

**CREACION DE EXPERIENCIAS DIDACTICAS PARA LA DETERMINACION DE  
LOS PARAMETROS FISICOS DE LOS SERVOMOTORES**

**DIANA ZULIANA GARCÍA JAIMES**

**CATALINA LUNA MONSALVE**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**CREACION DE EXPERIENCIAS DIDACTICAS PARA LA DETERMINACION DE  
LOS PARAMETROS FISICOS DE LOS SERVOMOTORES**

**DIANA ZULIANA GARCIA JAIMES**

**CATALINA LUNA MONSALVE**

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

**Director**

**JUAN CARLOS VILLAMIZAR RINCÓN  
ING. ELECTRICISTA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bucaramanga, 26 de Marzo de 2009**

*Un sueño desde muy pequeñas, algo que queríamos hacer realidad, en este momento es nuestro presente, fueron años de sacrificio, alegrías, éxitos, dificultades y grandes esfuerzos, pero finaliza con una satisfacción gigante, ser profesionales, sentirnos orgullosas de haber cumplido unas de nuestras grandes metas, sentirnos felices de realizar lo que nos gusta y haber logrado adquirir los conocimientos necesarios para ejecutar nuestras funciones con calidad y exactitud.*

*Por este motivo a nuestros padres, hermanas, docentes y amigos que fueron el apoyo para la consecución de este objetivo, se preocuparon por enseñarnos, colaborarnos y crearnos con un conocimiento intelectual y moral excelente, es por ello que este libro, el cual es una prueba de nuestro conocimiento adquirido, queremos dedicarlo a estas personas que creyeron en este sueño, en nosotras y en las capacidades que teníamos para lograrlo.*

*De todo corazón dedicarlo a Dios por darnos la bendición de haber nacido en esta época y en este lugar del mundo, para poder tener unos excelentes padres, los cuales nos han dado todo lo necesario para tener una vida feliz.*

*Los que estuvieron presentes en el transcurso de la carrera durante largas horas del día compartiendo la adquisición de nuevos conocimientos y en la lucha de una meta colectiva, nuestros compañeros de Ingeniería Electrónica 2007, porque siempre tendremos un recuerdo grato de nuestra vida universitaria, a ellos que fueron también un motivo de inspiración y ejemplo para la lucha de día a día.*

***Catalina Luna Monsalve  
Diana Zuliana García Jaimes***

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento:

A Dios por ser el ser superior y por su gran sabiduría, la cual nos ha guiado a ser cada día mejores personas. Gracias DIOS.

A Juan Carlos Villamizar, Ingeniero Electricista, Director de este proyecto, por su apoyo y brindarnos su conocimiento para el desarrollo de este proyecto. Gracias.

A Ricardo Gálvez, Ingeniero Electricista, por su colaboración e idea en este proyecto, el cual está basado en su conocimiento. Muchas Gracias.

A Carlos Gerardo Hernández, Ingeniero Electrónico, por su colaboración y aporte en el desarrollo de este proyecto. Gracias.

A Elvis Hernán Luna, Mecánico Industrial de precisión, por compartir su conocimiento en mecánica, la cual era una base principal en el desarrollo de las prácticas. Muchas Gracias.

A Oscar Escobar y Luis Enrique Corzo, por la paciencia y apoyo incondicional en la ejecución del proyecto. Gracias ^^

A todo el personal docente de la universidad, que compartieron sus conocimientos durante 5 años de estudio, para poder llegar a ser Ingenieras Electrónicas. Muchísimas Gracias.

A la Universidad Pontificia Bolivariana porque nos dio la oportunidad de ser parte de esta familia y brindarnos un futuro basado en los esquemas intelectuales y morales adecuados, logrando de esta manera la formación de grandes profesionales y de un país mejor.

## CONTENIDO

INTRODUCCION .....	1
1. OBJETIVOS.....	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	2
2. MARCO TEORICO .....	3
2.1 Motores de corriente continua. ....	3
2.1.1 Principio de funcionamiento.....	3
2.1.1.1 Fuerza contra electromotriz inducida en un motor. ....	4
2.1.1.2 Número de Escobillas. ....	4
2.1.1.3 Sentido de Giro. ....	4
2.1.1.4 Reversibilidad.....	5
2.1.2 Partes del motor.....	5
2.1.2.1 Rotor. ....	5
2.1.2.2 Estator.....	7
2.1.3 Etapas de funcionamiento de los motores de corriente continua.....	8
2.1.3.1 Momento de arranque.....	8
2.1.3.2 Momento de regulación de velocidad.....	9
2.1.3.3 Momento de frenado. ....	9
2.1.3.4 Momento de inversión de giro. ....	9
2.1.4 Método de regulación de velocidad. ....	9
2.1.4.1 Regulación por tensión de armadura. ....	10
2.1.4.2 Regulación por resistencia en serie con el circuito de armadura. ...	10
2.1.4.3 Regulación de velocidad usando corriente la corriente de campo. .	11

2.1.5 Clases de motores de corriente continua.....	12
2.1.5.1 Motores de imán permanente.....	12
2.1.6 Función de transferencia de un motor de corriente continua. ....	15
2.1.7 Consideraciones generales para la determinación de los parámetros en los servomotores. ....	16
2.1.7.1 Momento de inercia $J$ . ....	16
2.1.7.2 Resistencia de armadura $R_a$ ....	16
2.1.7.3 Inductancia de armadura $L_a$ ....	16
2.1.7.4 Constante de voltaje $K_e$ ....	17
2.1.7.5 Constante de torque.....	17
2.1.7.6 Constante de tiempo mecánica.....	19
2.1.7.7 Torque de fricción y corriente de arranque.....	19
2.1.8 Control electrónico para motores de corriente continua.....	19
2.1.9 Principio de funcionamiento de PWM.....	19
2.2 Control de posición del servomotor por medio de dsPIC30F2010 .....	22
2.2.1 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).....	22
2.2.1.1 Proporcional. ....	22
2.2.1.2 Integral. ....	23
2.2.1.3 Derivativo. ....	24
2.2.2 Ajustes del controlador PID. ....	25
2.2.3 dsPIC30F2010.....	25
2.2.3.1 Modulo UART.....	28
2.2.3.2 Módulo PWM.....	30
2.2.4 MPLAB IDE.....	32

2.2.5 MATLAB. ....	34
2.2.6 Circuito Integrado L298.....	34
3. Construcción y mantenimiento de módulos .....	36
3.1 Modulo acople .....	36
3.1.1 Construcción.....	37
3.1.2 Características técnicas del servomotor. ....	38
3.2 Modulo Unico .....	38
3.2.1 Construcción.....	40
3.2.2 Características técnicas del servomotor. ....	41
3.3 Modulo de inercia .....	42
3.3.1 Construcción.....	43
3.4 Modulo posición .....	44
3.4.1 Construcción.....	45
3.4.2 Características técnicas del servomotor. ....	46
4. Experiencias Implementadas.....	47
4.1 Determinación de la resistencia de armadura ( $R_a$ ) .....	47
4.2 Determinación de la inductancia de armadura ( $L_a$ ) y la constante de tiempo eléctrica ( $te$ ) de los motores DC.....	53
4.3 Determinación experimental del momento de inercia ( $J$ ) de los servomotores. ....	57
4.4 Obtención de la constante de voltaje ( $K_e$ ) para los servomotores de corriente continua.....	62
4.5 Determinación de la constante de torque ( $K_t$ ) de los servomotores de corriente continua.....	65



4.6 Determinación de la constante de tiempo mecánica ( <i>tm</i> ) de los servomotores.....	67
4.7 Obtención del torque de fricción y de la corriente de arranque en los servomotores de corriente continua .....	71
4.8 Control de posición de servomotores .....	73
CONCLUSIONES .....	80
BIBLIOGRAFIA.....	81
WEBGRAFIA .....	82
ANEXOS .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Motor de corriente continua .....	4
Figura 2. Rotor de un motor de corriente continua.....	5
Figura 3. Relación Velocidad vs Tensión de Armadura .....	11
Figura 4. Relación Velocidad vs Resistencia de Armadura.....	11
Figura 5. Servomotores.....	14
Figura 6. Parámetros que influyen en el sistema de rotación y circuito eléctrico ...	15
Figura 7. Técnica máquina indicadora de torque .....	18
Figura 8. Funcionamiento de PWM.....	20
Figura 9. Rampa Trapezoidal.....	21
Figura 10. Sistema de control de lazo cerrado.....	22
Figura 11. Comportamiento del controlador proporcional () .....	23
Figura 12. Comportamiento del controlador integral .....	24
Figura 13. Comportamiento del controlador derivativo() .....	25
Figura 14. Arquitectura Harvard.....	26
Figura 15. Pines dsPIC30F2010 .....	27
Figura 16. Familia dsPIC30F para control de motores y sistemas de alimentación .....	27
Figura 17. Señales en un conector DB9 .....	28
Figura 18. Circuito Basico Max 232 y conexiones DB9 .....	29
Figura 19. Ventana MPLAB IDE .....	32
Figura 20. Diagrama de bloques.....	33
Figura 21. Pines L298.....	34
Figura 22. Circuito para controlar la dirección de giro de un motor con el L298 ....	35

Figura 23. Modulo Acople .....	36
Figura 24. Circuito Modulo Acople .....	37
Figura 25. Baquelita Modulo Acople .....	38
Figura 26. Modulo Único.....	39
Figura 27. Circuito Modulo Único.....	40
Figura 28. Baquelita circuito modulo único .....	41
Figura 29. Inducido y Cilindro maestro .....	42
Figura 30. Modulo de Inercia .....	42
Figura 31. Modulo Posición.....	44
Figura 32. Circuito Modulo Posición .....	45
Figura 33. Baquelita circuito Modulo Posición .....	46

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. INTEGRADO L298 .....	83
ANEXO B. SCHMITH TRIGER 74LS04 .....	88
ANEXO C. MICROCONTROLADOR dsPIC30F2010 .....	90
ANEXO D. REGISTROS MODULO PWM dsPIC30F2010.....	95
ANEXO E. REGISTROS MODULO UART dsPIC30F2010.....	96
ANEXO F. INTEGRADO MAX 232 .....	97
ANEXO G. BAQUELITA MODULO POSICIÓN .....	101
ANEXO H. BAQUELITA MODULO MOTOR UNICO .....	102
ANEXO I. BAQUELITA MODULO ACOUPLE .....	103
ANEXO J. CIRCUITO MODULO UNICO .....	104
ANEXO K. CIRCUITO MODULO POSICIÓN.....	105
ANEXO L. CIRCUITO MODULO ACOUPLE .....	106
ANEXO M. GUIAS DE EXPERIENCIAS PARA EL ESTUDIANTE .....	107

## GLOSARIO

**Comunicación Serial:** La comunicación serial es un protocolo muy común para comunicación entre dispositivos que se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora. La mayoría de las computadoras incluyen dos puertos seriales RS-232. Además, la comunicación serial puede ser utilizada para adquisición de datos si se usa en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo. El puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez. Aun y cuando esto es más lento que la comunicación en paralelo, que permite la transmisión de un byte completo por vez, este método de comunicación es más sencillo y puede alcanzar mayores distancias.

**Constante de Tiempo Mecánica:** Es la relación de repuesta transitoria entre la velocidad y la tensión de armadura.

**Constante de Voltaje:** Cuando el inducido se encuentra en rotación aparece una tensión inducida proporcional al producto por la velocidad angular.

**Control Derivativo:** La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente. El error se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante  $D$ ,  $K_d$ .

**Control Integral:** El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; Luego es multiplicado por una constante  $I$ .  $I$  representa la constante de integración  $K_i$ .

**Control PID:** Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

**Control Proporcional:** La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional,  $K_p$ , como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango.

**Corriente Continua:** La corriente continua (CC en forma abreviada), es el resultado de el flujo de electrones (carga negativa) por un conductor (alambre de cobre casi siempre), que va del terminal negativo al terminal positivo de la batería (circula en una sola dirección), pasando por una carga.

**Error:** El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna o Set Point.

**Estator:** Esta parte de la máquina no se mueve y es la carcasa de la máquina.

**Inductancia:** La inductancia mide el valor de oposición de la bobina al paso de la corriente y se miden en Henrios (H).

**Lazo Abierto:** Los no realimentados o de lazo abierto no se compara a la variable controlada con una entrada de referencia. Cada ajuste de entrada determina una posición de funcionamiento fijo en los elementos de control.

**Lazo Cerrado:** Los realimentados o de lazo cerrado funcionan de tal manera que hace que el sistema se realimente, la salida vuelve al principio para analice la diferencia y en una segunda opción ajuste mas, así hasta que el error es 0. Cualquier concepto básico que tenga como naturaleza una cantidad controlada como por ejemplo temperatura, velocidad, presión, caudal, fuerza, posición, entre otras, son parámetros de control de lazo cerrado.

**Microcontrolador:** Un microcontrolador es un circuito integrado con un computador digital interno.

**Modulo PWM:** Modulación por anchura de pulso. Este modulo permite configurar salidas PWM para la familia de control de motores de la serie dsPIC30F

**Modulo UART:** Transmisor Receptor Universal asíncrono. Este modulo le permite a la serie dsPIC30f tener una comunicación serie asíncrona el cual puede adaptarse a interfaces como RS-232.

**Momento de Inercia:** Es la resistencia de los cuerpos físicos para aceptar un cambio de estado.

**Motor de corriente continua:** es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotatorio. Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, Rotor y Estator.

**Puente H:** Un Puente H o Puente en H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso.

**Puerto Serie:** Es una interfaz física de comunicación en serie a través de la cual se transfiere información mandando o recibiendo un bit.

**PWM:** La modulación por anchura de pulsos (PWM, en inglés pulse-width modulation) es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para, entre otras cosas, variar la velocidad de un motor. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al período. Cuanto más tiempo pase la señal en estado alto, mayor será la velocidad del motor. Este tren de pulsos, en realidad, hace que el motor marche alimentado por la tensión máxima de la señal durante el tiempo en que esta se encuentra en estado alto, y que pare en los tiempos en que la señal está en estado bajo.

**Rotor:** Es el componente que gira (rota) en una máquina eléctrica, sea esta un motor o un generador eléctrico. El rotor está formado por un eje que soporta un juego de bobinas arrolladas sobre un núcleo magnético que puede girar dentro de un campo magnético creado bien por un imán o por el paso por otro juego de bobinas, arrolladas sobre unas piezas polares, que permanecen estáticas y que constituyen lo que se denomina estator de una corriente continua o alterna, dependiendo del tipo de máquina de que se trate.

**RS232:** (Estándar ANSI/EIA-232) es el conector serial hallado en las PCs IBM y compatibles. Es utilizado para una gran variedad de propósitos, como conectar un ratón, impresora o modem, así como instrumentación industrial. Gracias a las mejoras que se han ido desarrollando en las líneas de transmisión y en los cables, existen aplicaciones en las que se aumenta el desempeño de RS-232 en lo que respecta a la distancia y velocidad del estándar. RS-232 está limitado a comunicaciones de punto a punto entre los dispositivos y el puerto serial de la computadora. El hardware de RS-232 se puede utilizar para comunicaciones seriales en distancias de hasta 50 pies.

**Servomotor:** Un servomotor puede ser definido como un motor eléctrico de corriente continua el cual tiene la capacidad de ubicarse en cierta posición, de acuerdo a su configuración, y mantenerla hasta que se le indique. Una de las principales características de los servomotores es su bajo momento de inercia y su característica lineal entre tensión vs velocidad, esto es lo que permite que sean

utilizados frecuentemente en sistemas de robótica y radiocontrol, se pueden encontrar desde 0.5HP hasta 1000Hp.

**Sistema de control:** Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

**Torque:** Es una pérdida de fricción estática originada por una oposición al desarrollo de la dinámica inicial del movimiento o freno inicial que presentan las superficies en contacto.



## RESUMEN

**TITULO:** CREACION DE EXPERIENCIAS DIDACTICAS PARA LA DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FISICOS DE LOS SERVOMOTORES

**AUTORES:** Catalina Luna Monsalve  
Diana Zuliana García Jaimes

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** Juan Carlos Villamizar Rincón

Se diseñó e implementó en presentación modular diferentes experiencias didácticas para permitir no solo obtener y analizar parámetros físicos de los servomotores de corriente continua, sino efectuar prácticas para desarrollar y conocer las diferentes características de un control de posición. Para lograr el éxito de cada uno de los objetivos propuestos, fue necesario realizar diferentes actividades a partir de ciertos conocimientos anteriormente adquiridos.

En este proyecto se manejaron varios conceptos de sistemas de control, los cuales en la mayoría de los casos fueron conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera y otros investigados en libros, documentos entre otros. Esta etapa se denominó Documentación Previa, la cual fue necesario investigar la veracidad de dicha información analizando los diferentes procedimientos existentes, inspeccionando los resultados en busca de errores debido a dichos procedimientos, realizando su respectivo ajuste. De esta manera se procedió a realizar la implementación de 7 experiencias para el laboratorio de sistemas de control 1, en las cuales se determinan los parámetros físicos de los servomotores y una experiencia más donde se implementa un Control de posición Proporcional Integral Derivativo al servomotor.

**PALABRAS CLAVES:** Servomotor, Características, Sistemas de control, Control de posición

## SUMMARY

**TITTLE:** CREATION OF DIDACTIC EXPERIENCES FOR THE DETERMINATION OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF THE SERVOMOTORS

**AUTHORS:** Catalina Luna Monsalve  
Diana Zuliana García Jaimes

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** Juan Carlos Villamizar Rincón

Different didactic experiences were designed and implemented, in modular presentation, not only to allow and analyse the physical parameters of the servomotors of direct current, but also to execute practices to develop and learn the different features of a position control. To ensure success of each one of the proposed objectives, it was necessary to carry out different activities base don certain knowledge previously acquired.

In this project several control systems concepts were manipulated, which in most cases were adquired during the career and others were researched in books, documents and among others. This stage was called Previous Documentation, which was necessary to investigate the veracity of the information by analysing the different existing procedures, inspecting the results searching by errors due to those procedures, making their proper adjustment. In this way it was proceeded to make the implementation of 7 experiences to the control systems 1's laboratory, in which the physical parameters of the servomotors are determined and a additional experience where a Proportional Integral Derivative Position Control system is implemented to a servomotor.

**KEYWORDS:** Servomotor, Characteristics, Control Systems, Position Control.

## INTRODUCCION

Durante la ejecución del aprendizaje es necesario hacer énfasis en la parte práctica, por este motivo es fundamental que la Universidad Pontificia Bolivariana tenga los laboratorios y equipos adecuados para el cumplimiento de este requisito, es por ello que se implementaron varios módulos didácticos con el fin de determinar experimentalmente los parámetros físicos de los servomotores.

Para la consecución de estos módulos fue de gran importancia realizar una revisión, configuración e innovación de las diferentes prácticas existentes en el Laboratorio de Sistemas de Control relacionadas con la obtención de los parámetros de los servomotores, se efectuó un estudio económico (especificado en el anteproyecto) en el cual se vincularon los componentes de uso necesario para el correcto funcionamiento de cada una de las experiencias, se realizó la construcción e implementación de las estructuras modulares para cada una de ellas, a su vez se efectuaron las pruebas y ajustes correspondientes, se elaboró una guía o instructivo teórico y práctico.

Con anterioridad se han realizado diferentes experiencias sobre este tema, las cuales fueron formuladas por el Ingeniero Ricardo Gálvez Sánchez docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, estas prácticas son implementadas en el transcurso del laboratorio de sistemas de control I. Las experiencias que se habían estado llevando a cabo son las siguientes:

- Determinación de la resistencia de armadura  $R_a$ .
- Determinación de la constante de la inductancia de armadura ( $L_a$ ) y de la constante de tiempo eléctrica ( $T_e$ ) de los motores DC.
- Determinación experimental del momento de inercia ( $J$ ) de los servomotores.
- Obtención de la constante de voltaje ( $K_e$ ) para servomotores CC.
- Determinación de la constante de torque ( $K_t$ ) de los servomotores CC.
- Determinación de la constante de tiempo mecánica ( $T_m$ ) de los servomotores.
- Obtención de la corriente de arranque y del torque de fricción en los servomotores de CC.

Se ejecutaron experiencias pero con nuevos módulos los cuales se encuentran contruidos con servomotores y son completamente lineales, ya que anteriormente se utilizaban motores de corriente continua los cuales no cumplían completamente con todos los requisitos para la consecución correcta de los resultados.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar e implementar, en presentación modular, las diferentes experiencias didácticas para permitir no solo obtener y analizar parámetros físicos de los servomotores de CC, sino efectuar prácticas avanzadas para controlar posición.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Revisar, configurar e innovar las diferentes experiencias del laboratorio de control relacionadas con la obtención de los parámetros en servomotores de CC.
- Diseñar la estructura modular de cada una de las prácticas y efectuar un adecuado estudio económico.
- Realizar la construcción e implementación de las estructuras modulares para las prácticas.
- Efectuar las pruebas y ajustes correspondientes.
- Elaborar las guías o instructivos de cada experiencia.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 Motores de corriente continua.

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante un movimiento rotatorio. En la actualidad, existen nuevas aplicaciones con motores eléctricos que no producen movimiento rotatorio, sino que con algunas modificaciones, ejercen tracción sobre un riel. Estos motores se conocen como motores lineales.

En los servomotores, el fácil control de posición, par y velocidad lo han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Pero con la llegada de la electrónica de potencia su uso ha disminuido en gran medida, pues los motores de corriente alterna, de tipo asíncrono, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles.

La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga. Los hay de distintos tamaños, formas y potencias, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento.

Para accionar un motor DC es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para cambiar el sentido de giro se debe invertir la polaridad al campo o armadura, pero nunca a las dos.

A diferencia de los motores paso a paso, los servomotores, no pueden ser posicionados y/o enclavados en una posición específica. Estos simplemente giran a una velocidad proporcional a la tensión y su sentido es controlado por su polaridad.

#### 2.1.1 Principio de funcionamiento.

Según la segunda ley de Lorentz, dice que un conductor por el que pasa una corriente eléctrica y está dentro de un campo magnético tiende a ser expulsado de este.

Dicho de otra manera, si se hace circular una corriente eléctrica por un conductor que está expuesto a un flujo magnético en el que se produce una fuerza proporcional a la corriente, densidad de flujo y ángulo entre ellos.

$$F = (B \times l) \cdot i$$

*F = Fuerza en Newtons*

*i = Intensidad que recorre el conductor en Amperios*

*l = Longitud del conductor en metros*

*B = Inducción en Teslas*

Las direcciones de la inducción magnética, la fuerza en la que se moverá el conductor como también el sentido de circulación de la corriente, se pueden definir con la regla de la mano derecha propuesta por Fleming.

**Figura 1. Motor de corriente continua**



*Fuente: <http://santome7.blogspot.com/2008/12/el-motor-de-corriente-continua-es-una.html>*

#### **2.1.1.1 Fuerza contra electromotriz inducida en un motor.**

La fuerza contra electromotriz es la tensión que se crea en los conductores de un motor como consecuencia del corte de las líneas de fuerza, es el efecto generador. La polaridad de la tensión en los generadores es inversa a la aplicada en bornes del motor.

Los elevados picos de corriente de un motor en el arranque son debidos que cuando una máquina está parada no hay fuerza contra electromotriz y el bobinado se comporta como una resistencia en el circuito.

#### **2.1.1.2 Número de Escobillas.**

Las escobillas deben colocarse de tal manera que no cortocircuiten ninguna de las bobina, es decir se deben conectar en la zona neutra de la máquina. Si la máquina tiene dos polos, tenemos también dos zonas neutras. En consecuencia, el número total de escobillas ha de ser igual al número de polos de la máquina. En cuanto a su posición, será coincidente con las líneas neutras de los polos.

#### **2.1.1.3 Sentido de Giro.**

El sentido de giro de un motor de corriente continua depende del sentido relativo de las corrientes que circulan por el campo y la armadura. La inversión del sentido de giro del motor de corriente continua se consigue invirtiendo el sentido del campo magnético o de la corriente del inducido. Si se permuta la polaridad en ambos bobinados, el eje del motor gira en el mismo sentido. Los cambios de

polaridad de los bobinados, tanto en el inductor como en el inducido se realizarán en la caja de bornes de la máquina.

#### **2.1.1.4 Reversibilidad**

Los motores y los generadores de corriente continua están constituidos esencialmente por los mismos elementos, diferenciándose únicamente en la forma de utilización. Por reversibilidad entre el motor y el generador se entiende que si se hace girar al rotor, se produce en el devanado inducido una fuerza electromotriz capaz de transformarse en energía en el circuito de carga.

En cambio, si se aplica una tensión continua al devanado inducido del generador a través del colector de delgas, el comportamiento de la máquina ahora es de motor, capaz de transformar la fuerza contra electromotriz en energía mecánica. En ambos casos el inducido está sometido a la acción del campo inductor.

#### **2.1.2 Partes del motor.**

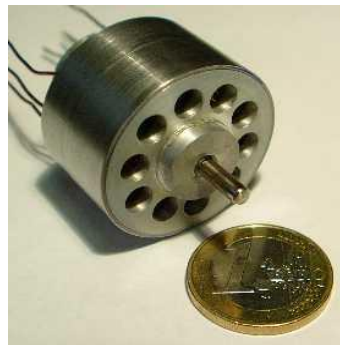
El motor de corriente continua está compuesto de 2 piezas fundamentales:

- Rotor
- Estator

##### **2.1.2.1 Rotor.**

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga. Está formado por:

**Figura 2. Rotor de un motor de corriente continua**



*Fuente: <http://electricidad-viatger.blogspot.com/2008/04/motores-de-corriente-continua.html>*

- **Devanado del rotor.**

Está constituido por unas bobinas de construcción especial, las cuales van a permitir la circulación de corriente por el circuito de armadura. En esta parte del circuito se van a generar los torques y las tensiones inducidas cuando se

encuentre trabajando como motor o generador. Estos dos fenómenos se presentan simultáneamente.

