digital recibiendo una señal 0 a 5v desde un interruptor.

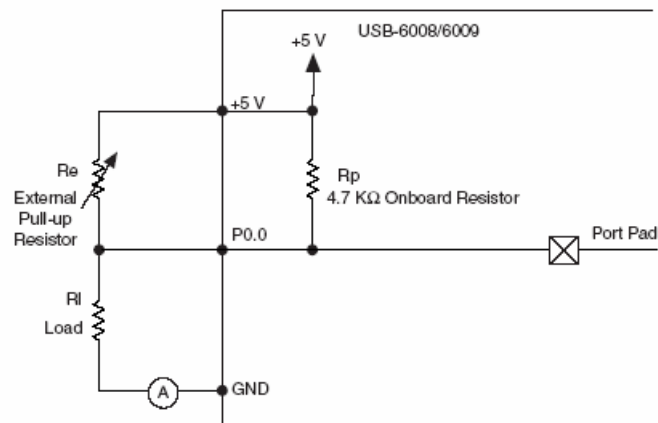
Exceder EL máximo voltaje nominal de entrada o máximo nominal de salida dados en las especificaciones puede dañar el aparato DAQ y el computador.

## Información de la fuente

La configuración por defecto de los puertos es de colector abierto, permitiendo la operación de 5 V, con una resistencia de 4.7 k $\Omega$ .

Una resistencia externa puede agregarse para incrementar la corriente entregada por la fuente hasta el límite de 8.5 mA por línea como muestra la figura 12. Los puertos también pueden configurarse como “active drive” usando DAQmx API permitiendo operar 3.3 V con un límite de corriente de la fuente de  $\pm 8.5$  mA.

Figura 12. Ejemplo de Conexión de una resistencia externa



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Hoja de Datos USB-6008 y USB-6009. pdf. 2005. Disponible en <<http://www.ni.com>>

Completar los siguientes pasos para determinar el valor del “user-provided pull-up resistor”:

1. Poner un amperímetro en serie con la carga.
2. Poner una resistencia variable entre la línea digital de salida y los +5 V.
3. Ajustar la resistencia variable hasta que el amperímetro indique la intensidad. La corriente intentada debe ser menos de 8.5 mA.
4. Retire el amperímetro y la resistencia resistor.
5. Mida la resistencia variable Ese es el valor ideal del “pull-up resistor”.
6. Seleccione un valor de resistencia para el “pull-up resistor” que sea mayor o igual a la ideal.
7. Reconecte el circuito de carga y el “pull-up resistor”.

## **Proteccion de entradas y salidas**

Para proteger la USB-6008 contra condiciones de sobre voltaje, bajo voltaje y sobre corriente o contra eventos de ESD use las siguientes directrices:

- Si se configura una línea DIO como salida no conectarla a fuente externa, señal a tierra o fuente de potencia.
- Si se configura una línea DIO como salida verificar que la corriente de carga conectada no excede los límites de corriente del aparato DAQ.
- National Instruments tiene varias soluciones de acondicionamiento de señales para aplicaciones digitales que requieren alta corriente.
- Si configura una línea DIO como entrada no alimentar la línea con voltajes fuera del rango normal de operación. Las líneas DIO tienen un rango de operación mas bajo que las señales AI.
- Tratar el dispositivo como sensible a la estática, Conectar a tierra apropiadamente el operador y el equipo cuando manipula o conecta el aparato DAQ.

## **Estados de Encendido**

En el inicio o reinicio del sistema todas las líneas DIO se ponen a alta impedancia de entrada, el dispositivo DAQ no conduce la señal alta o baja y cada línea tiene una "pull-up resistor" conectada.

## **Estatica de las Entradas y Salidas digitales**

Cualquier línea DIO de la USB-6008 puede usarse como línea estática DI o DO. Se puede usar líneas estáticas DIO para monitorear o controlar señales digitales. Las muestras de líneas DI estáticas y actualizaciones de líneas DO son por software.

## **Contador de Eventos**

Se puede configurar PF10 como una fuente para un contador inversor de flancos. En este modo de flancos de bajada, los eventos son contados por un contador de 32 bits.

