



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRONICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO**

TEMA:

**Diseño e implementación de un sistema de control PID de posición  
de un motor de corriente continua por medio de hardware y software  
Matlab – Simulink para uso didáctico en la facultad de Educación  
Técnica para el Desarrollo**

Previa la obtención del Título

**INGENIERO EN ELECTRONICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO CON  
MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

ELABORADO POR:

**JIMMY IVÁN BENALCÁZAR TENORIO  
GALO ANTONIO VERDUGA FRANCO**

GUAYAQUIL, OCTUBRE DEL 2013



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por los estudiantes, Jimmy Iván Benalcázar Tenorio y Galo Antonio Verduga Francocomo requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERÍA ELECTRONICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL.

---

Ing. Efrén Herrera Muentes MSc.

**TUTOR**

### **REVISORES**

---

Ing. Orlando Philco Asqui MSc.

---

Ing. Néstor Zamora C. MSc.

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

Ing. Armando Heras Sánchez

GUAYAQUIL, OCTUBRE DEL 2013



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## INGENIERÍA ELECTRONICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL

### **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

JIMMY IVÁN BENALCÁZAR TENORIO, y  
GALO ANTONIO VERDUGA FRANCO

DECLARAMOSQUE:

El trabajo de titulación denominado “Diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab – Simulink para uso didáctico en la facultad de Educación Técnica para el Desarrollo”, ha sido desarrollado con base a una investigación íntegra, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación referido.

Guayaquil, Octubre del 2013

---

Jimmy Iván Benalcázar Tenorio

---

Galo Antonio Verduga Franco



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## INGENIERÍA ELECTRONICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL

### **AUTORIZACIÓN**

Jimmy Iván Benalcázar Tenorio, y  
Galo Antonio Verduga Franco

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del proyecto titulado: “Diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab – Simulink para uso didáctico en la facultad de Educación Técnica para el Desarrollo”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad y autoría.

Guayaquil, Octubre del 2013

Los autores

---

Jimmy Iván Benalcázar Tenorio

---

Galo Antonio Verduga Franco

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la vida y la recompensa de culminar con éxito, una carrera profesional, a mi padre Iván Benalcázar Q., a mi madre Alicia Tenorio M., por darme siempre ese apoyo incondicional en todo el transcurso de mi vida estudiantil y ahora más que nunca en mi etapa universitaria, a ellos dedico este trabajo de graduación.

A mi hermano, para que a futuro cercano este trabajo le sirva como un ejemplo de superación.

A mis tíos, primos y demás familiares que siempre me dieron ese aliento para seguir adelante y no desmayar en la culminación de mi carrera.

A mis profesores de la Facultad Técnica, quienes a través de su enseñanza y amistad, forjaron base solidad de conocimiento para alcanzar una carrera profesional.

**Jimmy Iván Benalcázar Tenorio**

## *Dedicatoria.*

---

Dedico este trabajo de graduación a Dios, a mis padres y hermanos, a mis familiares cercanos que siempre estuvieron alentándome de la mejor forma.

También dedico este trabajo a los estudiantes de la carrera en ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, quienes pueden tener una referencia para simular el control de motores en corriente directa utilizando el Matlab-Simulink.

**Galo Antonio Verduga Franco**

## **AGRADECIMIENTO**

A toda nuestra familia por todo su apoyo y comprensión, que nos ha permitido culminar con éxito, el objetivo de ser profesionales.

A mis profesores de la FETD por la enseñanza y su amistad, a sus autoridades y en especial a nuestrotutor de tesis, Ing. Efrén Herrera Muentes, por su valiosa guía en la culminación de este trabajo de graduación.

Los autores

Jimmy Iván Benalcázar Tenorio, y  
Galo Antonio Verduga Franco

## **RESÚMEN**

El trabajo presentará una implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de la herramienta Matlab-Simulink para uso didáctico en los laboratorios de la facultad con el fin de que sea aprovechado por los alumnos como técnica de aprendizaje, constituyendo una oportunidad para poner a prueba los conocimientos adquiridos en clases de asignaturas como Teoría de Control, para ser aplicado como ejemplo real.

Se realiza un control PID sobre un motor DC. Las simulaciones y el control se realizan desde Simulink de MATLAB para analizar los resultados y observar el comportamiento del controlador PID.

El capítulo uno, describe el marco teórico acerca de los motores de corriente, sus tres clases más utilizadas en la industria. El capítulo dos, describe la metodología del control de los motores de corriente continua, se describe los aspectos del tratamiento de las señales de velocidad y posición mediante funciones de transferencia de sistemas continuo.

El tercer capítulo describe la recolección de datos o señales del motor de corriente, para ello se utiliza una tarjeta de adquisición de datos DAQ-USB 6009. Y el cuarto capítulo se hace el análisis de los resultados obtenidos tanto de la velocidad como de la posición, cuando se desea controlar un motor de corriente continua.

El quinto y sexto capítulo, son las conclusiones y recomendaciones acerca de este método para controlar la velocidad y posición de un motor de corriente continua.

The paper will present an implementation of a PID control system of position of a DC motor using Matlab-Simulink tool for educational use in the laboratories of the faculty in order to be used by students as a learning , constituting an opportunity to test the knowledge acquired in school subjects such as control theory, to be applied as a real example.

PID control is performed on a DC motor. The simulations and control is performed from MATLAB Simulink to analyze the results and observe the behavior of the PID controller.

Position, velocity and current of the DC motor can be controlled by varying the armature voltage, therefore, use a power converter that allows such regulation efficiently. The converter that is best suited to the requirements of the DC motor is the DC-DC converter full bridge which allows you to adjust the speed in both directions of rotation and return to the source of energy during braking

**Keywords:**

***Series motor, Shunt motor, compound motor, Simulink, motor speed and position***

## Índice General

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Planteamiento del Problema.....</b>	<b>2</b>
<b>Objetivo General .....</b>	<b>2</b>
<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>2</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>3</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo I: Marco Teórico de Motores de Corriente Continua.....</b>	<b>4</b>
1.1 El motor eléctrico .....	4
1.1.1 Principio de motor de CC.....	4
1.2 Características del Motor DC.....	7
1.3 Tipos de Motores DC .....	10
1.3.1 Motor SHUNT o derivación Paralelo.....	10
1.3.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS .....	12
1.3.2 Motor Serie.....	14
1.3.3 Motor Compound .....	17
1.4 Modelado Matemático.....	18
1.5 Simulink de Matlab .....	20
1.5.1 Creación de un Modelo. ....	22
1.5.2 Configuración de la Simulación. ....	25
<b>Capítulo II: Metodología del control de motores.....</b>	<b>29</b>
2.1 Control de Lazo de Corriente. ....	29
2.2 Lazo de Control de Velocidad.....	31
2.3 Lazo de Control de Posición. ....	36
2.4 Toolbox de Control de Simulink de Matlab.....	38
2.4.1 Tratamiento mediante Funciones de Transferencia. Sistemas Continuos .....	38
2.4.2 Dominio Temporal .....	38
2.4.3 Dominio Frecuencial .....	39
2.4.4 Márgenes de Estabilidad .....	41

## Índices

---

---

2.4.5 Efecto de los Retardos .....	41
2.4.6 Lugar de las Raíces.....	41
2.5 Sistema de Control PID .....	44
2.5.1 Algoritmo PID .....	44
2.5.2 Sintonización de un Controlador PID .....	45
<b>Capítulo III: Adquisición de Datos.....</b>	<b>48</b>
3.1 Software de verificación de Tarjeta de DAQ-USB 6009.....	49
3.2 Establecimiento de una sesión de Adquisición de Datos .....	53
3.3 Creación de Dispositivos de Adquisición de Datos (Canales I/O).....	53
3.3.1 Adición de Canales o Líneas para el Dispositivo.....	54
3.3.2 Configuración de valores de las Propiedades.....	55
3.3.3 Tipos de Propiedades.....	55
3.3.4 Sintaxis de Propiedades.....	56
3.3.5 Adquiriendo los Datos.....	56
3.4 Consultar información en el DAQ conectado en el computador.....	57
3.4.1 Comandos a ejecutar: .....	58
3.5 Toolbox de Adquisición de Datos .....	59
<b>Capítulo IV: Análisis de Mediciones y Simulaciones Realizadas.....</b>	<b>62</b>
4.1 Control de Posición .....	64
4.2 Resultados Experimentales.....	65
4.2.1 Control de Velocidad.....	65
4.2.2 Control de Posición .....	67
<b>Capítulo V: Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>Capítulo VI: Recomendaciones.....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>70</b>

**Índice de Figuras**

**Figura 1.1:**Regla de la mano izquierda.....5

**Figura 1.2:**Funcionamiento de un motor DC.....6

**Figura 1.3**Las partes de un motor CC.....7

**Figura 1.4** Vista frontal de rotor de motor DC.....8

**Figura 1.5** Núcleo de armadura de motor DC.....9

**Figura 1.6** Esquema eléctrico de un motor derivación paralelo o Shunt.....10

**Figura 1.7:** La corriente con y sin reóstato.....11

**Figura 1.8:** Esquema eléctrico de control de velocidad de motor SHUNT.....13

**Figura 1.9:** Colocación de un reóstato para controlar la velocidad en un motor SHUNT.....13

**Figura 1.10:** Esquema eléctrico de un motor en serie.....14

**Figura 1.11:** Curva de un motor en serie.....15

**Figura 1.12:** Implementación de reóstato que está en serie con bobina(a) y en paralelo (b) para disminuir o aumentar la velocidad del motor.....16

**Figura 1.13:** Circuito equivalente de armadura.....17

**Figura 1.14:** Diagrama de bloques del motor de CC.....18

**Figura 1.15:** Icono para arrancar SIMULINK en la barra de herramientas de MATLAB.....20

**Figura 1.16:** Ventana principal de SIMULINK.....21

**Figura 1.17:** Ventana del SIMULINK Library Browser.....22

**Figura 1.18:** Algunas librerías de SIMULINK Library Browser.....23

**Figura 1.19:** Ventana para la configuración de los parámetros de Simulación.....24

**Figura 1.20:** Bloques para la visualización de resultados.....25

**Figura 1.21:** Parámetros de configuración del bloque To Workspace.....26

**Figura 1.22:** Parámetros de configuración de la simulación.....28

**Figura 1.23:** Otra forma de guardar el tiempo en el espacio de trabajo.....28

**Figura 2.1:** Relación tensión – corriente de armadura.....29

<b>Figura 2.2:</b> Lazo de control de corriente.....	30
<b>Figura 2.3:</b> Lazo de control de velocidad.....	36
<b>Figura 2.4:</b> Lazo de control de posición.....	37
<b>Figura 2.5:</b> Ejemplo de respuesta al escalón de un sistema de primer orden.....	39
<b>Figura 2.6:</b> Diagramas de Bode, Nyquist y Nichols del ejemplo de la figura 2.5.....	40
<b>Figura 2.7:</b> Ventana principal de la herramienta rltool.....	43
<b>Figura 2.8:</b> Ventana para el diseño de sistemas SISO.....	43
<b>Figura 2.9:</b> Controlador proporcional, integral y derivativo.....	44
<b>Figura 2.10:</b> Respuesta del sistema de control PID.....	46
<b>Figura 2.11:</b> Características de las respuestas a la sintonización de controladores PID.....	48
<b>Figura 3.1:</b> Dispositivo de adquisición de datos USB-6009.....	52
<b>Figura 3.2:</b> Menú que aparece al conectar la tarjeta NI USB 6009.....	54
<b>Figura 3.3(a) y (b):</b> Ventana para la prueba de las entradas y salidas analógicas de la tarjeta.....	55
<b>Figura 3.4:</b> Selección del canal de la entrada y salida analógica de la tarjeta.....	56
<b>Figura 3.5:</b> Agrupación de canales en DAQ.....	57
<b>Figura 3.6:</b> Visualización de canal DAQ activado.....	58
<b>Figura 3.7:</b> Bloques de la herramienta DAQ.....	59
<b>Figura 3.8:</b> Bloques de la herramienta DAQ.....	60
<b>Figura 3.9:</b> Acceso algunas herramientas adicionales de DAQ.....	60
<b>Figura 4.1:</b> Arranque del motor.....	61
<b>Figura 4.2:</b> Detención del motor.....	62
<b>Figura 4.3:</b> Inversión del sentido de giro.....	63
<b>Figura 4.4:</b> Respuesta al escalón de carga.....	63
<b>Figura 4.5:</b> Cambio de posición.....	64
<b>Figura 4.6:</b> Respuesta al escalón de carga.....	64
<b>Figura 4.7:</b> Arranque del motor.....	65
<b>Figura 4.8:</b> Detención del motor.....	66
<b>Figura 4.9:</b> Inversión del sentido de giro.....	66

**Figura. 4.10:** Cambio de posición.....67

**Índice de Tablas**

**Tabla 1.** Datos de placa del motor DC.....17

**Tabla 2.** Parámetros del Motor.....17

**Tabla 2.1.** Lazo de Control de Corriente.....29

**Tabla 2.2.** Lazo de Control de Velocidad.....30

**Tabla 2.3.** Lazo de Control de Posición.....31

**Tabla 3.1.** Creación de funciones en tarjeta DAQ.....47

**Tabla 3.2.** Tipos de adaptadores para el NI USB 6009.....48

**Tabla 3.3.** Descripción de las formas de disparo.....51

## **Introducción**

Los motores de Corriente Continua (CC) han dominado el campo de los accionamientos de velocidad variable por más de un siglo, lo cual se debe a las excelentes características de funcionamiento y facilidad de control. Por otro lado, el motor de Corriente Alterna (CA) presenta ventajas en cuanto a costo, mantenimiento y densidad de potencia, sin embargo, son más difíciles de controlar por lo que no pudieron reemplazar al motor de CC hasta la década del 70.

En la actualidad, el campo de aplicación de los motores de CC se ha reducido notablemente, no obstante, existen aplicaciones donde es más simple y menos costoso utilizar este tipo de motores en lugar de los de CA. Entre las aplicaciones se destacan aquellas de gran potencia donde se aprovecha el alto par de arranque, como en la industria del acero en trenes de laminación reversibles y en sistemas de tracción de ferrocarriles eléctricos; y aplicaciones de precisión, como el mecanizado de piezas a través del uso de máquinas herramientas, en electrodomésticos, fotocopiadoras y en sistemas de control de posición utilizados en robótica (Catuogno y Falco, 2008).

La posición, velocidad y corriente del motor de CC pueden ser controladas variando la tensión de armadura, por lo tanto, se debe utilizar un convertidor de potencia que permita realizar dicha regulación de una manera eficiente. El convertidor que mejor se adecúa a los requerimientos del motor de corriente continua es el convertidor CC-CC puente completo el cual permite regular la velocidad en ambos sentidos de giro y devolver la energía a la fuente durante el frenado (Mohan, 2003).

### **Planteamiento del Problema**

Necesidad de comparar el control Proporcional, Integral y Derivativo de forma analítica utilizando un simulador, evidenciar la teoría del control con resultados mostrados por medio de una tarjeta de adquisición de datos., Se deben examinar, los parámetros de variación de velocidad y posición de un motor para elegir con eficacia y seguridad el mejor desempeño en procesos industriales donde se utilicen motores de corriente directa.

### **Objetivo General**

Diseñar e implementar un controlador PID de posición de un motor DC por medio de hardware y de software que complemente el aprendizaje del estudiante relacionando conceptos teóricos con los prácticos.

### **Objetivos Específicos**

1. Describir la fundamentación teórica de los controladores PID.
2. Analizar los parámetros de velocidad y posición de un motor de corriente directa en el proceso de control.
3. Diseñar e implementar un sistema de control de PID de posición de un motor de corriente continua por medio Matlab-Simulink.

### **Justificación**

El propósito de implementar el presente tema es para visualizar una de las aplicaciones de Teoría del Control de una manera práctica en función de las capacidades que posee el software MATLAB, para de esa manera complementar los conocimientos que reciben los estudiantes

que son puramente teóricos tanto en el estudio de la teoría del control como en el aprendizaje de la instrumentación.

### **Hipótesis**

Este trabajo de investigación pondrá en contacto al alumno con un sistema de control real, lo que constituye un factor importante en el aprendizaje al desarrollo, los conceptos teóricos dentro de un marco práctico. Durante su desarrollo se pondrán de manifiesto los parámetros que influyen en la respuesta de un lazo de control reafirmando los conocimientos.

### **Metodología**

Este trabajo se enmarca dentro del tipo de investigación descriptiva y aplicada, debido a que el investigador planteó los hechos de manera objetiva para obtener la realidad de la situación, así mismo siguió fines directos e inmediatos buscando solución a la problemática planteada en el trabajo; de igual manera, la investigación aplica o transfiere tecnología de control, las prácticas de adquisición de datos de velocidad y posición de un motor DC, son aplicación de tecnología (software-simulador).

## **Capítulo I: Marco Teórico de Motores de Corriente Continua**

### **1.1 El Motor eléctrico**

El motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía motriz. Casi todos los movimientos electromecánicos que se observa a nuestro alrededor son causados por un motor de corriente alterna (CA) o un motor de corriente continua (CC). El principio de operación de este tipo de motor, se describe a continuación.

#### **1.1.1 Principio de motor de CC**

El Motor de corriente continua, trabaja, cuando se coloca un conductor que lleva corriente en un campo magnético, que experimenta un torque y tiene una tendencia a moverse. Según ( Guasch Pesque & Ciumbulea, 2004) comentan que, “si la dirección de la corriente eléctrica en el alambre se invierte, la dirección de rotación también se invierte.

Cuando el campo magnético y el campo eléctrico interactúan que producen una fuerza mecánica, y en base a que el principio de funcionamiento del motor de corriente continua establecida.

Fleming expuso la regla de la mano izquierda, la dirección de rotación de un motor está dada por regla de la mano izquierda, que establece que si el dedo índice, dedo medio y el pulgar de la mano izquierda se extienden mutuamente perpendiculares entre sí y si el dedo índice representa la dirección del campo magnético, el dedo medio indica la dirección de la corriente eléctrica, entonces el pulgar representa la dirección en la que la fuerza es experimentada por el eje del motor de corriente continua.

La figura 1.1 muestra la forma de utilizar la regla de la mano izquierda, para conocer la dirección de la corriente y su campo magnético.

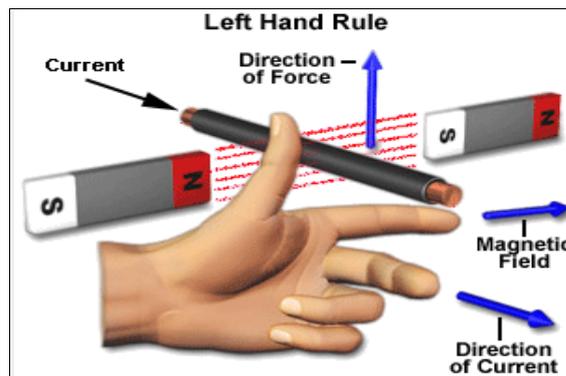


Figura 1.1 Regla de la mano izquierda

Fuente: <http://www.electrical4u.com/speed-control-of-dc-motor/>

(Álvarez, 2012) comenta al respecto, que el principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente directa o continua se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz<sup>1</sup>, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje. Este electroimán se denomina “rotor” y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor

La construcción estructural de un Motor de CC, es exactamente similar a un generador de corriente continua, pero eléctricamente es todo lo contrario, se diferencian por sus tensiones nominales. Como lo indica el autor (Senner, 2004) “los motores de CC no se deben emplear como generadores, ni los generadores como motores”.

Si se acciona un motor de CC a su velocidad de giro nominal, suministra una tensión inferior a la señalada en su placa de características y si se conecta un generador de corriente continua como motor a su tensión nominal, gira más lentamente.

Un motor CC, en palabras simples es un dispositivo que convierte la (energía eléctrica) de corriente continua en energía mecánica. Es de vital

---

<sup>1</sup>Es la relación entre una carga y un campo magnético.

importancia para la industria hoy en día, y es empleado en procesos industriales donde se requiere poco torque. Para entender el principio de funcionamiento del motor de corriente continua se tiene que mirar primero en su característica constructiva.

La construcción básica de un motor de corriente continua contiene una armadura de conducción de corriente que está conectado al extremo de suministro a través de segmentos de colector y escobillas y se coloca dentro de los polos sur al norte de una permanente o un electroimán como se muestra en el siguiente diagrama.

El funcionamiento de un motor se basa en la acción de campos magnéticos opuestos que hacen girar el rotor (eje interno) en dirección opuesta al estator (imán externo o bobina), con lo que si se sujeta por medio de soportes o bridas la carcasa del motor el rotor con el eje de salida será lo único que gire.

En la figura 1.2 se aprecia el funcionamiento de un motor DC.

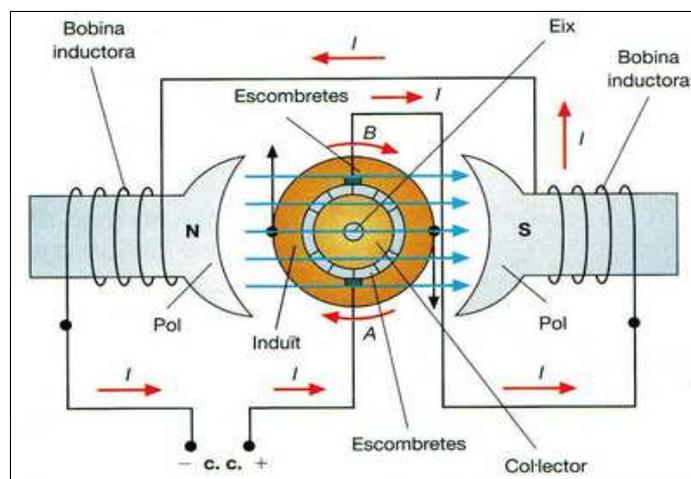


Figura 1.2 Funcionamiento de motor eléctrico DC

Fuente: <https://docs.google.com/presentation/d/1jFp6fbQKsraFVgtkZfATZaOmxKyPNiSMhiKkZ8iFE4c/embed?hl=ca&size=m#slide=id.p16>

## 1.2 Características del Motor DC

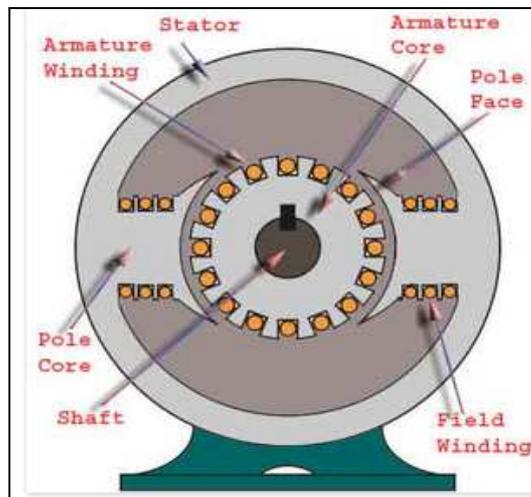


Figura 1.3 Las partes de un motor CC

Fuente: <http://www.electrical4u.com/speed-control-of-dc-motor/>

Los motores de CC, están contruidos en acero, tanto la carcasa, como su circuito magnético (polos inductores o principales), incluidos los polos de conmutación. El bobinado inducido está alojado en el circuito magnético (rotor), con principios y finales de bobinas que se conectan en las delgas del colector.

El autor (Viloria, Automatismo Industriales, 2011) sobre este tema, indica que, sobre el colector se deslizan las escobillas, con la rotación las escobillas se desgastan y el colector se recubre del material de las escobillas (polvo) que también puede alojarse sobre los bobinados del estator (inductor) y del rotor (inducido), y que por su conectividad, reduce la capacidad del aislamiento del bobinado (defecto de aislamiento).

### **Devanado de campo del motor de la CC**

El devanado de campo del motor de corriente continua se hacen con bobinas de campo (cable de cobre) para heridas más de las ranuras de las piezas polares , de tal manera que cuando fluye la corriente de campo a través de él, a continuación, polos adyacentes tienen polaridad opuesta se producen. Los devanados de campo básicamente forman un electroimán, que produce el flujo de campo dentro de la cual el inducido del rotor del

motor de corriente continua gira, y los resultados en el corte de flujo efectivo.

### **Núcleo de la armadura del motor de corriente continua**

El devanado del inducido de motor de corriente continua está unido al rotor, o la parte giratoria de la máquina, y como resultado se somete a la alteración del campo magnético en el camino de su rotación que se traduce directamente en pérdidas magnéticas.