- **Núcleo del rotor**

Se encuentra construido en láminas de acero o hierro y sirve para darle soporte a las bobinas del rotor, reduce el entrehierro que hay entre el rotor y el estator. Debido a que se encuentra en movimiento allí se van a producir los efectos de las corrientes de Eddy y las pérdidas por histéresis que tiene todo el circuito magnético. Por consiguiente este se puede recalentar y dañar el aislamiento de las bobinas del rotor, por este motivo, es necesario generar una ventilación adecuada al motor cuando trabaje con bajas velocidades y con altos torque, cuando tenga una baja carga nominal y velocidades cercanas a la nominal del motor. El ventilador se encarga de mantener la temperatura adecuada.

- **Eje del rotor**

Cumple la función de soportar mecánicamente todos los elementos del rotor y además es por donde se introduce la energía mecánica necesaria cuando trabaja como generador o motor.

- **Conmutador**

Es un rectificador mecánico que sirve para asegurar que la espira reciba la polaridad adecuada, su función es poder sacar la tensión producida por el devanado de inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas, se encuentra ubicado sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas.

El conmutador está construido con pequeñas láminas de bronce llamadas delgas que sirven para conectar las bobinas al exterior por medio de las escobillas. Una forma fácil de diferenciar si una máquina es de corriente continua o de corriente alterna es observar la construcción del conmutador, si está formado por pequeños trozos de bronce la máquina es de corriente continua y si por el contrario su conexión hacia el exterior es en forma de anillos, el motor es de corriente alterna. También es llamado colector.

- **Escobillas**

El rotor siempre está en movimiento, por él debe circular una corriente para que pueda producir un par, esta corriente se hace llegar por medio de las escobillas.

- **Rodamientos**

El rotor tiene la posibilidad de moverse y el estator debe estar anclado a un soporte mecánico, estos deben estar separados por un elemento que permita un adecuado acople entre las dos partes, estos se denominan rodamientos, en máquinas pequeñas estos elementos están constituidos en bronce denominados



bujes y normalmente son sólidos y en máquinas grandes son construidos con rodamientos o balineras que reducen la fricción entre las partes y permiten una adecuada lubricación.

### **2.1.2.2 Estator**

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio.

El devanado del estator está formado por:

- **Devanado de campo**

Se dedica exclusivamente a producir el campo magnético que necesita todo motor o generador para que haya inducción de tensión o producción de torque. El devanado está compuesto por uno o más arrollamientos y dependiendo de la cantidad de estos y su conexión la máquina recibe un nombre y un comportamiento diferente. En general, el devanado de campo está compuesto por un devanado serial (llamado así porque se conecta en serie con el devanado de armadura) cuya característica es que tiene pocas vueltas y es construido con un conductor grueso y por estas razones tiene una resistencia baja. El segundo devanado es el paralelo o shunt (llamado así porque se conecta en paralelo con el devanado de armadura), la principal característica, es que tiene muchas vueltas y además se construye con un conductor delgado, por tal razón posee una resistencia alta. Si la máquina solo tiene devanado serie recibe el nombre de serial. Si tiene solo devanado paralelo la máquina se llama shunt o de excitación independiente, si tiene los dos se llaman compuesto y dependiendo de la conexión de estos dos puede llamarse shunt largo o corto y también puede ser acumulativo o diferencial.

- **Devanado de Compensación**

Cuando los motores grandes trabajan con toda su carga (corrientes de armadura grandes) las corrientes de armadura empiezan a influenciar notablemente en el campo magnético producidos por los polos del estator y lo deforman. Lo que implica que el motor va a perder ciertas características de funcionamiento. Para recuperarlas se hace necesario restablecer o contrarrestar este fenómeno y para ello se construyen los polos de compensación. Por estos va a circular la corriente de armadura que compensaría las deformaciones del campo magnético principal.

- **Devanado de Campo**

Al igual que el rotor está construido de láminas de acero o hierro de alta permeabilidad magnética y juntos forman el circuito magnético, también es conocido como yugo o armazón.

- **Borneras de Conexión**

Son tornillos de conexión que sirven para conectar eléctricamente los devanados del motor con las fuentes de alimentación externa. Muchas veces se puede distinguir el tipo de motor con solo contar los tornillos de sujeción de la bornera. Si tiene solo dos terminales, el motor solo tiene el devanado de armadura. Si tiene cuatro cables se tiene acceso al devanado de armadura y de campo, puede ser serial de resistencia baja o paralelo de resistencia alta. Si tiene cuatro cables se trata de un motor compuesto o tiene devanados de compensación así aplica cuando los motores son grandes de 10Hp o más.

### **2.1.3 Etapas de funcionamiento de los motores de corriente continua.**

#### **2.1.3.1 Momento de arranque.**

Comprende desde el momento en que se energizan los circuitos de campo y armadura, hasta que el motor consigue una velocidad estable. Este es uno de los momentos críticos, pero es transitorio, ya que en este momento las corrientes son muy altas, y las aceleraciones impartidas a las cargas sujetas al eje del motor que experimenta son grandes. Por tales razones, se hace necesario limitar la corriente de arranque a unos valores lo suficientemente pequeños para no dañar los motores, las cargas y las instalaciones eléctricas. Como se dijo anteriormente, en esta etapa es donde se manejan corrientes altas las cuales se pueden causar daños a las cargas mecánicas, para impedir estos sucesos se ha implementado varios métodos de arranque cuya única función es limitar los picos de corriente evitando los dos efectos anteriores, la única desventaja que se tiene es que el motor demora más tiempo en llegar a la velocidad deseada.

- **Arranque a tensión reducida**

Este se implementa con un transformador que posea varios tomas o tapas o también con un auto-transformado variable (Variac) y un rectificador, cualquiera de los dos que se use debe tener una tensión lo suficientemente pequeña para que el motor tome solo dos o tres veces la corriente nominal. Con ello se reduce los momentos acelerantes que se le apliquen a la carga y se evita que las instalaciones eléctricas y mecánicas sufran. La tensión que se le debe aplicar al motor se puede obtener por la siguiente ecuación:

$$V_{arr} = K \times I_n \times R_a$$

*V<sub>arr</sub> = Tensión que se le debe aplicar en el momento de arranque.*

*I<sub>n</sub> = Corriente nominal del motor a plena carga y se debe consultar en la placa del motor.*

*R<sub>a</sub> = Es la resistencia del circuito de armadura.*

- **Arranque por resistencia de armadura**

Para este tipo de arranque, se deben introducir unas resistencias en serie con el circuito de armadura con el fin de limitar la corriente en el momento de arranque y después corto-circuitarlas, para que el motor tenga buena regulación de velocidad y pueda desarrollar las características nominales con que fue construido.

La ecuación que se usa para hallar la resistencia es la siguiente:

$$R_{arr} = \frac{V_n}{K \times I_n}$$

*R<sub>arr</sub> = Resistencia que se debe introducir en el momento del arranque.*

*V<sub>n</sub> = Tensión de alimentación nominal del motor.*

*K = Es una constante que está entre 1 y 3, y depende de que tan rápido se pueda arrancar el motor.*

Cuando se trabaja con motores grandes, no es suficiente un solo paso para arrancarlos, sino hay necesidad de diseñar circuitos de potencia y control más complejos para los diferentes métodos de arranque.

#### **2.1.3.2 Momento de regulación de velocidad.**

Este momento comprende desde que el motor ha llegado a su velocidad de trabajo hasta que se le pretende cambiar el sentido de giro o hasta que el motor se quiera parar.

#### **2.1.3.3 Momento de frenado.**

Comprende desde el momento en que el motor está en la velocidad deseada y pretende llevar la velocidad a cero. Aquí se pueden experimentar grandes desaceleraciones que pueden dañar el motor o algunas de las instalaciones.

#### **2.1.3.4 Momento de inversión de giro.**

Comprende el momento en el cual se tiene una velocidad deseada hasta que el motor llega a otra velocidad en el otro sentido de giro.

#### **2.1.4 Método de regulación de velocidad.**

La regulación de velocidad se hace necesaria para que una carga mecánica se pueda mover a una velocidad constante, es decir, se le debe impartir al motor una velocidad definida. En la actualidad, existen varios métodos para regular la velocidad que pueden ser implementados y que tienen sus características propias en el funcionamiento del motor y estas se pueden analizar teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$n = \frac{K_g (V_a - R_a \times I_a)}{K_f \times I_f}$$

$n$  = Velocidad deseada

$V_a$  = Tensión de Alimentación

$I_a$  = Corriente de armadura

$I_f$  = Corriente de campo

$R_a$  = Resistencia de armadura

$K_g$  = Constante de Voltaje

$K_f$  = Constante de Campo

La velocidad depende básicamente de tres parámetros, resistencia de armadura, tensión de armadura y corriente de campo; existen varios tipos de control por velocidad:

#### **2.1.4.1 Regulación por tensión de armadura.**

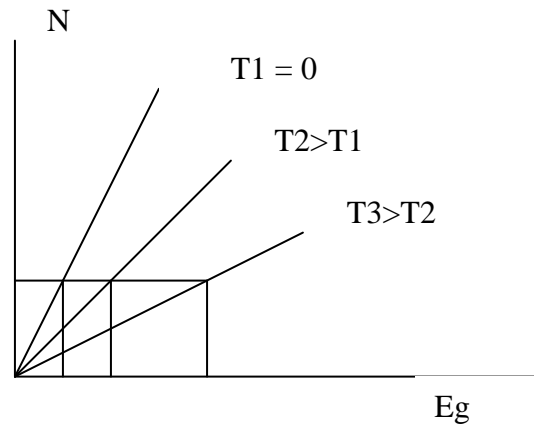
Es tal vez la forma más conveniente de regularle la velocidad, su relación es casi lineal, pero en motores pequeños o servomotores es absolutamente lineal. La relación es lineal cuando el motor está en vacío, la velocidad va decayendo a medida que el motor tiene mayor carga. Por este método al motor se le puede variar la velocidad desde cero hasta que el motor alcance la nominal. (Figura 4)

#### **2.1.4.2 Regulación por resistencia en serie con el circuito de armadura.**

Para lograr este objetivo se hace necesario introducir una resistencia de pocos ohmios y alta potencia en serie con el circuito de armadura, con el fin de que en esta haya una caída de tensión y así disminuya el valor de la tensión en el motor. Este es tal vez, el método más costoso de regular la velocidad por las grandes potencias que disipa la resistencia y es poco utilizado porque es bastante influenciado por la carga.

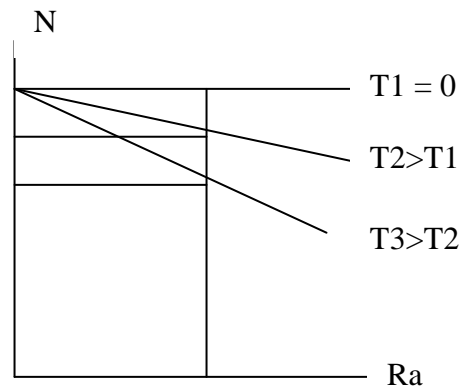
Se debe conocer el punto exacto de funcionamiento (velocidad) y además se debe conocer con precisión la carga que llevara el motor. Si la carga varía un poco la velocidad también lo hará. Las pérdidas de potencia en la resistencia de armadura colocada para la regulación de velocidad son grandes. La velocidad no se puede variar en un amplio rango.

**Figura 3. Relación Velocidad vs Tensión de Armadura**



$N = \text{Velocidad}$   
 $E_g = \text{Tensión de armadura aplicada}$   
 $T_1, T_2, T_3 = \text{Pares de carga}$

**Figura 4. Relación Velocidad vs Resistencia de Armadura**



Se debe conocer el punto exacto de funcionamiento (velocidad) y además se debe conocer con precisión la carga que llevara el motor. Si la carga varía un poco la velocidad también lo hará. Las pérdidas de potencia en la resistencia de armadura colocada para la regulación de velocidad son grandes. La velocidad no se puede variar en un amplio rango.

#### **2.1.4.3 Regulación de velocidad usando corriente la corriente de campo.**

Esté método sugiere que se inserte una resistencia variable en el circuito de campo con el fin de dejar pasar más o menos corriente y así variar el flujo en los

polos del motor. Este método es útil cuando se quiera llevar a un motor por arriba de la velocidad nominal. Como se puede deducir de la fórmula:

$$V_{arr} = K \times I_n \times R_a$$

$V_{arr}$  = Voltaje de arranque

$K$  = Constante

$I_n$  = Corriente nominal

$R_a$  = Resistencia de arranque

La relación no es lineal, para pequeños cambios de la corriente de campo hay una gran variación de la velocidad y de está empieza a ser excesivamente alta cuando la corriente se acerca a cero.

Si se pretende realizar una regulación de velocidad por este método se debe tener en cuenta las siguientes características:

- La relación de la corriente de campo con velocidad es hiperbólica
- Se puede hacer regulación de la velocidad por encima de la nominal.
- El torque que puede desarrollar el motor se ve disminuido notablemente.
- Por tal razón es conveniente saber cual es el torque que debe desarrollar el motor a la velocidad de giro.
- Pequeños cambios de corriente de campo producen grandes variaciones de velocidad.

### **2.1.5 Clases de motores de corriente continua.**

Se pueden dividir dentro de dos grandes tipos:

#### **2.1.5.1 Motores de imán permanente.**

Existen motores de imán permanente (PM, permanent magnet), en tamaños de fracciones de caballo y de números pequeños enteros de caballos. Tienen varias ventajas respecto a los del tipo devanado de campo. No se necesitan las alimentaciones de energía eléctrica para excitación ni el devanado asociado. Se mejora la confiabilidad, ya que no existen bobinas excitadoras del campo que fallen y no hay probabilidad de que se presente una sobre velocidad debida a pérdida del campo. Se mejoran la eficiencia y el enfriamiento por la eliminación de pérdida de potencia en un campo excitador. Así mismo, la característica de par contra corriente se aproxima más a lo lineal. Un motor de imán permanente (PM) se puede usar en donde se requiere un motor por completo encerrado para un ciclo de servicio de excitación continua.

Los efectos de la temperatura dependen de la clase de material que esté construido el imán. Los motores de número entero de caballos de fuerza con imanes del tipo álnico resultan menos afectados por la temperatura que los que tienen imanes de cerámica, porque el flujo magnético es constante. Por lo común, los imanes de cerámica que se utilizan en los motores fraccionarios tienen características que varían con la temperatura muy aproximadamente como varían los campos en derivación de las máquinas excitadas. Las desventajas son la falta de control del campo y de características especiales velocidad-par. Las sobrecargas pueden causar desmagnetización parcial que cambia las características de velocidad y de par del motor, hasta que se restablece por completo la magnetización.

En general, un motor del tipo PM de número entero de caballos es un poco más grande y más costoso que un motor equivalente con devanado en derivación, pero el costo total del sistema puede ser menor. Un motor PM es un término medio entre los motores de devanado compound y los devanados en serie. Tiene mejor par de arranque, pero alrededor de la mitad de la velocidad en vacío de un motor devanado en serie. Y se subdividen en los siguientes tipos:

- ***Motores de corriente continua sin escobilla.***

Los motores de corriente continua sin escobillas tienen una armadura estacionaria y una estructura rotatoria del campo, exactamente en forma opuesta a como están dispuestos esos elementos en los motores convencionales de corriente directa. Esta construcción aumenta la rapidez de disipación del calor y reduce la inercia del rotor. Los imanes permanentes suministran el flujo magnético para el campo. La corriente directa hacia la armadura se conmuta con transistores, en vez de las escobillas y las delgas del colector de los motores convencionales de corriente directa. Es normal que las armaduras de los motores de corriente continua sin escobillas contengan de dos a seis bobinas, en tanto que las armaduras de los motores convencionales de corriente continua contienen de 10 a 50 bobinas.

Los motores sin escobillas tienen menos bobinas porque se requieren dos o cuatro transistores para conmutar cada bobina del motor. Esta disposición se vuelve cada vez más costosa e ineficiente a medida que aumenta el número de devanados. Los transistores que controlan cada devanado de un motor sin escobillas de corriente continua se activan y desactivan a ángulos específicos del rotor. Los transistores suministran pulsos de corriente a los devanados de la armadura, los cuales son semejantes a los que suministra un conmutador. La secuencia de conmutación se dispone para producir un flujo magnético rotatorio en el entrehierro, que permanece formando un ángulo fijo con el flujo magnético producido por los imanes permanentes del rotor. El par producido por un motor sin escobillas de corriente continua es directamente proporcional a la corriente de la armadura.

- **Servomotores.**

Los servomotores de corriente continua son motores de alto rendimiento que por lo general se usan como motores primarios en computadoras, maquinaria controlada numéricamente u otras aplicaciones en donde el arranque y la detención se deben hacer con rapidez y exactitud. Los servomotores son de peso ligero, y tienen armaduras de baja inercia que responden con rapidez a los cambios en el voltaje de excitación. Además, la inductancia de armadura es muy baja la cual permite obtener en estos motores una baja constante eléctrica de tiempo (lo normal entre 0.05 y 1.5 ms) que proporciona una respuesta más rápida del motor a las señales de comando.

Los motores de dc sin escobillas constan de un rotor con una coraza cilíndrica de bobinas de alambre de cobre o de aluminio. El alambre gira en un campo magnético en el espacio anular entre las piezas polares magnéticas y un núcleo estacionario de hierro. El campo es producido por imanes de fundición de alnico cuyo eje magnético es radial. El motor puede tener dos, cuatro o seis polos. Cada uno de estos tipos básicos tiene sus propias características, como son la inercia, forma física, costos, velocidad y peso. Aun cuando estos motores tienen capacidades nominales similares de par, sus constantes físicas y eléctricas varían en forma considerable. La selección de un motor puede ser tan sencilla como ajustar uno al espacio del que se disponga. Sin embargo, en general éste no es el caso, ya que la mayor parte de los servo sistemas son muy complejos.

**Figura 5. Servomotores**



*Fuente: <http://www.galilmc.com/products/servo-motor.php>*

Un servomotor puede ser definido como un motor eléctrico de corriente continua el cual tiene la capacidad de mantener cierta velocidad, de acuerdo a su configuración, y mantenerla hasta que se le indique. Esto se debe a que puede ser controlado dentro de su rango de operación por medio de un circuito de control, el cual recibe un ancho de pulsos que dan la velocidad al motor. Una de las principales características de los servomotores es su bajo momento de inercia y su característica lineal entre tensión vs velocidad, esto es lo que permite que sean utilizados frecuentemente en sistemas de robótica y radiocontrol.



Por medio de su sistema de control se pueden clasificar los servomotores en:

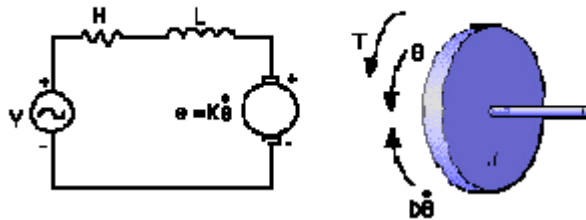
- Servo analógico
- Servo digital

Los servomotores están compuestos por un motor de corriente continua, caja reductora (posee varios engranajes para la reducción de la velocidad) y un circuito de control.

### 2.1.6 Función de transferencia de un motor de corriente continua.

Un motor de corriente continua posee un movimiento rotacional y traslacional. En la siguiente figura se puede observar los parámetros que influyen en el sistema de rotación y en el circuito eléctrico.

**Figura 6. Parámetros que influyen en el sistema de rotación y circuito eléctrico**



*Fuente: Modelado, simulación y control de sistemas dinámicos. P.f.puleston y f.valenciaga*

Donde:

Momento de inercia:

$$J = 0.01 \frac{kg \times m^2}{s^2}$$

Coeficiente de rozamiento:

$$b = 0.1 N_m \times s$$

Constante de fuerza electromotriz:

$$K = K_e = K_t = 0.01 \frac{N_m}{A}$$

Resistencia de armadura:

$$R = 1 \Omega$$

Inductancia de armadura:

$$L = 0.5 H$$

Aplicando la transformada de Laplace y haciendo cero las condiciones iniciales, al función de transferencia entre la entrada de tensión y la velocidad de rotación como salida.

$$s.(J.s + b).Velocidad_{rotación}(s) = K.I(s)$$

$$(L.s + R).I(s) = V - K.s.Velocidad_{rotación}(s)$$

$$\frac{Velocidad_{rotación}}{V} = \frac{K}{(J.s + b) \times (L.s + R) + K^2}$$

## 2.1.7 Consideraciones generales para la determinación de los parámetros en los servomotores.

### 2.1.7.1 Momento de inercia ( $J$ ).

Es la resistencia de los cuerpos físicos para aceptar un cambio de estado. Para la medición de estos parámetros en un servomotor se emplea un método denominado péndulo de torsión o también por medio de un dispositivo medidor de inercia. Se comprueba experimentalmente que el momento de inercia es proporcional al cuadrado del periodo de oscilación.

### 2.1.7.2 Resistencia de armadura ( $R_a$ ).

La resistencia de armadura se encuentra aplicando la ley de Ohm, a través del ajuste de un voltaje para una cuarta parte de la corriente nominal se armadura, la cual se halla aplicando el voltaje nominal de placa y sin carga.

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

A está resistencia es necesario adicionarle el valor de la resistencia de los devanados de armadura, contacto por escobillas y elementos de conmutación.

### 2.1.7.3 Inductancia de armadura ( $L_a$ )

La medición de la inductancia de armadura se puede verificar aplicando diferentes técnicas como lo son el puente Maxwell, pero así mismo con la moderna instrumentación de la tecnología se puede hallar con ayuda del osciloscopio digital, ya que se obtiene la constante de tiempo, por lo tanto se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$L_a = T_e \times R_a$$

$L_a$  = Inductancia de armadura

$T_e$  = Constante de tiempo

$R_a$  = Resistencia de armadura

Otro método es utilizar el dispositivo de puente de impedancias.

#### 2.1.7.4 Constante de voltaje ( $K_e$ )

Cuando el motor se encuentra en rotación, en el rotor aparece una tensión inducida proporcional a la velocidad angular, esta relación es lineal y depende de una constante y es dada por la ecuación.

$$E_b = K_s W = K_s \frac{d\theta}{dt} = K_s N$$

$N$  = Velocidad en rpm

$K_e$  = Constante de voltaje

#### 2.1.7.5 Constante de torque.

La energía entregada por el motor durante su rotación se puede expresar por medio de un par electromagnético  $T$ , el cual es proporcional al producto de corriente de inducido  $I_a$  por el flujo  $\phi$  en el entrehierro, que a su vez es proporcional a la corriente de campo  $I_f$ .

Entonces de esta manera se puede definir:

$$T = K_t \times I_a \times I_f$$

Cuando el motor posee imanes permanentes, se puede asumir que todos los parámetros  $K_f$ ,  $I_f$  y  $K_i$  se pueden reunir en una sola constante  $K_t$ . Por tanto la anterior expresión queda solamente así:

$$T = K_t \times I_a$$

La ecuación anterior indica la relación directa que hay entre el par y la corriente del inducido, siendo la constante  $K_t$  de origen experimental. Hay una técnica experimental la cual requiere utilizar un instrumento indicador de valor de torque o dinamómetro. Se mantiene el motor girando a velocidad constante mientras se ajusta gradualmente la carga del dinamómetro hasta llegar a la carga nominal del servomotor.

- **Técnica con la maquina indicadora de torque**

Las lecturas obtenidas de la prueba, o sea la corriente de armadura  $I_a$  y los valores de torque  $\tau$  se grafican de acuerdo a como se muestra en la figura 8.

$$K_a = \frac{\Delta T}{\Delta I_a}$$

- **Técnica paramétrico- dimensional**

Existe otro método para determinar  $R_a$  no recurre a la prueba experimental, pero se reconoce como útil y confiable, aplicable solo en servomotores y motores de corriente continua.

Se basa en utilizar expresiones que guardan una relación paramétrica-dimensional directa entre  $K_t$  con la constante de voltaje de  $K_e$  y cuya comprobación empírica ha sido sustentada.