## **Fuente de Poder y de Referencia**

La USB-6008 crea una referencia externa y suministra una fuente de potencia. Mientras el dispositivo está en reposo la salida está deshabilitada.



### **Referencia Externa de 2.5 V**

La USB-6008 crea una fuente de voltaje de referencia de alta pureza para el ADC usando un circuito regulador multi-estado, amplificador y filtro. El voltaje de referencia de +2.5 V resultante puede usarse como señal de auto prueba.

### **Fuente de Poder de +5 V**

La USB-6008 tiene una salida de 5 V, 200 mA. Esta fuente puede usarse para energizar componentes externos.

## ANEXO E. FUNCIONES PARA MANEJO DE LA TARJETA USB DENTRO DE LABVIEW

Tomado de: ARBELO L. Jean Pier/ LÓPEZ B, Félix Fabián. Adquisición de datos usb en tarjeta digital Feedback 33-120. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. 2007.

### Adquisición de señales digitales

Dentro de la librería del DAQmx existe un asistente llamado DAQ assistant que permite configurar el tipo de tarea que se desea realizar con la tarjeta USB, puede ser cualquier tipo de adquisición o generación. Con este asistente se realizaron las adquisiciones digitales para el proyecto.

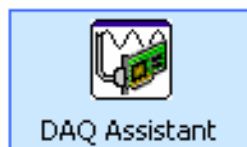
### Asistente DAQ

Crea, edita y controla las tareas usando NI-DAQmx. Cuando este VI Express es puesto en el diagrama de bloques el DAQ assistant crea una nueva tarea, después el programador puede editar la tarea tanto para adquisición como para generación.

Usando el VI Express DAQ assistant se crea una tarea accesible solamente al VI Express. Para hacer la tarea globalmente accesible desde cualquier aplicación, se debe convertir el VI Express a una tarea NI-DAQmx guardada en MAX.

Para una entrada o salida continua de un solo punto, el VI Express DAQ assistant no puede suministrar un funcionamiento óptimo.

Figura 1. Asistente DAQ



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <<http://sivirtual.upbbga.edu.co>>

Las entradas que contiene el asistente DAQ son:

- **Dato:** contiene muestras para escribir a la tarea. Los datos son una salida para tareas de medición y una entrada para tareas de salida análogas y digitales. Los datos no aparecen para tareas de contadores de salida.

- **Error de entrada:** describe las condiciones de error que ocurren antes de este VI Express inicie.
- **Número de muestras:** especifica el número de muestras para adquirir o generar. Esta entrada no aparece para algunos tipos de canal y muestreo.
- **Rata:** especifica la rata para adquirir o generar muestras. Esta entrada no aparece para algunos tipos de canal y muestreo.
- **Parar:** especifica la parada de la tarea y libera los recursos del dispositivo cuando este VI Express completa la ejecución.

Las salidas que contiene el asistente DAQ son:

- **Dato:** contiene muestras para leer de la tarea. Los datos son una salida para tareas de medición y una entrada para tareas de salida análogas y digitales. Los datos no aparecen para tareas de contadores de salida.
- **Error de salida:** contiene la información del error. Si el error de entrada indica que un error ocurrió antes de que el VI inicie, el error de salida contiene la misma información del error.
- **Parada:** indica si la tarea se paró. La tarea se para si la entrada de parada es puesta en alto o si un error ocurre. Esta salida aparece para tareas continuas.
- **Tarea de salida:** Contiene una referencia a la tarea después de que este VI completa la ejecución. Se puede unir esta salida a otros VIs NI-DAQMX para realizar otras operaciones con esta tarea.

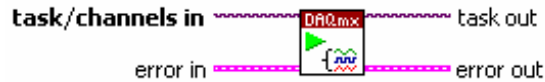
### **Funciones adicionales**

Además de las funciones principales de generación y adquisición, se utilizaron funciones indispensables para el correcto funcionamiento del proyecto.