Por esta razón, el rotor está hecho de núcleo de la armadura, que está hecho con varios de baja histéresis laminación de acero de silicio, para reducir las pérdidas magnéticas como histéresis y pérdidas por corrientes parásitas, respectivamente. Estas hojas de acero laminadas se apilan juntas para formar la estructura cilíndrica del núcleo de la armadura

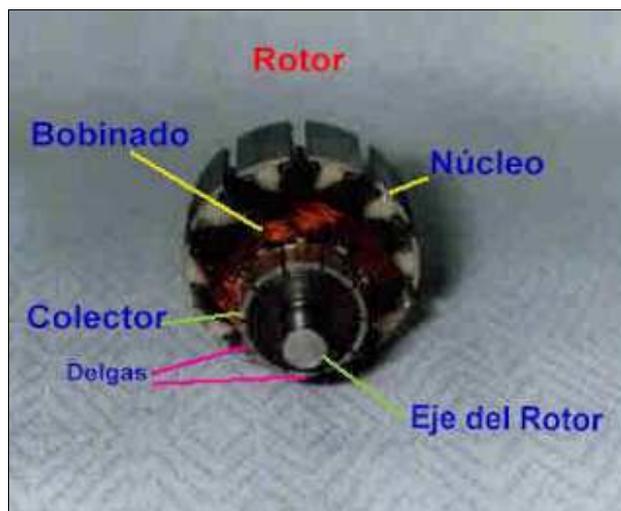


Figura 1.4 Vista frontal de rotor de motor DC

Fuente:<http://autodesarrollo->

[electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html](http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html)

El núcleo de la armadura se proporcionan con ranuras hechas del mismo material que el núcleo a la que las bobinas de la armadura hechos con varias vueltas de alambre de cobre distribuidos de manera uniforme sobre toda la periferia del núcleo. Las aberturas de las ranuras cerradas una con cuñas fibrosos para evitar que el conductor de que navegan a cabo debido

a la fuerza centrífuga de alta producido durante la rotación de la armadura , en presencia de una corriente de alimentación y de campo .

La construcción de bobinado del inducido del motor de corriente continua puede ser de dos tipos:

Lap Winding

En este caso, el número de trayectorias paralelas entre conductores A es igual al número de polos p

$$I.E A = P$$

### **Conmutador del motor de la CC**

El conmutador del motor de corriente continua es una estructura cilíndrica compuesta de segmentos de cobre apilados juntos, pero aislados unos de otros por la mica. Su función principal en lo que se refiere al motor de corriente continua es de conmutar o relé de corriente de la alimentación de la red eléctrica a los devanados del inducido alojados sobre una estructura giratoria a través de los cepillos de motor de corriente continua.



Figura 1.5 Núcleo de armadura de motor DC

Fuente: <http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html>

### **Cepillos del motor de la CC**

Los cepillos de motor de corriente continua se hacen con las estructuras de carbono o grafito, lo que hace contacto deslizante sobre el conmutador giratorio. Los cepillos se utilizan para transmitir la corriente eléctrica desde el circuito externo a la forma del conmutador giratorio en su desembocadura en el bobinado del inducido. El conmutador y la unidad de cepillo del motor de corriente continua tienen que ver con la transmisión de la potencia desde el circuito eléctrico estático para la región mecánicamente giratoria o el rotor.

### 1.3 Tipos de Motores DC

Según (Viloria, 2005), Los motores DC, se clasifican según la forma de conexión de las bobinas inductoras e inducidas entre sí. Así existen:

- Motor en derivación paralelo o motor Shunt.
- Motor en serie.
- Motor Compoud.

De acuerdo a los tipos de bobinados de excitación:

- ❖ Excitación independiente
- ❖ Excitación serie
- ❖ Excitación derivación (shunt)

#### 1.3.1 Motor SHUNT o derivación Paralelo

Para el esquema eléctrico de motor shunt de la figura, 1.6 se obtiene las expresiones;  $I_f = E_a/R_f$  e  $I_a = (E_a - E_b)/R_a$ .

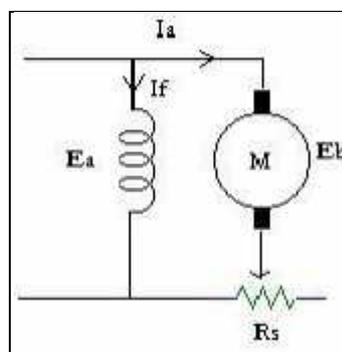


Figura 1.6 Esquema eléctrico de un motor derivación paralelo o Shunt

Fuente:<http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

Como lo indica el autor (Puentes, 2012) Inicialmente la fuerza contra electromotriz,  $f_{cem}$  es cero, debido a que el inducido está en reposo, por lo tanto,  $I_a = E_a / R_a$  que es de un valor elevado. Como la corriente es elevada, entonces el par motor también lo es, ya que  $\tau = K\phi I_a$ .

Esto hace que aumente la velocidad, por consiguiente  $E_b$  aumenta. Al aumentar  $E_b$  disminuye el par motor que se hace constante cuando el motor adquiere finalmente una velocidad constante. Si se impidiese el giro del inducido, la corriente de arranque sería muy intensa, continuaría circulando y quemaría el inducido en poco tiempo. En la práctica los motores se protegen generalmente con fusibles que, al fundirse, abren el circuito antes de que se quemara el inducido.

Como la corriente de arranque es elevada (varias veces el valor de la corriente nominal de carga) es necesario intercalar una resistencia  $R_s$  en serie para disminuir la corriente de arranque. Esta resistencia se suprime paulatinamente cuando el motor adquiere velocidad. La figura 1.7, representa la corriente con y sin el reóstato de arranque



Figura 1.7 La corriente con y sin reóstato

Fuente:<http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

### 1.3.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Según (Díaz, Barbón, & Gómez-Alexandre, 2002), comentan que, las curvas características de un motor indican como varían el par motor y la velocidad con la corriente en el inducido, siendo constante el voltaje aplicado.

$$\text{Par motor} = K\phi I_a$$

Como  $E_a = \text{constante}$ , entonces,  $I_f$  es también constante, por lo tanto, el flujo por polo también lo es.

$\text{Par motor} = K\phi I_a = K \times \text{constante} \times I_a = K' I_a$ , que representa la ecuación de una recta que pasa por el origen.

$$E_m = E_b = K \phi \text{ rpm} \qquad \text{rpm} = (E_a - I_a R_a) / K$$

$$\text{rpm} = \text{constante} \times (E_a - I_a R_a)$$

Como la resistencia  $R_a$  es pequeña el valor  $I_a R_a$  es pequeño comparado con  $E_a$ , por lo tanto, al aumentar la corriente, disminuye muy poco la velocidad. Por lo tanto el motor shunt es un motor de velocidad constante

### CONTROL DE VELOCIDAD

La velocidad de un motor viene determinada usualmente por el número de veces que gira en un periodo de un minuto, se expresa en revoluciones por minuto (r.p.m.) del motor. Según el autor (Seippel, 2003) La carga aplicada al motor es aquel dispositivo que el motor gira o sobre el que está operando. Puede que este dispositivo sea fácil o difícil de girar. Si es fácil la carga es ligera, si es difícil la carga es pesada.

En la mayor parte de los casos un motor girará más lentamente con una carga pesada que con otra ligera, pero la diferencia de velocidad en ambos casos depende del tipo individual de motor.

La forma de excitar los campos de corriente continua es muy semejante a la usada en los generadores de CC. Para modificar su velocidad podemos variar su tensión de alimentación con lo que el motor perderá velocidad, pero también perderá par de giro (fuerza) o para no perder par en el eje de salida podemos hacer un circuito modulador de anchura de pulsos con una salida a transistor de más o menos potencia según el motor utilizado.

(Puentes, 2012) Indica sobre este aspecto que, aunque el motor shunt es de velocidad constante, su característica más importante, es la de ser un motor de velocidad regulable.

Utilizando la ecuación de la velocidad, tenemos:  $Rpm = (E_a - I_a R_a) / K\phi$

La velocidad se puede aumentar, disminuyendo el flujo por polo ( $\phi$ ). Para esto, es necesario colocar un reóstato en el circuito de campo, tal como se indica en la figura 1.8.

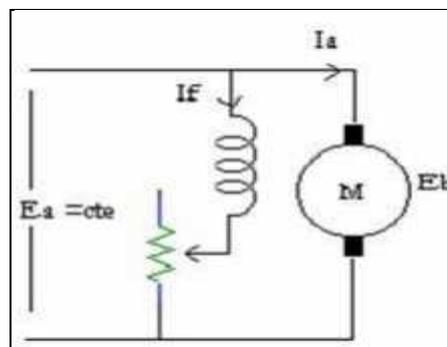


Figura 1.8 Esquema eléctrico de control de velocidad de motor SHUNT

Fuente: <http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

Intercalando un reóstato en el circuito del inducido podemos disminuir la velocidad nominal. Esto es debido a que al aumentar la resistencia en el circuito en el inducido el voltaje  $E_a$  disminuye.

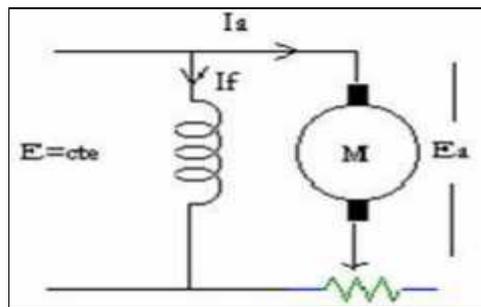


Figura 1.9 Reóstato para controlar la velocidad en un motor SHUNT

Fuente: <http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

### Inversión de Giro

El sentido de rotación de un motor Shunt se puede invertir, cambiando la dirección de la corriente, ya sea en el circuito de campo o en el circuito del inducido.

### Parada del motor.

Para parar el motor se introducen todas las resistencias del reóstato de arranque antes de cortar la corriente.

### Propiedades

- Par de arranque débil
- No soportan grandes sobrecargas.
- Velocidad constante cualquiera sea la carga.
- No se disparan en vacío.

### Utilización

Se utilizan en casos en los que no se requiera un par elevado a pequeñas velocidades y no produzcan grandes cargas, si la carga desaparece (funcionamiento en vacío) el motor varía apenas su velocidad.

### 1.3.2 Motor Serie

El motor serie se conecta a la red como se indica en la figura 1.10. El voltaje aplicado  $E_a$  es constante, mientras que el campo de excitación

aumenta con la carga, puesto que la corriente  $I_a$  es la misma corriente de excitación.

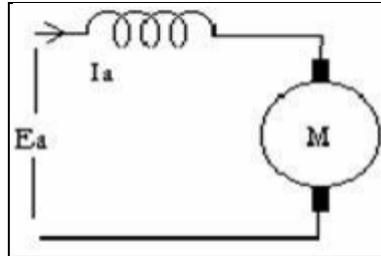


Figura 1.10 Esquema eléctrico de un motor en serie

Fuente: <http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

(Polanía) además comenta que, el par producido  $K\phi I_a$  es directamente proporcional al flujo y a la corriente en el inducido. Como el también aumenta con  $I_a$ , entonces, el par motor es directamente proporcional al cuadrado de  $I_a$ , por lo tanto, su curva será parabólica. Ver figura 1.11.

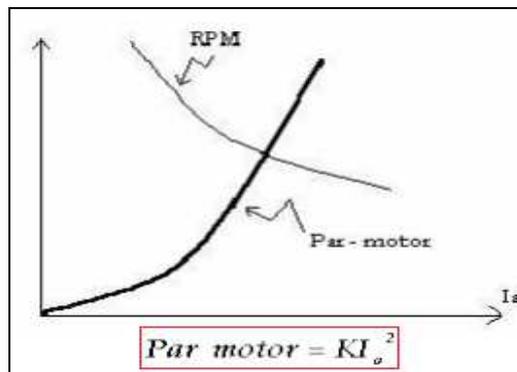


Figura 1.11 Curva de un motor en serie

Fuente: <http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

#### Arranque del motor:

Como en el caso del motor shunt se debe intercalar un reóstato de arranque en serie con el inducido. Según (Enríquez, 2003) indica que esta resistencia se reduce gradualmente cuando el motor adquiere velocidad.

### **Características de carga**

El ingeniero (Polanía) en sus publicaciones acerca de los motores eléctricos, comenta que, las curvas características se pueden obtener a partir de las fórmulas fundamentales:

$$P_{\text{motor}} = K\phi I_a = K I_a^2, \text{ debido a que } \phi = K I_a$$

$$R_{\text{pm}} = (E_a - I_a R_a) / K\phi = K (E_a - I_a R_a) / I_a,$$

O sea, que al aumentar la corriente, disminuye la velocidad, y su curva de velocidad, se observa que para cargas ligeras, la velocidad se hace peligrosamente elevada, y por esta razón un motor serie ha de estar siempre engranado o acoplado directamente a la carga.

Si un motor serie estuviera unido a la carga mediante una correa y ésta se rompiera o soltase, el motor se embalaría y probablemente se dañaría.

### **Inversión del sentido de rotación:**

La rotación se puede invertir cambiando la dirección de la corriente, ya sea del campo en serie o del inducido.

### **Parada del motor:**

Para parar un motor serie, es preciso introducir progresivamente las resistencias del reóstato de arranque y cortar luego la alimentación, para evitar una fuerte corriente de ruptura que sería peligrosa para los arrollamientos.

### **Control de velocidad:**

(Gil, 2003) Indica que la velocidad se puede variar, cambiando el voltaje aplicado  $E_a$ , colocando un reóstato en serie con la bobina de campo. De esta manera se disminuye la velocidad. Se puede aumentar la velocidad, disminuyendo el flujo por polo. Esto se puede realizar, colocando un reóstato en paralelo con la bobina de campo, de modo que la corriente total la solo se permita circular una parte por la bobina de excitación.

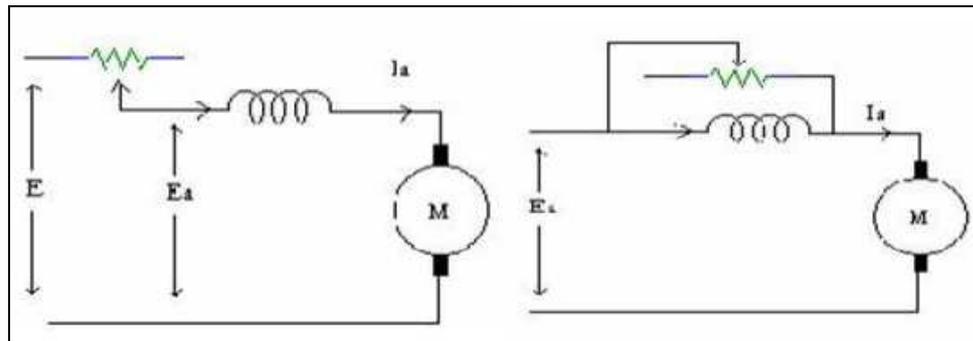


Figura 1.12 Implementación de reóstato que está en serie con bobina(a) y en paralelo (b) para disminuir o aumentar la velocidad del motor.

Fuente:<http://www.ceduvirt.com/resources/Control%20de%20Motores%20con%20Matlab.pdf>

### Propiedades

- Gran par de arranque.
- Velocidad variable con la carga.
- Tendencia al aceleramiento excesivo.
- Soporta bien las sobrecargas.
- Se dispara fácilmente en vacío o cuando la carga decrece.

### Utilización

Se usa en los aparatos de elevación: Montacargas, ascensores, grúas, frenos eléctricos.

### 1.3.3 Motor Compound

Comparando las ventajas de los motores serie y Shunt se encuentra que:

- 1) El motor Shunt tiene una velocidad más constante, pero
- 2) Un motor serie del mismo régimen de capacidad puede ejercer un par mucho mayor, cuando sea necesario, sin aumentar terriblemente la corriente.

Estas dos características pueden obtenerse en un mismo motor colocando dos bobinados de campo: Uno en serie y otro Shunt, en los polos del motor, y que se llamará motor compound.

### 1.4 Modelado Matemático

Según (Cogdell, 1997) El circuito equivalente de armadura del motor de CC se muestra en la figura 1.10

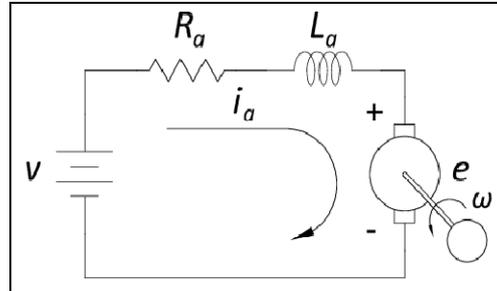


Figura 1.13 Circuito equivalente de armadura.

Fuente: <http://smartdreams.cl/motor-de-corriente-continua/>

La ecuación dinámica de la corriente de armadura está dada por,

$$v(t) = e(t) + i_a(t) R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde  $v$  e  $i_a$  son la tensión y corriente de armadura,  $R_a$  y  $L_a$ , la resistencia e inductancia de armadura y  $e$  la tensión inducida, que se puede modelar como,

$$e(t) = k_b \omega(t) \quad (2)$$

Donde  $k_b$  es la constante de fuerza contra-electromotriz y  $\omega$  es la velocidad mecánica del eje del rotor. El par electromagnético ( $T_e$ ) es proporcional a la corriente de armadura,

$$T_e(t) = k_t i_a(t) \quad (3)$$

Donde  $k_t$  es la constante de par. El modelo mecánico del motor de CC es el siguiente,

$$T_e(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + D_m \omega(t) + T_L(t) \quad (4)$$

Donde  $J_m$  es el momento de inercia de armadura,  $D_m$  es el coeficiente de fricción viscosa y  $T_L$  es el par de carga. Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones (1) – (4), la corriente de armadura se expresa de la siguiente manera,

$$I_a(s) = \frac{V(s) - k_b \omega(s)}{R_a + L_a s} \quad (5)$$

y la velocidad mecánica del eje del rotor se expresa como,

$$\omega(s) = \frac{k_1 I_a(s) - T_L(s)}{D_m + J_m s} \quad (6)$$

En la Figura 1.14 se muestra el diagrama de bloques del modelo del motor de corriente continua.

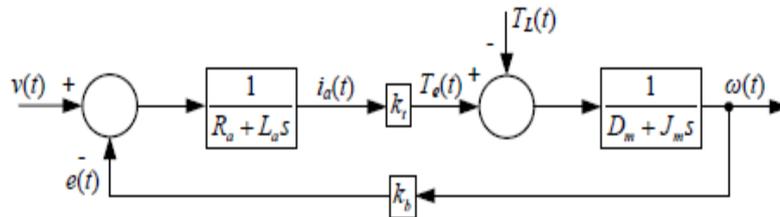


Figura 1.14 Diagrama de bloques del motor de CC.

Fuente: Autores

Para poder diseñar los controles de corriente, velocidad y posición propuestos en este trabajo fue necesario obtener los parámetros del motor mediante ensayos. En las Tablas 1 y 2, se muestran los datos de placa del motor y los parámetros obtenidos siguiendo los procedimientos listados en (Krishnan, 2001).

PARÁMETRO	VALOR
$V_n$	30 (V)
$I_n$	2 (A)
$P_n$	42 (W)
$N_n$	2750 (RPM)
$Res.$	400 (PPR)

Tabla 1. Datos de placa del motor DC

Fuente: autores

PARÁMETRO	VALOR
$R_a$	1.1 $\Omega$
$L_a$	8.57 (mHy)
$K_b$	0.92 (V/rad/seg)
$K_t$	0.92 (N.m/A)
$J_m$	$1.240 \cdot 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$

Tabla 2. Parámetros del Motor

Fuente: autores

### 1.5 Simulink de Matlab

La herramienta de simulación SIMULINK de MATLAB, es una utilidad que permite la simulación temporal de sistemas, que se construyen gráficamente a partir de bloques predefinidos o definidos por el desarrollador.

Según el Manual de introducción al Simulink de José Acosta Rodríguez, explica que, la simulación a través de diagramas de bloques permite una fácil comprobación de los diseños de los sistemas de control antes de pasar a la fabricación del primer prototipo.

Para ejecutar SIMULINK, teclear el comando simulink en la ventana de comandos o haciendo clic sobre el icono que aparece en la barra de herramientas (ver Figura 1.15).

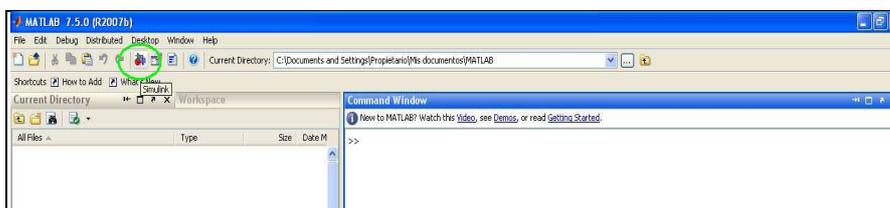


Figura 1.15 Icono para arrancar SIMULINK en la barra de herramientas de MATLAB

Fuente: el autor

Entre otras muchas, cabe citar las siguientes ventajas de los entornos de simulación para el estudio y diseño de los sistemas reales:

- De forma sencilla se pueden realizar distintas ejecuciones del lazo de control para diferentes valores de parámetros de diseño y elegir el que mejor comportamiento tenga para el problema bajo análisis, incluso se puede acercar lo más posible a la realidad añadiendo bloques no lineales.
- Permiten simular procesos muy lentos en el tiempo de forma rápida. Así, por ejemplo, se puede simular un proceso que tarde en evolucionar varios minutos, en breves segundos de simulación.

Según el autor comenta que, con SIMULINK, el usuario puede crear sus modelos a partir de una librería de componentes básicos, copiándolos de una ventana a otra, estableciendo las conexiones oportunas y dando valores a sus parámetros. Su utilización sólo requiere un ligero conocimiento sobre las características básicas de MATLAB.

Al trabajar con SIMULINK hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El análisis del sistema, mediante simulación, se puede efectuar desde el menú de simulación asociado a todo diseño en SIMULINK, desde la línea de comandos o desde cualquier programa de comandos (\*.m), en MATLAB.
- Durante la simulación no es posible modificar los parámetros generales, pero sí es posible efectuar cambios en los parámetros específicos de cada bloque, dotando así a SIMULINK de un entorno interactivo muy útil para la realización de pruebas. Es decir se pueden definir parámetros dentro de los bloques y en la ventana de MATLAB se definen dichos parámetros como variables y se les asignarán valores para cada simulación.
- Adicionalmente a la simulación es posible obtener un modelo lineal del sistema frente a determinadas perturbaciones, obtener

las condiciones de equilibrio del sistema a partir de distintas condiciones iniciales y utilizar toda la potencia de MATLAB para el análisis de datos o para el análisis y diseño del modelo lineal.

### **1.5.1 Creación de un Modelo.**

Al abrir SIMULINK, junto con la ventana de librerías se abre una ventana en blanco con el nombre de untitled donde se programará gráficamente un nuevo sistema, tal y como semuestra en la figura 1.16 (si no aparece dicha ventana se crea desde el menú file→new).

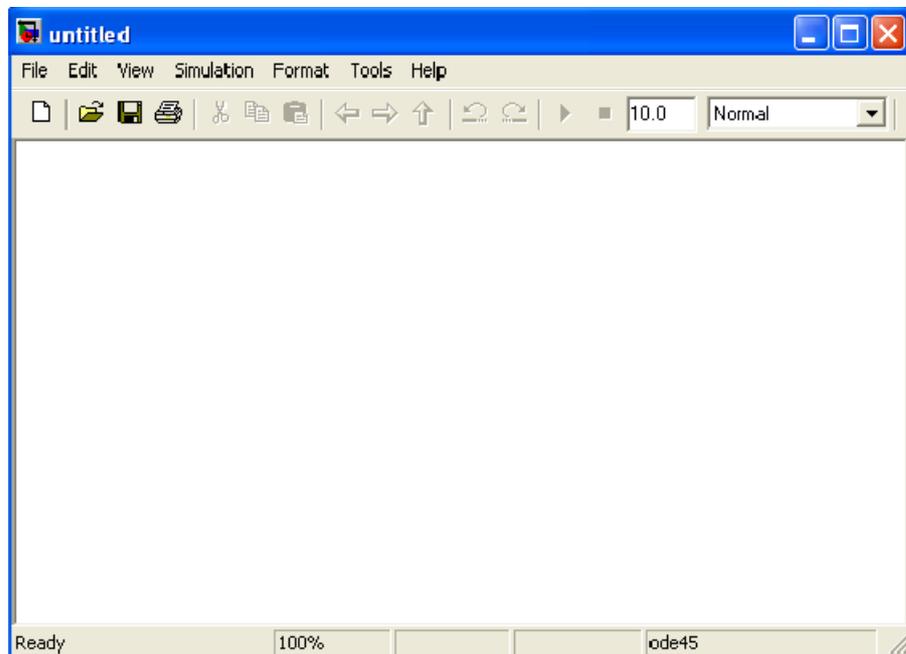


Figura 1.16 Ventana principal de SIMULINK

Fuente: autores

El sistema se formará tomando bloques de la ventana Simulink Library Browser (Figura 1.17), arrastrándolos a la ventana de SIMULINK e interconectando sus entradas y salidas adecuadamente.