Dichas relaciones paramétricas son:

$$E_b = K_e W = K_e \frac{d\theta}{dt} = K_e N$$

$$K_t \left( \frac{N_m}{A} \right) = 9.5493 * 10^{-3} K_e \left( \frac{V}{K_{rpm}} \right)$$

$$K_t \left( oz - \frac{I_n}{A} \right) = 1.3524 K_e \left( \frac{V}{K_{rpm}} \right)$$

Donde:

$N_m$  = Newton – Metro

$A$  = Amperios

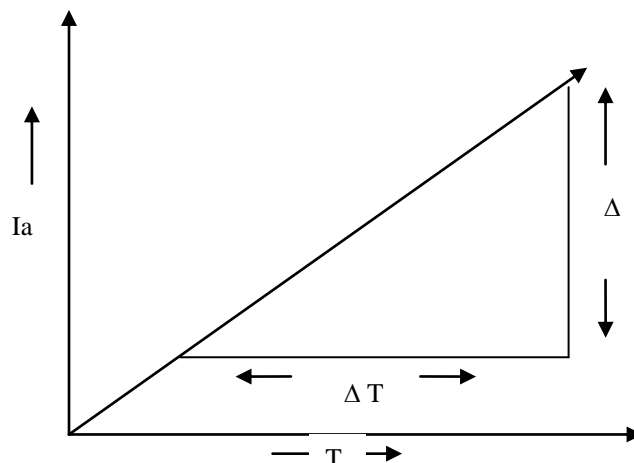
$oz - in$  = Onza-pulgada

$K_{rpm}$  = Kilo revoluciones por minuto

$V$  = Voltios

$Rad$  = Radianes

**Figura 7. Técnica máquina indicadora de torque**



**Fuente:** *Guías laboratorio de control obtención y chequeo de los parámetros funcionales de los servomotores. Ricardo Gálvez.*

#### **2.1.7.6 Constante de tiempo mecánica.**

Es la relación de repuesta transitoria entre la velocidad y la tensión de armadura. Experimentalmente se puede hallar mediante la siguiente expresión:

$$T_m = J \times \frac{R_a}{K_t} \times K_e$$

#### **2.1.7.7 Torque de fricción y corriente de arranque.**

Es una pérdida de fricción estática originada por una oposición al desarrollo de la dinámica inicial del movimiento o freno inicial que presentan las superficies en contacto.

En un motor se manifiesta este estado cuando la corriente de armadura inicial es insuficiente para superar el torque causado por dicha fricción que al ir incrementándose, no se mueve el motor. En un momento dado se superará el torque de fricción, se iniciará la rotación del eje y la corriente de armadura se reducirá. Esta corriente mínima se denomina corriente de arranque y dicha fricción estática se llamará torque de fricción  $T_f$ .

$$T_f = K_t \times I_a$$

#### **2.1.8 Control electrónico para motores de corriente continua.**

El control completo de un motor de corriente continua, se puede hacer controlando la tensión de armadura. Por medio de una manipulación correcta de las tensiones de cada uno de los momentos de funcionamiento que permiten el control del motor (arranque, control de velocidad, frenado e inversión de giro), un dispositivo que maneje la potencia de los servomotores y una programación eficaz de computador se puede ejercer control.

La técnica que se debe utilizar para controlar la tensión de armadura es la Pulse Width Modulation conocida como PWM o modulación por ancho de pulso, la cual se puede conseguir fácilmente por muchos circuitos integrados especializados.

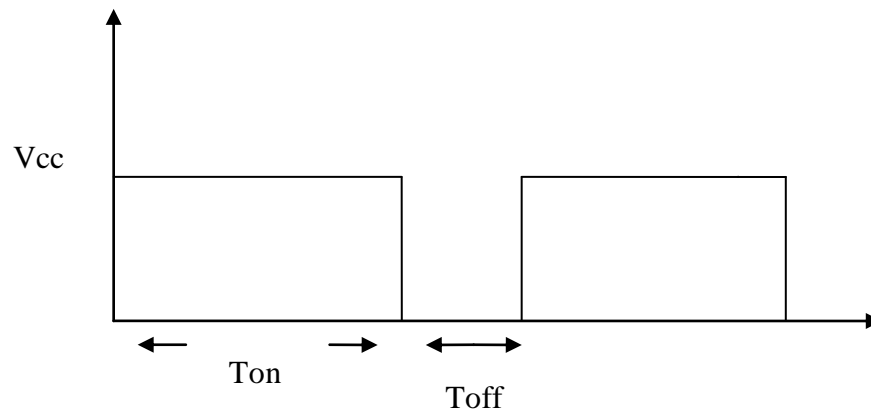
#### **2.1.9 Principio de funcionamiento de PWM**

Una señal de PWM es cualquier onda cuadrada que tenga un tiempo de encendido  $T_{on}$ , un tiempo de apagado  $T_{off}$  y a su vez se presente una periodicidad. Si se calcula el valor promedio de la onda de la figura, se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_{on}} V_{cc} * dt = \frac{1}{T} V_{cc} * t \Big|_0^{T_{on}} = \frac{V_{cc} * T_{on}}{T}$$

Es decir, la tensión promedio aplicada a la armadura del motor es directamente proporcional al tiempo de encendido, tiempo que el circuito está expuesto a una tensión  $V_{cc}$ , y del periodo de la onda cuadrada. Para poder realizar el control del circuito de armadura, se debe disponer de un circuito que pueda variar el tiempo de encendido desde 0% hasta el 100% del periodo o de un programa de computador o microcontrolador que pueda hacer la misma variación. En la mayoría de los casos, no importa la frecuencia de la onda del PWM sino la relación  $K_f = T_{on}/T$ . Es importante recordar que la tensión máxima que se le puede aplicar el motor es la nominal ( $V_{cc}$ ), si se sobrepasa se puede presentar un daño en el dispositivo. La máxima velocidad que se puede llegar alcanzar es la velocidad nominal.

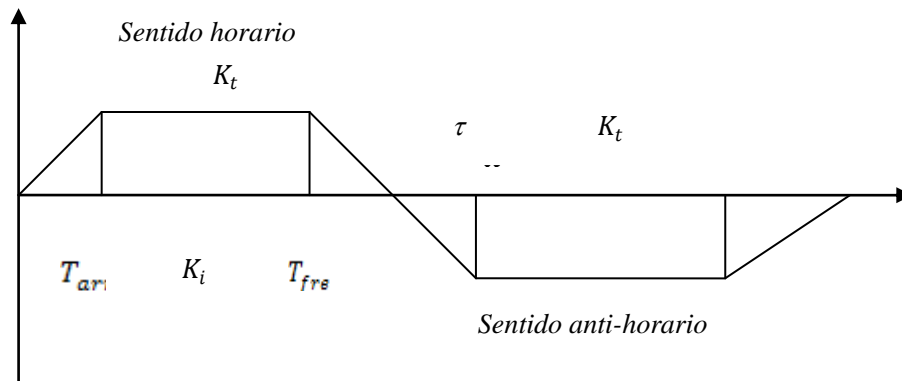
**Figura 8. Funcionamiento de PWM**



*Fuente: Maquinas Eléctricas. Juan Carlos Villamizar*

Si se controla la tensión de armadura del motor se pueden hacer arranques, control de velocidad, frenado e inversiones que no van a perjudicar las cargas ni el motor. Para poder manejar el motor se debe usar la rampa de aceleración que se ve en la siguiente figura:

**Figura 9. Rampa Trapezoidal**



*Fuente: Maquinas Eléctricas. Juan Carlos Villamizar*

La rampa consiste en darle un tiempo de arranque al motor  $T_{arr}$ . Que puede ser modificado ampliando el ancho de pulso de este dispositivo hasta la velocidad que se desee. Después de haber controlado el arranque para que el motor llegue a una velocidad se debe mantener al ancho de pulso constante, si se quiere mantener la velocidad del motor, o se le debe variar en el caso de que se necesite hacer lo mismo con la velocidad.

Para frenar el motor se recurre al frenado regenerativo donde la energía cinética almacenada en el rotor se puede reinvertir en la fuente de alimentación, también se consigue reduciendo el ancho del pulso que se le aplica a la armadura. Para invertir el sentido de giro solo se necesita cambiar la polaridad al motor como se explica a continuación, y se deben seguir exactamente los pasos anteriores para manejar el motor.

Cuando se trabaja con motores grandes las corrientes que manejan en el momento de arranque, cambio de velocidad, inversión de giro y frenado pueden llegar a ser perjudiciales para los dispositivos semiconductores, por ese motivo se debe utilizar un variador de velocidad para un motor de corriente continua que mejora las prestaciones del motor y evita daños tanto en la parte mecánica como en la eléctrica. Este variador debe tener un circuito que limite las corrientes en

estos momentos y para proteger cada uno de los elementos involucrados en el funcionamiento del motor.

## 2.2 Control de posición del servomotor por medio de dsPIC30F2010

### 2.2.1 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).

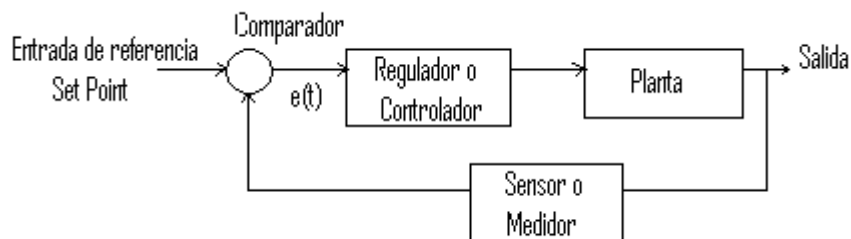
Existen varias maneras de controlar un servomotor, por sistema de control de lazo abierto o sistema de control de lazo cerrado. En un sistema de control de lazo abierto la señal de salida depende únicamente de los valores de la señal de entrada, no reaccionando a las perturbaciones del sistema.

En un sistema de control de lazo cerrado la señal de salida hace una comparación con un nivel de referencia ajustado a la entrada y utilizando esta diferencia como parámetro de control ( $e(t)$ ) denominado señal de error actual.

El controlador permite mantener la salida dentro de límites aceptables de acuerdo al setpoint, para que el controlador se pueda efectuar el sistema debe ser de lazo cerrado, el controlador (PID) mueve a la planta (Motor), la planta debe afectar la medición de la salida (encoder) y la señal de salida debe llegar al comparador (Dspic30f2010) para posteriormente llegar al controlador.

El controlador PID es la suma de tres controladores: proporcional, integral y derivativo.

**Figura 10. Sistema de control de lazo cerrado**



*Fuente: PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd Edition. K. ASTRÖM y T. HÄGGLUND*

#### 2.2.1.1 Proporcional.

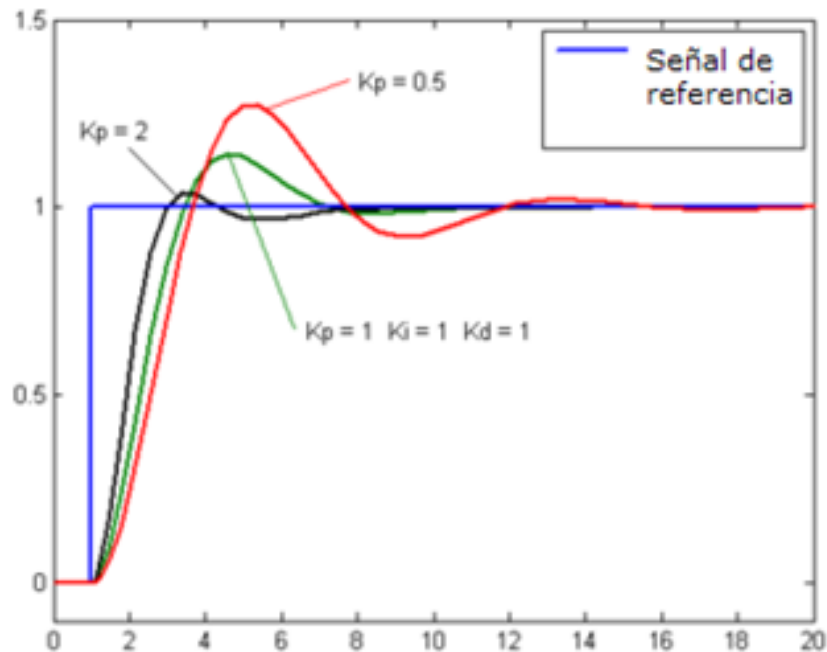


La acción proporcional multiplica el error por una constante ( $K_p$ ), la cual también es conocida como ganancia del controlador, para lograr un error en estado estacionario cercano a cero.

$$\text{Salida} = (K_p)e_{(t)}$$

La respuesta proporcional es la base de el controlador, ya que no considera el tiempo, para eliminar el error permanente se le agregan componentes que si tienen en cuenta el tiempo como lo son las acciones integral y derivativa. Algunas respuestas al variar  $K_p$  se pueden ver en la figura 11.

**Figura 11. Comportamiento del controlador proporcional** 0



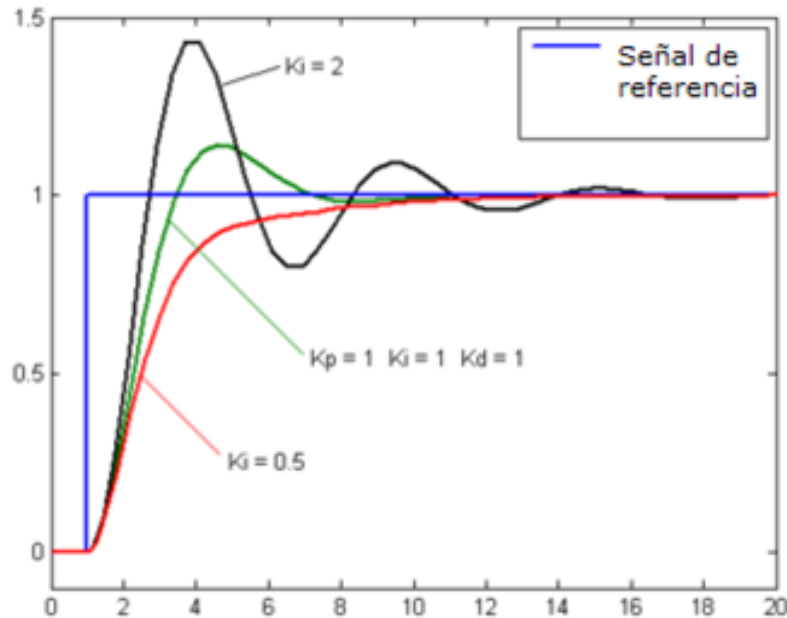
Fuente:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo#Proporcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional)

### 2.2.1.2 Integral.

La acción integral tiene como fin eliminar el error en estado estacionario causado por la acción proporcional. Para esto el error es integrado, la cual suma el error por un periodo de tiempo determinado y posteriormente multiplicando este resultado por una constante integral ( $K_i$ ).

**Figura12. Comportamiento del controlador integral**



Fuente:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo#Proporcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional)

$$Salida = K_i \int e(t)dt$$

Si existe error entre la medición y el setpoint, la acción integral variara la salida hasta que el error no exista. Cuanta más acción integral exista en el controlador, más rápido cambia la salida en función del tiempo. En la figura 13 se puede ver como se puede disminuir el overshoot por medio de la acción integral.

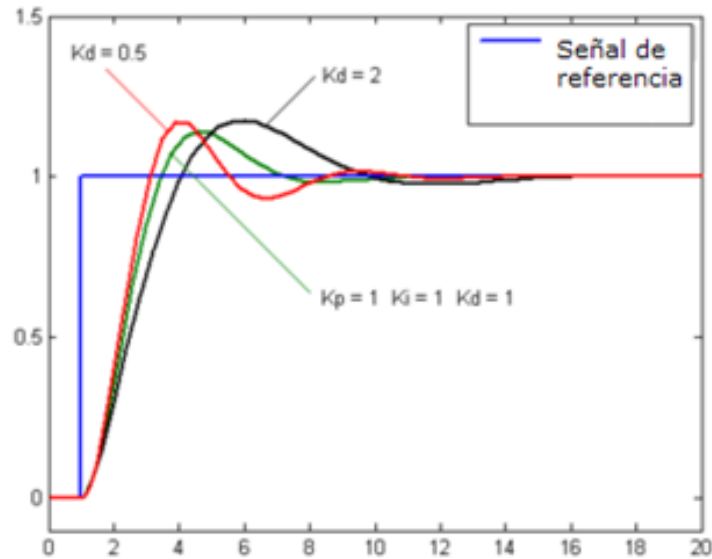
### 2.2.1.3 Derivativo.

La acción derivativa se opone a un cambio en el error, su objetivo es tratar de mantener un error mínimo, si el error es constante solo actúan la acción proporcional y la acción integral. Para esto el error es derivado y posteriormente se multiplica este resultado por una constante derivativa ( $K_d$ ).

$$Salida = K_d \frac{de}{dt}$$

Cuanto más grande sea el tiempo de acción derivativa se provocará inestabilidad al sistema y cuanto más pequeño sea el tiempo de acción derivada la salida oscilara con respecto al setpoint.

**Figura13. Comportamiento del controlador derivativo** 0



Fuente:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo#Proporcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional)

### 2.2.2 Ajustes del controlador PID.

Se debe lograr que el controlador corrija en el mínimo tiempo las perturbaciones del sistema, obteniendo la mínima integral del error. Para esto se debe escoger las constantes ( $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_d$ ) correctas de lo contrario el sistema será inestable y no se llegara a la respuesta deseada (set point). Se requiere estabilidad en respuesta dada por el controlador y no debe oscilar ante ningún cambio del proceso o del setpoint.

Debido a la facilidad para alcanzar excelentes resultados el controlador PID es muy utilizado en un sistema de control, teniendo en cuenta que se debe tener claro el funcionamiento del sistema para poder aplicar el controlador PID. Si solo se desea dar estabilidad al sistema se utiliza la acción proporcional, pero como este produce un error estacionario para eliminarlo se utiliza la acción integral si se desea que la respuesta sea rápida ante errores grandes se utiliza la acción derivativa la cual reduce es error.

### 2.2.3 dsPIC30F2010.

Un microcontrolador es un circuito integrado con varios periféricos dedicados que lo asemejan computador en miniatura. Un Procesador Digital de Señal (DSP) es un circuito integrado con un microcontrolador, el cual procesa la información

procedente de una señal analógica, el cual está diseñado para resolver algoritmos que soportan un campo de aplicación concreto.

Un DSP se caracteriza por tener una arquitectura de memoria de acceso múltiple (permite leer varios datos a la vez, Figura 17), por tener multiplicadores hardware muy rápidos y dispositivos auxiliares integrados en el mismo circuito integrado (convertor A/D-D/A, comparadores, puertos de comunicación y otros dispositivos utilizados en el procesamiento de señales).

Los DSP son usualmente utilizados en audio, regulación de voltaje, control de servomotores, radio digital, sintetizador de voz, mezclador de señales, sonido estéreo, tarjeta grafica, convertidores A/D y D/A, etc.

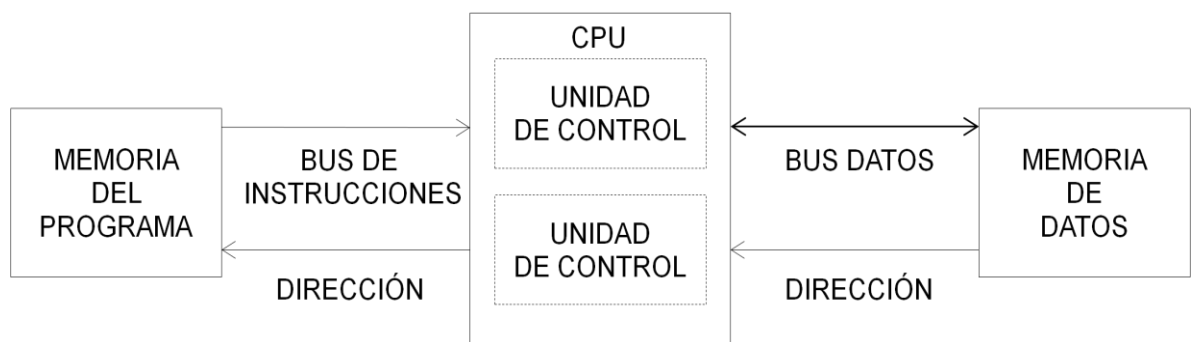
Un dsPIC es un controlador digital de señal que ofrece velocidad, potencia, manejo, flexible de interrupciones, un campo de funciones analógicas y digitales, etc. La serie dsPIC30F de Microchip es un microcontrolador de 16 bits el cual posee las principales capacidades de los DSP dando paso al procesamiento de señales análogas y digitales.

La serie dsPIC30F está dividida en tres grupos de acuerdo a sus utilidades:

- Para dispositivos de propósito general. Muestran las principales características de la familia dsPIC30F
- Para control de motores y sistemas de alimentación.
- Para control de sensores

#### Figura 14. Arquitectura Harvard.

*Se caracteriza por disponer de dos memorias independientes para datos e instrucciones, lo que fomenta el acceso simultaneo*



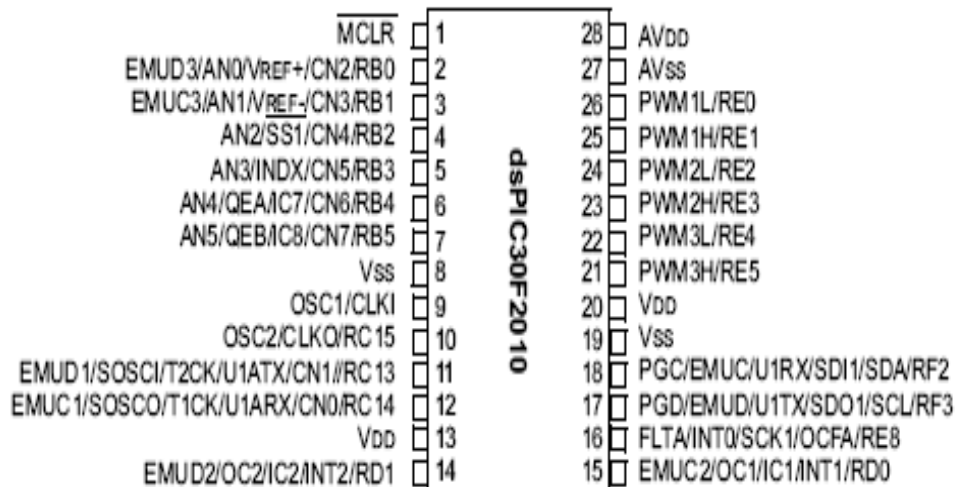
*Fuente: Microcontroladores avanzados dsPIC. J. ANGULO, B. GARCÍA, I. ANGULO y J. VICENTE.*

Los dsPIC30F son muy usados en la regulación de velocidad, posición y dirección de giro de los motores, una de sus principales características es el

módulo PWM. Uno de los dispositivos que se utiliza para el control de motores es el dsPIC30F2010, el cual posee 3 módulos PWM (6 salidas PWM) y un módulo UART.

**Figura 15. Pines dsPIC30F2010**

28-Pin SDIP and SOIC



**Figura 16. Familia dsPIC30F para control de motores y sistemas de alimentación**

dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family\*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	IC™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

\* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

### 2.2.3.1 Modulo UART.

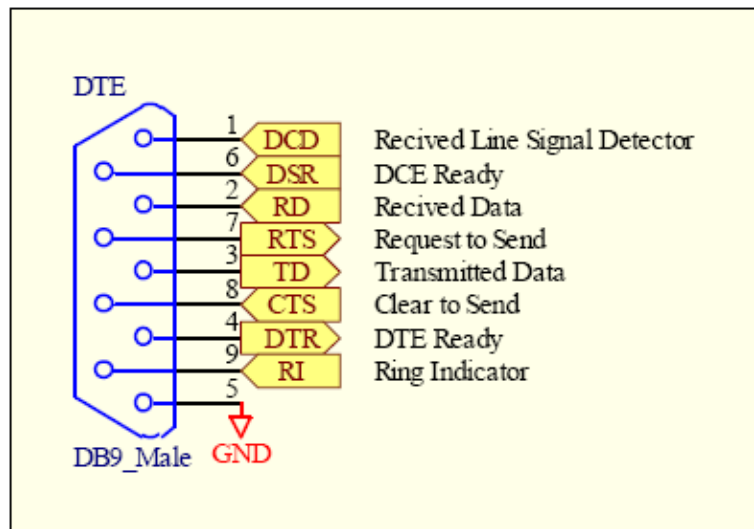
EL módulo UART (Transmisor Receptor Universal Asíncrono) le permite a la serie dsPIC30F tener una comunicación asíncrona, que puede adaptarse a interfaces como RS-232. La transferencia de datos se realiza por medio de las líneas UTX (Transmisión) y URX (Recepción) las cuales envían y reciben bits de acuerdo a una frecuencia establecida en el internamente en el UART.

- **Interfaz RS232.**

Es utilizado para realizar comunicación serial asíncrona RS232 entre el puerto COM del computador y el microcontrolador. El estándar RS232 (EIA/TIA-232-E) define los niveles de voltaje que se deben utilizar y los pines de conexión al equipo. El estándar RS232 tiene 4 grupos de señales: común, datos, control y temporización, sumando 24 señales, pero algunos solo utilizan dos para datos y dos para control además de la señal de tierra para esto se utiliza el conector de 9 pines (DB9). El estándar establece que el voltaje entre +5 y +15 voltios es un nivel alto y un voltaje entre -5 y -15 voltios es un nivel bajo. El receptor está diseñado para permitir un nivel de ruido de 2 voltios.

La comunicación por RS232 está diseñada para distancias menores de 15 metros y para velocidades de comunicación hasta de 20(Kb/s).