### **Iniciar tarea DAQmx**

Transiciones de la tarea en el estado de inicio para comenzar la medición o generación. Requieren la utilización este VI para algunos usos y es opcional para otros. Si no se usa este VI, una tarea de medida comienza automáticamente cuando el VI lector DAQMX inicia. La entrada de auto inicio del VI escritor DAQMX determina si una tarea de generación comienza automáticamente cuando el VI escritor DAQMX inicia. Si no se usa el VI de iniciar tarea DAQMX y el VI de detener tarea DAQMX cuando se usa el VI de lector DAQMX o el VI de escritor DAQMX varias veces, como en un lazo, la tarea inicia y se detiene repetidamente. El inicio y la parada de una tarea repetidamente reducen el buen funcionamiento de la aplicación.

Figura 2. VI de iniciar tarea DAQmx

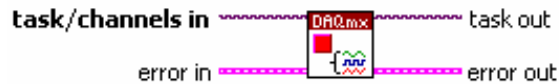


Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <<http://sivirtual.upbbga.edu.co>>

### Detener tarea DAQmx

Detener la tarea y retornarla al estado en que la tarea estaba antes de que el VI de iniciar tarea DAQMX o el VI de escritor DAQMX iniciaran con la entrada de auto inicio en verdadero. Si no se usa el VI de iniciar tarea DAQMX y el VI de detener tarea DAQMX cuando se usa el VI de lector DAQMX o el VI de escritor DAQMX varias veces, como en un lazo, la tarea inicia y se detiene repetidamente. El inicio y la parada de una tarea repetidamente reducen el buen funcionamiento de la aplicación.

Figura 3. VI de Detener tarea DAQmx



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Tutorial Genérico Labview. pdf. 2005. Disponible en <http://sivirtual.upbbga.edu.co>

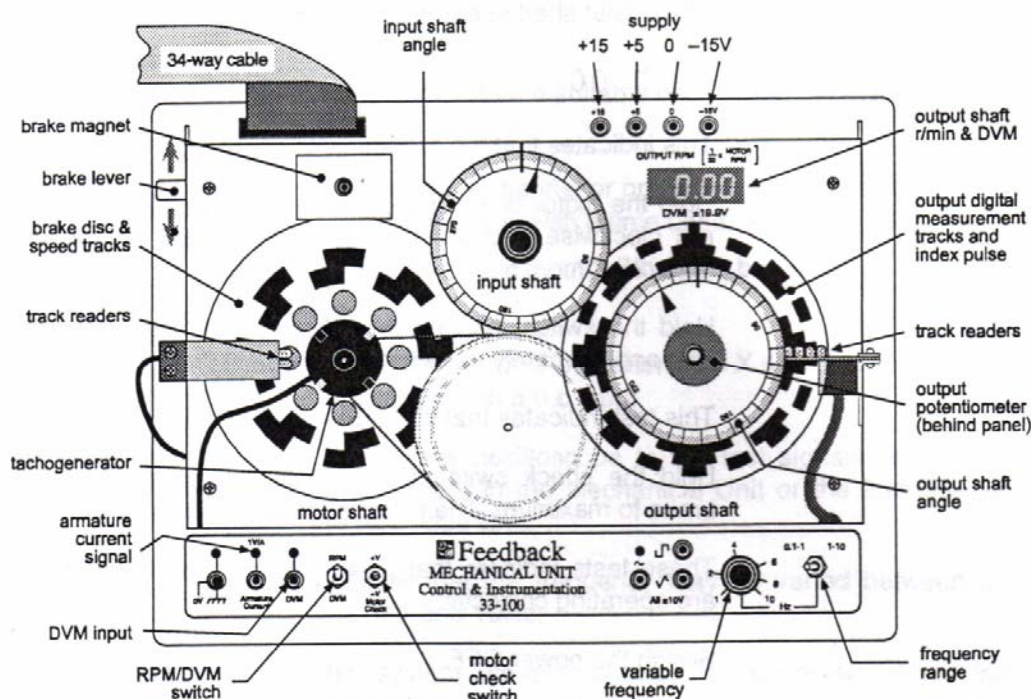
## ANEXO F. UNIDAD MECÁNICA 33-100 FEEDBACK

Tomado de: ARBELO L. Jean Pier/ LÓPEZ B, Félix Fabián. Adquisición de datos usb en tarjeta digital Feedback 33-120. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Seccional Bucaramanga. 2007.