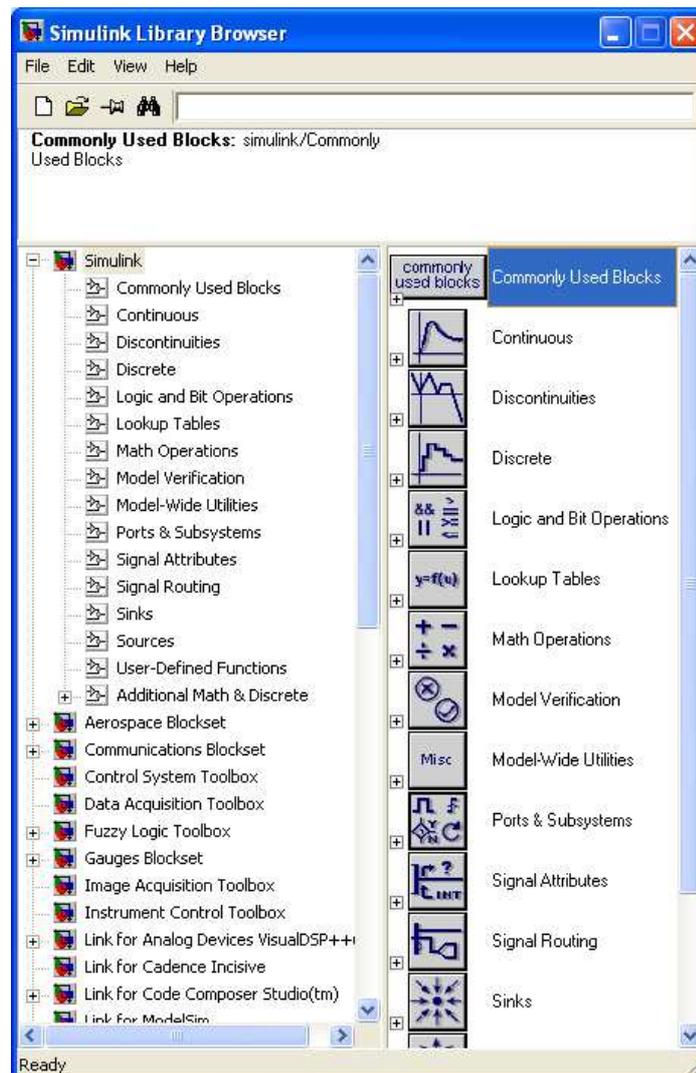


Figura 1.17: Ventana del SIMULINK Library Browser

Fuente: autores

Los bloques disponibles están agrupados en librerías. Entre las más utilizadas, se encuentran las siguientes:

- Sources: los bloques de las distintas señales de entrada.
- Sinks: bloques que recogen la respuesta de los sistemas.
- Continuous: componentes para la programación de sistemas continuos.
- Discrete: componentes para la programación de sistemas discretos.

- Discontinuous: componentes para la programación de sistemas no lineales.
- Signals & Subsystems: conexiones.
- Math Operations: incluye bloques para operaciones matemáticas.

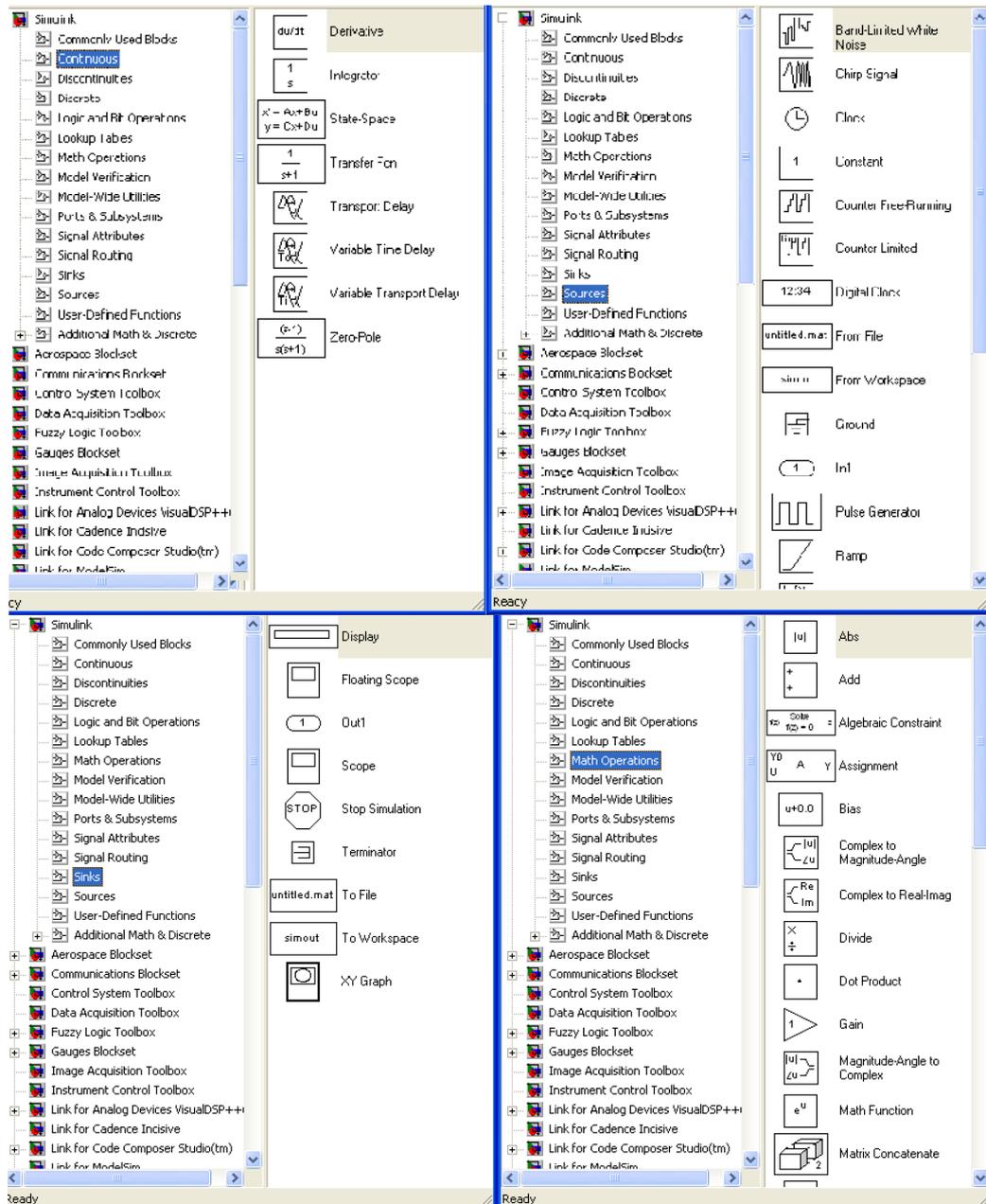


Figura 1.18 Algunas librerías de SIMULINK Library Browser

Fuente: autores

Cada bloque situado en la ventana de trabajo aparece con su símbolo y unas marcas que representan las entradas y/o salidas del mismo; para conectar los bloques hay que hacer clic en una de dichas marcas y soltar el botón del ratón arrastrar hasta otra marca o bien hasta una línea ya dibujada.

Una vez dibujado el diagrama de bloques se pueden cambiar los parámetros asociados a cada bloque haciendo doble clic dentro del bloque, se abrirá una ventana (particular de cada bloque) que permite visualizar los parámetros actuales y cambiar sus valores.

Cuando se ha realizado un cambio en la ventana de trabajo en la barra de título de la ventana aparece: untitled\* indicando que todavía no se ha dado nombre al fichero (untitled) y que se han hecho cambios en el diagrama de bloques sin que se hayan salvado en disco.

### 1.5.2 Configuración de la Simulación.

A la ventana de configuración de la simulación se accede desde el menú desplegable Simulation en la opción Simulation Parameters (ver Figura 1.19).

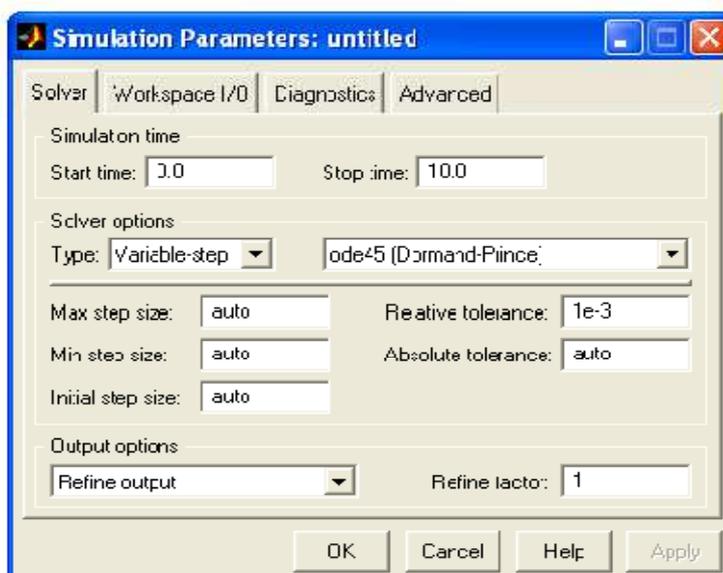


Figura 1.19 Ventana para la configuración de los parámetros de simulación

Fuente: autores

En la pestaña que aparece al abrirse (solver) se distinguen tres partes:

- Simulation time: comienzo y fin de simulación en segundos.
- Solver options: método de integración, tamaño del paso.
- Output options: para aumentar los puntos de la simulación.

La simulación comienza en el menú Simulation → Start o pulsando el icono en forma de triángulo de la barra de botones. Para visualizar los resultados de la simulación los dos bloques más utilizados son Scope y To Workspace (de la librería Sinks):

- Scope: durante o tras la simulación al hacer doble clic en este bloque se abrirá una nueva ventana con las señales generadas. En su barra de herramientas existen varios iconos: los tres primeros fijan el tipo de zoom (ampliar eje x y eje y, sólo eje x y sólo eje y); el cuarto icono (se identifica con unos prismáticos) hará que aparezca en pantalla la gráfica completa. El quinto guarda la configuración de los ejes para simulaciones posteriores, y el último nos permite fijar los ejes y la cantidad de datos que queremos que se representen en la gráfica.
- To Workspace: guarda la señal en el espacio de trabajo de MATLAB, para poder trabajar con ella desde el entorno de MATLAB. Lo más sencillo es guardarla en forma de array; para ello, elegir esa opción en Save format (en la ventana de configuración de este bloque, ver Figura 1.20). Los valores de tiempo correspondientes a esos datos almacenados pasan al espacio de trabajo en una variable llamada tout.

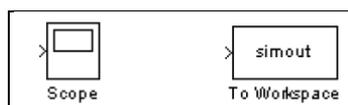


Figura 1.20 : Bloques para la visualización de resultados

Fuente: autores

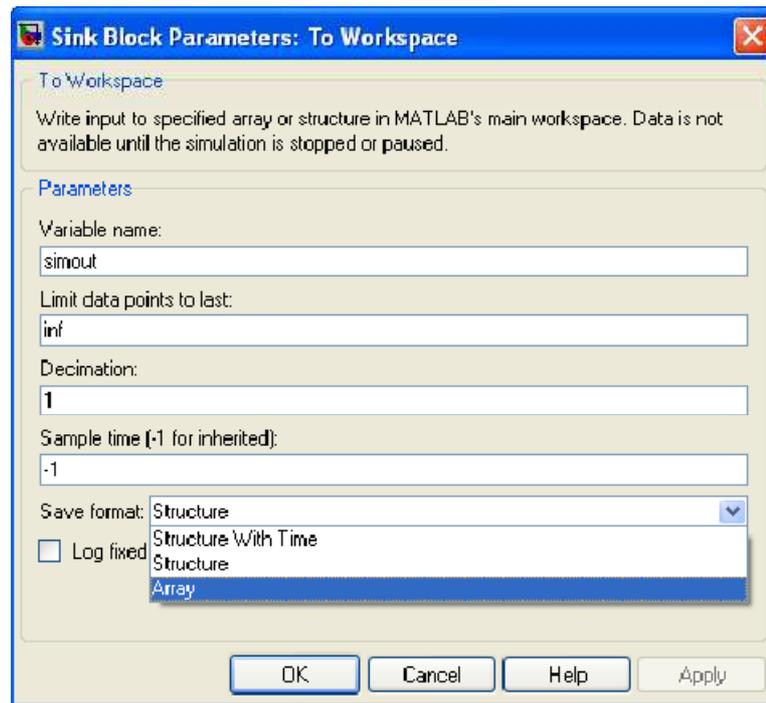


Figura 1.21 Parámetros de configuración del bloque To Workspace

Fuente: autores

Por defecto se guardan. Se puede modificar esa opción en la pestaña Workspace I/O o Data Import/Export (dependiendo de la versión de MATLAB instalada) de la ventana Simulation Parameters.

En cualquier caso, otra forma para guardar el tiempo, con el nombre que se quiera, es mediante el bloque Clock de la librería Sources (véase figura 1.22).

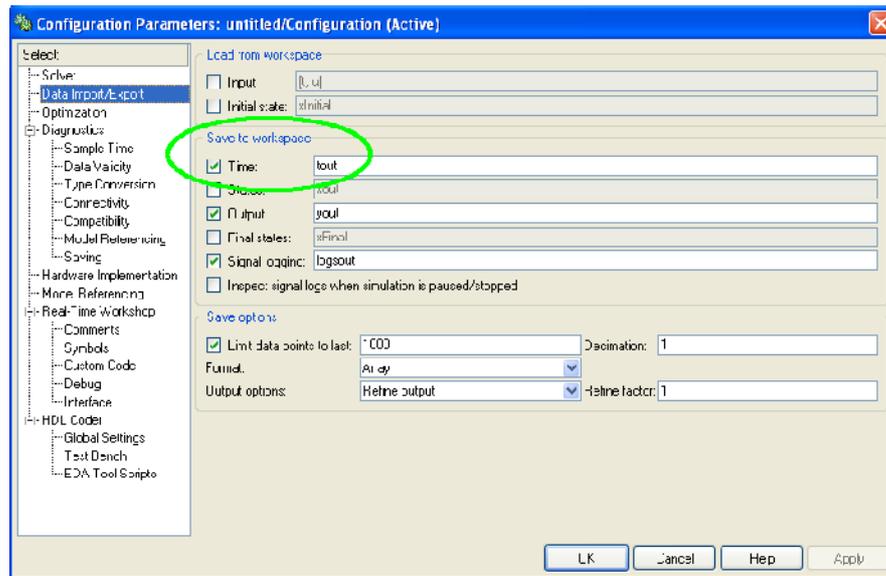


Figura 1.22 Parámetros de configuración de la simulación (guardar el tiempo en tout)

Fuente: autores

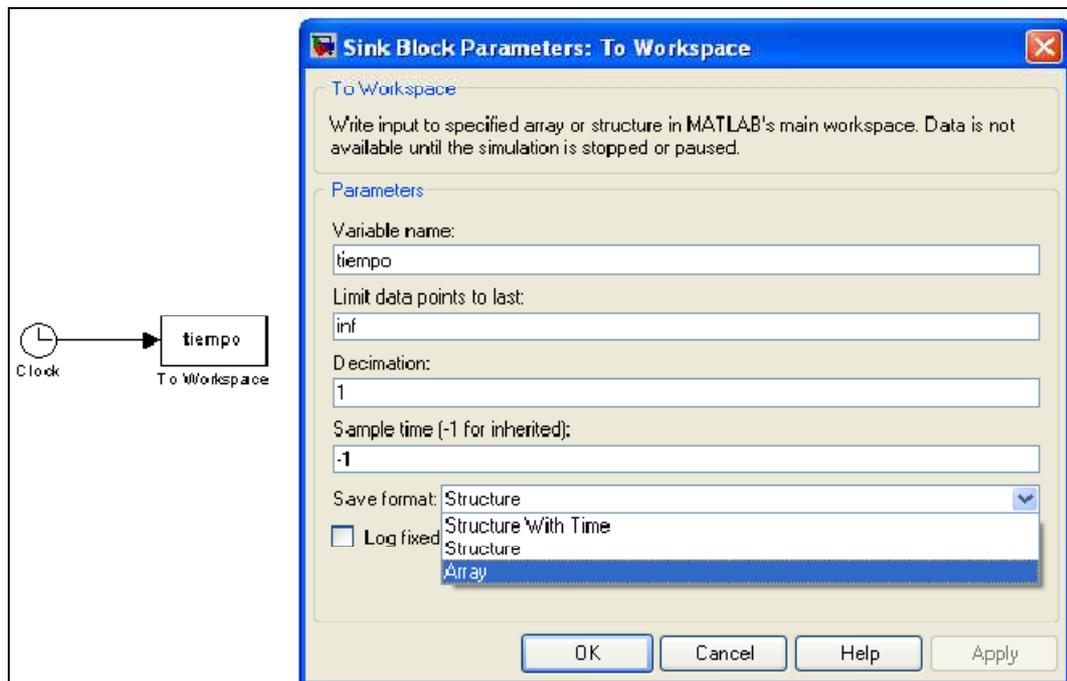


Figura 1.23 Otra forma de guardar el tiempo en el espacio de trabajo

Fuente: autores

## Capítulo II: Metodología del control de motores

Existen diferentes métodos de control de velocidad para motores DC.

- Tradicionalmente el voltaje de armadura utiliza un método Reostático para motores DC de baja potencia.
- Uso de controladores PID convencionales.
- Controladores de Redes Neuronales.
- Motores de potencia de campo constante hacen ineficientes los controladores basados en técnicas de linearización de cargas adaptivas multi entradas – multi salidas (para regímenes de alta velocidad).
- Convertidores PWM uniformes de fase simple con acoplamiento AC/DC, son solamente un dispositivo usado para el control de voltaje de armadura.
- El uso de controladores para la región de torque constante NARMA-L2 (*Non-Linear Auto-Regresive Moving Average*).

Se ha alcanzado gran experiencia en el diseño de controladores basados en auto sintonización y control proporcional integral, el cual tiene muchas ventajas como la rapidez de control, bajo costo y estructura simple.

### 2.1 Control de Lazo de Corriente.

En la Figura 2-1 se muestra el diagrama de bloques que relaciona la tensión con la corriente de armadura asumiendo un par de carga nulo.

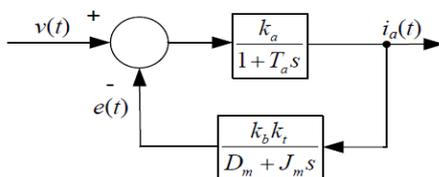


Fig. 2.1 Relación tensión – corriente de armadura.

Fuente: autores

Donde  $k_a$  y  $T_a$  son la ganancia y la constante de tiempo de armadura y las mismas se relacionan con  $R_a$  y  $L_a$  de la siguiente manera.

$$k_a = \frac{1}{R_a}, \quad T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (7)$$

Para controlar la respuesta transitoria de la corriente de armadura y eliminar el error en estado estable, se utiliza un controlador PI cuya función de transferencia es la siguiente.

$$\frac{V(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{k_c(1+T_c s)}{T_c s} \quad (8)$$

Donde  $k_c$  y  $T_c$  son la ganancia y la constante de tiempo del controlador y  $\varepsilon(s)$  es el error de corriente. En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques del lazo de control de corriente donde se desprecia el coeficiente de fricción viscosa ya que su valor es pequeño comparado con el valor del momento de inercia.

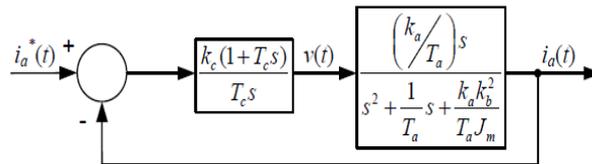


Figura. 2.2: Lazo de control de corriente.

Fuente: autores

Mediante el álgebra de diagramas de bloques, la función de transferencia a lazo cerrado queda expresada como,

$$G_{CLC} = \frac{\frac{k_c k_a}{T_a} \left( s + \frac{1}{T_c} \right)}{s^2 + \frac{1}{T_a} (1 + k_c k_a) s + \frac{k_a}{T_a} \left( \frac{k_c}{T_c} + \frac{k_b^2}{J_m} \right)} \quad (9)$$

Los coeficientes del denominador están relacionados con la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$  y el factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$  de la siguiente manera (Nise, 2002), (Gonzalez et al., 2011),

$$\frac{1}{T_a} (1 + k_c k_a) = 2\zeta\omega_n, \quad \frac{k_a}{T_a} \left( \frac{k_c}{T_c} + \frac{k_b^2}{J_m} \right) = \omega_n^2 \quad (10)$$

En la Tabla 2.1, se muestran las especificaciones deseadas de la respuesta del lazo de control de corriente (tiempo de asentamiento y

sobrepaso) y los valores de  $\zeta$ ,  $\omega_n$ ,  $k_{pc}$  y  $k_{ic}$  obtenidos usando las relaciones presentadas en (10).

PARÁMETRO	VALOR
%OS	0%
$T_s$	10 (ms)
$\zeta$	1
$n$	400(rad/seg <sup>2</sup> )
$k_{pc}$	4.732
$k_{ic}$	1220.616

Tabla 2.1. Lazo de Control de Corriente

Fuente: autores

## 2.2 Lazo de Control de Velocidad.

Control de velocidad significa un cambio intencional de la velocidad de desplazamiento a un valor necesario para llevar a cabo el proceso de trabajo específico. El control de velocidad es un concepto diferente de la regulación de velocidad donde hay cambio natural a su debido cambio de velocidad de la carga en el eje. El control de velocidad se realiza, bien manualmente por el operador o por medio de algún dispositivo de control automático.

Una de las características importantes del motor de corriente continua es que su velocidad se puede controlar con relativa facilidad. Sabemos que la expresión de la velocidad de control de motor de corriente continua se da como,

$$N = KV - \frac{I_a(R_a + R)}{\phi}$$

Por lo tanto la velocidad (N) de 3 tipos de motor de corriente continua - SERIE, derivación y el compuesto se puede controlar mediante el cambio de las cantidades en el lateral derecho de la expresión. Así velocidad se puede variar cambiando

- (I) la tensión en los bornes del inducido  $V$ ,
- (ii) la resistencia externa en el circuito del inducido  $R$  y
- (iii)  $\phi$  flujo por polo.

Los dos primeros casos se tratan de cambio que afecta circuito de la armadura y la tercera consiste en cambio en el campo magnético. Por lo tanto, el control de velocidad del motor de corriente continua se clasifica como

- 1) los métodos de control de la armadura y
- 2) los métodos de control de campo.

#### Control de velocidad de motor DC Series

Control de la velocidad del motor serie de corriente continua se puede hacer ya sea por el control del inducido o por control de campo.

#### Control de la armadura de la serie DC Motor

Ajuste de la velocidad del motor en serie de corriente continua por el control de la armadura se puede hacer por cualquiera de los métodos que siguen,

1. Método de control de la resistencia del inducido: Este es el método más común empleado. Aquí la resistencia de control está conectada directamente en serie con la alimentación del motor.

La pérdida de potencia en la resistencia de control de motor de la serie de corriente continua se puede despreciar, porque este método de control se utiliza para una gran parte de tiempo para reducir la velocidad en condiciones de carga ligera. Este método de control de velocidad es más económica para par constante. Este método de control de velocidad se

emplea para la serie de motores de corriente continua grúas de manejo, montacargas, trenes, etc.

2. El control del inducido conectado en derivación: La combinación de un reóstato maniobras la armadura y un reóstato en serie con el inducido está involucrado en este método de control de velocidad. El voltaje aplicado a la armadura se varía variando serie reóstato R 1. La corriente de excitación puede ser variada mediante la variación de la resistencia del inducido R derivación 2. Este método de control de velocidad no es económico debido a las considerables pérdidas de potencia en las resistencias de control de velocidad. Toma de control Aquí velocidad en un amplio rango, pero debajo de la velocidad normal.

3. Control de tensión en los bornes del inducido: El control de la velocidad del motor en serie de corriente continua puede llevarse a cabo mediante el suministro de la energía al motor desde un suministro de voltaje variable independiente. Este método implica alto costo por lo que rara vez se utiliza.

### **Control Campo de DC Serie Motor**

La velocidad del motor de corriente continua puede ser controlada por este método por cualquiera de las siguientes maneras -

1. Método desviador Campo: Este método utiliza un desviador Aquí el flujo de campo se puede reducir derivando una parte de la corriente alrededor del campo de serie del motor.. Menores la resistencia desviador menos es el campo actual, menos flujo por lo tanto más velocidad. Este método da por encima de la velocidad normal y el método se utiliza en accionamientos eléctricos en los cuales la velocidad debe aumentar bruscamente tan pronto como se disminuye la carga.