**Figura 17. Señales en un conector DB9**



*Fuente: Diseño del módulo RS-232. Por Michael Kusch*

Las conexiones que como mínimo se deben tener conectadas son las TD para transmitir y RD para recibir datos. Así mismo, si desea utilizarse control de flujo por hardware, se utilizan las señales RTS (petición de transmisión) y CTS

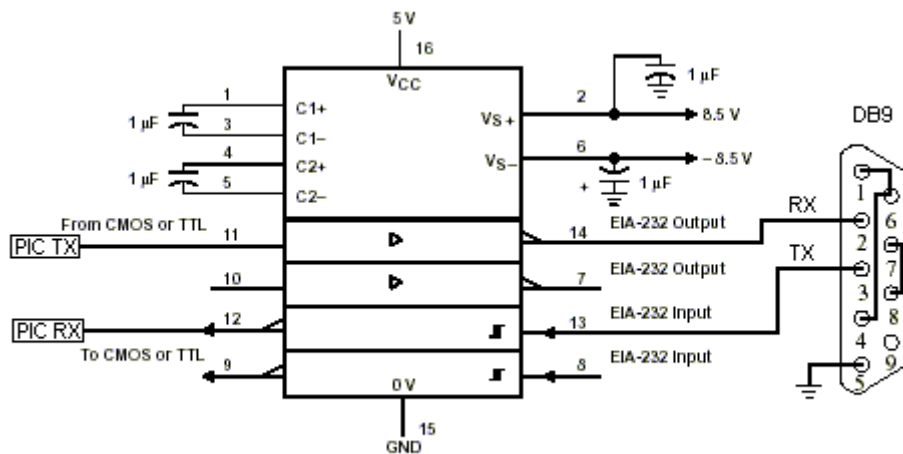
(habilitado para transmitir). Si se va a manejar control de flujo de hardware se conectan las señales RTS (petición de transmisión) y CTS (Habilitado para transmitir)

- **Características MAX 232.**

El estándar RS232 fue creado en el año 1967 antes de la lógica TTL. Para lograr la comunicación entre el RS232 y el microcontrolador se necesita de un dispositivo que realice la conversión de voltajes especificados por el estándar RS232 cuando se realice la transmisión y voltajes lógicos TTL cuando se realice la recepción. Este dispositivo se conoce como MAX 232, internamente posee 4 convertidores (2 para lógica TTL a estándar RS232 y 2 para estándar RS232 a lógica TTL) con lo que se pueden manejar 4 señales del puerto serie al computador.

Para lograr un buen funcionamiento del MAX 232 se debe poner unos condensadores externos (1microfaradio para obtener 120Kbps o 100 nano faradios para obtener 64Kbps).

**Figura 18. Circuito Básico Max 232 y conexiones DB9**



Circuito básico con el MAX232

Fuente: Datasheet MAX232

Según la hoja de especificaciones del MAX232 estas son sus principales características:

- $V_{cc}$  : 4.5v a 5.5v
- $I_{out}$ : 4mA
- $V_{in}$  máximo RS232: +/- 30v
- $V_{out}$  RS232: +/- 15v
- $R_{in}$  RS232: 5KΩ
- $R_{in}$  TTL/CMOS: 400KΩ

- Las entradas se pueden dejar al aire (entrada TTL al aire se considera un 0 al invertirse en la salida, entrada RS232 al aire se considera un 1 al invertirse en la salida)

- Data Rate: 120 Kbps

- **Configuración modulo UART**

Para la configuración del modulo UART del dsPIC30F2010 se debe tener en cuenta los siguientes registros.

U1BRG: Registro tasa de baudios

$$U1BRG = \frac{FCY}{16 \times (Baud Rate)} - 1$$

FCY= Frecuencia de trabajo del dsPIC

Baud Rate= Tasa de Baudios

U1MODE: Registro de configuración uso de modulo.

U1STA: Registro de estado.

U1TXREG: Registro de transmisión.

U1RXREG: Registro de recepción.

**Configuración básica de modulo UART: A** continuación se muestra una sección del programa para configurar el módulo UART del dsPIC30F2010.

```
CLR U1BRG ; Se inicializa U1BREG para transmisión
MOV #25,W0 ;a 9600 baudios con un reloj de 4Mhz
MOV W0,U1BRG
MOV #0x8000, W0 ; Se habilita la recepción de datos
MOV W0,U1MODE
MOV #0x0510, W0
MOV W0,U1STA
MOV #0x8020, W0 ; Se habilita el módulo UART
MOV W0,U1MODE
MOV #0x0200, W0 ; Se habilita interrupción por recepción
MOV W0,IEC0
CLR IEC1
CLR IEC2
```

### 2.2.3.2 Módulo PWM.

Al variar el ancho de pulso de la señal (Modulación por anchura de pulso, PWM) en un tren de pulsos, varía la tensión promedio entregada al motor controlando así la velocidad del motor. La serie dsPIC30F posee dos gamas para el control de motores, la gama baja los cuales poseen tres módulos PWM (6 salidas) y la gama superior con cuatro módulos (8 salidas). El dsPIC30F2010 pertenece a la gama



baja, los módulos poseen dos salidas diferentes (PWMxH alta, PWMxL baja) repartidos de la siguiente manera:

MOD1:PWM1H, PWM1L  
MOD2:PWM2H, PWM2L  
MOD3:PWM3H, PWM3L

- **Configuración modulo PWM.**

Para la configuración del modulo PWM del dsPIC30F2010 se debe tener en cuenta los siguientes registros.

PTCON. Registro de control de la base de tiempo. En este registro se configura la base de tiempo, el valor del postescalado, el valor del preescalado del periodo de la entrada del reloj y el modo de funcionamiento de la base de tiempo.

PWMCON1: Registros de control. En este registro se selecciona el modo de salida de cada modulo (independiente o complementario), se configura que salidas van a funcionar (PWMxH, PWMxL).

OVDCON: Registro de control de cancelación. Indica por quien es controlada la salida PWM (PWMxH, PWMxL).

PTPER: Registro de carga de periodo de la señal. Contiene el valor del periodo de la señal.

$$PTPER = \frac{FCY}{FPWM \times (Preescalado)} - 1$$

FCY= Frecuencia de trabajo del dsPIC

FPWM= Frecuencia deseada para la señal de salida

PDCx: Carga el ciclo de trabajo de la señal (PDC1, PDC2, PDC3).

$$PDCx = PTPER \times \text{Ciclo de trabajo}(\%)$$

**Configuración básica de modulo PWM:** A continuación se muestra una sección del programa para configurar el módulo PWM del dsPIC30F2010.

```
MOV    #0X8034,W0           ;Registro de control: base tiempo (1),
MOV    W0,PTCON             ; post (0011), pre (01) 1:4 modo normal 00
MOV    #0X111,W0
MOV    W0,PWMCON1          ;Modulo de trabajo funcionamiento, mod 1
CLR    PWMCON2
```

```

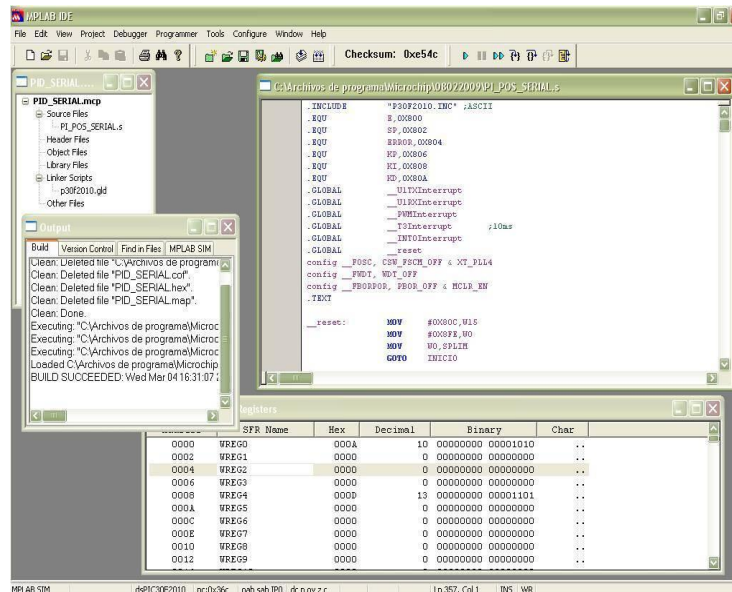
BCLR    IFS2,#PWMIF           ;Bandera
BCLR    IEC2,#PWMIE           ;Desactivar Interrupción
BCLR    OVDCON,#POVD1H       ;Indica quien controla a PWM
BCLR    OVDCON,#POUT1H       ;Valor de la salida
BCLR    OVDCON,#POVD1L       ;Indica quien controla a PWM
BCLR    OVDCON,#POUT1L       ;Valor de la salida
MOV     #4999,W0
MOV     W0,PTPER               ;Periodo de la señal
MOV     #300,W6                ; Ancho de pulso PWM (Ciclo de trabajo)
MOV     W6,PDC1                ;de 0 a 4999

```

## 2.2.4 MPLAB IDE.

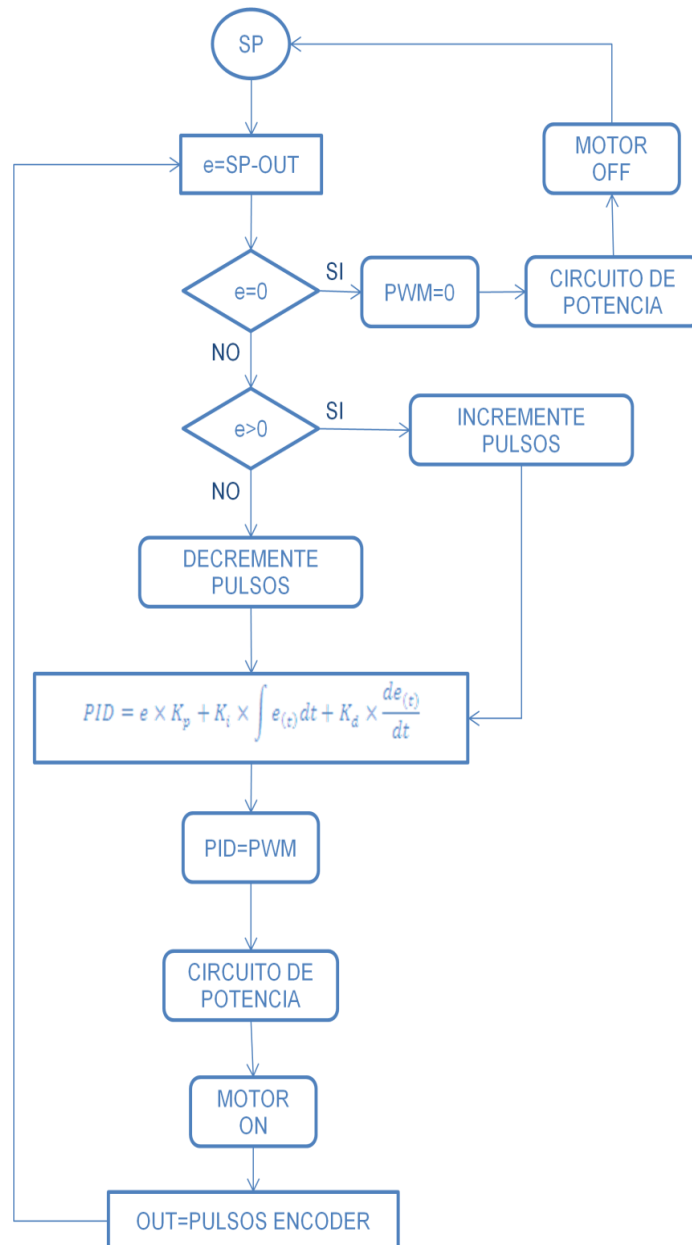
MPLAB es una herramienta para escribir y desarrollar de manera sencilla el software compatible con dsPIC30F. Proporciona un depurador a nivel del lenguaje ensamblador ASM30 para los microcontroladores PIC. MPLAB incorpora todas las herramientas necesarias para la realización de cualquier proyecto, ya que además de un editor de textos cuenta con un simulador en el que se puede ejecutar el código paso a paso para ver así su evolución y el estado en el que se encuentran sus registros en cada momento.

Figura 19. Ventana MPLAB IDE



A continuación se presenta un diagrama de bloques el cual explica en que consiste el programa de control de posición PID de un servomotor con un dsPIC30F2010. Ver figura 20.

**Figura 20. Diagrama de bloques**



SP= Set Point (mm).

e= Error

OUT= Salida (Pulsos del encoder)

Nota: Cada vuelta del motor es equivalente a un milímetro (mm) de desplazamiento, el encoder del motor que se utiliza en esta práctica por cada vuelta emite 100 pulsos. Por lo tanto 1 vuelta=1mm=100pulsos.

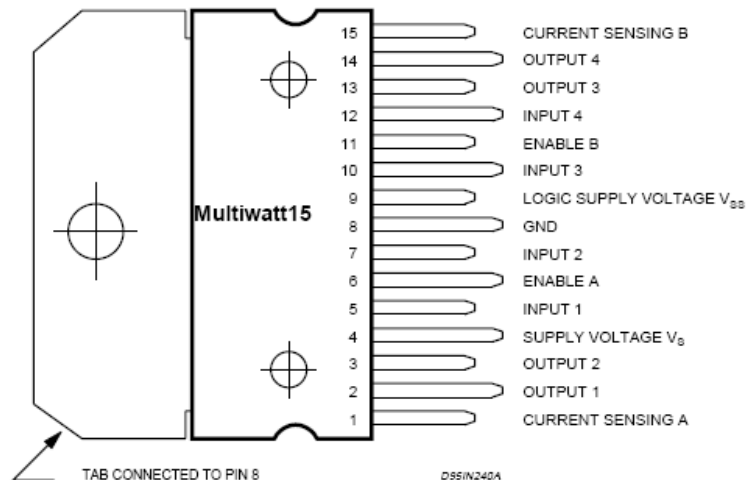
## 2.2.5 MATLAB.

MATLAB es un software que permite el desarrollo de cálculos numéricos y simbólicos el cual posee características graficas que facilita el trabajo científico y de ingeniería Es un entorno interactivo que implementa más de 500 funciones para el trabajo en distintos campos de la ciencia. MATLAB es compatible con varias plataformas, facilitando el trabajo con sistemas operativos y relacionando el trabajo entre las plataformas, por lo tanto es un software en crecimiento y adaptable a los avances científicos y al trabajo en los laboratorios de investigación muy utilizado en la ingeniería por su capacidad de resolver problemas en el desarrollo de productos nuevos.

Uno de las facilidades que ofrece MATLAB es crear programas de fácil entendimiento para el usuario como Interfaces gráficas en MATLAB usando GUIDE (Graphical User Interfase Development Environment). Un GUIDE es un juego de herramientas con el cual se crean GUIs (Graphical User Interfaces) de manera rápida facilitando el diseño de cada control, ya que se asigna su función por medio de un CALLBACK escribiendo el código de MATLAB que se ejecutará cuando él sea utilizado. MATLAB también permite realizar comunicación serial, la cual se utilizo para conectar el computador con el microcontrolador dsPIC30F2010 con la ayuda de un MAX232. Esta comunicación en conjunto con la interfaz grafica permite al usuario introducir el valor del setpoint deseado para el control de posición.

## 2.2.6 Circuito Integrado L298.

Figura 21. Pines L298

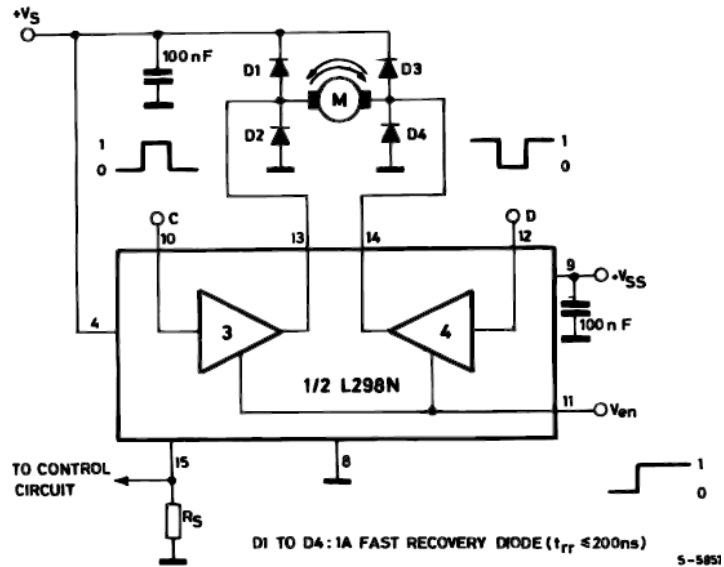


Fuente: DataSheet L298

El circuito integrado L298 es un puente H con el cual se controla el cambio de giro del motor. Este circuito integrado posee dos puente H por lo tanto puede manejar dos motores, soporta tensiones de hasta 46V y una corriente máxima de 4A.

Los pines 5 y 7, 10 y 12 son entradas TTL (1/0) con las cuales se controla la dirección del motor para que gire a la derecha, izquierda o que se detenga.

**Figura 22. Circuito para controlar la dirección de giro de un motor con el L298**

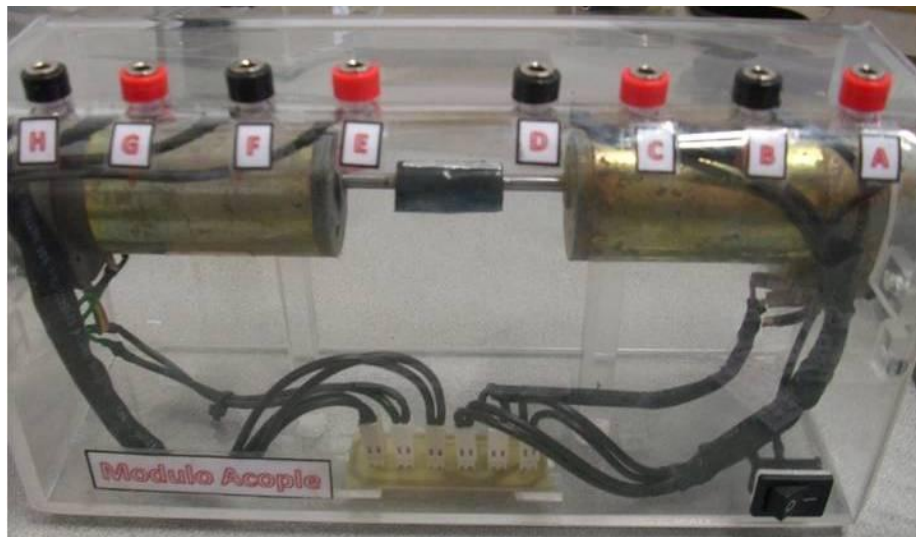


Fuente: DataSheet L298

### 3. Construcción y mantenimiento de módulos

#### 3.1 Modulo acople

Figura 23. Modulo Acople



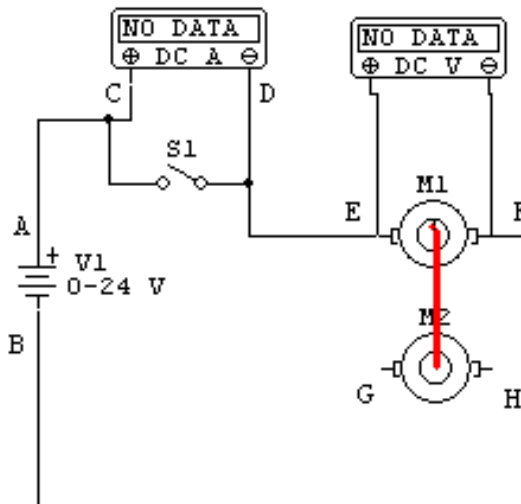
### 3.1.1 Construcción

Este módulo fue construido con dos servomotores de 24V DC los cuales poseen un encoder de pulsos, se encuentran acoplados por medio de un eje de bronce y el tornillos prisioneros de 3mm de diámetro para el ajuste, esto fue realizado por un taller de torno, posee borneras de conexión para la alimentación, corriente del motor, voltaje del motor, y voltaje del generador, estas se encuentran identificadas por letras de la A a la H distribuidas de la siguiente manera:

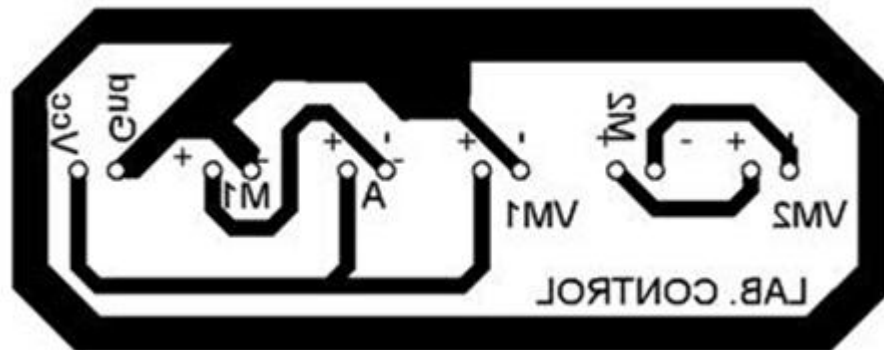
- A: Voltaje de alimentación +
- B: Voltaje de alimentación -
- C: Corriente de alimentación +
- D: Corriente de alimentación -
- E: Voltaje motor + M1
- F: Voltaje motor - M1
- G: Voltaje generador + M2
- H: Voltaje generador - M2

Posee un circuito interno de conexión el cual facilita las mediciones en cada una de las borneras.

Figura 24. Circuito Modulo Acople



**Figura 25. Baquelita Modulo Acople**



El circuito original se encuentra abierto para la medición de la corriente en el motor por ese motivo se debe tener el amperímetro conectado en los puntos C y D del módulo, si no se desea conectar el amperímetro se cierra el switch (S1) para activar el circuito e ignorar la medición de la corriente.

Los motores y la baquelita del circuito se encuentran protegidos por una caja en acrílico la cual está ajustada con tornillos y parte móviles las cuales se pueden retirar para acciones de mantenimiento, en este mismo sitio se encuentran ubicada las borneras de los puntos de medición. Se debe tener especial cuidado en el movimiento de los módulos para proteger el acople de los motores, el cual si no se encuentra bien alineado producirá vibraciones y como consecuencia el mal funcionamiento de los motores.

Los servomotores fueron extraídos de impresoras XEROX.

El acople de bronce fue realizado por el señor Jesús León Taller Torfres Calle 23 N° 16-33 Tel 6300813 Bucaramanga.

La caja acrílica fue realizada en Acrildiseños Calle 37 N° 25-63 Tel 6341131-6348471.

### **3.1.2 Características técnicas del servomotor.**

Marca: **HITACHI DC Motor**

Tipo: D04A321E

Voltaje: 24V

Salida: 21W

Encoder: 100P/R

### **3.2 MODULO UNICO**



Figura 26. Modulo Único



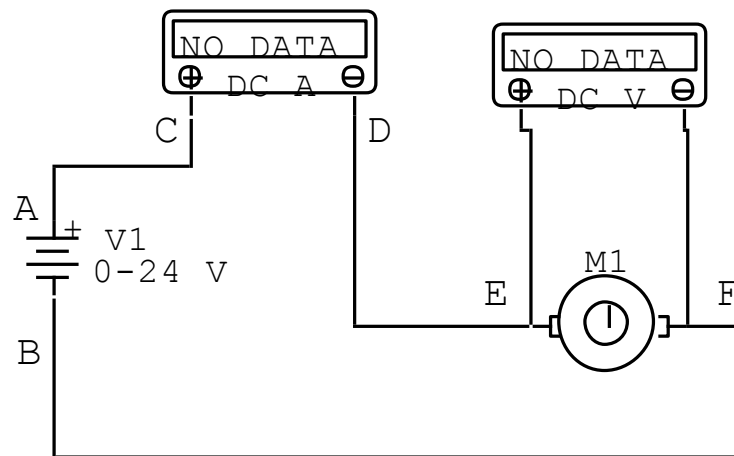
### 3.2.1 Construcción

Este módulo fue construido con un servomotor de 24V DC el cual posee un encoder de pulsos, posee borneras de conexión para la alimentación, corriente del motor, voltaje del motor; estas se encuentran identificadas por letras de la A a la F distribuidas de la siguiente manera:

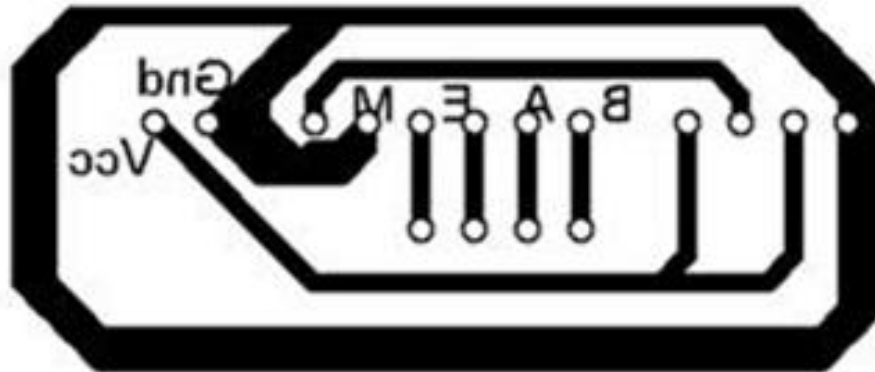
- A: Voltaje de alimentación +
- B: Voltaje de alimentación -
- C: Corriente de alimentación +
- D: Corriente de alimentación -
- E: Voltaje motor +
- F: Voltaje motor -

Posee un circuito interno de conexión el cual facilita las mediciones en cada una de las borneras.

**Figura 27. Circuito Modulo Único**



**Figura 28. Baquelita circuito modulo único**



El circuito original se encuentra abierto para la medición de la corriente en el motor por ese motivo se debe tener el amperímetro conectado en los puntos C y D del módulo, si no se desea conectar el amperímetro se debe realizar un puente en estos dos puntos para activar el circuito e ignorar la medición de la corriente.