### Detalles de la Unidad Mecánica 33-100.

La figura 1 muestra la disposición general de los paneles. La unidad es común para los dos sistemas, el análogo y el digital. Todas las señales incluyendo la de alimentación, para ambas unidades están disponibles desde el conector 34-way, la unidad puede ser operada desde cualquier fuente de señales apropiadas conectadas al conector 34-way.

Figura 1. Unidad Mecánica



Fuente: FEEDBACK INSTRUMENTS. Analogue Servo Fundamentals Trainer 33-002. 3 ed. Crowbrough, Inglaterra. 2000.

- **Fuentes de alimentación**

Alimentación externa de +15 y -15 V a 1,5 A y de +5 a 0,5 A es necesaria. Los conectores de entrada (4mm) están protegidos contra error en las conexiones de alimentación, sin embargo conexiones erróneas pueden disparar un fusible.

- **Eje del motor**

Este lleva un disco de freno, junto con dos fases de trayectorias de velocidad y un tacogenerador.

- **Disco de freno e imán**

El freno es aplicado por una palanca proyectada en la izquierda. La escala de la palanca está dada para repetir ajustes.

- **Trayectorias de velocidad y lectores**

Estas proporcionan dos fases, 0-5 V ondas cuadradas en 8 ciclos por revolución. Estas señales están disponibles en el conector 34-way pero no son usados en el sistema análogo.

- **Interruptor de revisión de motor**

Este habilita el motor para ser rotado como una revisión inicial.

- **Señal de corriente de armadura**

Esta es una forma de onda de voltaje indicando la corriente de armadura con escala de 1A/V.

- **Eje de entrada**

Este lleva un potenciómetro de entrada con una escala y da una señal  $\theta_i$  en el rango de  $\pm 10V$ .

- **Señal de frecuencia de prueba y interruptor de rango**

Este controla el oscilador interno que proporciona una onda cuadrada y triangular de  $\pm 10 V$  con una frecuencia de 0.1 a 10 Hz en dos rangos. Las formas de ondas están conectas en el conector 34-way.

- **Eje de salida**

Esta lleva el potenciómetro de salida y las trayectorias de medición angular. El potenciómetro proporciona  $\theta_0$  en el rango de  $\pm 10$  V.

- **Medición digital y lectores**

Las trayectorias digitales dan una información en código gray de 6 bits (64 posiciones) y son leídas por unos sensores infrarrojos. La información de 6 bits es dada como 0 a 5V en seis pines del conector 34-way.

- **Pulso de índice**

En un pulso por revolución este proporciona un punto de referencia en el eje de salida para el control incremental conectado a un pin en el conector 34-way.

- **Display de salida de velocidad:**

Da la lectura directa de la velocidad del eje de salida en r.p.m. en el rango de 00.0 a 99.9 derivado de las trayectorias de velocidad en el disco de freno. La razón de reducción es 32:1, una velocidad en el motor de 1000 r.p.m. da 31.1 r.p.m en el eje de salida.

- **Potenciómetro de Entrada.**

Da la señal  $\theta_i$  (Ángulo de referencia) en un rango de  $\pm 10$ V; se utiliza para suministrar señales análogas de entrada que permitan tener una señal de referencia en la medición y control de posición. Este potenciómetro es manipulado por el estudiante con giros que varían la señal del ángulo de referencia.

- **Potenciómetro de Salida**

Proporciona una señal  $\theta_0$  (Angulo girado) en un rango de  $\pm 10$  V; esta señal se adquiere para realizarle las operaciones correspondientes al ángulo de referencia.

- **Encoder absoluto**

Proporciona señales digitales que dan información de posición en código Gray de 6 bits (64 posiciones) y son leídas por sensores infrarrojos. La información de 6 bits se da de 0 a 5V.

- **Encoder incremental**

Proporciona dos señales cuadradas desfasadas 90° una respecto a la otra. Debido al desfase que existe estas señales proporcionan una secuencia digital que permite conocer el sentido de giro del motor.

- **Tacogenerador**

Es un instrumento utilizado para medir velocidad.

- **Entrada al motor**

La entrada al motor es el amplificador de potencia diseñado el cual recibe la señal que entrega la tarjeta USB 6008 de National Instruments; esta se puede observar en el movimiento del motor, ya sea cambiando su velocidad, siguiendo una referencia u observando el cambio de giro.