2. Campo de control de roscado: Este es otro método de incrementar la velocidad mediante la reducción del flujo y se hace mediante la reducción de número de vueltas del devanado de campo a través de la cual fluye la

corriente. En este método es presentada fuera de una serie de grabaciones de devanado de campo. Este método se emplea en la tracción eléctrica.

### **Control de velocidad del motor de la CC Derivación**

Velocidad de motor derivación de corriente continua es controlada por los factores enumerados a continuación

### **Control Campo de DC Motor shunt**

Por este método de control de la velocidad se obtiene por uno cualquiera de los siguientes medios:

1. Reóstato de control de motor de CC de campo de derivación: En este método, la variación de velocidad se consigue por medio de una resistencia variable insertada en serie con el campo en derivación. Un aumento en el control de resistencias reduce la corriente con una reducción en el flujo de campo y un aumento en la velocidad. Este método de control de la velocidad es independiente de la carga en el motor. Energía desperdiciada en la resistencia de control es muy inferior en la corriente de campo es un valor pequeño. Este método de control de velocidad también se utiliza en el motor compuesto DC.

Las limitaciones de este método de control de velocidad:

- A. velocidades arrastramiento no se pueden obtener.
- B. Las velocidades máximas sólo obtuvieron a menor torque
- C. La velocidad es máxima en el valor mínimo de flujo, que se rige por el efecto de desmagnetización de la reacción de armadura en el campo.

2. Control de la tensión de campo: Este método requiere un suministro de voltaje variable para el circuito de campo que está separada de la fuente de alimentación principal a la que está conectada la armadura. Tal alimentación variable se puede obtener por un rectificador de electrónica.

### **Control de armadura de motor de CC Derivación**

El control de velocidad por este método implica dos maneras. Estos son:

1. Control de la resistencia del inducido: En este circuito de la armadura método está provisto de una resistencia variable. Campo está conectado directamente a través del flujo de suministro de manera que no se cambia debido a la variación de la resistencia en serie. Esto se aplica para el motor shunt de corriente continua. Este método se utiliza en la impresión de prensa, grúas, montacargas donde las velocidades inferiores nominal se utiliza sólo por un período corto.

2. Control de la tensión del inducido: Este método de control de velocidad necesita una fuente variable de tensión de separado de la fuente de suministro de la corriente de campo. Este método evita los inconvenientes de la regulación de la velocidad pobres y la baja eficiencia de los métodos de control de la armadura de resistencia. El método de control de tensión de armadura básica ajustable de la velocidad d el control se lleva a cabo por medio de un generador de tensión ajustable que se llama sistema de Leonard Ward. Este método implica el uso de un conjunto motor-generador (MG). Este método es el más adecuado para el acero de laminación, máquinas de papel, ascensores, montacargas de minas, etc

Las ventajas de este método -

- A. Control de velocidad muy fina en abanico en ambas direcciones
- B. Se obtiene la aceleración uniforme
- C. Una buena regulación de velocidad

Desventajas -

- A. Se necesita arreglo costoso, el espacio de piso requerido es más
- B. Baja eficiencia en cargas ligeras.

Para el control de velocidad se propone un controlador PI el cual se puede ver en el diagrama de bloques de la figura 2.3.

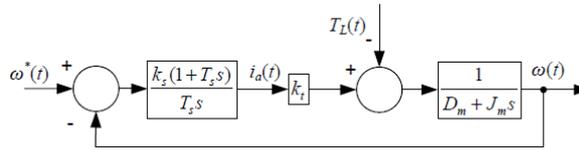


Figura. 2.3: Lazo de control de velocidad.

Fuente: autores

Asumiendo un par de carga nulo, la función de transferencia de lazo cerrado queda expresada de la siguiente manera,

$$G_{S_{LC}} = \frac{\frac{k_s k_t}{J_m} \left( s + \frac{1}{T_s} \right)}{s^2 + \left( \frac{k_s k_t}{J_m} + \frac{D_m}{J_m} \right) s + \frac{k_s k_t}{T_s J_m}} \quad (11)$$

En la Tabla 2.2, se muestran las especificaciones deseadas de la respuesta del lazo de control de velocidad y los valores de  $\zeta$ ,  $\omega_n$ ,  $k_{ps}$  y  $k_{is}$  obtenidos.

PARÁMETRO	VALOR
%OS	0%
$T_s$	100(ms)
$\zeta$	1
$n$	40 (rad/seg <sup>2</sup> )
$k_{ps}$	0.107
$k_{is}$	2.153

Tabla 2.2 Lazo de Control de Velocidad

Fuente: autores

### 2.3 Lazo de Control de Posición.

(Kosow, 2006) comenta al respecto que, al igual que en el diseño del lazo de control de velocidad, la función de transferencia de lazo cerrado del control de posición se puede simplificar eligiendo una velocidad de respuesta 10 veces inferior a la del control de velocidad de manera tal que

este último se pueda considerar instantáneo. En la Figura 2-4 se muestra el diagrama de bloques del lazo de control de posición.

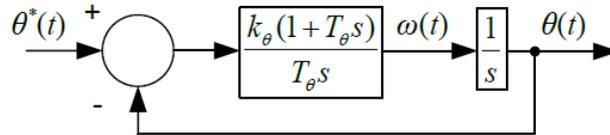


Fig. 2.4: Lazo de control de posición.

Fuente: autores

La función de transferencia de lazo cerrado se puede representar como,

$$G_{\theta_{LC}} = \frac{K_{\theta} \left( s + \frac{1}{T_{\theta}} \right)}{s^2 + K_{\theta} s + \frac{k_{\theta}}{T_{\theta}}} \quad (12)$$

donde  $k_{\theta}$  y  $T_{\theta}$  son la ganancia y la constante de tiempo del controlador de posición. En la Tabla 5 se muestran las especificaciones deseadas de la respuesta del lazo de control de posición y los valores de  $\zeta$ ,  $\omega_n$ ,  $k_{p\theta}$  y  $k_{i\theta}$  obtenidos.

PARÁMETRO	VALOR
%OS	0%
$T_s$	1(s)
$\zeta$	1
$n$	4(rad/seg)
$k_{ps}$	8
$k_{is}$	16

Tabla 2.3. Lazo de Control de Posición.

Fuente: autores

## **2.4 Toolbox de Control de Simulink de Matlab.**

### **2.4.1 Tratamiento mediante Funciones de Transferencia. Sistemas Continuos**

En MATLAB las funciones de transferencia se introducen dando el par de polinomios (numerador, denominador) como argumentos de la función `tf`.

(Muñoz, Sánchez, & Veléz, 2008) Indican que, una forma de convertir una función de transferencia dada por dos polinomios numerador y denominador, en un conjunto de factores de grado 1, correspondientes a los polos ( $p_1, p_2, p_3 \dots$ ) y ceros ( $c_1, c_2$ ), es mediante el comando `tf2zp`, que devuelve un vector conteniendo los ceros de la función de transferencia, un vector conteniendo los polos, y un escalar correspondiente a la ganancia estática. La función complementaria a ésta también existe: `zp2tf`.

### **2.4.2 Dominio Temporal**

La respuesta ante un escalón a la entrada se puede analizar en sistemas que tengan una descripción en forma de función de transferencia o una representación en el espacio de estados, generando un vector de tiempos y usando la función `step`.

No es necesario recuperar el resultado de la simulación ante escalón que realiza `step` para después representarlo con `plot`, sino que el propio comando, utilizado sin parámetros de salida, realiza la representación. Es más, la representación gráfica es interactiva, puesto que si se “pincha” con el botón izquierdo del ratón en algún punto de la gráfica, nos dice los valores correspondientes al tiempo y al valor de la salida en ese punto (véase el ejemplo de la Figura 2.5).

La respuesta impulsional se puede obtener del mismo modo, usando la función `impz`, que tiene una sintaxis similar al comando `step`.

La respuesta del sistema a cualquier tipo de entrada también puede obtenerse. Para ello es necesario tener la señal de entrada en un vector,

que lógicamente deberá tener la misma dimensión que el vector de tiempos. A estos efectos se usa la función `lsim`.

### 2.4.3 Dominio Frecuencial

(Enríquez, 2003) comenta al respecto, que la respuesta en frecuencia de los sistemas se puede obtener usando las funciones Bode, Nyquist y Nichols, tal y como se muestra en la Figura 2.6. Si no se le ponen argumentos a la izquierda, estas funciones generan las gráficas por sí solas. En caso contrario, vuelcan los datos en los vectores de salida oportunos.

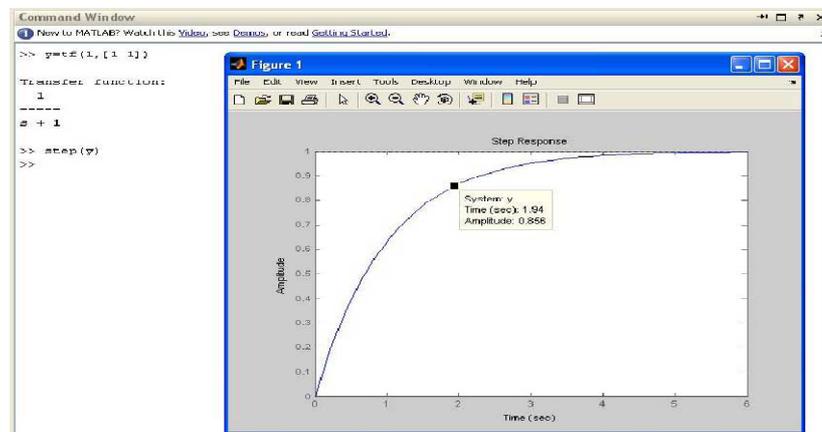


Figura 2.5: Ejemplo de respuesta al escalón de un sistema de primer orden

Fuente: autores

A continuación se presentan ejemplos de las tres posibles sintaxis de la función `bode`:

1. **`bode(num,den)`**: produce un gráfico con la magnitud en decibelios (*dB*) y la fase en grados.
2. **`[mag,phase,w] = bode (num,den)`**
3. **`[mag,phase] = bode (num,den,w)`**

En las opciones 2 y 3 la magnitud se devuelve en el vector `mag` y está expresada en unidades absolutas, no en *dB*. La fase, devuelta en el vector `phase`, sigue siendo en grados. La segunda forma automáticamente genera los puntos de frecuencia en el vector `w`. En la tercera forma es el usuario el

que escoge los rangos de frecuencia, y resulta muy adecuado cuando se quieren representar varias gráficas conjuntamente, que habrán de compartir una misma escala frecuencial.

El resultado de los dos últimos comandos se puede representar usando funciones conocidas:

```
subplot(211), loglog(w,mag), title('Magnitud'), xlabel('rad/s');  
subplot(212), semilogx(w,phase), title('Fase'), xlabel('rad/s');
```

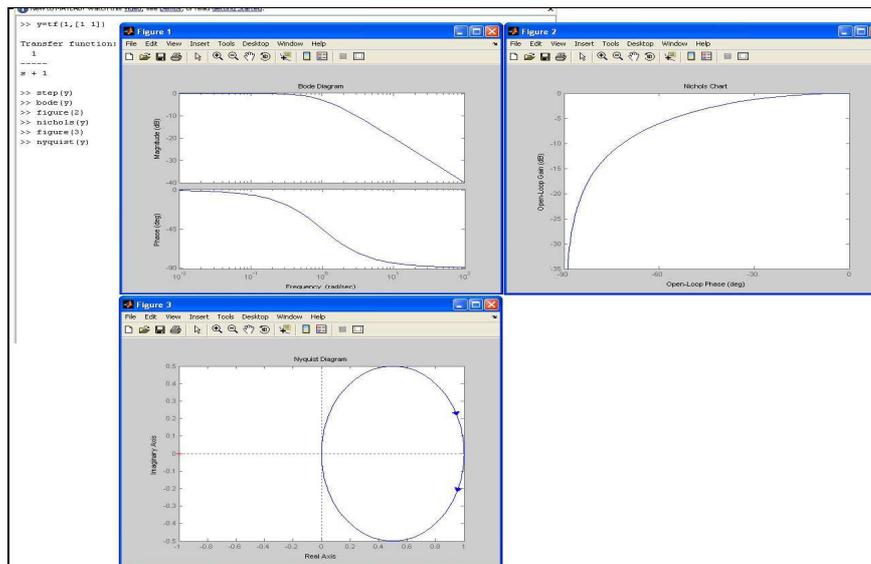


Figura 2.6: Diagramas de Bode, Nyquist y Nichols del ejemplo de la Figura 2.5

Fuente: autores

El comando Nyquist tiene la misma sintaxis. Computa las partes real e imaginaria de  $G(j\omega)$  y realiza la representación si no se le ponen parámetros de salida. Para obtener la representación gráfica por nosotros mismos, sólo hay que dibujar la parte real frente a la imaginaria.

El comando nichols computa el diagrama de Nichols de un sistema a partir de la función de transferencia en bucle abierto. Para verlo basta dibujar la magnitud del bucle abierto en dB (en el eje de ordenadas) frente a fase del bucle abierto en grados (en eje de abcisas), o llamar a la función sin argumento de salida. Si se quiere en forma de ábaco, se puede usar el comando ngrid.

#### **2.4.4 Márgenes de Estabilidad**

Como es bien sabido en la teoría clásica del control, los márgenes de estabilidad son el margen de fase y el margen de ganancia. Estos márgenes se calculan usando el comando margin. Cuando no se le especifican parámetros de salida, se realiza la representación del diagrama de Bode, junto con una indicación, mediante líneas verticales de los puntos donde se mide cada uno de los márgenes y los valores de los mismos.

#### **2.4.5 Efecto de los Retardos**

El autor (Manzanero, 2010) indica que, los retardos existen en numerosas aplicaciones de control automático. En sistemas lineales continuos invariantes en el tiempo, el retardo viene representado por  $e^{-sT}$ . La forma más sencilla de manipular los retardos en MATLAB es en el dominio de la frecuencia. Nótese que  $e^{-j\omega T} = 1|-wT$ . Por tanto, los retardos dejan la magnitud invariable y afectan al desfase, tendiendo a inestabilizar al sistema controlado.

Para propósitos de representación mediante el comando bode, todo lo que habrá que hacer es restar la fase del retardo a la de la función de transferencia.

#### **2.4.6 Lugar de las Raíces**

El análisis mediante el lugar de las raíces se puede obtener definiendo un vector de ganancias deseadas (que es el parámetro usado habitualmente para ver la evolución de los polos en bucle cerrado). La sintaxis es:

```
r = rlocus (N,D,K);  
rlocus (N,D);
```

En la primera forma, calcula el lugar de las raíces de  $1 + k \frac{N(s)}{D(s)} = 0$ , para un vector de ganancias especificado, K. rlocus devuelve una matriz r con

length(K) filas y length(den) columnas, conteniendo la localización de las raíces complejas. Cada fila de la matriz corresponde a una ganancia del vector K. El lugar de las raíces puede ser dibujado con plot(r,'x').

En la segunda forma, que es la usada habitualmente, la función directamente dibuja el lugar de las raíces. Además, como vemos, no es imprescindible indicar un vector de ganancias.

Un comando muy útil como complemento a rlocus es rlocfind, cuya sintaxis general es:

**[K,polos] = rlocfind (num,den)**

Antes de introducir dicho comando es necesario haber dibujado el lugar de las raíces. Al introducir rlocfind, se pide que se seleccione con el ratón un punto determinado del lugar, proporcionando como resultado la ganancia K en dicho punto y la localización de los polos correspondientes a esa ganancia. Para mejorar la precisión, puede realizarse un zoom en torno a una zona de interés en la gráfica, antes de ejecutar la orden.

Otra utilidad para ver la sobreoscilación que correspondería a un par de polos complejos conjugados situados en el lugar, sería dibujar los lugares geométricos de factor de amortiguamiento ( $\delta$ ) y frecuencia natural ( $\omega_n$ ) constantes, mediante el comando sgrid.

Las nuevas versiones de MATLAB van más allá y ofrecen una herramienta interactiva para ir viendo en vivo las variaciones que sufre el lugar de las raíces, conforme se añaden, eliminan y mueven los polos y ceros de bucle abierto. A esta herramienta se accede mediante el comando rltool, cuya ventanas principales se muestran en las figuras 2.7 y 2.8.

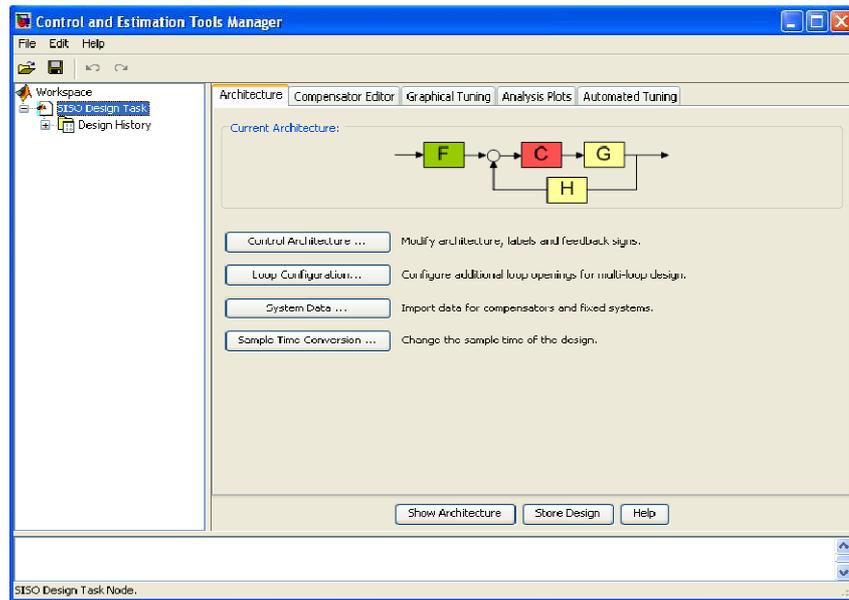


Figura 2.7 Ventana principal de la herramienta rtool

Fuente: autores

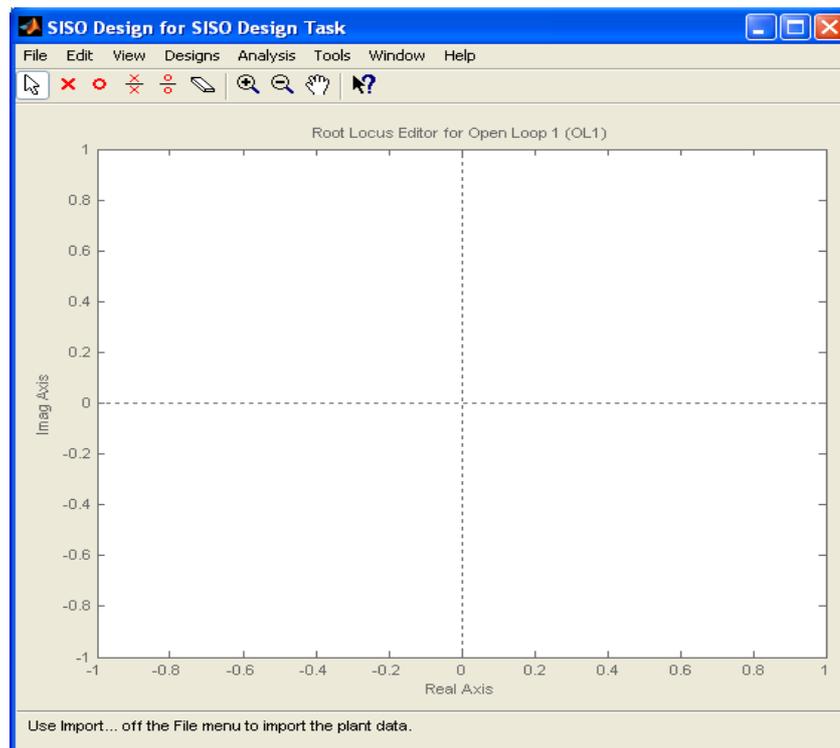


Figura 2.8: Ventana para el diseño de sistemas SISO

Fuente: autores

## 2.5 Sistema de Control PID

PID es un algoritmo usado en lazos de control realimentado para regular un proceso como el movimiento de un motor o el flujo de una válvula. Usando controles PID haremos que el diseño sea más estable, robusto y que tenga un potencial de respuesta para mejorar sus características.

### 2.5.1 Algoritmo PID

Un controlador Proporcional – Integral – Derivativo, es el algoritmo de control más utilizado en la industria y ha sido universalmente aceptado en la industria de control. La popularidad de los controladores PID puede ser atribuida parcialmente a su robusta performance en un amplio rango de condiciones de operación y parcialmente a su sencilla funcionalidad la cual permite a los ingenieros operarlos en una forma simple y permanente.

Como su nombre lo sugiere; un algoritmo PID consiste de tres coeficientes básicos: proporcional, integral y derivativo. Esas ganancias son variadas hasta alcanzar la óptima respuesta del sistema.

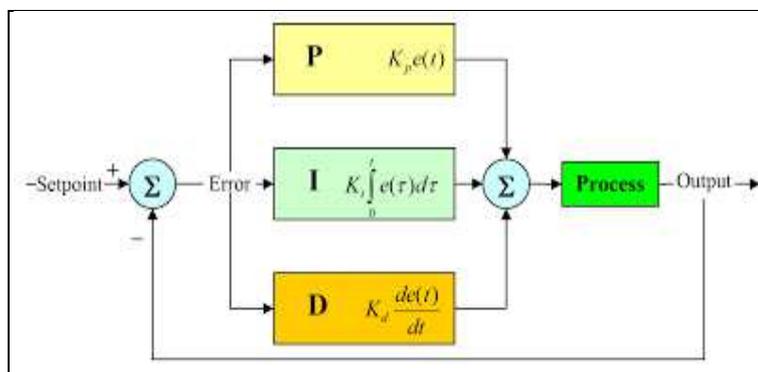


Figura 2.9 Controlador proporcional, integral y derivativo

Fuente: <http://electroinfoingenieria.blogspot.com/2013/05/control-pid.html>

La estructura básica de un sistema de control con PID implementado se mostró en la figura anterior. Se lee la salida del sistema (también llamada variable de proceso) con un sensor y se la compara con un valor de referencia (también llamado set point). La comparación de la referencia y la medición de la salida devuelven un valor de error el cual es utilizado para calcular las respuestas proporcional, integral y derivativa. Esas tres

respuestas son sumadas para obtener la salida del controlador. La salida del controlador es usada como una entrada al sistema que se quiere controlar, cambiando algunos de los aspectos del sistema.

Por ejemplo; como en esta tesis, se requiere controlar un motor y el controlador debe proveer más o menos corriente, la salida del sistema es medida nuevamente y otra vez el proceso se repite. Un proceso completo de este tipo es denominado es llamado iteración de control de lazo cerrado.

### 2.5.2 Sintonización de un Controlador PID

Un controlador PID necesita ser “sintonizado” (configuración de las ganancias PID a valores apropiados para el sistema donde se encuentra instalado) para funcionar apropiadamente. El funcionamiento del sistema de control es definido por un conjunto de mediciones hechas cuando se aplica función de entrada step específica como el comando variable set point (variando de 0% a 100% del valor instantáneo de la salida) y la medición de la respuesta de la variable de proceso. Esas mediciones son mostradas en el gráfico de respuesta de sistema a una entrada step que visualizamos a continuación:

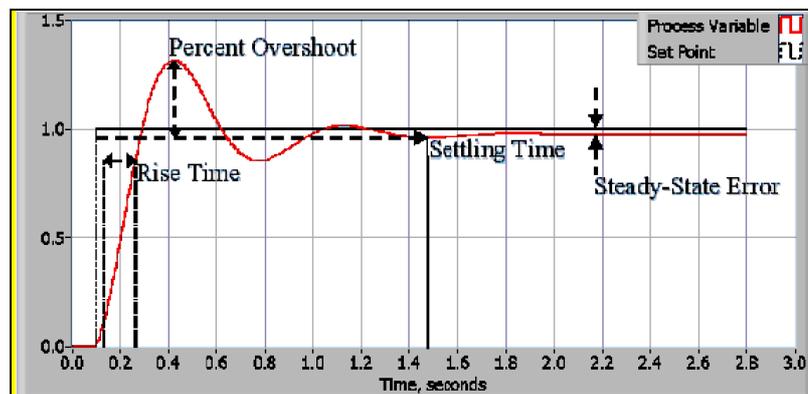


Figura 2.10 Respuesta del sistema de control PID

Fuente: autores

Cuando sintonizamos un controlador podemos obtener sistemas sobre compensados, críticamente compensados o descompensados. En la mayoría de aplicaciones robóticas un pico excesivamente grande (sobre compensado) es inaceptable y puede causar daños en el sistema. La

mayoría de los sistemas robóticos son sobre compensados pero en lo posible no deben exceder su setpoint. El éxito de la sintonización de esos sistemas es entonces el decrecimiento de ese pico y el alcance del estado estacionario que permita operar con el mejor grado de funcionamiento posible de acuerdo a los requerimientos.