El motor y la baquelita del circuito se encuentran protegidos por una caja en acrílico la cual está ajustada con tornillos y parte móviles las cuales se pueden retirar para acciones de mantenimiento, en este mismo sitio se encuentran ubicada las borneras de los puntos de medición.

Los servomotores fueron extraídos de impresoras XEROX.

El acople de bronce fue realizado por el señor Jesús León Taller Torfres Calle 23 N° 16-33 Tel 6300813 Bucaramanga.

La caja acrílica fue realizada en Acrildiseños Calle 37 N° 25-63 Tel 6341131-6348471.

### **3.2.2 Características técnicas del servomotor.**

Marca: **HITACHI DC Motor**

Tipo: D04A321E

Voltaje: 24

Salida: 21W

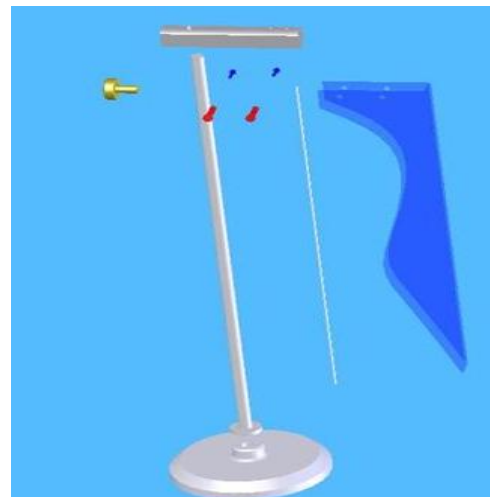
Encoder: 100P/R

### 3.3 Modulo de inercia

Figura 29. Inducido y Cilindro maestro



Figura 30. Modulo de Inercia



### 3.3.1 Construcción

Se implemento una técnica simple la cual tiene un funcionamiento general para cualquier inducido de diferentes características.

La técnica empleada fue el péndulo de torsión la cual se implemento por medio de un módulo de acero galvanizado el cual permite sostener un hilo de guitarra de 0.01" de diámetro. Para sostener el inducido a la cuerda se utilizo un buje.

En esta experiencia fue necesario construir un cilindro maestro en acero inoxidable el cual tiene las medidas de inducido de prueba.

Los procedimientos utilizados para la construcción del módulo fue la fundición en la placa de la base torneada en mdf para luego ser fundida en aluminio, operaciones maquinado como el torneado que se hizo en el cilindro principal (el asta) el cual consta de cilindrado, refrentado y desbaste radial, en la parte del bloque de aluminio de la parte superior primero, se hizo un cilindrado en el torno, luego se paso al taladro de árbol donde se refrento con un escariador de 1/4 de pulgada hasta reducir la sección del cilindro en ambos lados a líneas rectas que luego pasarían a taladrado con brocas de 1/2 pulgada, 1/4 de pulgada y 1/8 de pulgada, el tornillo en bronce se cilindro, avellano y taladrado a medida en el torno, la lamina de Polimetilmetacrilato (acrilico), fue cortada con la caladora de banco, taladrada con el taladro manual y doblada con una pistola de calor y una matriz de doblado. El ensamble se da apretando los tornillos.

Se utiliza para las mediciones un inducido del servomotor de las siguientes características:

Marca: **HITACHI DC Motor**

Tipo: D04A321E

Voltaje: 24

Salida: 21W

Encoder: 100P/R

El cilindro maestro esta construido en acero inoxidable con las siguientes especificaciones:

Diámetro: 26.6mm

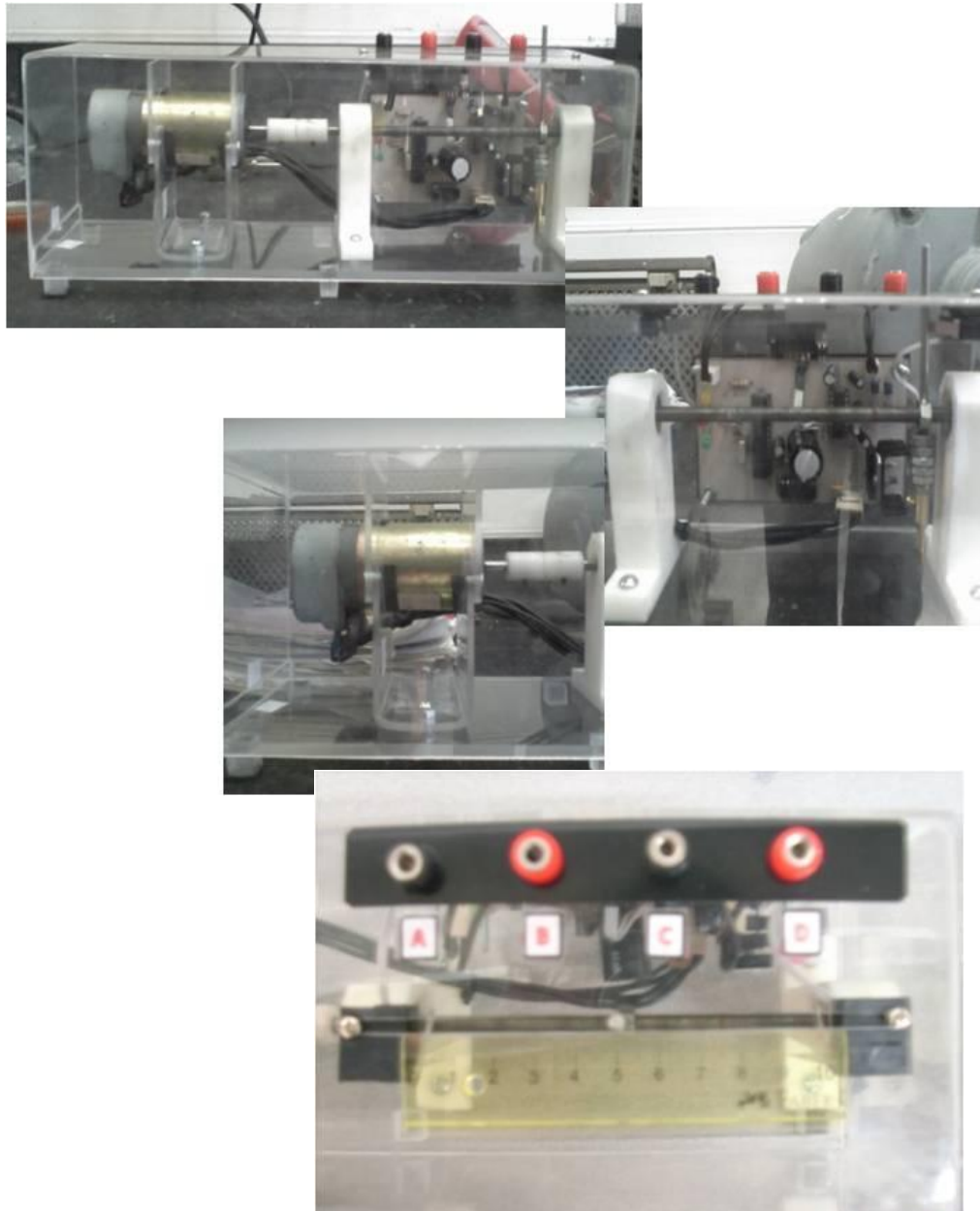
Peso: 23.3gr

Para la realización de la práctica se debe colocar el inducido en la cuerda de guitarra en una elevación adecuada.

El diseño y construcción del módulo fue realizado por Freddy Durán Estudiante de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander.

### 3.4 Modulo posición

Figura 31. Modulo Posición



### 3.4.1 Construcción

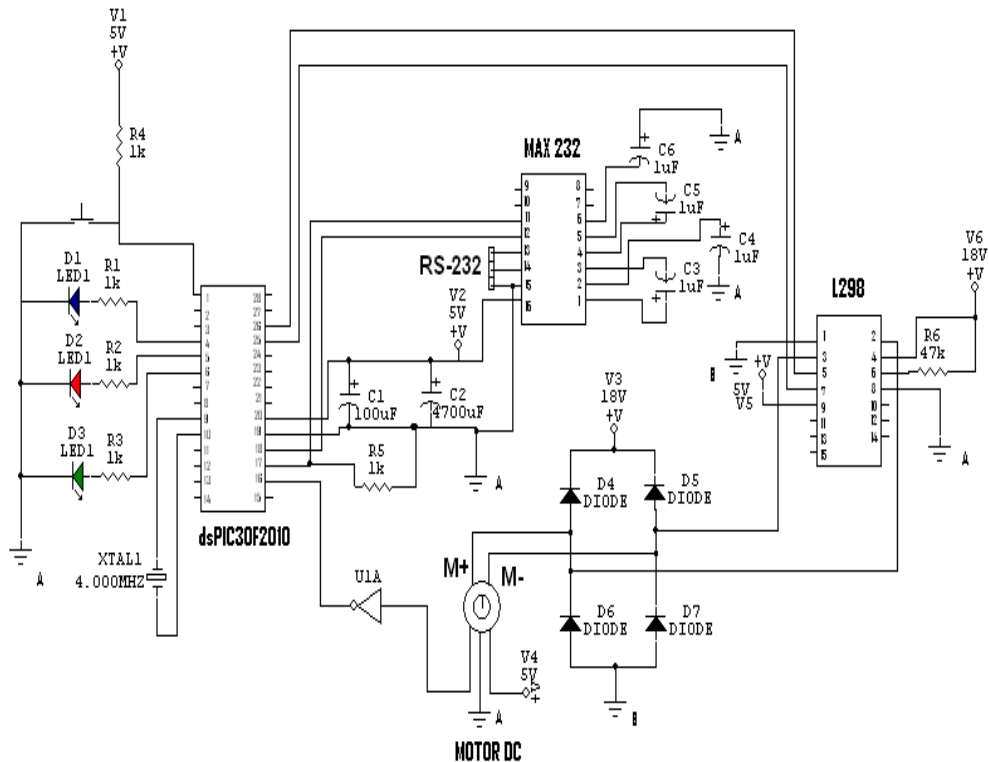
Este módulo fue construido con un servomotor de 24V DC, el cual posee un encoder de pulsos, este motor se encuentra acoplado a un tornillo sin fin de paso 1 (1mm) por medio de un eje de bronce y tornillos prisioneros de 3mm de diámetro para el ajuste, el tornillo se encuentra apoyado sobre dos bases las cuales tienen rodamientos para el fácil movimiento de este. Posee borneras de conexión para la alimentación, estas se encuentran identificadas por letras de la A a la E distribuidas de la siguiente manera:

- A: Voltaje de alimentación –
- B: Voltaje de alimentación + 5V
- C: Voltaje de alimentación -
- D: Voltaje de alimentación + 18V

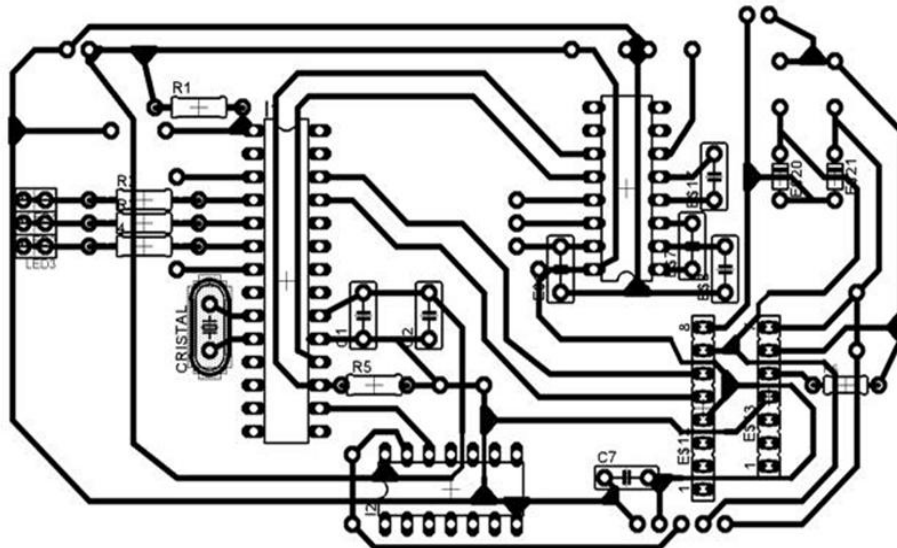
E: Conexión cable computador (RS-232)

Posee un circuito interno llamado circuito de control y potencia, el cual se encarga de controlar el motor a la posición deseada, de conectar el modulo con el computador y de dar la potencia que el motor necesita para moverse

Figura 32. Circuito Modulo Posición



**Figura 33. Baquelita circuito Modulo Posición**



Este circuito se encuentra compuesto principalmente de un microcontrolador dsPIC30F2010, el integrado MAX232, el Schmitt trigger 74LS04 y el puente H L298.

Los motores y la baquelita del circuito se encuentran protegidos por una caja en acrílico la cual está ajustada con tornillos y parte móviles las cuales se pueden retirar para acciones de mantenimiento, en este mismo sitio se encuentran ubicada las borneras de los puntos de medición. Se debe tener especial cuidado en el movimiento de los módulos para proteger el acople del motor a el tornillo, el cual si no se encuentra bien alineado producirá vibraciones y como consecuencia el mal funcionamiento de los motores, en caso de llegar a pasar esto de debe quitar la tapa del modulo y revisar que el acople.

Los servomotores fueron extraídos de impresoras XEROX.  
El acople de bronce fue realizado por el señor Jesús León Taller Torfres Calle 23 N° 16-33 Tel 6300813 Bucaramanga.  
La caja acrílica fue realizada en Acrildiseños Calle 37 N° 25-63 Tel 6341131-6348471.

### **3.4.2 Características técnicas del servomotor.**

Marca: <b>HITACHI DC Motor</b>	Tipo: D04A321E	Voltaje: 24V
Salida: 21W	Encoder: 100P/R	



## 4. Experiencias Implementadas

### 4.1 Determinación de la resistencia de armadura (Ra)

#### OBJETIVO

- Hallar experimentalmente la resistencia de armadura de los servomotores de corriente directa.

#### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores de DC
- Amperímetro
- Voltímetro o Osciloscopio digital Fluye 123
- Fuente de corriente continua
- Conectores

#### MARCO TEORICO

##### ➤ RESISTENCIA DE ARMADURA:

La resistencia de armadura se encuentra aplicando la ley de Ohm, a través del ajuste de un voltaje para una cuarta parte de la corriente nominal de armadura, la cual se halla aplicando el voltaje nominal de placa y sin carga.

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

A está resistencia es necesario adicionarle el valor de la resistencia de los devanados de armadura, contacto por escobillas y elementos de conmutación.

##### ➤ RESISTENCIA DINAMICA

La resistencia dinámica es la protección del motor cuando este se encuentra en movimiento, el incremento de voltaje y de corriente permiten que esta resistencia sea mayor que la estática, en el arranque la corriente alcanza un pico generalmente tres veces la corriente nominal por lo tanto en este instante la resistencia será mayor.

##### ➤ RESISTENCIA ESTATICA

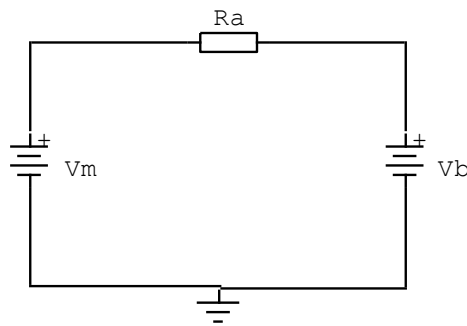
La resistencia estática puede ser definida como el valor óhmico cuando el motor se encuentra en estado de reposo, generalmente es de un valor muy pequeño, ya

que no hay presencia de corriente y voltaje y por lo tanto no cumple con la ley de Ohm.

$$V = I \times R$$

➤ **FCEM (Fuerza contra-electromotriz)**

La fuerza contra electromotriz es un voltaje que es causado por el giro del motor, ya que debido a la resistencia o arrollamientos internos de este elemento se genera una caída de tensión, por lo tanto el voltaje de alimentación será mayor que el voltaje generado en la salida de este.



$$V_m = V_b + (I_a \times R_a)$$

La **FCEM** es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Si el motor tiene rotor con imán permanente esta constante es:

$$K = \frac{v_b}{N_d}$$

Donde:

$K$  = Constante de FCEM del motor y se expresa en Voltios / rpm.

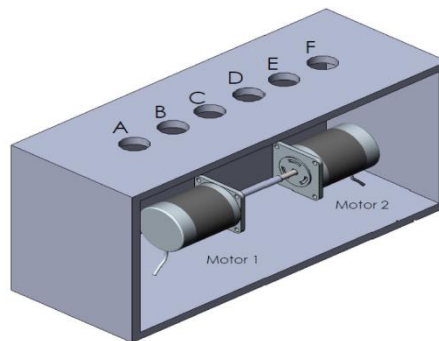
$N_d$  = Velocidad de giro del motor en rpm.

$V_B$  = Voltaje de giro del motor en V.

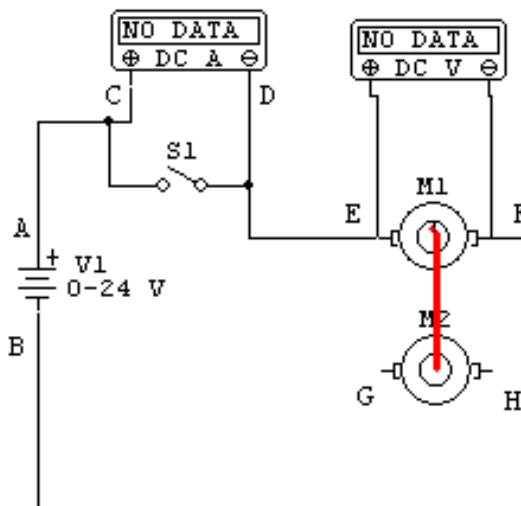
Nota: rpm = revoluciones por minuto

**PROCEDIMIENTO**

**Figura 1. Módulo de acople de motores.**



**Figura 2. Conexión interna del módulo de acople de motores.**



## **MEDICION DE LA RESISTENCIA DINÁMICA**

- El módulo de acople se encuentra diseñado por dos motores de corriente continua 24V, los cuales se encuentran acoplados por medio de un eje en bronce, y se encuentran alineados correctamente, uno funciona como generador y otro como carga, ya que solo uno recibe alimentación.
- Se debe conectar inicialmente la fuente de corriente continua a los terminales A y B del módulo de acople de los servomotores, los cuales se encuentran acoplados por medio del eje y con régimen de velocidad reducida, los dos servomotores poseen las mismas características, en los

terminales C y D del módulo se conectara el amperímetro, en el E y F, estará ubicado el voltímetro para el voltaje de motor, en G y H se puede leer el voltaje del generador.

- La fuente debe ser ajustada al valor del voltaje de armadura colocando el motor en movimiento por medio de una elevación de voltaje proporcional hasta alcanzar aproximadamente una cuarta parte de la corriente nominal.

$$V_n = 24V$$

$$I_n = 117.7mA$$

- La corriente nominal de armadura se obtiene aplicando el voltaje nominal de armadura (24V), al servomotor sin carga. El servomotor debe girar a velocidad constante, si este efecto no se produce se debe aumentar de 25% en 25% el voltaje nominal hasta que se cumpla con este requisito.

$$I_{n \text{ de armadura}} = \frac{I_n}{4}$$

$$I_{n \text{ de armadura}} = \frac{117.7mA}{4}$$

$$I_{n \text{ de armadura}} = 29.17mA$$

Debido a que la corriente de armadura no permite el arranque instantáneo del motor a una velocidad constante se aumenta proporcionalmente su valor hasta lograr que las condiciones anteriores se cumplan, este valor de voltaje y corriente será el valor utilizado para calcular la resistencia de armadura.

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

$$R_a = \frac{1.1V}{142.1mA}$$

$$R_a = 7.73\Omega$$

- Debido a que los valores de resistencia están especificados para 25°C, es aconsejable tomar los valores rápidamente para evitar el efecto de calentamiento.
- El valor de la resistencia calculada incorpora el valor de la resistencia de los devanados de armadura y la resistencia de contacto por escobillas, más los elementos de conmutación.

## MEDICION DE LA RESISTENCIA ESTATICA

- Es importante realizar la medición de forma estática, o sea utilizando el óhmetro, aplicado directamente sobre los terminales de armadura encontrándose el servomotor desenergizado y realizando la comparación con el resultado anterior.

### RESISTENCIA ESTATICA

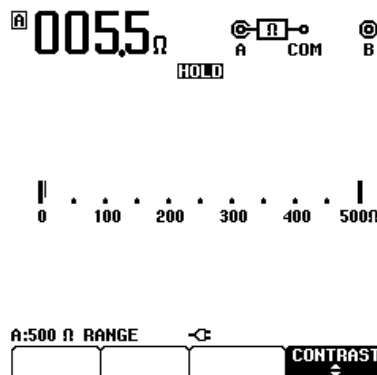
Medida con el óhmetro

$$R_a = 4.9 \Omega$$

- Se debe realizar la misma operación pero utilizando el osciloscopio digital Fluke 123 en la escala de ohmios.

Medida con el osciloscopio

$$R_a = 5.5 \Omega$$



- Para calcular el valor del error relativo, para este procedimiento se toma como referencia el valor de la resistencia estática medida por el osciloscopio digital y el valor experimental será el valor de la resistencia leída por el óhmetro.

$$Error_{relativo} = \left[ \frac{(V_{ref} - V_{exp})}{V_{ref}} \right] \times 100\%$$

$V_{ref}$  = Valor de referencia

$V_{exp}$  = Valor experimental

$$Error_{relativo} = \left[ \frac{(5.5\Omega - 4.9\Omega)}{5.5\Omega} \right] \times 100\%$$

$$Error_{relativo} = 10.9\%$$

- Realice el mismo procedimiento anterior pero el valor de referencia será la resistencia estática medida por el óhmetro y el valor experimental la resistencia dinámica.

$$Error_{relativo} = \left[ \frac{(4.9\Omega - 7.73\Omega)}{4.9\Omega} \right] \times 100\%$$

$$Error_{relativo} = 57.7\%$$

- Igualmente realice lo mismo pero el valor de referencia será la resistencia estática medida con el osciloscopio y el valor experimental será la resistencia dinámica.

$$Error_{relativo} = \left[ \frac{(5.5\Omega - 7.73\Omega)}{5.5\Omega} \right] \times 100\%$$

$$Error_{relativo} = 28.84\%$$

## PREGUNTAS

- ¿A que atribuye usted, la gran diferencia entre los valores obtenidos de la resistencia dinámica y la estática?
- ¿De que factores depende la exactitud de los resultados hallados durante la práctica?

## **4.2 Determinación de la inductancia de armadura ( $L_a$ ) y la constante de tiempo eléctrica ( $t_e$ ) de los motores DC.**

### **OBJETIVOS**

- Hallar el valor de la inductancia de armadura de un servomotor DC, mediante la determinación previa de la constante de tiempo eléctrica.
- Calcular la constante eléctrica del servomotor.

### **ELEMENTOS**

- Modulo de Servomotor de DC.
- Osciloscopio digital Fluke 123
- Fuente variable de voltaje

### **MARCO TEORICO**

#### **➤ INDUCTANCIA**

La bobina o inductor es un elemento que reacciona contra cambios de corriente a través de él, generando un voltaje que se opone al voltaje aplicado y es proporcional al cambio de la corriente. A diferencia del condensador o capacitor, que almacena energía en forma de campo eléctrico, la bobina o inductor por su forma (espiras de alambre arrollados) almacena energía en forma de campo magnético.

Todo cable por el que circula una corriente, tiene a su alrededor un campo magnético, siendo el sentido de flujo del campo magnético, el que establece la ley de la mano derecha. Al estar el inductor hecho de espiras de cable, el campo magnético circula por el centro del inductor y cierra su camino por su parte exterior.

Una característica interesante de los inductores es que se oponen a los cambios bruscos de la corriente que circula por ellas. Esto significa que a la hora de modificar la corriente que circula por ellos

La inductancia mide el valor de oposición de la bobina al paso de la corriente y se miden en Henrios (H), pudiendo encontrarse valores de mili-henrios (mH).

El valor depende de:

- El número de espiras que tenga la bobina (a más vueltas mayor inductancia  $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$ ).
- El diámetro de las espiras (a mayor diámetro, mayor inductancia).
- La longitud del cable de que está hecha la bobina.
- El tipo de material de que esta hecho el núcleo, si es que lo tiene.

En motores de corriente continua la medición de la inductancia de armadura se puede verificar aplicando diferentes técnicas como lo son el puente Maxwell, pero así mismo con la instrumentación moderna se puede hallar con ayuda del osciloscopio digital, ya que se obtiene la constante de tiempo, por lo tanto se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$L_a = t_e \times R_a$$

$R_a$  = Resistencia de armadura  
 $t_e$  = Constante de tiempo eléctrica  
 $L_a$  = Inductancia de armadura

Otro método es utilizar el dispositivo de puente de impedancias.

### **CONSTANTE DE TIEMPO ELECTRICA ( $t_e$ )**

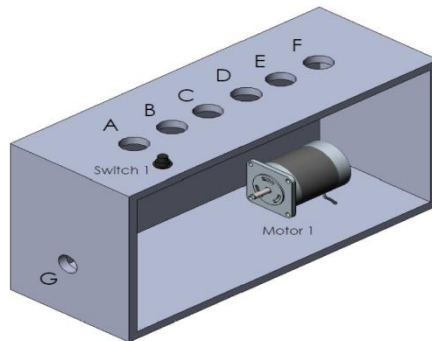
Es el tiempo transcurrido para que la corriente alcance el 63.2% de su valor estable, por medio de esta medida se puede encontrar el tiempo mínimo de reacción de la corriente, para una mejor lectura del tiempo el motor debe estar quieto para que la constante de tiempo mecánica no influya dentro de la medición.

### **PROCEDIMIENTO**

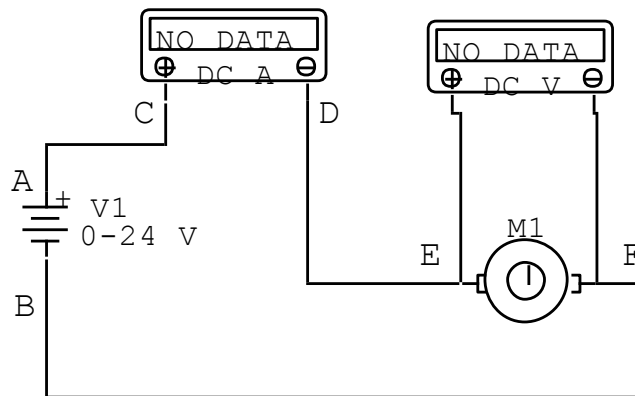
- Conectar los puntos A y B del módulo del servomotor a la fuente variable, ajustando previamente el valor de la tensión nominal del servomotor.
- Conectar el osciloscopio digital Fluke 123 en los puntos C y D el cual debe ser ajustado en el modo para captura y exhibición de la forma de onda eligiendo la opción de disparo único (Single Shot) o abriendo el Menú (Tigger) y la función (On Trig), de esta manera se logrará obtener la repuesta transitoria. Se deben ajustar al inicio las escales de amplitud y base de tiempo de la señal que se desea obtener.



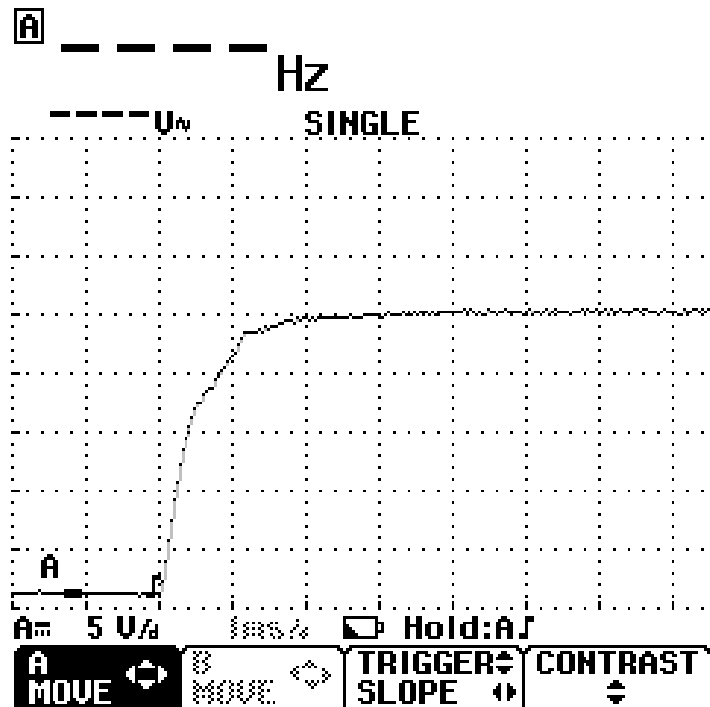
**Figura 1. Módulo motor único.**



**Figura 2. Conexión interna del módulo**



- Por medio del cierre del interruptor se produce un voltaje tipo escalón, el cual es aplicado directamente a la armadura del motor, esto permite que circule inicialmente una corriente transitoria de armadura.
- El osciloscopio digital Fluke 123, permite la captura de dicha forma de la señal y la representa en la pantalla.
- Si se mide el tiempo requerido para que la corriente alcance el 63.2% de su valor final. Dicha lectura se basará en los escalamientos fijados previamente. Este tiempo hallado corresponde a la constante de tiempo eléctrica ( $t_e$ ).



$$Y_t = 0.632 \times Y_{estable}$$

$$Y_t = 0.632 \times 24$$

$$Y_t = 15.168 \frac{V}{d}$$

- El valor de  $Y_t$  debe ser prolongado en la escala de  $Y_{estable}$  el valor encontrado es el valor  $t_e$ .

$$t_e = 0.3ms$$

- Por medio de la expresión:

$$L_a = t_e \times R_a$$

Se calcula el valor de la inductancia de armadura ( $L_a$ ) en el servomotor de prueba.  $R_a$  es la resistencia de armadura la cual debe ser conocida anteriormente.

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

$$R_a = \frac{1.02V}{66.5mA}$$

$$R_a = 15.33\Omega$$

$$L_a = t_e \times R_a$$

$$L_a = 3.03ms \times 15.33\Omega$$

$$L_a = 46.4mH$$

## PREGUNTAS

- Realice una descripción breve de las técnicas de medición de inductancias por los métodos experimentales: Puente de Maxwell y Puente de Hay.
- ¿Por que puede ser confiable la exactitud de la medición de la inductancia utilizando la técnica del osciloscopio digital?
- ¿Cual es la importancia de hallar la constante de tiempo eléctrica en los servomotores?

## 4.3 Determinación experimental del momento de inercia (J) de los servomotores.

### OBJETIVOS

- Implementar una técnica sencilla, para encontrar con cierta precisión el valor del momento de inercia del inducido en los servomotores de corriente continua.

### ELEMENTOS

- Inducido de un servomotor de prueba
- Módulo para la medición del momento inercial

- Cilindro maestro de prueba
- Cronometro

## **MARCO TEORICO**

### **➤ MOMENTO DE INERCIA**

El momento de inercia es una medida de la inercia rotacional de un cuerpo, es decir cuanto se opone un cuerpo para ponerse en movimiento. Más concretamente el momento de inercia es una magnitud escalar que refleja la distribución de masas de un cuerpo o un sistema de partículas en rotación, respecto al eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro; pero no depende de las fuerzas que intervienen en el movimiento.

El momento de inercia desempeña un papel análogo al de la masa inercial en el caso del movimiento rectilíneo y uniforme. Es el valor escalar del momento angular longitudinal de un sólido rígido.

Para una masa puntual y un eje arbitrario, el momento de inercia es:

$$I = m \times r^2$$

donde  $m$  es la masa del punto, y  $r$  es la distancia al eje de rotación.

La inercia es una propiedad inherente de los cuerpos, que se expresa en una súbita resistencia de todos los cuerpos físicos a aceptar cambios de estado. La medida de esta propiedad se denomina momento de inercia. Si dicha magnitud relaciona a un cuerpo referido a un eje de rotación, su momento de inercia también se llama Inercia rotacional.

Para la mayoría de los cuerpos dependiendo de su forma geométrica y distribución de masa regulares, tienen una ecuación diferente para hallar su valor. Para encontrar el valor del momento de inercia de un servomotor existen dos métodos. El primero involucra un dispositivo medidor de inercia llamado máquina medidora de inercias; mientras que el segundo método aplica la técnica del péndulo de torsión, ambos métodos relacionan el momento de inercia con la proporcionalidad matemática existente con el cuadrado del periodo de oscilación.

## **METODOS PARA CALCULAR EL MOMENTO DE INERCIA**

### **➤ TECNICA DE LA MAQUINA I.M.D (Inertial Measuring Device)**

La máquina I.M.D corresponde a un dispositivo, el cual se monta sobre un buje receptor el inducido del servomotor, luego se imprime un giro al conjunto y enseguida se leerá el periodo de oscilación sobre un registrador digital. Posteriormente se retira la armadura del buje y se da un nuevo giro al buje solamente, leyendo también su periodo de oscilación. Entonces el momento de inercia se calculará por la expresión:

$$J = C \times (t_1^2 - t_2^2)$$

$J$  = Momento de inercia

$C$  = Constante de calibración del aparato

$t_1$  = Tiempo del periodo de oscilación del inducido más el buje

$t_2$  = Tiempo del periodo de oscilación del buje solamente.

### ➤ TÉCNICA DEL PENDULO DE TORSIÓN (Cuerda de guitarra)

Este método requiere de la construcción previa de un cilindro maestro y un buje o casquillo con momentos de inercia conocido. El cilindro maestro debe ser aproximadamente del mismo tamaño del inducido de prueba.

La experiencia se realiza inicialmente colgando y sujetando el inducido del motor a determinar el momento de inercia a través de hilo metálico a un soporte con elevación adecuada. Estando el cuerpo en reposo, se aplica media o una vuelta de giro completa sobre el inducido, se suelta y se permite que este oscile libremente. Luego con un cronometro se mide el tiempo para veinte oscilaciones. Posteriormente se retira el inducido y se cuelga el "cilindro maestro" y se repite la operación de medición para veinte oscilaciones.

Con los resultados obtenidos se calcula el momento de inercia del inducido a través de la expresión:

$$J = J_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^2 - J_2$$

$J$  = Momento de inercia del inducido de prueba.

$J_1$  = Momento de inercia del cilindro maestro y buje.

$J_2$  = Momento de inercia del buje.

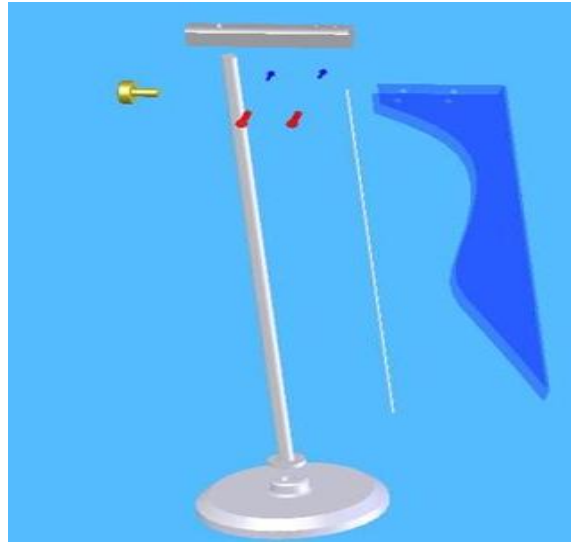
$t_2$  = Tiempo para 20 oscilaciones del cilindro maestro y buje

$t_1$  = Tiempo para 20 oscilaciones del inducido bajo prueba y buje.

El momento de inercia del cilindro maestro y buje es equivalente a la suma algebraica de los momentos de cada cuerpo parcial si ellos están referidos al mismo eje de rotación.

## PROCEDIMIENTO

Figura 1. Módulo para medición del momento de inercia.



- Inicialmente se debe sujetar el inducido de prueba al módulo para la medición del momento inercial a través del buje.
- Estando el cuerpo en reposo, se aplica media o una vuelta de giro completa sobre el inducido, se suelta y se permite que esté oscile libremente.
- Con un cronómetro se mide el tiempo para 20 oscilaciones.

Prueba 1	25.25
Prueba 2	25.92
Prueba 3	25.38
t1	25.51

- Posteriormente se retira el inducido y se instala el cilindro maestro, se repiten las mismas operaciones anteriormente realizadas para el inducido del servomotor de prueba.

Prueba 1	35.37
Prueba 2	35.11
Prueba 3	35.38
t2	35.28

- Con los resultados obtenidos se calcula el momento de inercia del inducido a través de la expresión:

$$J = J_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^2 - J_2$$

### MOMENTO DE INERCIA DEL CILINDRO MAESTRO

Como el cilindro maestro tiene una geometría definida se puede calcular de forma sencilla su momento de inercia mediante la fórmula:

$$J_1 = \frac{(m \times r)^2}{2}$$

Donde m es la masa del cilindro:

$$P = m \times g$$

$$J_1 = \frac{m \times r^2}{2}$$

$$P = m \times g$$

$$m = \frac{P}{g}$$

$$m = \frac{2.33^{-3}}{9.8 \frac{m}{s^2}}$$

$$m = 2.37755^{-4} Kg$$

$$J_1 = \frac{2.377^{-4} Kg \times 0.0133m^2}{2}$$

$$J_1 = 4.2046^{-8} N$$

$$J = J_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right) - J_2$$

$$J = 4.2046^{-8} \left( \frac{25.51}{35.28} \right) - 0$$

$$J = 3.040^{-8} N$$

## PREGUNTAS

- Describir analíticamente cual es la función de transferencia obtenida para un servomotor de corriente continua.
- ¿Cuando en la prueba anterior no se utiliza buje, y solo se cuelga el inducido al hilo de acero, como se modificaría la fórmula? ¿Cambia la exactitud esperada en la prueba?

## 4.4 Obtención de la constante de voltaje ( $K_e$ ) para los servomotores de corriente continua.

### OBJETIVO

- Determinar experimentalmente la constante de voltaje  $K_e$ , para servomotores de corriente continua, por medio del módulo adecuado para la realización de estas mediciones.

### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores de DC.
- Tacómetro
- Voltímetro (2)
- Fuente DC variable
- Cables y conectores

### MARCO TEORICO

- **FCEM (Fuerza contra-electromotriz)**



La fuerza contra electromotriz es un voltaje es causado por el giro del motor en presencia de un campo magnético y se calcula por medio de la ley de Faraday  $E = l(V \times B)$ .

Como el rotor está construido de alambres conductores estos al ser movidos dentro de un campo magnético se crea una tensión que se llama fuerza contra electromotriz.

La **FCEM** es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Si el motor tiene rotor con imán permanente esta constante es:

$$K_e = \frac{v_b}{N_d}$$

Donde:

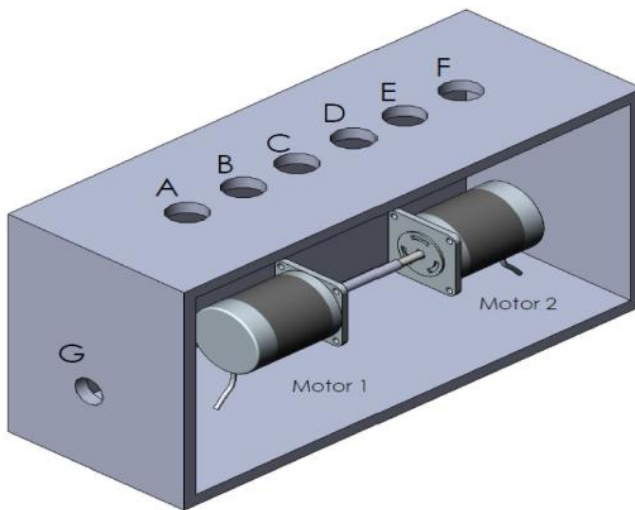
$K_e$  = Constante de FCEM del motor y se expresa en Voltios / rpm.

$N_d$  = Velocidad de giro del motor en rpm (revoluciones por minuto).

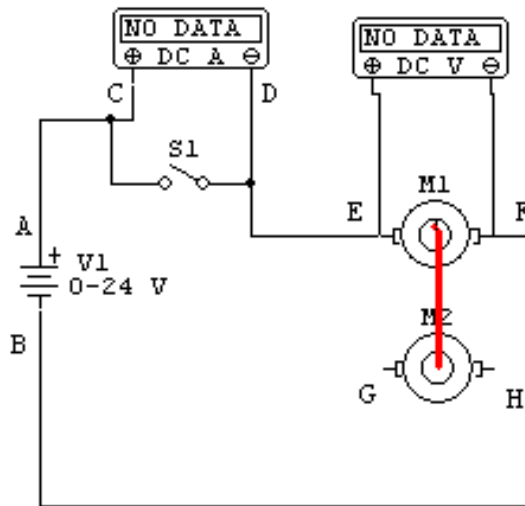
$V_B$  = Voltaje de giro del motor en V.

## PROCEDIMIENTO

**Figura 1.** Módulo de acople de motores.

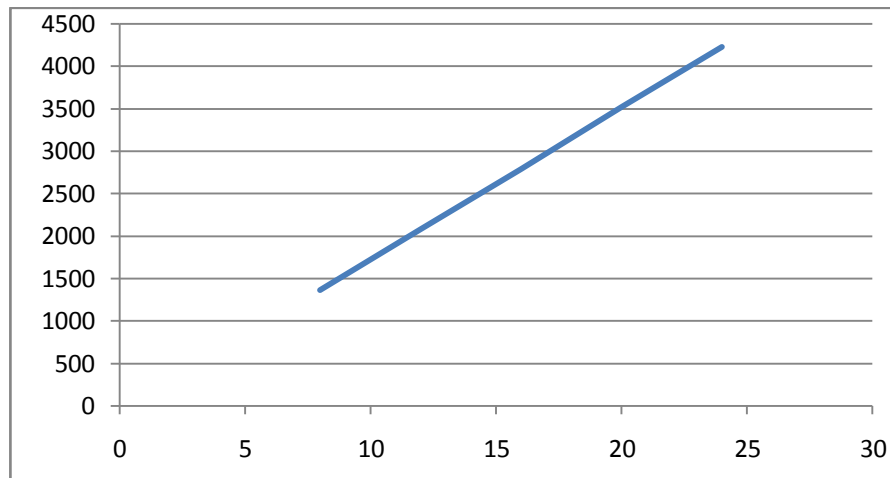


**Figura 2.** Conexión interna módulo de acople de motores.



- Se monta el esquema circuital de la figura 2, teniendo en cuenta que el motor de prueba funcione como generador y el otro, como motor impulsor. Por tanto el control por armadura se aplicará sobre el segundo motor y la instrumentación en el primero.
- Conecta la fuente de DC variable en los puntos A y B del módulo, un voltímetro u osciloscopio digital Fluye 123 (modo voltaje) en los puntos C y D, el otro voltímetro en los puntos E y F, y el tacómetro en el punto G.
- Tomando como referencia la velocidad nominal del motor de prueba y mediante ajustes graduales del voltaje de armadura sobre el motor impulsor en forma escalada desde cero, se toman lecturas simultáneas de velocidad ( $n$ ) con el tacómetro y tensión generada  $E_b$  con el voltímetro, hasta alcanzar la velocidad nominal del motor de prueba.
- Con las lecturas obtenidas se construye la característica:  $E_b$  vs  $w$ . Aplicando procedimientos de linealización se obtiene gráficamente la pendiente de dicha recta, que corresponderá a la constante  $K_e$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_e \left( \frac{V}{Rpm} \right) = \frac{E_b}{n}$$



$$K_s = \frac{24}{4231rpm}$$

$$K_s = 5.67^{-3} \frac{V}{Rpm}$$

## PREGUNTAS

- ¿Cuales son las razones prácticas para que un motor pueda ser utilizado como una máquina generadora?
- Enuncie los posibles factores que pueden influir negativamente en la determinación exacta de la constante de voltaje.

## 4.5 Determinación de la constante de torque ( $K_t$ ) de los servomotores de corriente continua.

### OBJETIVOS

- Mediante las técnicas de procedimiento teórico y práctico se trata de hallar la constante de torque  $K_t$  para servomotores de corriente continua.

## MARCO TEORICO

La ley de Ampere dice que en si un conductor transporta corriente está dentro del campo magnético se crea una fuerza que trata de expulsar el conductor del campo magnético mediante la formula:

$$F = l(ixB)$$

La máquina de corriente continua si se comporta como generador o como motor debe tener una corriente eléctrica en el rotor. Como este rotor está dentro de un campo magnético (creado por lo imanes permanentes) en el se crea una fuerza. Esta fuerza es tangencial al roto. Como la máquina es rotativa ya no se habla de fuerza sino de torque o par, la relación entre la fuerza y el par es dada por:

$$\tau = Fxr.$$

En una máquina de corriente continua el par está relacionado con la corriente en el rotor por medio de la ecuación:

$$\tau = K_t I_a$$

A la constante  $K_t$  se le llama la constante de torque.

Para poder medir la constate de par se pueden hacer dos montajes, una es por medio de una polea que ata un cuerpo de peso conocido. El motor se hace girar a velocidad conocida, se mide la corriente y por medio de ecuaciones se puede hallar el torque desarrollado por el motor.

El segundo método usado es por medio del método paramétrico, este método se puede aplicar cuando se conoce el valor de la  $K_e$  y por medio de una ecuación se puede conocer le valor de  $K_t$ .

## PROCEDIMIENTO

- Este método es no experimental como, ya se tiene el valor de la constante de voltaje  $K_e$  se puede determinar  $K_t$  por medio de las siguientes ecuaciones:

$$K_t(oz - in) = 1.3524K_e \left( \frac{V}{Krpm} \right)$$

$$K_t(oz - in) = 1.3524 \times 5.67^{-3} \left( \frac{V}{Krpm} \right)$$

$$K_t(oz - in) = 7.66 \left( \frac{mV}{Krpm} \right)$$

## PREGUNTAS

- ¿Podría señalar alguna objeción, con respecto al método Paramétrico – Decimal?

$$K_t(oz - in) = 1.3524K_s \left( \frac{V}{Krpm} \right)$$

$$K_t = 1.324 \times 5.67 \left( \frac{V}{Krpm} \right)$$

- Escriba la expresión de la función de transferencia para un servomotor DC que involucra la constante de torque  $K_t$ .

## 4.6 Determinación de la constante de tiempo mecánica ( $t_m$ ) de los servomotores.

### OBJETIVOS

- Comprobar mediante dos métodos optativos, uno experimental y otro paramétrico como hallar la constante de tiempo mecánica de los servomotores de corriente continua.

### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores DC
- Osciloscopio digital Fluke 123
- Voltímetro
- Fuente de corriente continua
- Cables y conectores

### MARCO TEORICO

#### ➤ CONSTANTE DE TIEMPO MECÁNICA

La ecuación de movimiento de motor de corriente continua es dada por la expresión:

$$\tau_e - \tau_r = j \frac{d\omega}{dt} + b\omega$$

Donde:

$T_e$  = Es el torque eléctrico.

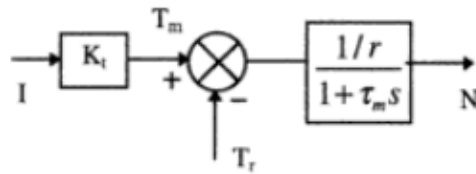
$T_r$  = Es el torque resistente.

$J$  = Es el momento de inercia.

$W$  = Es la velocidad de giro.

$B$  = Es el coeficiente de fricción viscosa.

Si se toma la transformada de Laplace a esta ecuación se puede hallar como:



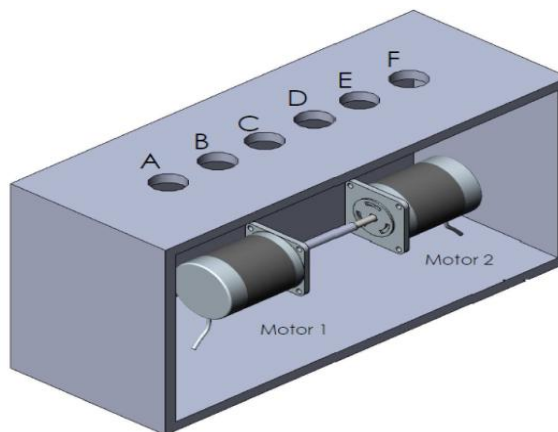
Siendo  $\tau_e = \frac{j}{b}$  la constante de tiempo mecánica.

Dicho de otra manera la constante de tiempo mecánica es una constante que dice que tan rápido cambia la velocidad de una motor cuando está expuesto a un para aplicado.

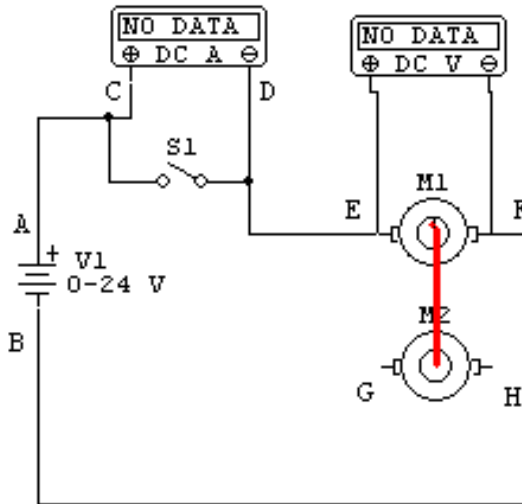
## PROCEDIMIENTO

### METÓDO EXPERIMENTAL PARA HALLAR LA CONSTANTE DE TIEMPO MECANICA $t_m$ .

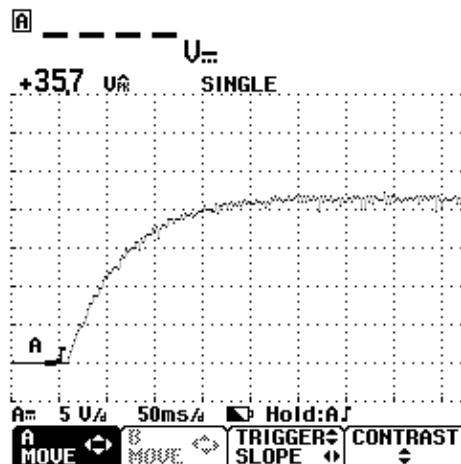
**Figura 1.** Módulo de acople de motores.



**Figura 2.** Conexión interna módulo de acople de motores



- Los terminales del motor generador es decir los puntos A y B, se conectan al osciloscopio digital Fluke 123, y los puntos C y D que son los correspondientes al motor de prueba son conectados a la fuente de corriente continua.
- Cerrando el interruptor, se ajusta previamente el voltaje nominal de inducido y se abre nuevamente el interruptor.
- Se efectúan los ajustes requeridos en el osciloscopio para la captura, congelación y exhibición de la repuesta transitoria de voltaje del motor-generador.
- Se aplica un voltaje tipo escalón a la armadura del motor cerrando rápidamente el interruptor. El osciloscopio construirá la característica equivalente de velocidad.