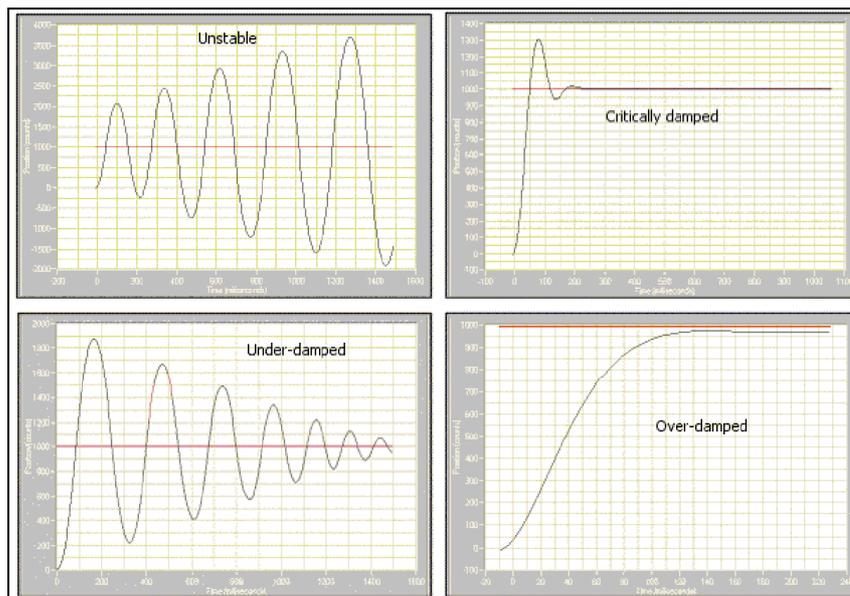


Figura 2.11: Características de las respuestas a la sintonización de controladores PID

Fuente: autores

Un sistema inestable produce una oscilación exponencialmente divergente de la respuesta al impulso. Esto ocasiona que el sistema nunca se asiente y esas oscilaciones tiendan a empeorarse cada vez más.

Un sistema descompensado ocasiona una ligera respuesta oscilatoria que eventualmente saldrá de compensación. Se caracteriza por una gran sobrecompensación inicial y un largo periodo de inestabilidad que va recortando el nivel de las oscilaciones en intensidad hasta reducir casi al mínimo.

(Kosow, 2006) Comenta que, un sistema críticamente compensado provee un balance intermedio entre los sistemas sobre y descompensados. Este tipo de sistemas mejora el tiempo de respuesta del rizado y los efectos de la compensación, también es caracterizado por una baja sobre

compensación, cortos rizados y tiempos menores comparados con sistemas sobre compensados y un gran tiempo de pico de rizado comparado con los sistemas descompensados.

Un sistema sobre compensado produce perturbaciones y baja respuesta al impulso, es caracterizado por la no existencia de rebotes y un largo tiempo de rizado y tiempos de ajuste.

## Capítulo III: Adquisición de Datos

Cada dispositivo de computador (monitor, disco duro, tarjeta de sonido, impresoras, etc.) tiene un programa (driver) que comunica a éste con el computador, usualmente a nivel de sistema operativo. MATLAB tiene una sintaxis uniforme y no cambia con el dispositivo utilizado, sus comandos se comunican con esos drivers. Ellos actúan como adaptadores, usualmente uno por cada fabricante.

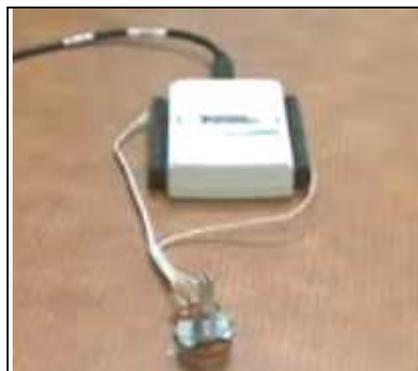
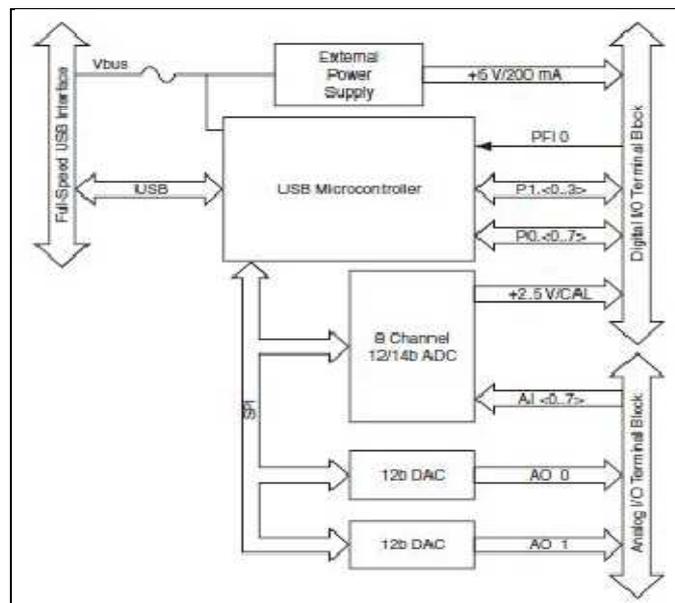


Figura 3.1: Dispositivo de adquisición de datos USB-6009.

Fuente: [http://informaciona.com/video/adquisicion-de-entradas-analogicas-y-registro-de-datos-con-la-usb-6009\\_bytSJW7R6rs](http://informaciona.com/video/adquisicion-de-entradas-analogicas-y-registro-de-datos-con-la-usb-6009_bytSJW7R6rs)

La tarjeta NI USB 6009 de la figura 3.1, tiene como características principales las siguientes:

- Entradas analógicas: 8 canales (0-7) de 14 bits de resolución de hasta  $\pm 5V$ .
- Salidas analógicas: 2 canales (0-1) de 12 bits de resolución de hasta  $\pm 5V$ .
- 12 E/S digitales tipo TTL/CMOS.
- Máxima velocidad de muestreo: 48 ks/s.
- Contador de 32 bits, a 5 MHz.
- Tarjeta de tipo USB.
- Incorpora un software de *National Instruments* para la verificación de la tarjeta, la generación y lectura de señales.

Todos estos comandos para los dispositivos de adquisición de datos; desde un práctico punto de vista trabajan fuera de línea, tales como get, set, setverify, daqhwinf, inspect, propinfo...pueden llamar a todos los atributos a los cuales pueden acceder como cambio o necesidad de conocer característica alguna.

Un caso de estudio respecto del uso de las salidas analógicas del USB-6009 de National Instruments, propone en términos generales que una salida analógica trabaja de la siguiente manera: Primero, se puede proponer un voltaje de salida en un canal con un comando putsample ().

O segundo, se puede poner en cola (en la máquina driver del adaptador) un vector de (considerando que el dispositivo se llamare MyData) voltajes analógicos que ud quiera emitir sobre un canal pero usando un comando putdata (ao, MyData). Debe configurarse la velocidad para esas salidas usando set (ao, 'SampleRate') Después de iniciar el objeto ao debe proponer un trigger ao y los valores son enviados a la línea a la velocidad especificada igual como un objeto de entrada analógica.

### **3.1 Software de verificación de Tarjeta de DAQ-USB 6009.**

La tarjeta NI USB 6009 incorpora un software para la verificación de sus entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Al ser una tarjeta tipo

USB, una vez instalado su controlador en cualquier ordenador, al conectarla en el PC éste la detecta y aparece el menú de la figura 3.2.

A partir de este menú se puede acceder a diferentes aplicaciones de National Instruments: NI LabVIEW, NI LabVIEW SignalExpress (herramienta de LabVIEW para el tratamiento y análisis de señales), el interfaz de verificación de la tarjeta (Test Panels, entre otras..

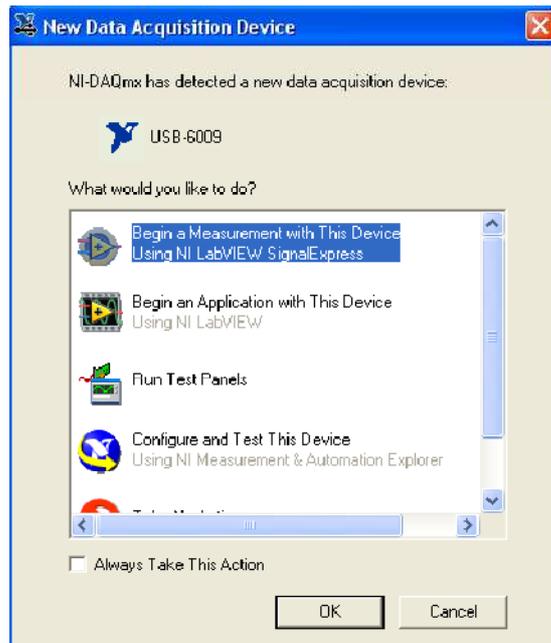


Figura 3.2 Menú que aparece al conectar la tarjeta NI USB 6009

Fuente: autores

El software Test Panels es bastante útil, puesto que nos va a permitir verificar las entradas y salidas de la tarjeta que se están usando. El aspecto de este software es el que se muestra en la figura 3.3 (a). Como puede verse, en la parte de arriba se selecciona la pestaña correspondiente a lo que se quiere verificar: entradas analógicas, salidas analógicas, entradas/salidas digitales o contadores.

En cada caso, se debe elegir el canal y ajustar los parámetros específicos, tal y como se representa en la figura 3.3 (b).

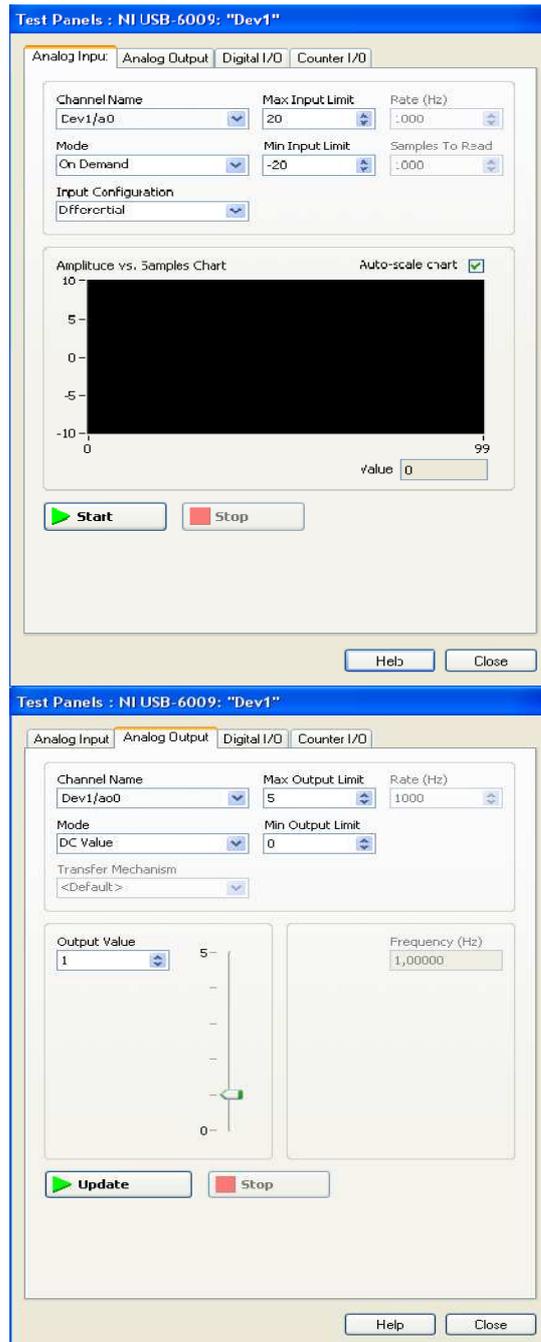


Figura 3.3(a) y (b): Ventana para la prueba de las entradas y salidas analógicas de la tarjeta

Fuente: autores

Si se quiere visualizar la señal analógica que se está capturando por uno de los canales, es necesario darle al botón Start. Por su parte, para generar un voltaje de salida, una vez seleccionado el modo y el valor, se le da al botón Update.

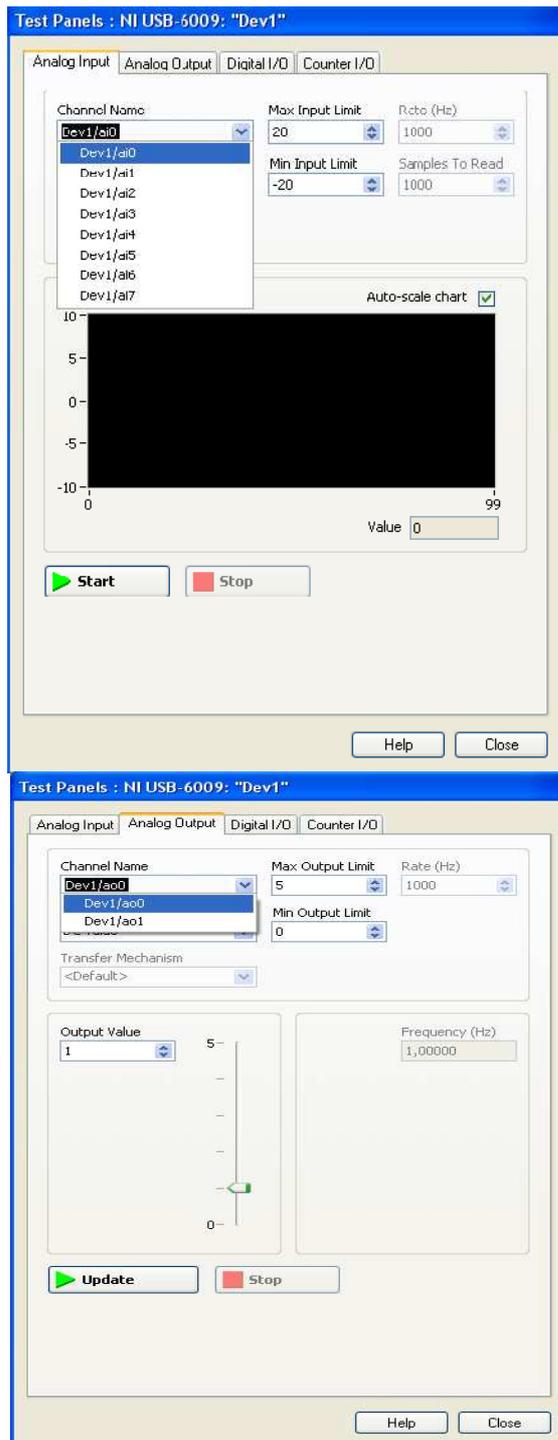


Figura 3.4: Selección del canal de la entrada y salida analógica de la tarjeta

Fuente: autores

### **3.2 Establecimiento de una sesión de Adquisición de Datos**

Una sesión completa de adquisición de datos consta de cinco pasos:

1. Creación de un dispositivo de adquisición de datos
2. Adición de canales o líneas para el dispositivo
3. Configuración de los valores de las propiedades para controlar el comportamiento de su aplicación de adquisición de datos
4. Adquisición de datos (AI) o la Salida de datos (AO)
5. Limpieza de canales

### **3.3 Creación de Dispositivos de Adquisición de Datos (Canales I/O)**

Para crear un objeto de dispositivo, debe llamar a la función de creación correspondiente (constructor). Como se muestra a continuación, las funciones de creación se nombran para el dispositivo objeto que crean.

<b>TIPO DE CANAL</b>	<b>FUNCIÓN DE CREACIÓN</b>
Analog Input	Analoginput ('adaptor',ID);
Analog Output	Analogoutput ('adaptor',ID);
Digital I/O	Digitalio ('adaptor',ID);

Tabla 3.1 Creación de funciones en tarjeta DAQ

Fuente: autores

Según el manual de (Pulido & Castilla, 2003), el ID es el identificador de dispositivo de hardware. Este es un argumento opcional para tarjetas de sonido con un ID de 0, adaptador es el nombre del adaptador de controlador de hardware.

Los adaptadores soportados se muestran a continuación.

PROVEEDOR DE HARDWARE	NOMBRE DEL ADAPTADOR
Advantech®	advantech
Measurement Computing™	mcc
National Instruments®	nidaq
Parallel port	parallel
Microsoft® Windows® sound card	winsound

Tabla 3.2 Tipos de adaptadores para el NI USB 6009

Fuente: autores

Por ejemplo, para crear un objeto de entrada analógica ai para un dispositivo de adquisición de datos USB-6009 de National Instruments:

**ai = analoginput ('nidaq', 'Dev1');**

Donde Dev1 es la identificación del dispositivo USB; esto se puede verificar en el MAX de National Instruments.

### 3.3.1 Adición de Canales o Líneas para el Dispositivo

Antes de utilizar un dispositivo, debe agregar al menos un canal o línea al mismo. Para agregar canales a un dispositivo, debe utilizar la función addchannel. Por ejemplo, para agregar dos canales para ai:

**chans = addchannel (ai, 01:02);**

Usted puede pensar en un dispositivo como un canal o un contenedor de línea, los canales añadidos como un grupo de canales y las líneas añadidas como un grupo de líneas. La relación entre un objeto de entrada analógica y los canales que contiene se muestra a continuación.

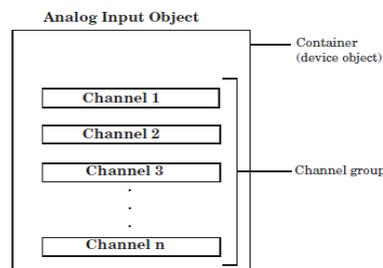


Figura 3.5: Agrupación de canales en DAQ

Fuente: autores

### **3.3.2 Configuración de valores de las Propiedades**

Se puede controlar el comportamiento de la aplicación de adquisición de datos por medio de la configuración de sus propiedades. Las reglas asociadas a la configuración de propiedades incluyen:

- Los nombres de propiedades no distinguen entre mayúsculas y minúsculas.
- Puede abreviar los nombres de propiedad.
- **set (ai)** devuelve todas las propiedades configurables para ia, mientras que **set (ai.Channel (index))** devuelve todas las propiedades configurables para el canal especificado.
- **get (ai)** devuelve los valores de las propiedades actuales de ia, mientras que **get (ai.Channel (index))** devuelve los valores de las propiedades actuales para el canal especificado.

### **3.3.3 Tipos de Propiedades**

Las cajas de herramientas de propiedades se dividen en estos dos tipos principales:

- Las propiedades comunes que se aplican a cada canal o línea de contenidos en un dispositivo.
- Propiedades Canal/línea que permiten configurar canales o líneas individuales.

Las propiedades comunes y de canal/línea se dividen en estos dos tipos:

- Propiedades de Base que se aplican a todos los subsistemas de hardware compatibles de un mismo tipo (AI, AO, DIO)
- Propiedades de dispositivos específicos que se aplican al hardware específico que esté utilizando

Las propiedades de establecer y obtener graficador seguido de las propiedades específicas del dispositivo.

### **3.3.4 Sintaxis de Propiedades**

Puede configurar y recuperar los valores de propiedades de tres maneras: por medio de las funciones get o set, notación de puntos, o nombre indexado.

La sintaxis de las funciones get y set son similares a las sintaxis de get o set de Handle Graphics®.

```
out = get(ai,'SampleRate');  
set(ai,'SampleRate',11025)
```

La notación de puntos tiene la siguiente sintaxis:

```
out = ai.SampleRate;  
ai.SampleRate = 11025;
```

La Indexación de Nombre permite asociar un nombre descriptivo, con un canal o línea. Por ejemplo, para asociar el nombre Chan1 con el primer canal de contenido por ai:

```
set(ai.Channel(1),'ChannelName','Chan1');  
out = ai.Chan1.UnitsRange;  
ai.Chan1.UnitsRange = [0 10];
```

### **3.3.5 Adquiriendo los Datos**

Para adquirir (AI) o sacar (AO) datos, usted debe:

- Inicializar el dispositivo
- Registrar o enviar datos
- Detener el dispositivo

#### **3.3.5.1 Inicializar el Dispositivo**

Para inicializar el dispositivo, utilice la función start.

Start (ai). Luego de que el dispositivo es inicializado, la propiedad Runing (ai) o Sending (ao) es automáticamente puesta en ON.

### 3.3.5.2 Emisión de un Disparo

Para iniciar una sesión de datos en el motor o un archivo de disco (IA), o para la salida de datos del motor (AO), debe producirse un disparo. Los tipos de disparo compatibles con todo el hardware son los siguientes.

Trigger Type	Descripción
<b>Immediate</b>	El disparo se produce justo después de emitir el comienzo. Este es el tipo de disparo predeterminado.
<b>Manual</b>	El disparo se produce después de ejecutar manualmente la función de disparo.
<b>Software (AI only)</b>	El disparo se produce cuando se detecta una señal que satisface una condición especificada. Debe especificar un canal como fuente de disparo.

Tabla 3.3 Descripción de las formas de disparo

Fuente: autores

Después de producirse el disparo, la propiedad de registro (AI) o envío (AO) se establece automáticamente en On.

### 3.3.5.3 Deteniendo un Dispositivo

Un objeto de dispositivo se detiene cuando se adquiereN los datos solicitados (AI) o se generan los datos de salida (AO), se produce un error en tiempo de ejecución, o bien se emite una función de parada.

stop (ai)

## 3.4 Consultar información en el DAQ conectado en el computador

Una vez instalado el USB-6009 ejecutar el siguiente comando:

**daqwinfo nidaq**

Matlab responderá indicando el nombre, versión y demás datos relativos al hardware USB instalado:

**AdaptorDIName: [1x75 char]**

**AdaptorDIVersion: '2.11 (R2007b)'**

**AdaptorName: 'nidaq'**

**BoardNames: {'USB-6009'}**

**InstalledBoardIds: {'Dev1'}**

**ObjectConstructorName: {1x3 cell}**

Luego para hacer una verificación si el dispositivo de adquisición de datos está conectado y funcionando ejecutar los siguientes comandos y visualizar la medición realizada:

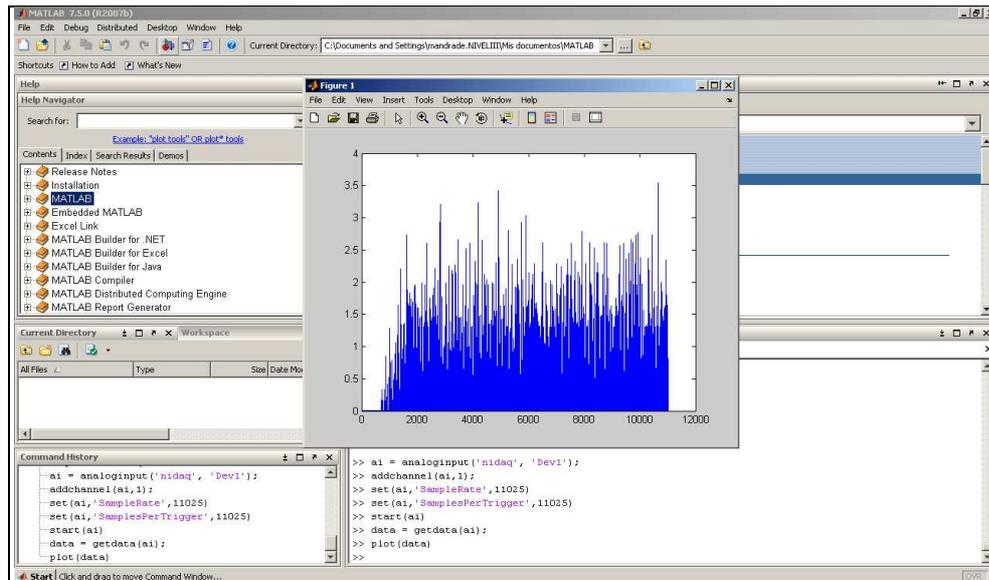


Figura 3.6: Visualización de canal DAQ activado

Fuente: autores

### 3.4.1 Comandos a ejecutar:

Para desarrollar una tarea de adquisición de datos se deberán ejecutar las instrucciones en la secuencia indicada a continuación:

#### Cree un dispositivo

Crea la entrada analógica ai en la tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

**ai = analoginput ('nidaq', 'Dev1');**

#### Añadir canales

Añade dos canales de hardware de ai.

**addchannel (ai, 01:02);**

**Configure las características de la medición**

Configurar la frecuencia de muestreo a 44,1KHz y recoger 1 segundo de datos (44.100 muestras) para cada canal.