- Se mide el tiempo requerido para el cual la velocidad alcanza el 63.2% de su valor de estado estable. Dicho tiempo corresponderá a la constante de tiempo mecánica  $t_m$ .

$$Y_t = 0.632 \times Y_{estable}$$

$$Y_t = 0.632 \times 22V$$

$$Y_t = 13.9 V/d$$

$$t_m = 51.5 ms$$

### ➤ METODO PARAMETRICO

Esté método combina al conocimiento de parámetros ya obtenidos o conocidos tales como:

$$T_m(s) = \left( \frac{J \times R_a}{K_t \times K_e} \right)$$

El momento de inercia ( $J$ )

Resistencia de armadura ( $R_a$ )

Constante de torque ( $K_t$ )

Constante de voltaje ( $K_e$ )

Debido a su relación dimensional entre ellas se puede calcular la constante de tiempo mecánica mediante la expresión:

### PREGUNTAS

- Establecer un estudio comparativo entre los dos métodos aplicados para hallar la constante de tiempo mecánica.
- ¿Es posible sobre la característica de repuesta de velocidad hallar el valor de velocidad transitoria para 4 constantes de tiempo? En caso afirmativo, indíquese dicho valor.



## 4.7 Obtención del torque de fricción y de la corriente de arranque en los servomotores de corriente continua

### OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente el valor de la corriente de arranque de un servomotor de corriente continua y hallar analíticamente su torque de fricción estático.

### ELEMENTOS

- Servomotor de corriente continua
- Amperímetro
- Voltímetro
- Fuente de corriente continua

### MARCO TEORICO

#### TORQUE DE FRICCIÓN Y CORRIENTE DE ARRANQUE.

Es una pérdida de fricción estática originada por una oposición al desarrollo de la dinámica inicial del movimiento o freno inicial que presentan las superficies en contacto.

En un motor se manifiesta este estado cuando la corriente de armadura inicial es insuficiente para superar el torque causado por dicha fricción el cual al ir incrementado la corriente en un momento dado supera el torque de fricción y se inicia la rotación del eje.

Esta corriente mínima se denomina corriente de arranque y dicha fricción estática se llamará torque de fricción  $T_f$ .

$$T_f = K_t \times I_a$$

Cuando se utiliza una máquina de inducción para arrancar y accionar una carga mecánica a una velocidad determinada, es posible que sucedan tres situaciones diferentes:

El torque eléctrico de arranque que se suministra a la máquina puede ser inferior al torque mecánico que requiere la carga en reposo para comenzar a moverse. En esta situación la máquina no puede acelerar, el rotor está detenido o bloqueado. La corriente es varias veces la corriente nominal produciendo un recalentamiento y provocando un daño al motor.

El torque eléctrico es exactamente igual al torque de la carga. Esta situación tiene los mismos problemas que el primer caso. Si los torques eléctricos y mecánico están equilibrados, no es posible acelerar la máquina.

El torque eléctrico de arranque es mayor que el torque mecánico de la carga. En estas condiciones, existe un torque acelerante que permite incrementar la velocidad del rotor, hasta un punto de la característica torque eléctrico - deslizamiento donde se equilibran los torques de la máquina y de la carga. Si la velocidad alcanzada en este punto es cercana a la velocidad sincrónica, la corriente disminuye a un nivel que permite la operación en régimen permanente. Cuando la máquina opera en este punto, un pequeño incremento de la carga mecánica, reduce la velocidad e incrementa el torque eléctrico de accionamiento, obteniéndose un nuevo punto de operación.

Una máquina con alta resistencia en el rotor tiene deslizamientos de operación más grandes. Las pérdidas en el rotor se incrementan durante la operación en régimen permanente cuando se utilizan resistencias grandes en estas bobinas, y esto repercute desfavorablemente en el rendimiento de la máquina.

Es deseable que una máquina eléctrica produzca un torque de arranque elevado y un rendimiento cercano a la unidad. Estas dos características de la máquina se contraponen con respecto a la variación de la resistencia del rotor. Por esta razón en algunas máquinas de inducción se añade en el eje del rotor anillos deslizantes, cada uno de ellos se conecta a un extremo de las fases del rotor. Estos anillos, permiten conectar elementos en el exterior de la máquina con las bobinas, mediante contactos deslizantes - carbones o escobillas -. Al disponer de acceso al circuito del rotor, es posible incluir resistencia adicional con la finalidad de incrementar el torque eléctrico de la máquina durante el arranque. Cuando la máquina está operando en régimen permanente es posible eliminar o cortocircuitar la resistencia adicional para mejorar el rendimiento.

El rotor bobinado con acceso mediante anillos rozantes, es capaz de regular el torque de arranque, disminuir las corrientes durante el proceso de aceleración y aumentar el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa.

Sin embargo, esta solución encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

El rotor bobinado con acceso mediante anillos rozantes, es capaz de regular el torque de arranque, disminuir las corrientes durante el proceso de aceleración y aumentar el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa.

Sin embargo, esta solución encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

## **PROCEDIMIENTO**

Este valor se halla teóricamente pero teniendo en cuenta los valores anteriormente establecidos.

Para hallar el torque de fricción ( $T_f$ ) se debe realizar de manera analítica, ya que se tiene una relación directamente proporcional entre al valor de la corriente de arranque, ( $I_{arr}$ ) la cual se halló anteriormente de manera experimental y la constante de torque ( $K_t$ ) que también fue conocida.

$$T_f = (K_t \times I_{arr})$$

$$T_f = 7.66 \left( \frac{mV}{Krpm} \right) \times 66.5mA$$

$$T_f = 0.5 \left( \frac{V}{Krpm} \right) mA$$

## PREGUNTAS

- Enunciar brevemente cuáles otras pérdidas afectan el rendimiento de los motores.
- Calcular el porcentaje de pérdidas que constituyen el torque de fricción con respecto al torque nominal de armadura (Sin tener en cuenta otras pérdidas)

## 4.8 Control de posición de servomotores

### OBJETIVOS

- Observar el comportamiento del controlador PID de acuerdo al cambio de las constantes  $K_p, K_i, K_d$ .

### ELEMENTOS

- Modulo de posición
- Cable Null-modem Serie de 3 hilos
- 2 Fuentes de voltaje

### MARCO TEORICO

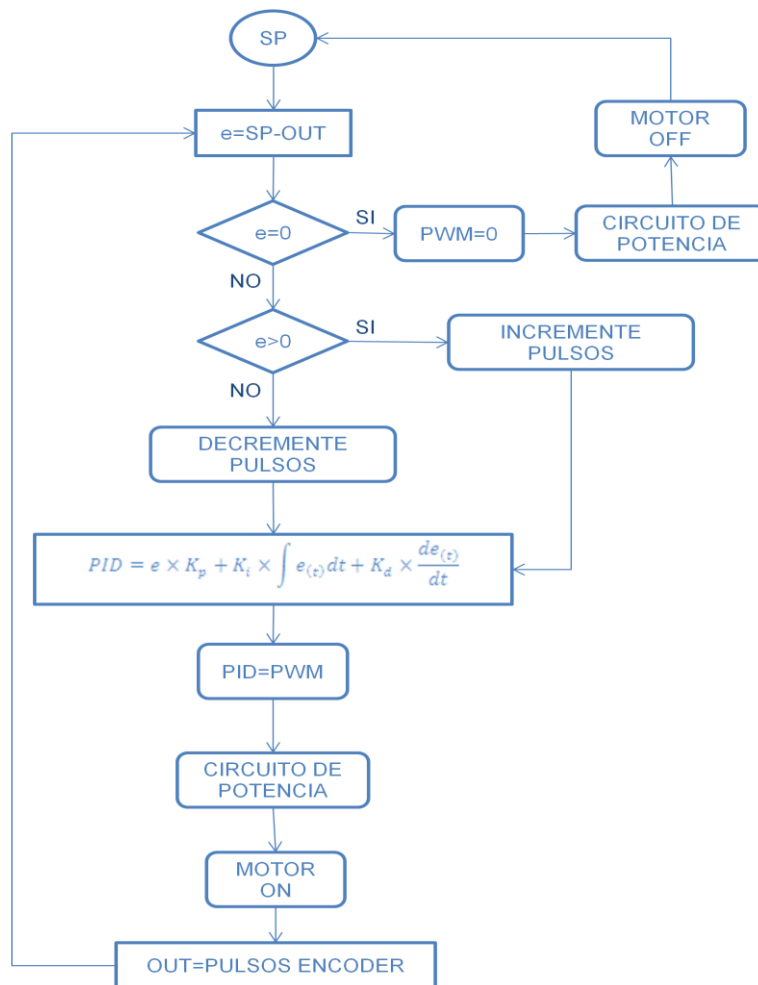
- **Control de posición PID de un servomotor con un dsPIC30F2010**

Este modulo está compuesto por una interfaz RS232, un microcontrolador dsPIC30F2010, un circuito de potencia y un servomotor con encoder (100 pulsos

por cada revolución). Por medio de una interfaz con el computador el estudiante ingresa el valor de las constantes del PID, el valor del Set Point (en milímetros) y el número de muestras a tomar. En el microcontrolador el valor del Set Point en milímetros es multiplicado por 100, para que sea equivalente a pulsos por giro de 360° (1 revolución). El microcontrolador envía un pulso PWM con el cual se controla la potencia del motor, es decir su velocidad; el lazo cerrado se completa al leer la salida del encoder, esta señal cuadrada llega al microcontrolador el cual cuenta la cantidad de pulsos para ser comparada con el valor del Set Point, de acuerdo al valor de el error, el cual es el resultado de dicha comparación, el controlador PID realizara su acción de corrección hasta encontrar que el error sea igual a cero, esto quiere decir que el Set Point deseado se ha encontrado.

A continuación se presenta un diagrama de bloques el cual explica en que consiste el programa de control de posición PID de un servomotor con un dsPIC30F2010

**Figura 1. Diagrama de bloques**



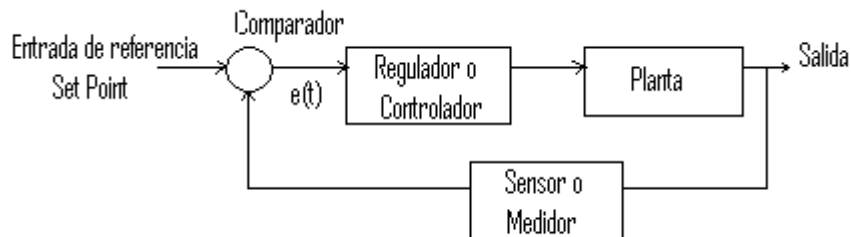
SP= Set Point (mm).  
 e= Error  
 OUT= Salida (Pulsos del encoder)

Nota: Cada revolución del motor es equivalente a un milímetro (mm) de desplazamiento, el encoder del motor que se utiliza en esta práctica por cada revolución emite 100 pulsos. Por lo tanto 1 revolución=1mm=100pulsos.

- **Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)**

En un sistema de control de lazo cerrado la señal de salida hace una comparación con un nivel de referencia ajustado a la entrada y utilizando esta diferencia como parámetro de control ( $e(t)$ ) denominado señal de error actual.

**Figura 2. Sistema de control de lazo cerrado**



El controlador permite mantener la salida dentro de límites aceptables de acuerdo al Set Point. Para que el controlador se pueda efectuar, el sistema debe ser de lazo cerrado, el controlador (PID) mueve a la planta (Motor), la planta debe afectar la medición de la salida (encoder) y la señal de salida debe llegar al comparador (dsPIC30F2010) para posteriormente llegar al controlador.

El controlador PID es la suma de tres controladores: proporcional, integral y derivativo.

$$PID = e \times K_p + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times \frac{de}{dt}$$

- **Proporcional**

La acción proporcional multiplica el error por una constante ( $K_p$ ), la cual también es conocida como ganancia del controlador, para lograr un error en estado estacionario cercano a cero.

$$Salida = (K_p)e(t)$$

La respuesta proporcional es la base de el controlador, ya que no considera el tiempo, para eliminar el error permanente se le agregan componentes que si tienen en cuenta el tiempo como lo son las acciones integral y derivativa.

- **Integral**

La acción integral tiene como fin eliminar el error en estado estacionario causado por la acción proporcional. Para esto el error es integrado, la cual suma el error por un periodo de tiempo determinado y posteriormente multiplicando este resultado por una constante integral ( $K_i$ ).

$$Salida = K_i \int e(t)dt$$

Si existe error entre la medición y el Set Point, la acción integral variara la salida hasta que el error no exista. Cuanto más acción integral exista en el controlador, mas rápido cambia la salida en función del tiempo.

- **Derivativo**

La acción derivativa se opone a un cambio en el error, su objetivo es tratar de mantener un error mínimo, si el error es constante solo actúan la acción proporcional y la acción integral. Para esto el error es derivado y posteriormente se multiplica este resultado por una constante derivativa ( $K_d$ ).

$$Salida = K_d \frac{de}{dt}$$

Cuanto mas grande sea el tiempo de acción de derivada provocara inestabilidad al sistema y cuanto mas pequeño sea el tiempo de acción de derivada la salida oscilara demasiado con respeto al Set Point.

- **Ajustes del controlador PID**

Se debe lograr que el controlador corrija en el mínimo tiempo las perturbaciones del sistema, obteniendo la mínima integral del error. Para esto se debe escoger las constantes ( $K_i, K_p, K_d$ ) correctas de lo contrario el sistema será inestable y no se llegara a la respuesta deseada (Set Point). Si solo se desea dar estabilidad al sistema solo se utiliza la acción proporcional, pero como este produce un error estacionario para eliminarlo se utiliza la acción integral si se desea que la respuesta sea rápida ante errores grandes se utiliza la acción derivativa la cual reduce es error.

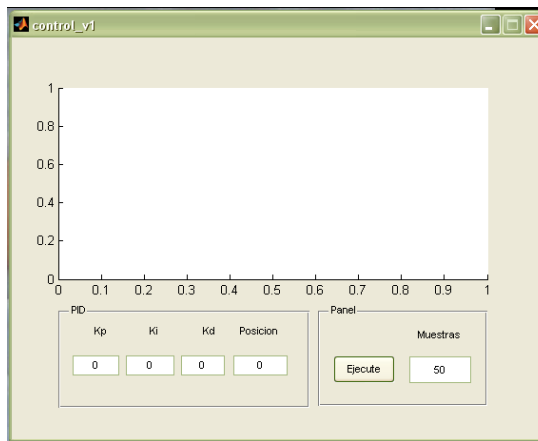
- **MATLAB**

MATLAB es un software que permite el desarrollo de cálculos numéricos y simbólicos el cual posee características graficas que facilita el trabajo científico y

de ingeniería. Uno de las facilidades que ofrece MATLAB es crear programas de fácil entendimiento para el usuario como Interfaces gráficas en MATLAB usando GUIDE (Graphical User Interfase Development Environment). MATLAB también permite realizar comunicación serial, la cual se utilizo para conectar el computador con el microcontrolador dsPIC30F2010 con la ayuda de un MAX232. Esta comunicación en conjunto con la interfaz grafica permite introducir el valor del Set Point deseado para el control de posición.

- **Como utilizar el programa**

**Figura 3. Ventana Programa Control**

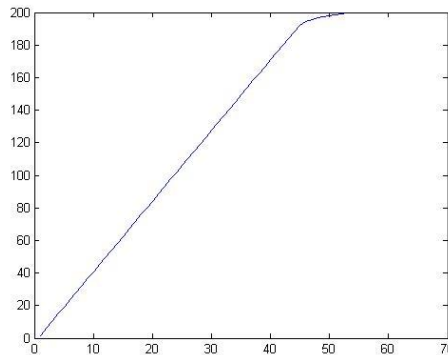


Para la realización de este modulo se realizo una interfaz con MATLAB para introducir el valor de la posición del motor y las constantes del controlador PID ( $K_p, K_i, K_d$ ). El programa realizado se encuentra ubicado en el computador en la carpeta work (disco local (C) -Archivos de programa-MATLAB- Work). Se debe abrir el archivo control v1 y el archivo tomar, se ubica en la ventana de control v1 y dar ejecutar, aparecerá el programa mostrado en la figura 3, el cual se utiliza de la siguiente manera:

1. Se deben definir los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ , de la misma manera el valor de Set Point que es el mismo dato del valor de posición. En el ítem de muestras se identificara la escala de tiempo con la cual se realiza el muestreo de la señal. Si el sistema no genera la señal completa es necesario ampliar el valor de rango de las muestras.
2. Para ejecutar el programa y observar la señal de Control se debe hacer clic en el ítem Ejecute.

3. Para tener un historial de cada una de las señales es necesario dar clic encima de la gráfica después de estar finalizada, ya que el programa tiene la opción de guardar todas las señales realizadas en este.
4. Para guardar la señal dentro de su sistema de información del computador es necesario en la opción archivo guardarla nuevamente, ya que lo único que me permite está es tener una visualización previa.

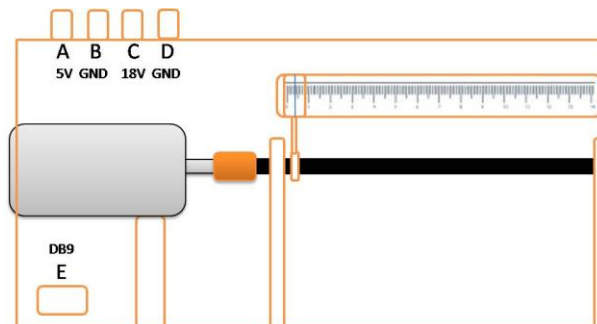
**Figura 4. Ventana Grafica PID**



## PROCEDIMIENTO

- Conectar el cable Null-modem Serie de 3 hilos al modulo de posición (punto E) y a el conector serial del computador.

**Figura 4. Modulo Posición**



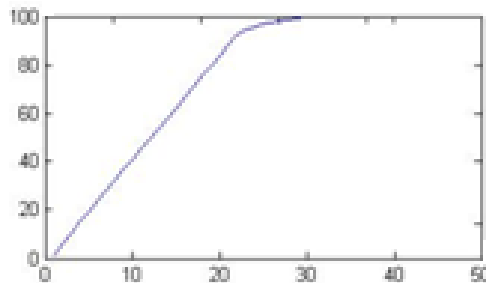
- Ajustar la fuente de voltaje a 5V DC, conectar los terminales a los puntos A(-) y B(+), Ajustar la otra fuente de voltaje a 18V DC y conectar los terminales a los puntos C(-) y D(+). Encender las fuentes.



- Ejecutar y ajustar en el programa Control, las constantes PID ( $K_p, K_i, K_d$ ), el valor del set point y el numero de muestras que se desea graficar.
- Variar las constantes para un mismo Set Point y observar el comportamiento del controlador. Guardar las graficas de comportamiento del controlador PID.
- Repetir el paso anterior para otros puntos de desplazamiento. De acuerdo con el comportamiento de las graficas, ¿cuál cree que son las constantes ideales para este controlador PID de posición y porque?

### DATOS OBTENIDOS

Toma	Set Point	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	100	1	2	1



### PREGUNTAS

- Que es un controlador PID.
- Explique el efecto de las constantes Proporcional, Derivativa e Integral ( $K_i, K_p, K_d$ ) en el ajuste del controlador PID.

## CONCLUSIONES

Se logró desarrollar nuevos de equipos de laboratorio didácticos para la ejecución de prácticas de la asignatura Sistemas de control I, los cuales tiene la facilidad de tomar datos, con prototipos desarmados como armados, lo que le da mayor flexibilidad en la adquisición de los datos y prolonga la vida útil de los equipos ya que cada uno de los equipos no está sujeto a desmantelamientos además, el tiempo necesario para tomar los datos y manipular las características será mas corto.

Con la realización de este proyecto se logra adquirir de forma práctica las constantes de una planta (motor) y poder observar el comportamiento de su función de transferencia en lazo cerrado y abierto, de la misma manera ejercer aplicaciones en la parte industrial como lo es el control de posición de un servomotor.

En las funciones de transferencia en cada uno de los sistemas de control, se encuentran relacionadas con varias de las constantes que pueden ser halladas experimentalmente, con esto se comprueba que para realizar un sistema de control en cualquier aplicación es importante conocer su funcionamiento y valores, ya que estos parámetros afectan el comportamiento del sistema, hay unas como son la constante de voltaje ( $K_e$ ), con la cual se pueden calcular otras, por eso se deben realizar con cuidado y de forma correcta para evitar datos erróneos

Las experiencias y módulos se crearon con servomotores de corriente continua, evitando de está manera errores debido al ruido que se pueda presenta, generalmente cuando se realiza un control de posición y el desfase en las mediciones de las características de estos dispositivos, a su vez se generaron e implementaron técnicas de fácil aplicación para el hallazgo de los parámetros de mayor importancia en el comportamiento de estos, ya que un estudiante de Ingeniería Electrónica debe conocer para facilitar su aplicabilidad y funcionalidad en sistemas de control.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) GALVEZ SANCHEZ, Ricardo. Guías laboratorio de control obtención y chequeo de los parámetros funcionales de los servomotores.
- (2) PÉREZ LÓPEZ, César. MATLAB y sus aplicaciones en la ciencia y la ingeniería. Prentice Hall. 2006.
- (3) ANGULO USATEGUI, José María, GARCÍA ZAPIRAIN, Begoña, ANGULO MARTÍNEZ, Ignacio y VICENTE SÁEZ, Javier. Microcontroladores avanzados dsPIC. Thomson Editores Spain. 2006
- (4) ASTRÖM, Karl Johan y HÄGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd Edition. Instrument Society of America. 1995
- (5) HERNANDEZ CAPACHO, Carlos Gerardo. MAESTRE CARRILLO, Laura Clarena. Dspic De Microchip. Universidad Pontificia Bolivariana. 2006
- (6) VILLAMIZAR RINCON, Juan Carlos. Maquinas Eléctricas. Universidad Pontificia Bolivariana. 2003

## WEBGRAFIA

- Conceptos comunicación serial. Disponible en internet: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>. (Enero 14/2009)
- Conceptos Controlador PID. Disponible en internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo#Proporcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional). (Diciembre 10/2008)
- Conceptos Electrónica. Disponible en internet: <http://www.unicrom.com/>. (Febrero 20/2009)
- Conceptos Maquinas Eléctricas. Disponible en internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_\(m%C3%A1quina\\_el%C3%A9ctrica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_(m%C3%A1quina_el%C3%A9ctrica)) (Agosto 02/2008)
- Conceptos PWM. Disponible en internet: <http://www.ucontrol.com.ar/wiki/index.php?title=PWM>. (Diciembre 10/2008)
- Conceptos sobre inductancia. Disponible en internet: [http://books.google.com.co/books?id=idLmH8n4mWMC&pg=PA533&lpg=PA533&dq=perdidas+que+afectan+el+rendimiento+de+los+motores&source=bl&ots=C6moJDSaoE&sig=D5D8TMpYaXR\\_2C3B7EXvTZVReml&hl=es&ei=qZHJSebGAoGUMt-l8OQD&sa=X&oi=bookresult&resnum=2&ct=result#PPA533,M1](http://books.google.com.co/books?id=idLmH8n4mWMC&pg=PA533&lpg=PA533&dq=perdidas+que+afectan+el+rendimiento+de+los+motores&source=bl&ots=C6moJDSaoE&sig=D5D8TMpYaXR_2C3B7EXvTZVReml&hl=es&ei=qZHJSebGAoGUMt-l8OQD&sa=X&oi=bookresult&resnum=2&ct=result#PPA533,M1). (Enero 15/09)
- Conceptos y métodos momento de inercia. Disponible en internet: [file:///F:/Momentos %20de%20inercia%20-%20Monografias\\_com.htm](file:///F:/Momentos%20de%20inercia%20-%20Monografias_com.htm). (Febrero 03/09)
- Investigación momento de inercia. Disponible en internet: [file:///F:/Momento %20de%20inercia%20-%20Wikipedia,%20la%20enciclopedia%20libre.htm](file:///F:/Momento%20de%20inercia%20-%20Wikipedia,%20la%20enciclopedia%20libre.htm) (Enero 15/2009)
- Teoría FCM. Disponible en internet: <file:///F:/Fuerza%20Contraelectromotriz%20-%20FCM%20en%20Motor%20CC%20-%20Electr%C3%B3nica%20Unicrom.htm>. (Marzo 20/09).
- Teoría motores de corriente continua. Disponible en internet: [file:///F:/DESCARGA/FisicaNet%20-%20F%C3%ADsica\\_%20Electrot%C3%A9cnica\\_%20Motor%20de%20Corriente%20Continua\\_%20AP-10.htm](file:///F:/DESCARGA/FisicaNet%20-%20F%C3%ADsica_%20Electrot%C3%A9cnica_%20Motor%20de%20Corriente%20Continua_%20AP-10.htm) (Diciembre 18/2009)
- Resistencia dinámica teoría. Disponible en internet: [file:///F:/Technical%20English %20-%20Spa ni sh%20Vocabulary.htm](file:///F:/Technical%20English%20-%20Spanish%20Vocabulary.htm). (Enero 18/2009)