**set (ai, 'SampleRate', 44100)**

**set (ai, 'SamplesPerTrigger', 44100)**

**Adquirir los datos**

Iniciar la adquisición y emisión esperan en la ventana de comandos de MATLAB hasta que se adquieran la totalidad de los datos. Cuando todos los datos son adquiridos, espere que el cursor esté activo nuevamente en la ventana de comandos y los datos estén disponible para leerlos y visualizarlos con el comando getdata.

**start (ai)**

**wait (ai, 2)**

**data = getdata (ai);**

**plot (datos)**

**Limpiar los datos**

Cuando ya no necesite ai, debe eliminar las mediciones realizadas de la memoria y el espacio de trabajo de MATLAB.

**delete (ai)**

**clear ai**

**3.5 Toolbox de Adquisición de Datos**

La herramienta de adquisición de datos, Data Acquisition Toolbox (DAQ), incluye varias librerías DLL's que habilitan un interfaz entre MATLAB y un hardware específico, como por ejemplo, hardware/tarjetas de adquisición de datos de compañías/vendedores Advantech, Agilent Technologies, Keithley, National Instruments, tarjetas de sonido de Windows, puertos paralelos LPT1-LPT3

Esta herramienta dispone de cuatro bloques de SIMULINK, tal y como se muestra en la Figura 16, referidos a entradas/salidas analógicas y digitales. Una vez incluidos en el fichero de SIMULINK, cada uno de estos bloques reconoce todos aquellos dispositivos hardware que estén conectados. Sólo

habrá que seleccionar el canal que se va a utilizar y el periodo de muestreo (ver figura 3.7).

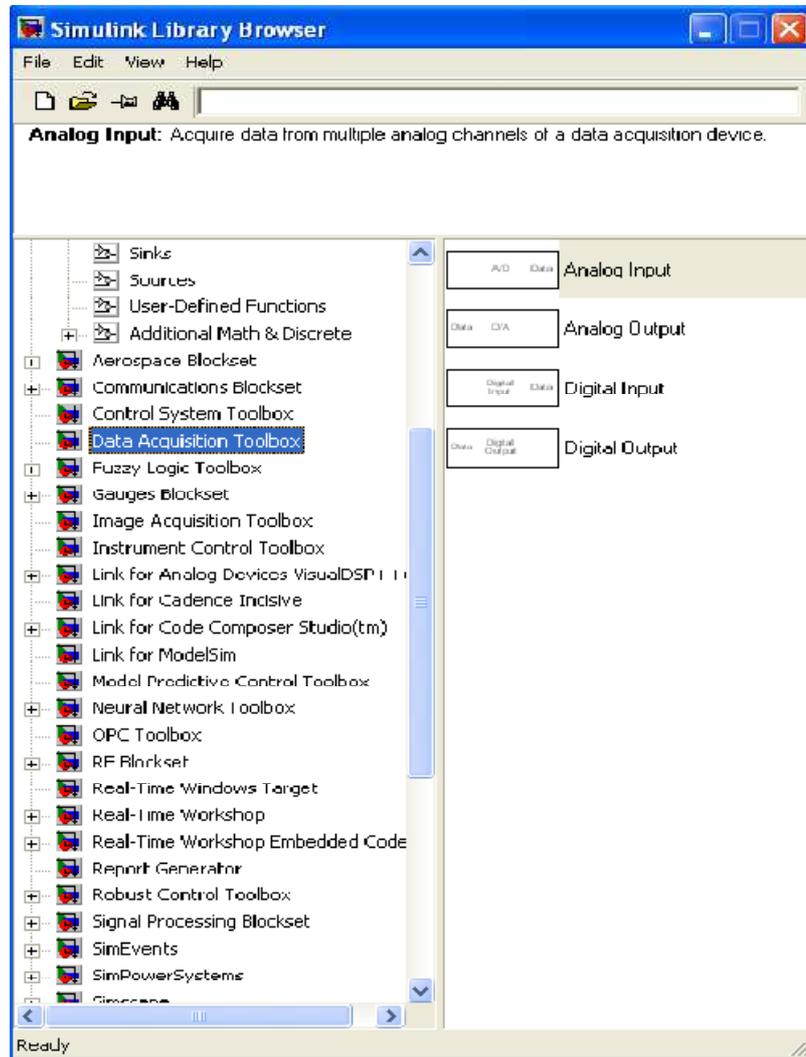


Figura 3.7 Bloques de la herramienta DAQ

Fuente: autores

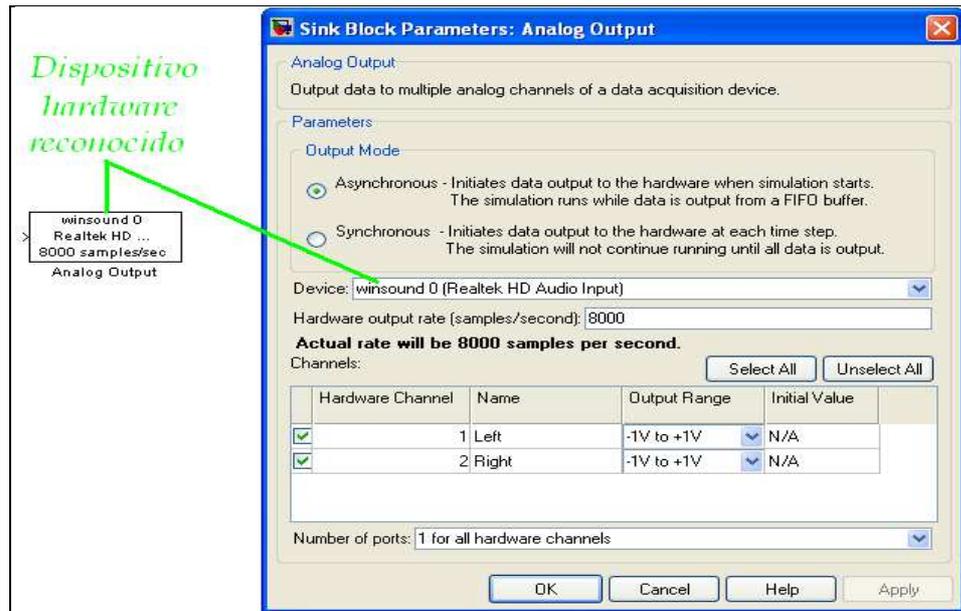


Figura 3.8: Bloques de la herramienta DAQ

Fuente: autores

Desde el menú Start (figura 3.9), se puede acceder a una serie de herramientas adicionales de DAQ, como el osciloscopio y un generador de funciones (asociados a un hardware determinado). También se puede acceder a los tutoriales o la ayuda.

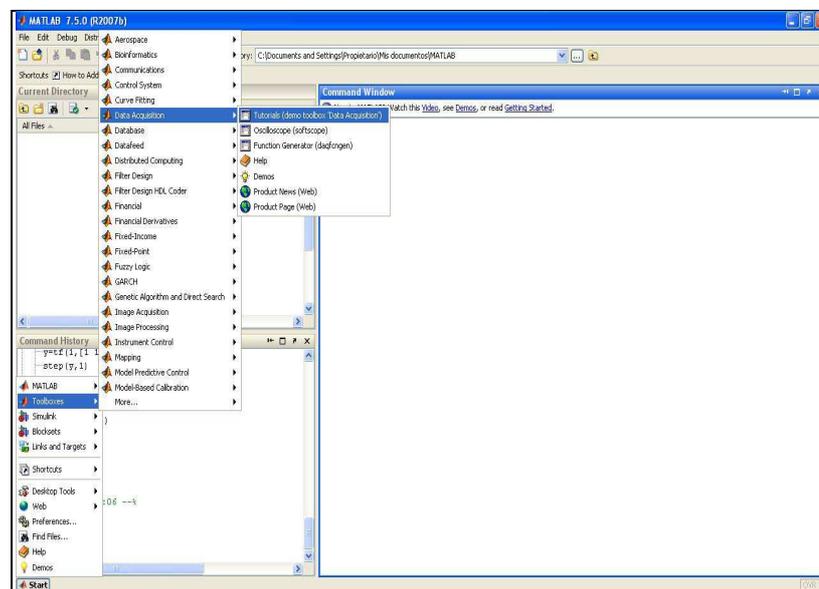


Figura 3.9 Acceso algunas herramientas adicionales de DAQ

Fuente: autores

### Capítulo IV: Análisis de Mediciones y Simulaciones Realizadas

Con el fin de evaluar el desempeño del motor, se realizaron simulaciones utilizando el paquete SIMULINK de MATLAB, en particular, la librería SimPowerSystems la cual permite simular sistemas eléctricos y electrónicos de potencia.

Para evaluar el desempeño del lazo interno de control de velocidad se desacopló el lazo externo de posición y se realizaron una serie de ensayos. En la figura 4.1, se muestra la velocidad y corriente del motor durante el arranque. Se puede observar que la velocidad del motor alcanza el valor de referencia (50rad/seg) en el tiempo establecido en el diseño de control (100ms). El pequeño sobrepaso se debe al efecto producido por el cero de la función de transferencia de lazo cerrado el cual es aportado por el controlador PI de velocidad.

Si bien, el efecto del cero no fue contemplado cuando se sintonizaron las ganancias del controlador, en la simulación se puede observar que el mismo no es significativo y la respuesta transitoria cumple con las especificaciones de diseño.

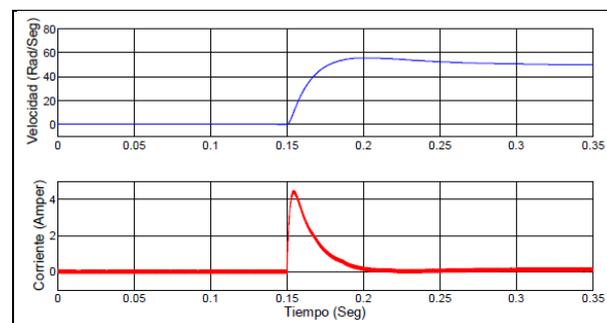


Figura 4.1 Arranque del motor

Fuente: autores

En la figura 4.2, se muestra la respuesta de la velocidad y corriente del motor durante la detención. La velocidad inicial es de 50rad/seg y el cambio de referencia se produce a los 150ms del inicio de la simulación. En la figura se observa que la respuesta transitoria de la velocidad cumple con las especificaciones de diseño y además, el sentido de la corriente se invierte.

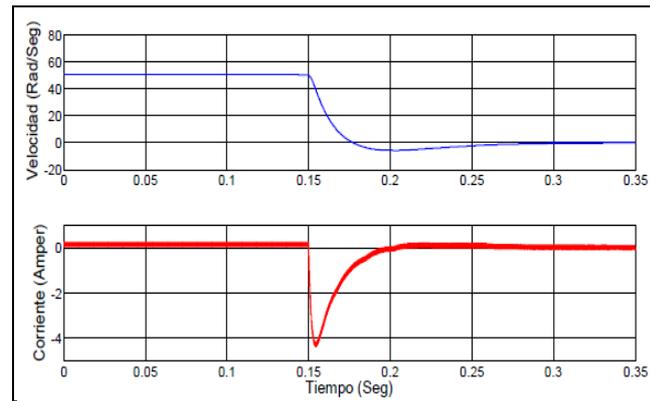


Figura 4.2 Detención del motor.

Fuente: autores

La respuesta del motor en la inversión del sentido de giro se muestra en la figura 4.3. Al iniciar la simulación el motor gira en sentido directo a una velocidad de 25rad/seg. A los 150ms se requiere la inversión del sentido de giro con un valor de referencia de -30rad/seg. El tiempo de asentamiento y el sobrepaso máximo se encuentran dentro de los valores esperados.

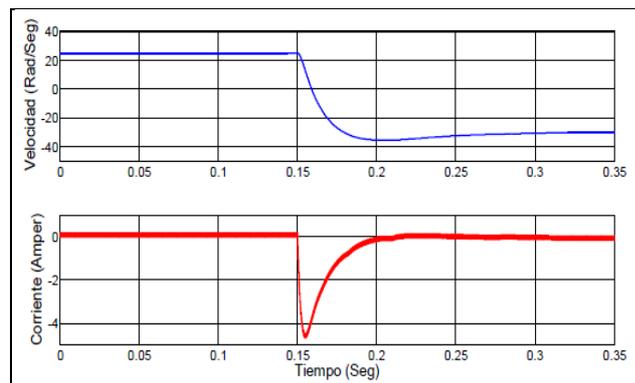


Figura 4.3 Inversión del sentido de giro.

Fuente: autores

En la figura 4.4, se muestra la respuesta del motor ante un escalón de carga de 0,15N.m. Como se puede observar, al aplicar el par de carga el lazo de control de velocidad junto con el lazo interno de corriente compensan el error de velocidad producido por la perturbación en un tiempo de 100ms.

La corriente se establece en un valor aproximado de 1,6A, esto produce el par necesario para mantener la velocidad en el valor de referencia (50rad/seg).

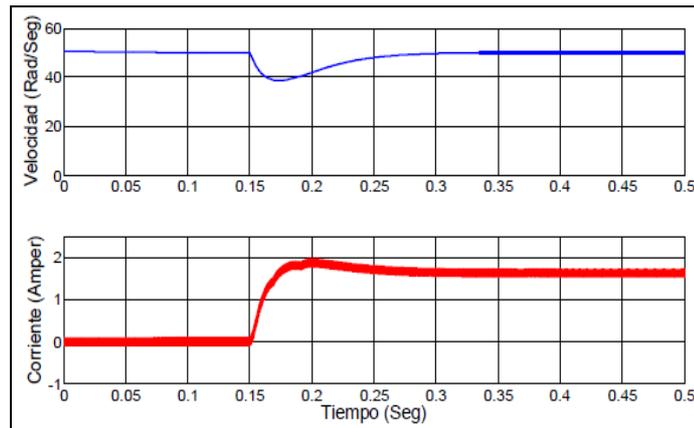


Figura. 4.4 Respuesta al escalón de carga.

Fuente: autores

#### 4.1 Control de Posición

En la figura 4.5 se puede ver la respuesta del motor cuando se controla la posición. Al inicio de la simulación se establece la referencia de posición en un valor de  $\pi$  radianes. Se observa en la figura que la posición alcanza el valor de referencia en un tiempo de 1s, el cual coincide con el valor impuesto en el diseño.

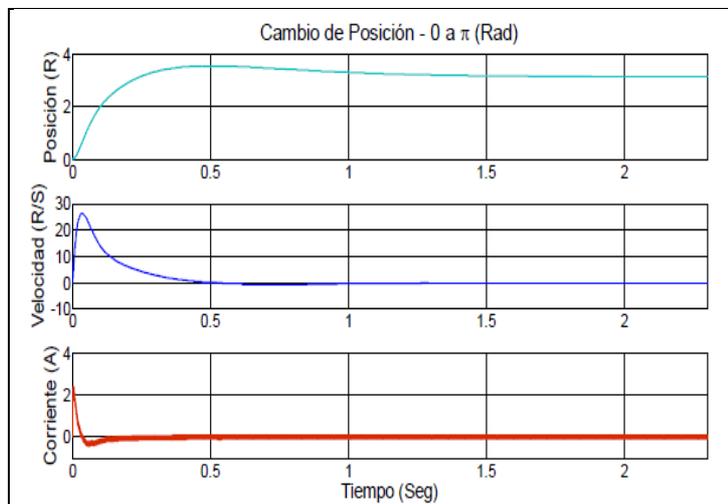


Figura 4.5 Cambio de posición.

Fuente: autores

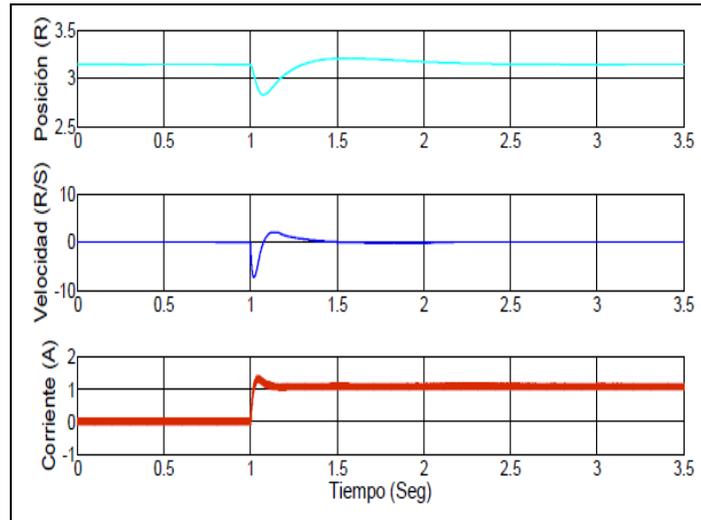


Figura4.6 Respuesta al escalón de carga.

Fuente: autores

En la figura 4.6 se muestra la respuesta del lazo de control de posición cuando se aplica un escalón de carga de 0,1N.m. Se observa en la figura que el efecto producido por la perturbación de carga es compensado por el lazo de control manteniendo finalmente la posición en el valor de referencia.

## 4.2 Resultados Experimentales.

Para validar el comportamiento del motor utilizando los controles diseñados, se realizaron ensayos donde se evaluó la respuesta dinámica de la posición, velocidad y corriente de la máquina en situaciones similares a las evaluadas en simulación. (Ver en anexo 1, las imágenes de pruebas)

### 4.2.1 Control de Velocidad.

En la figura 4.7, se muestra la respuesta dinámica de la velocidad y corriente del motor durante el arranque. Al igual que en simulación, la referencia de velocidad se fija en un valor de 50rad/seg. Se observa que la respuesta transitoria de la velocidad cumple con las especificaciones de diseño. El pico de corriente inicial es el responsable de producir la aceleración necesaria para que la velocidad alcance el valor de referencia en el tiempo establecido.

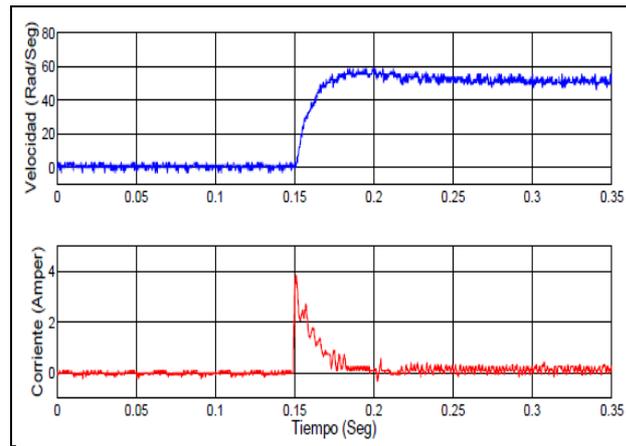


Figura4.7 Arranque del motor.

Fuente: autores

En la figura 4.8, durante la detención, se puede ver que al momento de requerir la detención se produce un pico de corriente en sentido inverso, el cual produce la desaceleración necesaria para que el motor se detenga en el tiempo requerido.

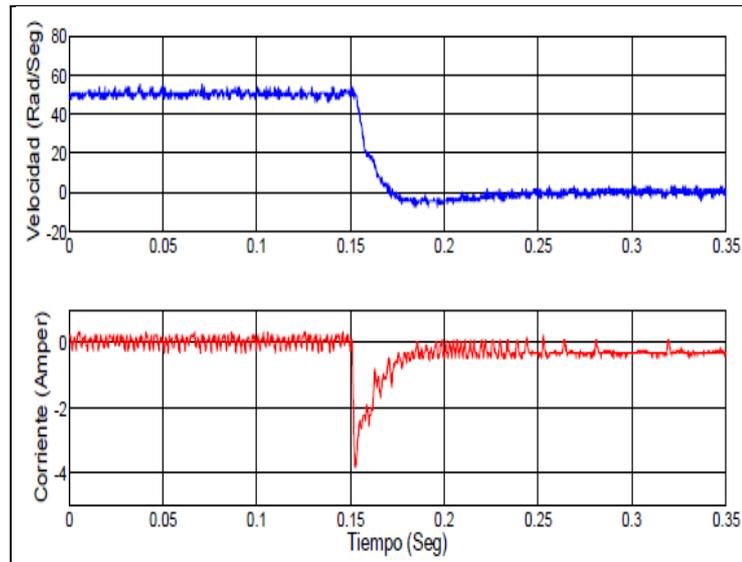


Figura4.8 Detención del motor.

Fuente: autores

En la figura 4.9 se presentan las curvas de velocidad y corriente obtenidas durante el ensayo de inversión del sentido de giro. El ensayo es similar al realizado en simulación donde los parámetros de la respuesta transitoria coinciden con los establecidos en el diseño.

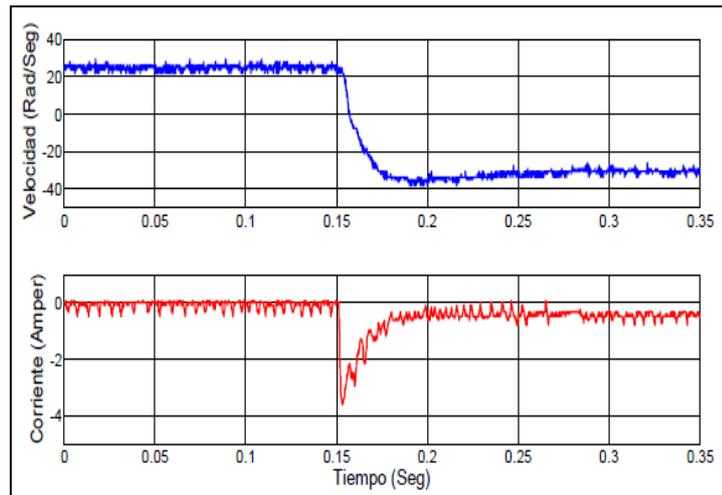


Figura 4.9: Inversión del sentido de giro.

Fuente: autores

#### 4.2.2 Control de Posición

En la figura 4.10, se puede ver la respuesta del motor cuando se cierra el lazo de control de posición. Al inicio del ensayo se impone una posición de referencia con un valor de  $\pi$  radianes. Se observa en la figura que la posición se establece en el valor deseado en un tiempo de 1s, el cual coincide con el valor obtenido en simulación.

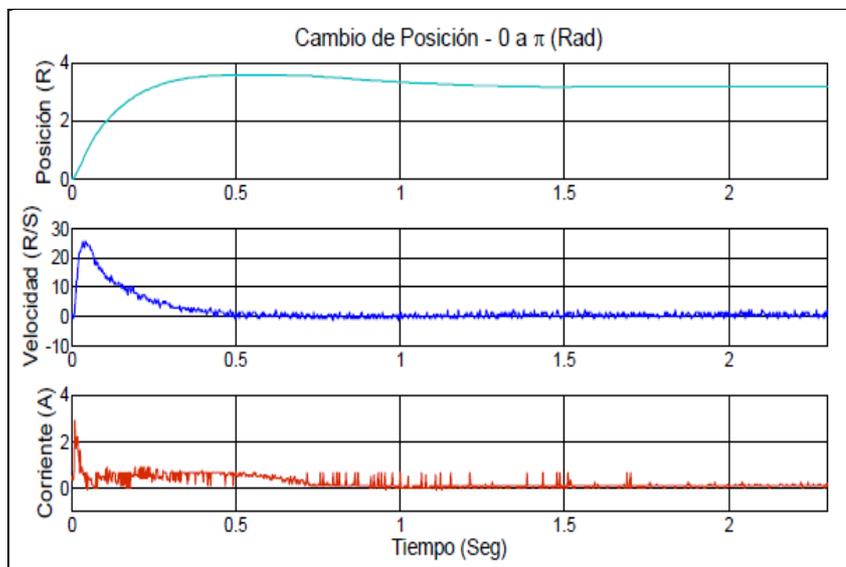


Figura. 4.10 Cambio de posición.

Fuente: autores

## **Capítulo V: Conclusiones**

En la actualidad los motores de inducción, motores de escobillas y motores sincrónicos han ganado un amplio espacio en el uso de sistemas de tracción eléctrica. Incluso los esfuerzos orientados al mercadeo han hecho que los motores dc puedan ser complementados con el diseño de innovadoras técnicas de control.

El modelado es un proceso mediante el cual se elabora una representación matemática que simboliza de manera simplificada un sistema real, y de esta manera, poder analizar su comportamiento, el mismo que es fundamental a la hora de tomar decisiones, tanto para su perfeccionamiento o para el control de alguna función específica.

Se demostró que el método de identificación de sistemas analizado en el presente trabajo, es una herramienta muy eficiente y de gran ayuda cuando se precisa determinar un modelo matemático de un sistema dinámico real.

El proceso de identificación debe ser realizado en una secuencia específica para obtener resultados consistentes. El mismo va desde el diseño del experimento, la adquisición y tratamiento de la información, la elección de la estructura del modelo, la selección de los parámetros y la validación.

Con el uso del programa Proteus, se diseñó y produjo la tarjeta que con circuitos electrónicos puede realizar el control PID para la velocidad de un motor DC.

## **Capítulo VI: Recomendaciones**

Se recomienda tomar mediciones en puntos claves para tener una mejor perspectiva del funcionamiento del motor y evitar posible mal funcionamientos o daños provocados por exceso de carga.

Realizar varias pruebas con varias señales de entrada para observar cual se aproxima más al original.

Se recomienda que los estudiantes de Electrónica en control y automatismo utilicen el simulador de Matlab pues su desempeño tiene una validez que se ajusta a la realidad del control de velocidad de motores DC.

---

---

## Bibliografía

- Guasch Pesque, L., & Ciumbulea, G. (2004). *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Barcelona: Marcombo.
- Cogdell, J. R. (1997). *Fundamentos de Máquinas Eléctricas'*. Mac Graw hill.
- Díaz, G., Barbón, A., & Gómez-Alexandre, J. (2002). *Variación de la velocidad de los motores eléctricos*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Enríquez, G. (2003). *El ABC del control electrónico de las máquinas eléctricas*. México: Limusa.
- Gil, M. (2003). *Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería*. Madrid: Diaz de Santos.
- Manzanero, J. (2010). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. Madrid: Paraninfo.
- Muñoz, J., Sánchez, M., & Veléz, D. (2008). *Simulación de motores de CC con Matlab*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Seippel, R. (2003). *Fundamentos de electricidad: principios de electricidad, electrónica, control y ordenadores*. Madrid: Reverté.
- Senner, A. (2004). *Principio de Electrotecnia*. Barcelona: Reverté.
- Viloria, J. R. (2005). *Motores eléctricos: automatismos de control*. Madrid: Thomson Paraninfo.
- Viloria, J. R. (2011). *Automatismo Industriales*. Madrid: Paraninfo.

## Referencias en la web:

- Álvarez, J. G. (Marzo de 2012). <http://www.asifunciona.com/inicio.htm>. Recuperado el 21 de Junio de 2013, de ASÍ FUNCIONA EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA O CONTINUA: [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_motor\\_cd/af\\_motor\\_cd\\_1.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_motor_cd/af_motor_cd_1.htm)
- Polanía, J. (s.f.). <http://www.joanpola.com/programa.php>. Recuperado el 29 de Mayo de 2013, de <http://www.joanpola.com/resources/Motores%20el%C3%A9ctricos.pdf>:

---

---

<http://www.joanpola.com/resources/Motores%20el%C3%A9ctricos.pdf>

Puentes, J. a. (22 de Noviembre de 2012). *http://www.slideshare.net/*  
Recuperado el 3 de Julio de 2013, de  
<http://www.slideshare.net/genius794/50089575-controldemotoreselectricos>.

Pulido, J., & Castilla, M. (2003). *Simulación de convertidores conmutados DC-DC mediante Matlab-Simulink*. Recuperado el 2013 julio 15, de  
<http://books.google.com.ec/books?id=NZp5MwEACAAJ&dq=simulink+simulacion+matlab&hl=es-419&sa=X&ei=qjUkUqDUOuPYsASXpIH4Aw&ved=0CDMQ6AEwAQ>

**Manuales en la web:**

1. Motores de corriente continua. (s.f.).

Recuperado el Julio de 2013, de disponible:<http://smartdreams.cl/motor-de-corriente-continua/>

2. Motores eléctricos

Recuperado en julio del 2013, disponible:

<http://www.joanpola.com/resources/Motores%20el%C3%A9ctricos.pdf>

---

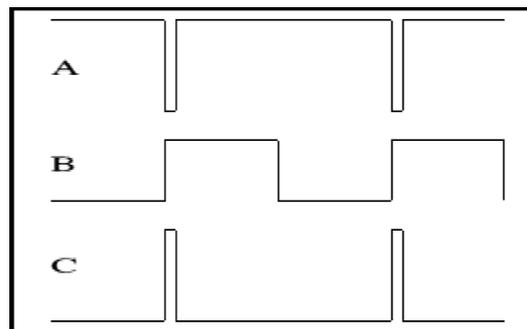
---

## Anexo 1: ANALISIS TEÓRICO

### Control de velocidad mediante PWM.

Para controlar la velocidad de un motor DC. se necesita un voltaje variable DC, de la fuente de alimentación. Sin embargo si usamos un motor de 12 V y se conecta la alimentación, el motor empezará a aumentar su velocidad: los motores no responden inmediatamente, necesitan un pequeño intervalo de tiempo para alcanzar su velocidad máxima. Si apagamos la alimentación en algún momento antes de que el motor alcance su máxima velocidad, notaremos una disminución de esta.

Si se enciende la alimentación y se lo apaga rápidamente, el motor tomará una velocidad comprendida entre velocidad cero y velocidad máxima. Esto es exactamente lo que hace un controlador de p.w.m.: alimenta el motor suministrándole una serie de pulsos. Para controlar la velocidad del motor se varía (modula) la anchura de los pulsos.



### Controladores de tres términos P.I.D.

Uno de los controles más utilizados en control de procesos industriales es el denominado controlador de tres términos o controlador PID. Este controlador tiene una función de transferencia

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$$

El controlador proporciona un término proporcional un término integral y un término derivativo la ecuación para la salida en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

El controlador de tres modos se denomina también controlador PID porque contiene un término proporcional, uno integral y otro derivativo. La función de transferencia del término derivativo

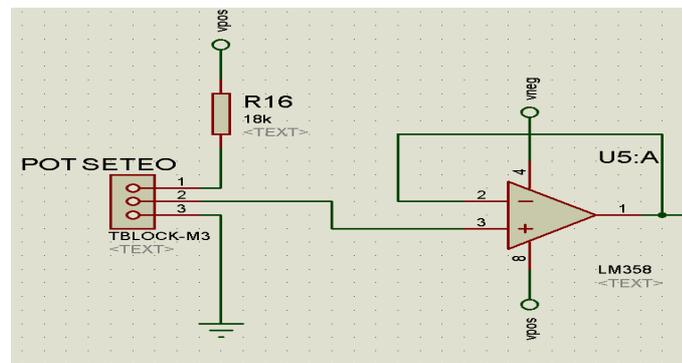
$$G_D(s) = \frac{k_D s}{t_D s + 1}$$

Pero  $t_D$  es normalmente mucho menor que las constantes de tiempo del propio proceso por lo que puede desestimarse.

La popularidad de los controladores PID puede atribuirse en parte a su buen comportamiento en un amplio intervalo de condiciones de operación y en parte a su sencillez funcional. Para implementar este controlador se deben determinar tres parámetros para un proceso dado: la ganancia proporcional, la ganancia integral y la ganancia derivativa

### CALCULOS TEORICOS.

NOTA: En todos los cálculos se asume lo siguiente  $v^+ = v^- I^+ = I^- = 0$

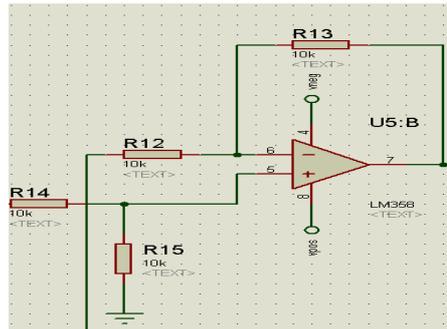


$v_0 = \text{terminal 1}$ ,  $v_i = \text{terminal 3} = v^+$ ,  $v^- = \text{terminal 2}$

$$v_i = v^+ = v^- = v_0$$

$$v_0 = v_i$$

## RESTADOR



$v_0 =$  terminal 7,  $v_2 = v_{R12}$ ,  $v_1 = v_{R14}$

$$v^+ = \left( \frac{R_{15}}{R_{14} + R_{15}} \right) v_i$$

$$\frac{v_2 - v^-}{R_{12}} = \frac{v^- - v_0}{R_{13}}$$

$$\frac{v_2}{R_{12}} + \frac{v_0}{R_{13}} = v^- \left( \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{12}} \right)$$

$$\frac{v_2}{R_{12}} + \frac{v_0}{R_{13}} = v^- \left( \frac{R_{12} + R_{13}}{R_{12} \times R_{13}} \right)$$

$$v^- = \left( \frac{R_{12} \times R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \right) \left( \frac{v_2}{R_{12}} + \frac{v_0}{R_{13}} \right)$$

$$\left( \frac{R_{15}}{R_{14} + R_{15}} \right) v_1 = \left( \frac{R_{12} \times R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \right) \left( \frac{v_2}{R_{12}} + \frac{v_0}{R_{13}} \right)$$

$$\left( \frac{R_{15}}{R_{14} + R_{15}} \right) v_1 = \left( \frac{R_{12} \times R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \right) \left( \frac{v_2}{R_{12}} \right) + \left( \frac{v_0}{R_{13}} \right) \left( \frac{R_{12} \times R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \right)$$

$$\left( \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{13}} \right) v_0 = \left( \frac{R_{15}}{R_{14} + R_{15}} \right) v_1 - \left( \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \right) v_2$$

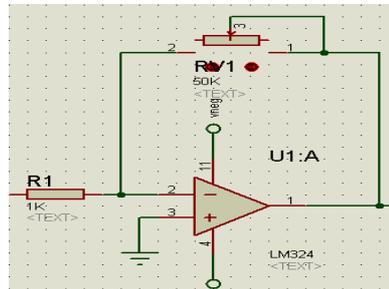
$$R_{12} = R_{13} = R_{14} = R_{15} = 10K\Omega$$

$$\frac{v_0}{2} = \frac{v_1}{2} - \frac{v_2}{2}$$

$$v_0 = v_1 - v_2$$

## CONTROLADOR P.I.D

### PROPORCIONAL



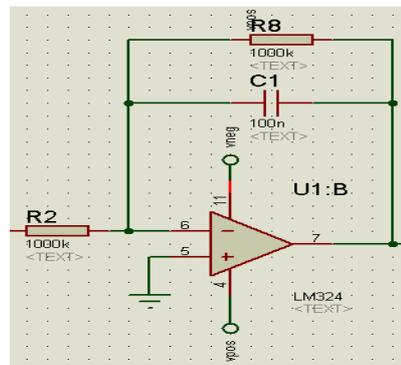
$$v_{R_1} = v_e v_0 = \text{salida}$$

En este caso  $v^+ = v^- = 0$

$$\frac{v_e - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_0}{R_2}$$

$$v_0 = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_e$$

### INTEGRADOR



Cuando la frecuencia (f) mayor que la frecuencia de corte( $f_c$ )

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

$$f > f_c$$

$$v_e = v_{R_2}$$

---

---

$v_0 = \text{salida} = \text{terminal } 7$

$$\frac{v_e - v^-}{R_2} = -C_1 \frac{d(v^- - v_0)}{dt}$$

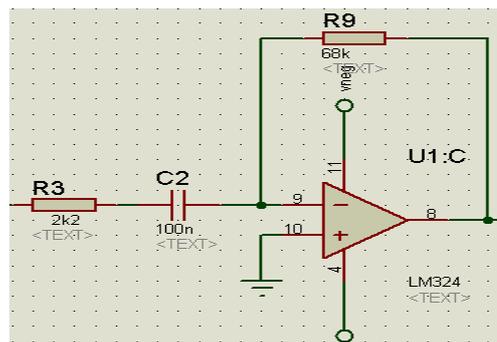
$$\frac{v_e}{R_2} = -C_1 \frac{d(v_0)}{dt}$$

$$v_0 = -\frac{1}{R_2 C_1} \int v_e dt$$

para  $f < f_c$

$$v_0 = -\frac{R_8}{R_1} v_e$$

## DERIVATIVO



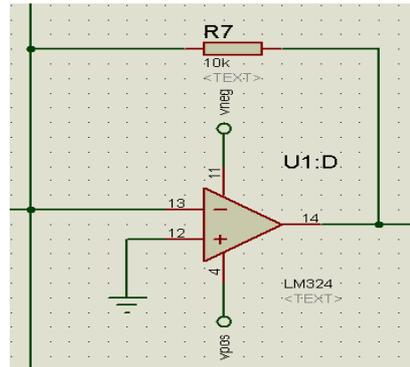
$v_0 = \text{salida} = \text{terminal } 8$

$$v_e = v_{R_3}$$

$$C_2 \frac{d(v_e - v^-)}{dt} = \frac{v^- - v_0}{R_9}$$

$$v_0 = -C_2 R_9 \frac{dv_e}{dt}$$

## SUMADOR



$$v^+ = v^- = 0$$

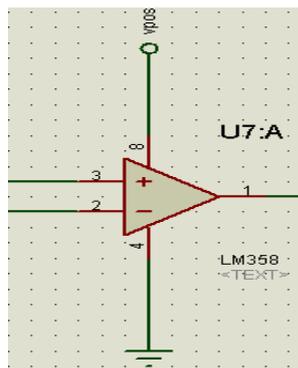
$$\frac{v_p - v^-}{R_1} + \frac{v_i - v^-}{R_2} + \frac{v_D - v^-}{R_3} = \frac{v^- - v_0}{R_f}$$

$$v_0 = -\frac{R_f}{R_1}v_p - \frac{R_f}{R_2}v_i - \frac{R_f}{R_3}v_D$$

$$R_f = R_1 = R_2 = R_3$$

$$v_0 = -v_p - v_i - v_D$$

## COMPARADOR



$$v_0 = \text{salida}, v_1 = \text{terminal 2}, v_2 = \text{terminal 3}$$

$$v_{cc} = 12 [v]$$

$$v_1 - v_2 > 0, \quad v_0 = +v_{cc} - 2$$

$$v_1 - v_2 < 0, \quad v_0 = -v_{cc} \text{ o } GND$$

---

---

CALCULO DE LA CONSTANTE  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$

$$k_p = \frac{R_{pot\ propor}}{R_1} = \frac{1.179k}{1k} = 1.179$$

$$k_i = \frac{R_{pot\ propor} R_2 c_1 R_{pot\ int}}{R_{1propor} R_7} = \frac{1.179k \times 1000k \times 100n \times 44.1k}{1k \times 10k} = .5199$$

$$k_D = \frac{R_9 R_{1propor} c_2 R_7}{R_{pot\ propor} R_{pot\ deriva}} = \frac{68k \times 1k \times 100n \times 10k}{1.179k \times 82.8} = 6.98 \times 10^{-4}$$

**DATOS EXPERIMENTALES**

POT SETEO

$$v_0 = v_i$$

$$v_0 = 4[v]$$

POT MOTOR

$$v_2 = 0$$

$$v_1 - v_2 = 4[v]$$

PROPORCIONAL

$$v_e = 4[v]$$

$$v_0 = -3[v]$$

INTEGRADOR

$$v_e = 4[v]$$

$$v_0 = -4[v]$$

---

---

## DERIVADOR

$$v_e = 4[v]$$

$$v_o = 0[v]$$

## SUMADOR

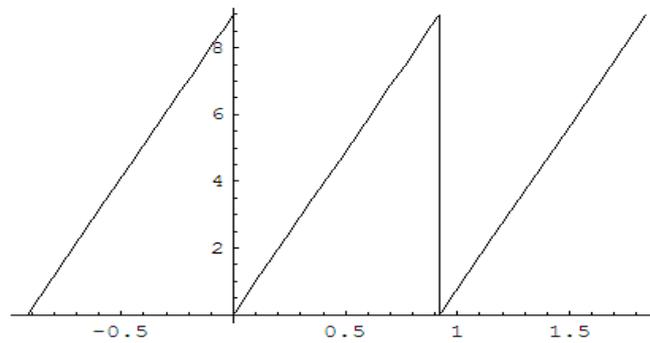
$$v_o = 3.80$$

## RECTIFICADOR

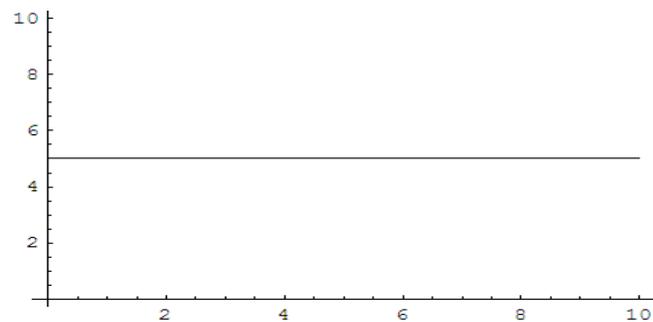
En la salida su rango está entre 0 y 5 voltios

## SEÑAL DEL CONTROLADOR P.W.M

Función dientes de sierra



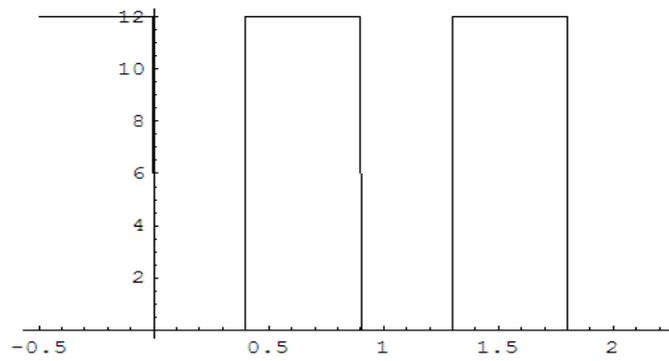
Con voltaje de referencia 5 voltios



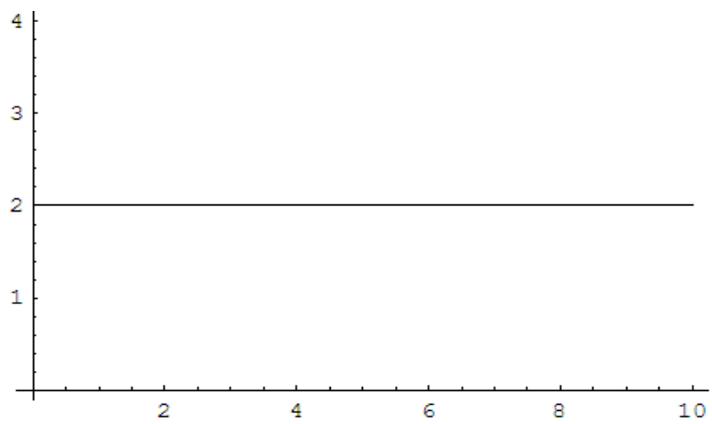
---

---

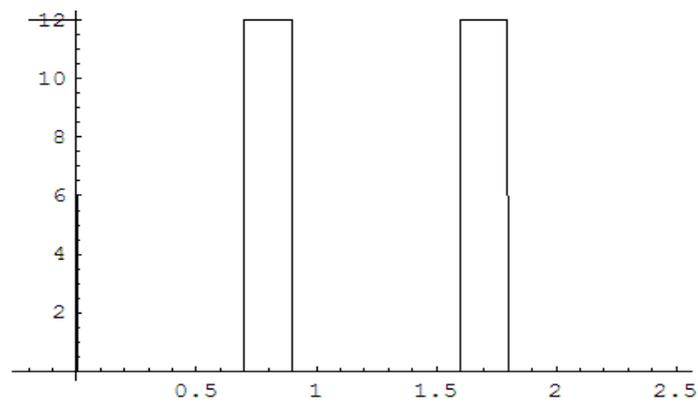
Salida del P.W.M es



Con voltaje de referencia 2 voltios



Salida del P.W.M es



SEÑAL DE LA DIRECCION

Entrada varía entre 0 y 5 voltios

Salida se mantiene en 12 voltios

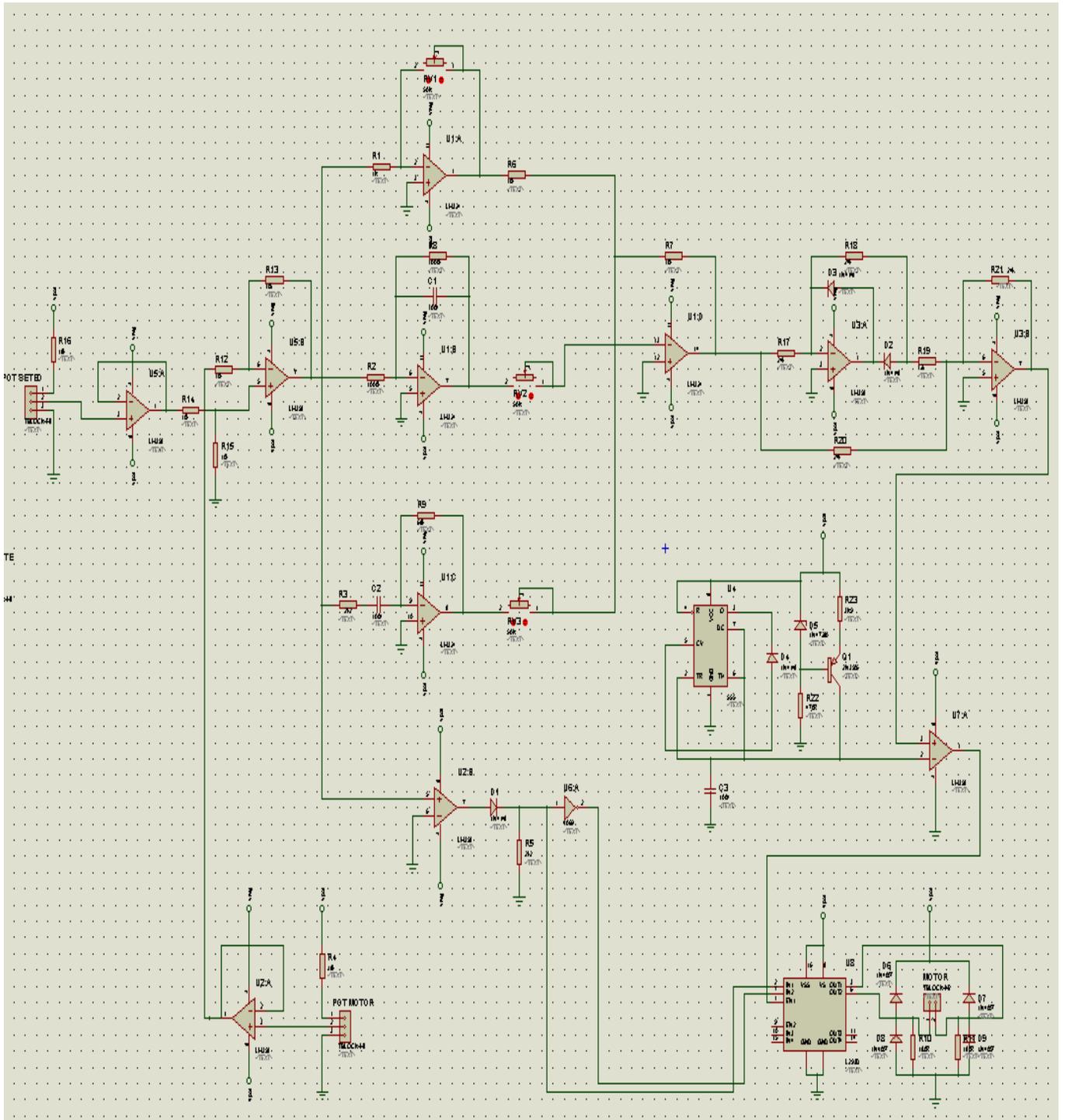
---

---

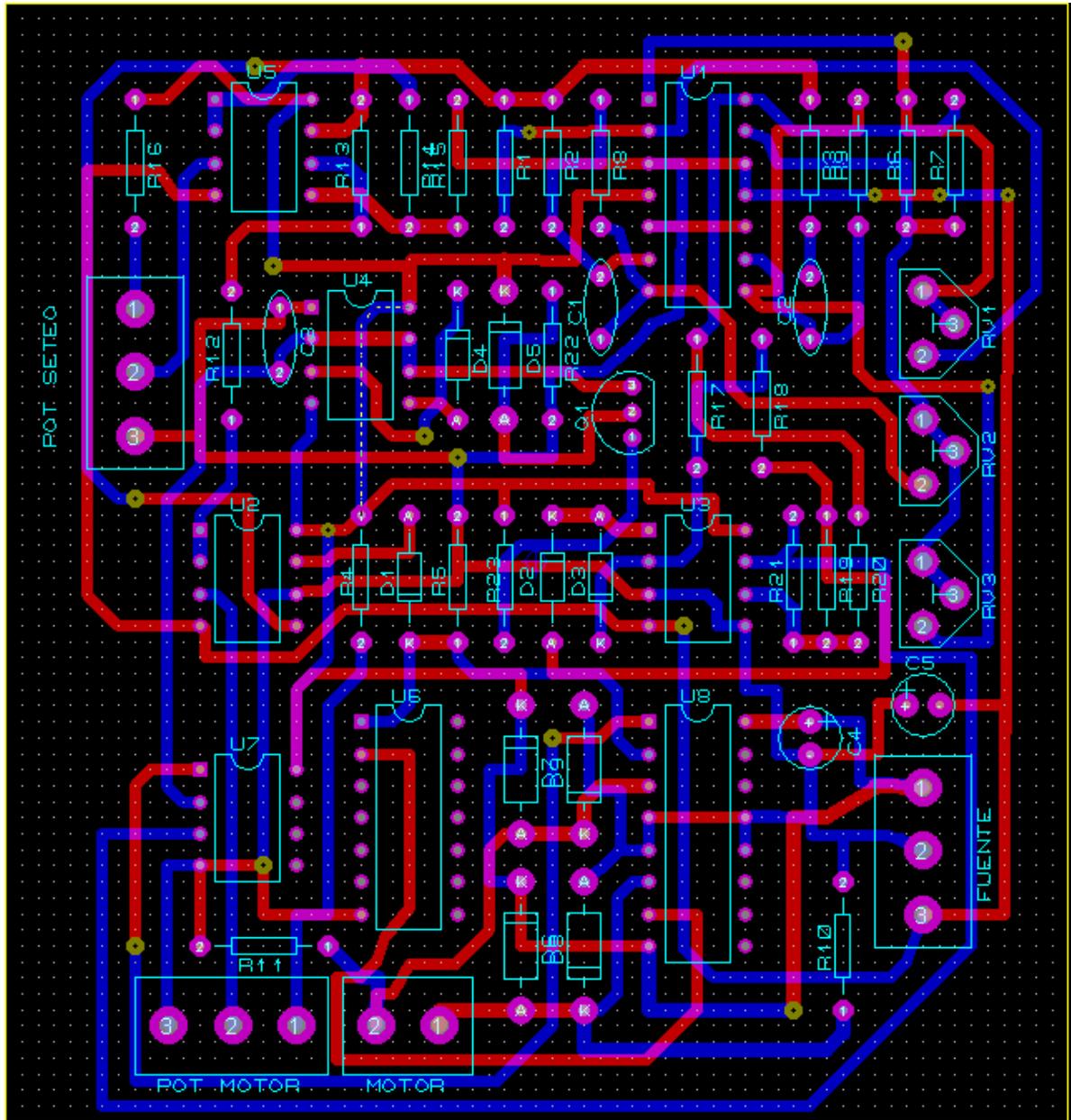
### CALCULO DE ERRORES

	<b>TEORICO</b>	<b>EXPERIMENTA L</b>	<b>% DE ERROR</b>
RESTADOR	4[v]	4[v]	0
PROPORCIONA L	-4.68[v]	-3[v]	35.89
INTEGRAL	-2[v]	-4[v]	100
DERIVATIVO	-0.03312[v]	0	3.312
SUMADOR	6.7131[v]	7[v]	4.27

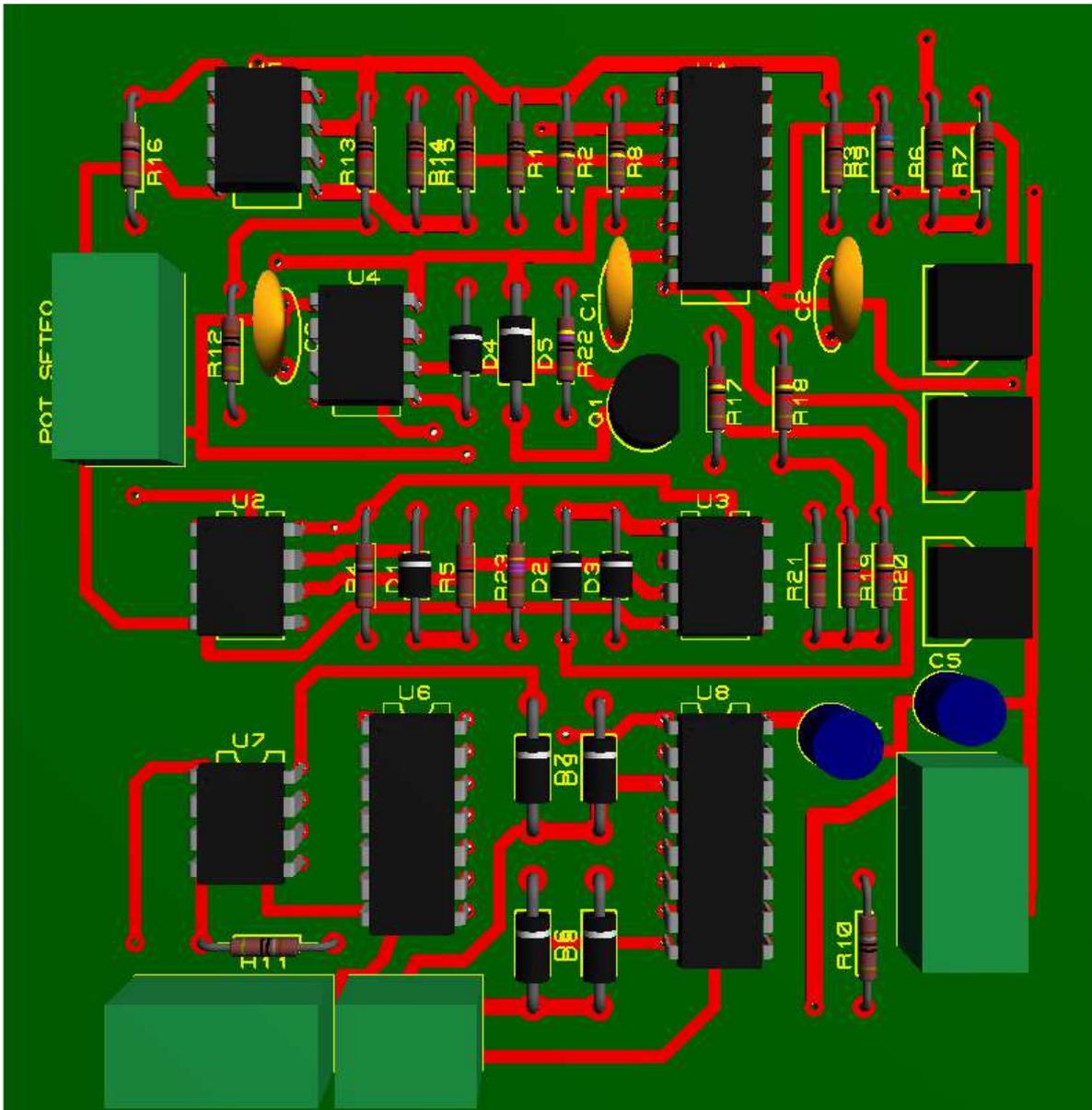
# DIAGRAMA ESQUEMATICO



# IMPRESO DEL PCB



VISTA EN 3D



# ESPECIFICACIONES DE COMPONENTES

## CD4069



October 1987  
Revised January 1999

### CD4069UBC Inverter Circuits

#### General Description

The CD4069UB consists of six inverter circuits and is manufactured using complementary MOS (CMOS) to achieve wide power supply operating range, low power consumption, high noise immunity, and symmetric controlled rise and fall times.

This device is intended for all general purpose inverter applications where the special characteristics of the MM74C901, MM74C907, and CD4049A Hex Inverter/Bufferers are not required. In those applications requiring larger noise immunity the MM74C14 or MM74C914 Hex Schmitt Trigger is suggested.

All inputs are protected from damage due to static discharge by diode clamps to  $V_{DD}$  and  $V_{SS}$ .

#### Features

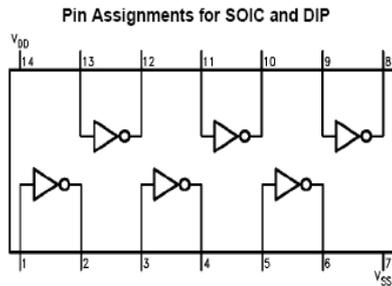
- Wide supply voltage range: 3.0V to 15V
- High noise immunity:  $0.45 V_{DD}$  typ.
- Low power TTL compatibility: Fan out of 2 driving 74L or 1 driving 74LS
- Equivalent to MM74C04

#### Ordering Code:

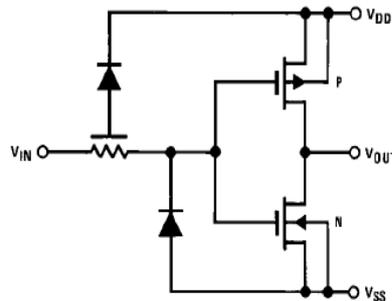
Order Number	Package Number	Package Description
CD4069UBCM	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-120, 0.150" Narrow Body
CD4069UBCSJ	M14D	14-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
CD4069UBCN	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Device also available in Tape and Reel. Specify by appending suffix "X" to the ordering code.

#### Connection Diagram



#### Schematic Diagram



## DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		+25°C			+85°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
$I_{DD}$	Quiescent Device Current	$V_{DD} = 5V$ , $V_{IN} = V_{DD}$ or $V_{SS}$		1.0			1.0		7.5	$\mu A$
				2.0			2.0		15	$\mu A$
				4.0			4.0		30	$\mu A$
$V_{OL}$	LOW Level Output Voltage	$ I_O  < 1 \mu A$ $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$		0.05		0	0.05		0.05	V
				0.05		0	0.05		0.05	V
				0.05		0	0.05		0.05	V
$V_{OH}$	HIGH Level Output Voltage	$ I_O  < 1 \mu A$ $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$	4.95		4.95		4.95			V
			9.95		9.95		9.95			V
			14.95		14.95		14.95			V
$V_{IL}$	LOW Level Input Voltage	$ I_O  < 1 \mu A$ $V_{DD} = 5V, V_O = 4.5V$ $V_{DD} = 10V, V_O = 9V$ $V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$		1.0			1.0		1.0	V
				2.0			2.0		2.0	V
				3.0			3.0		3.0	V
$V_{IH}$	HIGH Level Input Voltage	$ I_O  < 1 \mu A$ $V_{DD} = 5V, V_O = 0.5V$ $V_{DD} = 10V, V_O = 1V$ $V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	4.0		4.0		4.0			V
			8.0		8.0		8.0			V
			12.0		12.0		12.0			V
$I_{OL}$	LOW Level Output Current (Note 4)	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.4V$ $V_{DD} = 10V, V_O = 0.5V$ $V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	0.52		0.44	0.88		0.36		mA
			1.3		1.1	2.25		0.9		mA
			3.6		3.0	8.8		2.4		mA
$I_{OH}$	HIGH Level Output Current (Note 4)	$V_{DD} = 5V, V_O = 4.6V$ $V_{DD} = 10V, V_O = 9.5V$ $V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$	-0.52		-0.44	-0.88		-0.36		mA
			-1.3		-1.1	-2.25		-0.9		mA
			-3.6		-3.0	-8.8		-2.4		mA
$I_{IN}$	Input Current	$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 0V$ $V_{DD} = 15V, V_{IN} = 15V$		-0.30		$-10^{-5}$	-0.30		-1.0	$\mu A$
				0.30		$10^{-5}$	0.30		1.0	$\mu A$

Note 3:  $V_{SS} = 0V$  unless otherwise specified.

## L293D

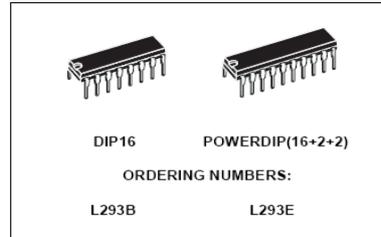
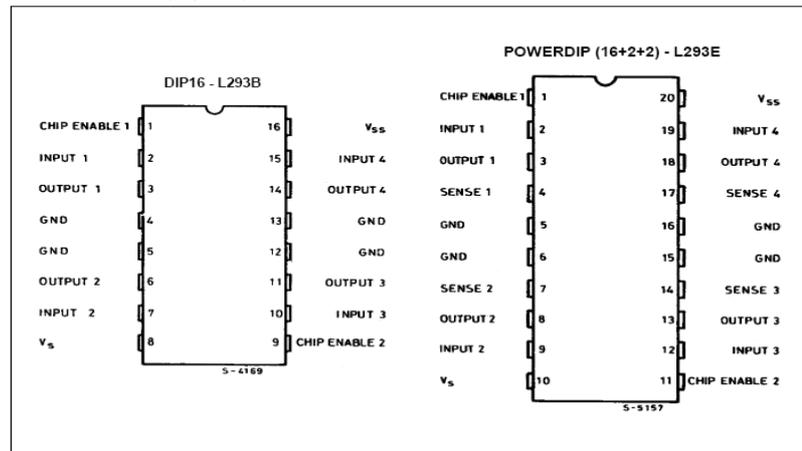
- OUTPUT CURRENT 1A PER CHANNEL
- PEAK OUTPUT CURRENT 2A PER CHANNEL (non repetitive)
- INHIBIT FACILITY
- HIGH NOISE IMMUNITY
- SEPARATE LOGIC SUPPLY
- OVERTEMPERATURE PROTECTION

### DESCRIPTION

The L293B and L293E are quad push-pull drivers capable of delivering output currents to 1A per channel. Each channel is controlled by a TTL-compatible logic input and each pair of drivers (a full bridge) is equipped with an inhibit input which turns off all four transistors. A separate supply input is provided for the logic so that it may be run off a lower voltage to reduce dissipation.

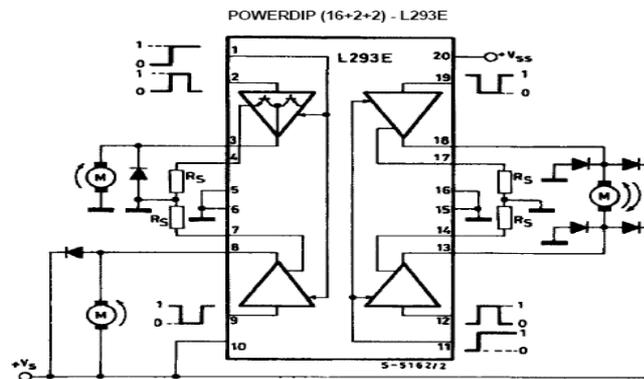
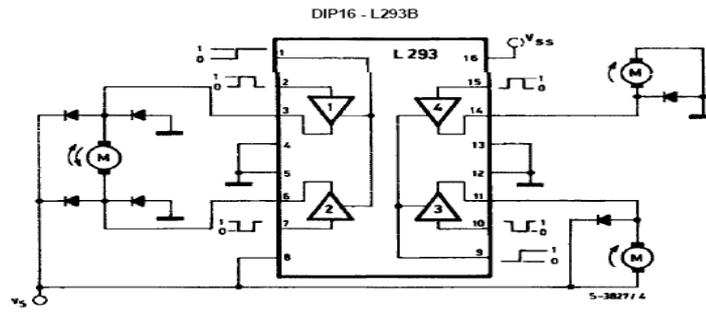
Additionally, the L293E has external connection of

### PIN CONNECTION (Top view)



sensing resistors, for switchmode control.

The L293B and L293E are package in 16 and 20-pin plastic DIPs respectively ; both use the four center pins to conduct heat to the printed circuit board.



PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP. (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage (Note 6)		25	-	2	5	-	2	7	-	-	-	mV
		Full	-	-	7	-	-	9	-	-	10	mV
Average Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	Full	-	7	-	-	7	-	-	7	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Differential Input Voltage (Note 5)		Full	-	-	$V^+$	-	-	$V^+$	-	-	$V^+$	V
Input Common Mode Voltage Range (Note 5)	$V^+ = 30\text{V}$	25	0	-	$V^+ - 1.5$	0	-	$V^+ - 1.5$	-	-	-	V
	$V^+ = 30\text{V}$	Full	0	-	$V^+ - 2$	0	-	$V^+ - 2$	-	-	-	V
	$V^+ = 26\text{V}$	Full	-	-	-	-	-	-	0	-	$V^+ - 2$	V
Common Mode Rejection Ratio	DC	25	70	85	-	65	70	-	-	-	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	DC	25	65	100	-	65	100	-	-	-	-	dB
Input Bias Current (Note 4)	$I_{I^+}$ or $I_{I^-}$	25	-	45	150	-	45	250	-	-	-	nA
	$I_{I^+}$ or $I_{I^-}$	Full	-	-	300	-	-	500	-	40	500	nA
Input Offset Current	$I_{I^+} - I_{I^-}$	25	-	3	30	-	5	50	-	-	-	nA
	$I_{I^+} - I_{I^-}$	Full	-	-	100	-	-	150	-	45	200	nA
Average Input Offset Current Drift		Full	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ , $V^+ = 15\text{V}$ (For Large $V_O$ Swing)	25	94	100	-	88	100	-	-	-	-	dB
	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ , $V^+ = 15\text{V}$ (For Large $V_O$ Swing)	Full	88	-	-	83	-	-	83	-	-	dB

# INTEGRADO 555

## DESCRIPTION

The 555 monolithic timing circuit is a highly stable controller capable of producing accurate time delays, or oscillation. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For a stable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output structure can source or sink up to 200 mA.

## FEATURES

- Turn-off time less than 2  $\mu$ s
- Max. operating frequency greater than 500 kHz
- Timing from microseconds to hours
- Operates in both astable and monostable modes
- High output current
- Adjustable duty cycle
- TTL compatible
- Temperature stability of 0.005% per  $^{\circ}$ C

## APPLICATIONS

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation

## PIN CONFIGURATION

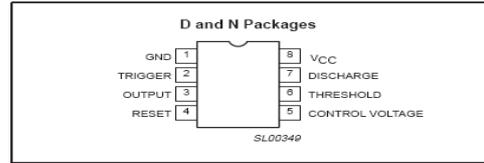


Figure 1. Pin configuration

## BLOCK DIAGRAM

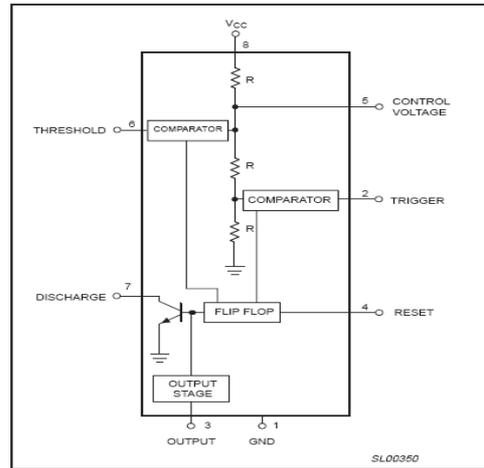


Figure 2. Block Diagram

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V <sub>CC</sub>	Supply voltage		
	SE555 NE555, SE555C, SA555	+18 +16	V V
P <sub>D</sub>	Maximum allowable power dissipation <sup>1</sup>	600	mW
T <sub>amb</sub>	Operating ambient temperature range	NE555	0 to +70
		SA555	-40 to +85
		SE555, SE555C	-55 to +125
T <sub>stg</sub>	Storage temperature range	-65 to +150	$^{\circ}$ C
T <sub>SOLD</sub>	Lead soldering temperature (10 sec max)	+230	$^{\circ}$ C

### NOTE:

- The junction temperature must be kept below 125  $^{\circ}$ C for the D package and below 150  $^{\circ}$ C for the N package. At ambient temperatures above 25  $^{\circ}$ C, where this limit would be derated by the following factors:  
 D package 160  $^{\circ}$ C/W  
 N package 100  $^{\circ}$ C/W

## INTEGRADO LM358

### Single Supply Dual Operational Amplifiers

Utilizing the circuit designs perfected for Quad Operational Amplifiers, these dual operational amplifiers feature low power drain, a common mode input voltage range extending to ground/ $V_{EE}$ , and single supply or split supply operation. The LM358 series is equivalent to one-half of an LM324.

These amplifiers have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. They can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V, with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

#### Features

- Short Circuit Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Single and Split Supply Operation
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness of the Device without Affecting Operation
- Pb-Free Packages are Available
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Site and Control Changes

ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



PDIP-8  
N, AN, VN SUFFIX  
CASE 626

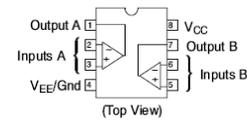


SOIC-8  
D, VD SUFFIX  
CASE 751



Micro8™  
DMR2 SUFFIX  
CASE 846A

#### PIN CONNECTIONS



#### ORDERING INFORMATION

#### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

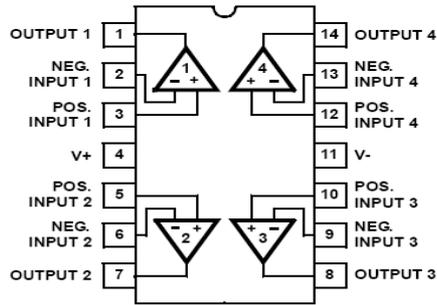
Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages Single Supply Split Supplies	$V_{CC}$ $V_{CC}, V_{EE}$	32 $\pm 16$	Vdc
Input Differential Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 32$	Vdc
Input Common Mode Voltage Range (Note 2)	$V_{ICR}$	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	$t_{SC}$	Continuous	
Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air (Note 3)	$R_{\theta JA}$	238	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55 to +125	$^\circ\text{C}$
ESD Protection at any Pin Human Body Model Machine Model	$V_{esd}$	2000 200	V
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$	-25 to +85 0 to +70 -40 to +105 -40 to +125	$^\circ\text{C}$
	LM258 LM358 LM2904/LM2904A LM2904V, NCV2904 (Note 4)		

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

1. Split Power Supplies.
2. For Supply Voltages less than 32 V the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
3.  $R_{\theta JA}$  for Case 846A.
4. NCV2904 is qualified for automotive use.

# INTEGRADO LM324

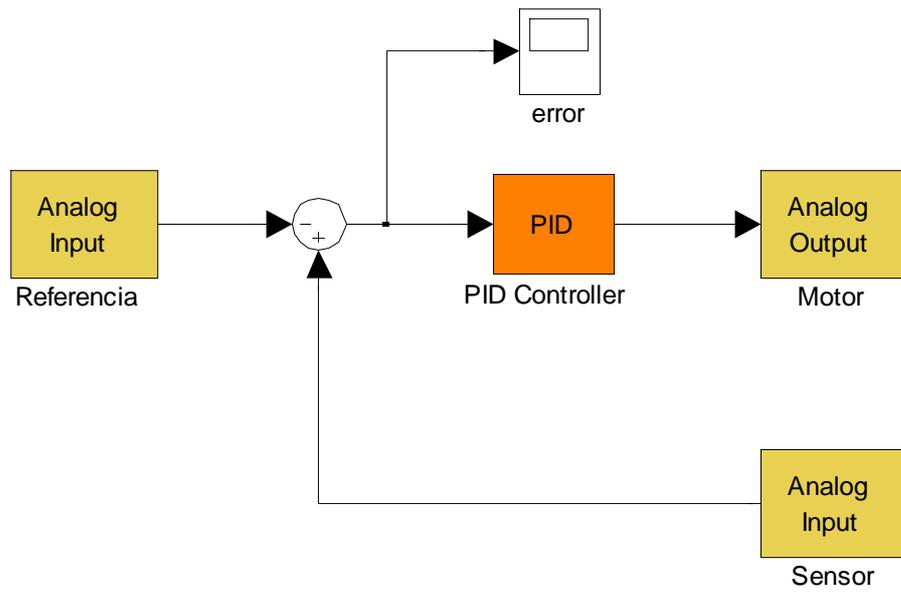
CA124, CA224, CA324, LM2902 (PDIP, SOIC)  
LM324 (PDIP)  
TOP VIEW



Pinout diagram provided

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP. (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage (Note 6)		25	-	2	5	-	2	7	-	-	-	mV
		Full	-	-	7	-	-	9	-	-	10	mV
Average Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	Full	-	7	-	-	7	-	-	7	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Differential Input Voltage (Note 5)		Full	-	-	V+	-	-	V+	-	-	V+	V
Input Common Mode Voltage Range (Note 5)	V+ = 30V	25	0	-	V+ -1.5	0	-	V+ -1.5	-	-	-	V
	V+ = 30V	Full	0	-	V+ -2	0	-	V+ -2	-	-	-	V
	V+ = 26V	Full	-	-	-	-	-	-	0	-	V+ -2	V
Common Mode Rejection Ratio	DC	25	70	85	-	65	70	-	-	-	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	DC	25	65	100	-	65	100	-	-	-	-	dB
Input Bias Current (Note 4)	$I_{I+}$ or $I_{I-}$	25	-	45	150	-	45	250	-	-	-	nA
	$I_{I+}$ or $I_{I-}$	Full	-	-	300	-	-	500	-	40	500	nA
Input Offset Current	$I_{I+} - I_{I-}$	25	-	3	30	-	5	50	-	-	-	nA
	$I_{I+} - I_{I-}$	Full	-	-	100	-	-	150	-	45	200	nA
Average Input Offset Current Drift		Full	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ , V+ = 15V (For Large $V_O$ Swing)	25	94	100	-	88	100	-	-	-	-	dB
	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ , V+ = 15V (For Large $V_O$ Swing)	Full	88	-	-	83	-	-	83	-	-	dB

### Diagrama Simulink



### IMPLEMENTACION DE DISPOSITIVO DE CONTROL DE VELOCIDAD PID PARA MOTORES DC