## ANEXOS

### ANEXO A. INTEGRADO L298



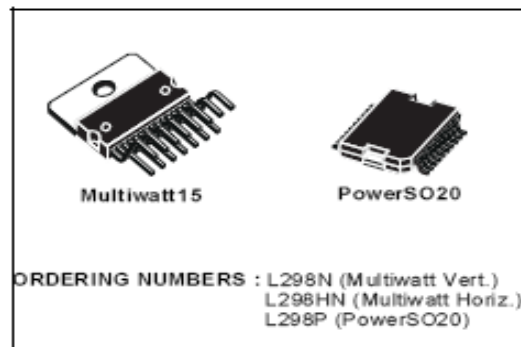
L298

### DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

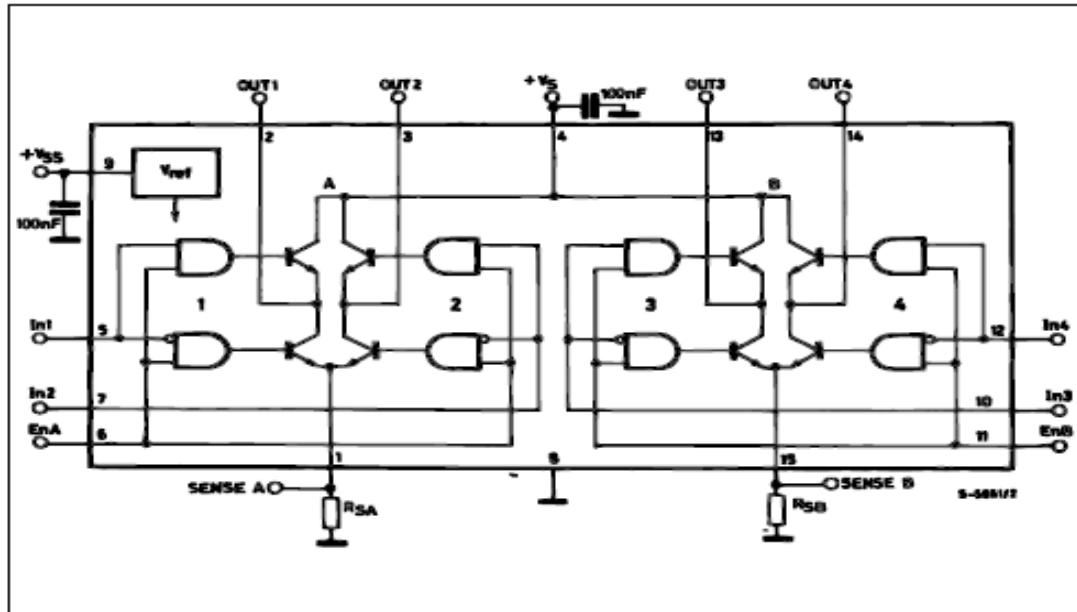
#### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

#### BLOCK DIAGRAM

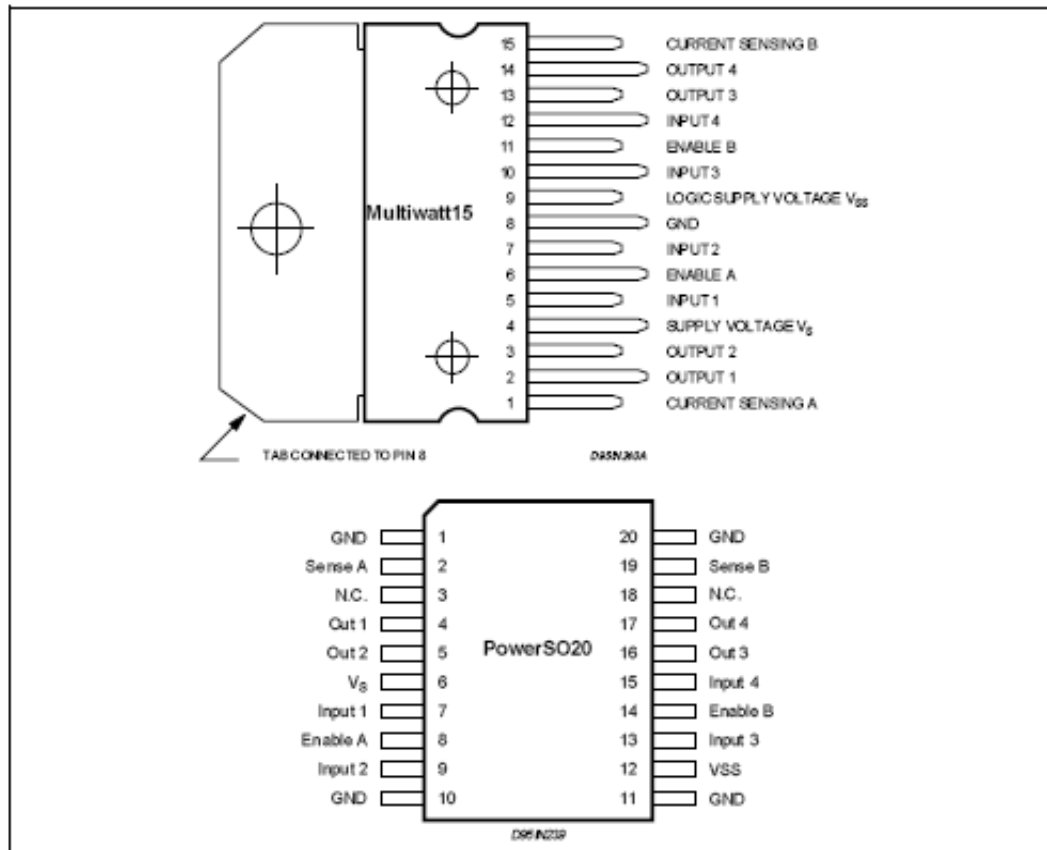


## L298

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_i, V_{en}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ )	2.5	A
	-DC Operation	2	A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{\phi}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_j$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

### PIN CONNECTIONS (top view)



### THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	$^\circ C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(\*) Mounted on aluminum substrate

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V <sub>SS</sub>	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V, T<sub>J</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>S</sub>	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V <sub>PH</sub> +2.5		46	V
V <sub>SS</sub>	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I <sub>S</sub>	Quiescent Supply Current (pin 4)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0 V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H		13 50	22 70	mA mA
		V <sub>en</sub> = L V <sub>I</sub> = X			4	mA
I <sub>SS</sub>	Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0 V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H		24 7	36 12	mA mA
		V <sub>en</sub> = L V <sub>I</sub> = X			6	mA
V <sub>IL</sub>	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V <sub>HI</sub>	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>L</sub>	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = L			-10	μA
I <sub>HI</sub>	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>en</sub> = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V <sub>en</sub> = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>en</sub> = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = L			-10	μA
I <sub>en</sub> = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>CEsat(H)</sub>	Source Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A I <sub>L</sub> = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V <sub>CEsat(L)</sub>	Sink Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V <sub>CEsat</sub>	Total Drop	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V <sub>sense</sub>	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V

## L298

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$T_1$ (V)	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_I$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		1.5		$\mu$ s
$T_2$ (V)	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.2		$\mu$ s
$T_3$ (V)	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_I$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		2		$\mu$ s
$T_4$ (V)	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.7		$\mu$ s
$T_5$ (V)	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_I$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.7		$\mu$ s
$T_6$ (V)	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu$ s
$T_7$ (V)	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_I$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		1.6		$\mu$ s
$T_8$ (V)	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.2		$\mu$ s
$f_c$ (V)	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
$T_1$ ( $V_{en}$ )	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		3		$\mu$ s
$T_2$ ( $V_{en}$ )	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		1		$\mu$ s
$T_3$ ( $V_{en}$ )	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.3		$\mu$ s
$T_4$ ( $V_{en}$ )	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.4		$\mu$ s
$T_5$ ( $V_{en}$ )	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		2.2		$\mu$ s
$T_6$ ( $V_{en}$ )	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.35		$\mu$ s
$T_7$ ( $V_{en}$ )	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu$ s
$T_8$ ( $V_{en}$ )	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.1		$\mu$ s

1) Sensing voltage can be  $-1V$  for  $t \leq 50 \mu$ sec; in steady state  $V_{sens}$  min  $\geq -0.5V$ .

2) See fig. 2.

3) See fig. 4.

4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

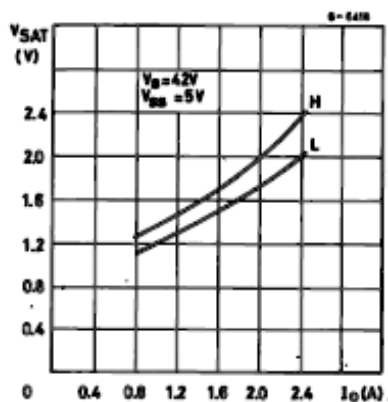
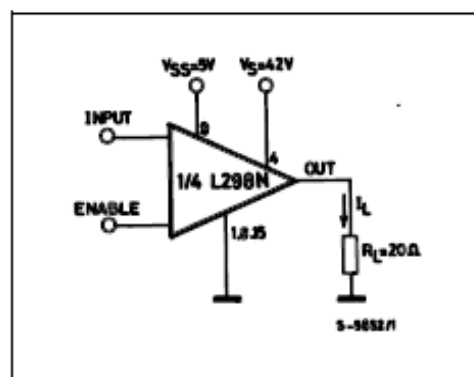


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note: For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching, set IN = H



Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

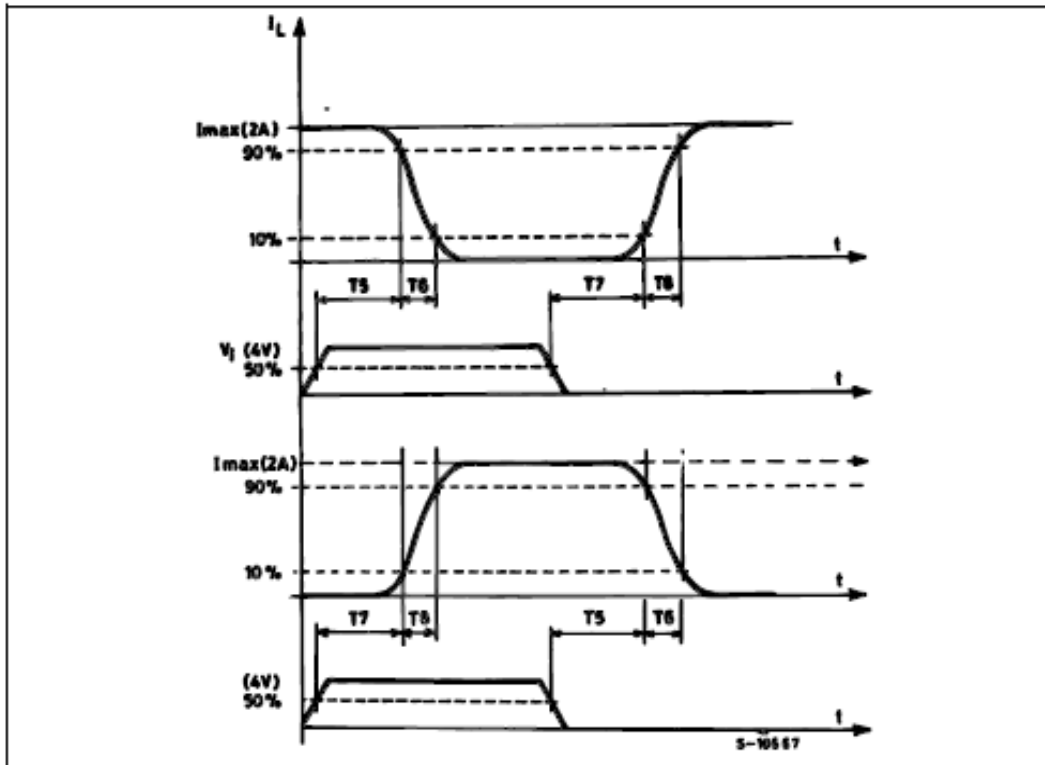
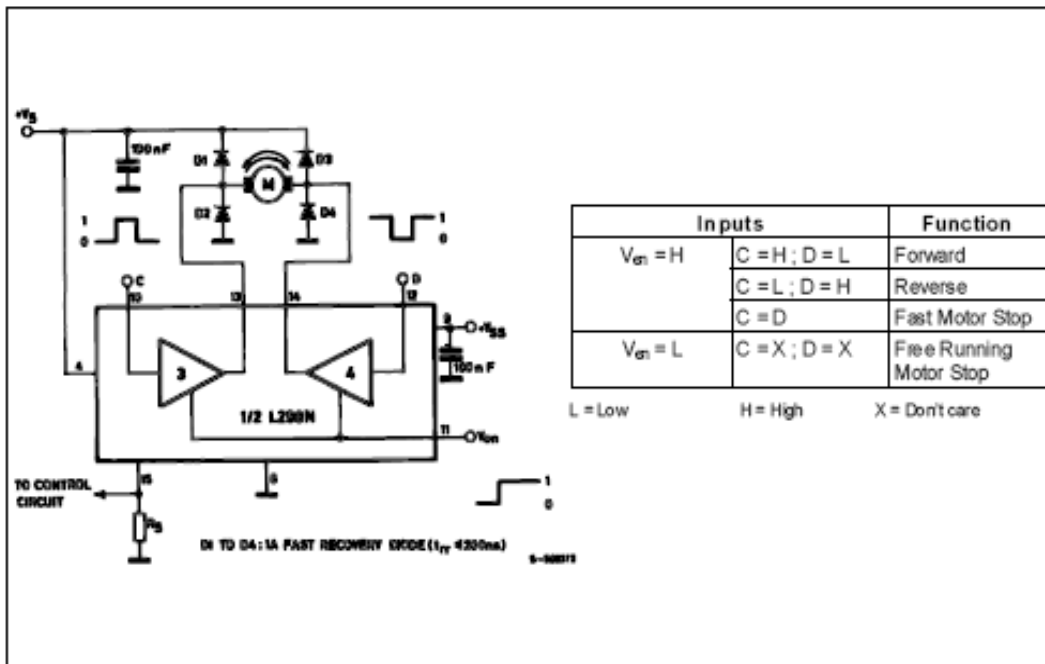
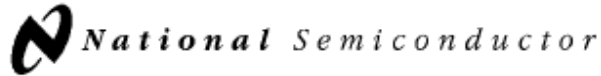


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.



## ANEXO B. SCHMITH TRIGER 74LS04



June 1989

### 54LS04/DM54LS04/DM74LS04 Hex Inverting Gates

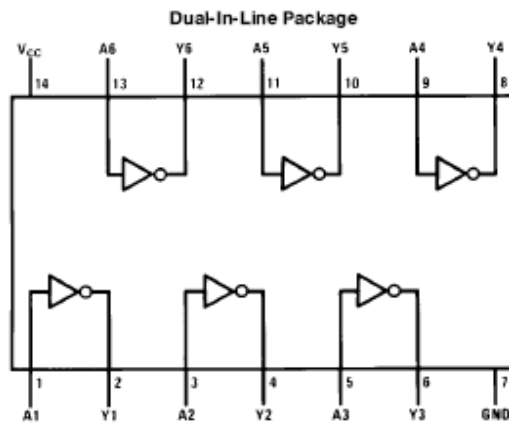
#### General Description

This device contains six independent gates each of which performs the logic INVERT function.

#### Features

- Alternate Military/Aerospace device (54LS04) is available. Contact a National Semiconductor Sales Office/Distributor for specifications.

#### Connection Diagram



TL/F/6345-1

Order Number 54LS04DMQB, 54LS04FMQB, 54LS04LMQB, DM54LS04J, DM54LS04W, DM74LS04M or DM74LS04N  
See NS Package Number E 20A, J 14A, M 14A, N 14A or W 14B

#### Function Table

$$Y = \bar{A}$$

Input	Output
A	Y
L	H
H	L

H = High Logic Level

L = Low Logic Level

### Absolute Maximum Ratings (Note)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	7V
Input Voltage	7V
Operating Free Air Temperature Range	
DM54LS and 54LS	-55°C to +125°C
DM74LS	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Note: The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the "Electrical Characteristics" table are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

### Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	DM54LS04			DM74LS04			Units
		Min	Nom	Max	Min	Nom	Max	
V <sub>CC</sub>	Supply Voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V <sub>IH</sub>	High Level Input Voltage	2			2			V
V <sub>IL</sub>	Low Level Input Voltage			0.7			0.8	V
I <sub>OH</sub>	High Level Output Current			-0.4			-0.4	mA
I <sub>OL</sub>	Low Level Output Current			4			8	mA
T <sub>A</sub>	Free Air Operating Temperature	-55		125	0		70	°C

### Electrical Characteristics over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 1)	Max	Units
V <sub>I</sub>	Input Clamp Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>I</sub> = -18 mA			-1.5	V
V <sub>OH</sub>	High Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OH</sub> = Max, V <sub>IL</sub> = Max	DM54	2.5	3.4	V
			DM74	2.7	3.4	
V <sub>OL</sub>	Low Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OL</sub> = Max, V <sub>IH</sub> = Min	DM54		0.25	V
			DM74		0.35	
			DM74	I <sub>OL</sub> = 4 mA, V <sub>CC</sub> = Min		
I <sub>I</sub>	Input Current @ Max Input Voltage	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 7V			0.1	mA
I <sub>IH</sub>	High Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 2.7V			20	μA
I <sub>IL</sub>	Low Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 0.4V			-0.36	mA
I <sub>OS</sub>	Short Circuit Output Current	V <sub>CC</sub> = Max (Note 2)	DM54	-20	-100	mA
			DM74	-20	-100	
I <sub>CC1</sub>	Supply Current with Outputs High	V <sub>CC</sub> = Max		1.2	2.4	mA
I <sub>CC2</sub>	Supply Current with Outputs Low	V <sub>CC</sub> = Max		3.6	6.6	mA

### Switching Characteristics at V<sub>CC</sub> = 5V and T<sub>A</sub> = 25°C (See Section 1 for Test Waveforms and Output Load)

Symbol	Parameter	R <sub>L</sub> = 2 kΩ				Units
		C <sub>L</sub> = 15 pF		C <sub>L</sub> = 50 pF		
		Min	Max	Min	Max	
t <sub>PLH</sub>	Propagation Delay Time Low to High Level Output	3	10	4	15	ns
t <sub>PHL</sub>	Propagation Delay Time High to Low Level Output	3	10	4	15	ns

Note 1: All typicals are at V<sub>CC</sub> = 5V, T<sub>A</sub> = 25°C.

Note 2: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.

## ANEXO C. MICROCONTROLADOR dsPIC30F2010



# dsPIC30F2010

## 28-pin dsPIC30F2010 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

**Note:** This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

### High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 84 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 1 Kbyte non-volatile data EEPROM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
  - DC to 40 MHz external clock input
  - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 27 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- 8 user selectable priority levels for each interrupt
- 4 processor exceptions and software traps

### DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

### Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit Capture input functions
- Two 16-bit Compare/PWM output functions
  - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I<sup>2</sup>C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Addressable UART modules with FIFO buffers

### Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
  - Complementary or Independent Output modes
  - Edge and Center Aligned modes
- 4 duty cycle generators
- Dedicated time base with 4 modes
- Programmable output polarity
- Dead time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for synchronized A/D conversions

### Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

### Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with:
  - 500 Ksps (for 10-bit A/D) conversion rate
  - Six input channels
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Detection and Reset generation

# dsPIC30F2010

## Special Microcontroller Features:

- Enhanced Flash program memory:
  - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
  - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation

- Detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
  - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

## CMOS Technology:

- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

## dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family\*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	I <sup>2</sup> C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	–
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	–
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	–
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

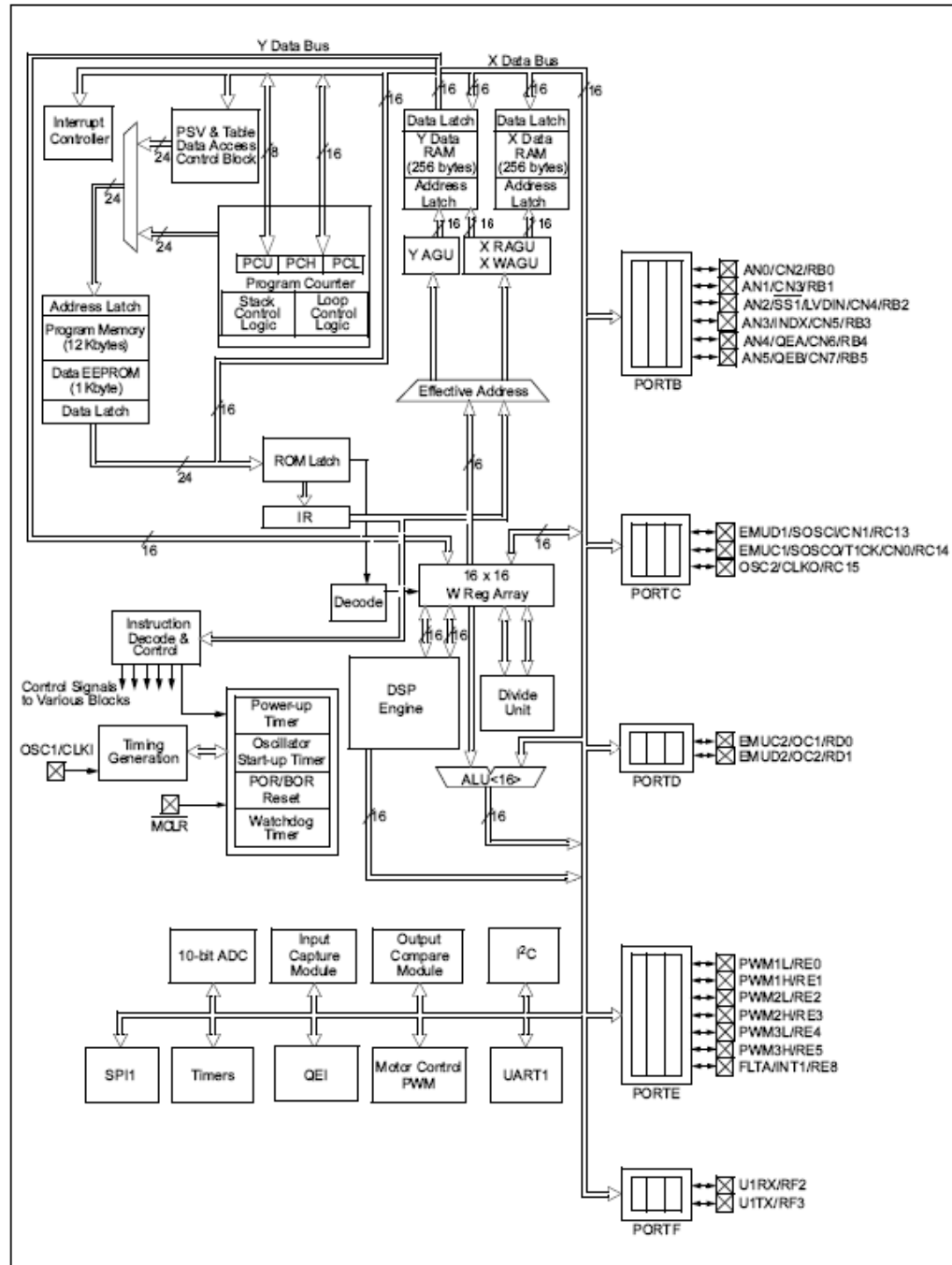
\* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

## 28-Pin SDIP and SOIC

MCLR	1	28	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	27	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/SS1/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
VSS	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	VSS
EMUD1/SOSCVT2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SD1/SDA/RF2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUC/U1TX/SDO1/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

# dsPIC30F2010

FIGURE 1-1: dsPIC30F2010 BLOCK DIAGRAM



# dsPIC30F2010

Table 1-1 provides a brief description of device I/O pinouts and the functions that may be multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

**TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN5	I	Analog	Analog input channels.
AV <sub>DD</sub>	P	P	Positive supply for analog module.
AV <sub>SS</sub>	P	P	Ground reference for analog module.
CLK1 CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
EMUD EMUC EMUD1 EMUC1 EMUD2 EMUC2 EMUD3 EMUC3	I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O	ST ST ST ST ST ST ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin. ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs. The dsPIC30F2010 has 4 capture inputs. The inputs are numbered for consistency with the inputs on larger device variants.
INDX QEA QEB	I I I	ST ST ST	Quadrature Encoder Index Pulse input. Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0 External interrupt 1 External interrupt 2
FLTA PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H	I O O O O O O	ST — — — — — —	PWM Fault A input PWM 1 Low output PWM 1 High output PWM 2 Low output PWM 2 High output PWM 3 Low output PWM 3 High output
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OCFA OC1-OC2	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs.
OSC1 OSC2	I I/O	ST/CMOS —	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes.

Legend: CMOS =CMOS compatible input or output Analog= Analog input  
 ST =Schmitt Trigger input with CMOS levels O= Output  
 I =Input P = Power

# dsPIC30F2010

**TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC14	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF2, RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ #1.
SDI1	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SS1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I <sup>2</sup> C.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I <sup>2</sup> C.
SOSCO	O	—	32 kHz low power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
U1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

Legend: CMOS =CMOS compatible input or output Analog= Analog input  
 ST =Schmitt Trigger input with CMOS levels O= Output  
 I =Input P = Power



## ANEXO D. REGISTROS MODULO PWM dsPIC30F2010

**Table 15-9: Registers Associated with the 6-Output PWM Module**

Name	ADR	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on Reset
INTCON1	0080	NSTDIS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
INTCON2	0082	ALTVT	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
IFS2	0088	—	—	—	FLATIF	—	—	—	—	PWMIF	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
IEC2	0090	—	—	—	FLTAIE	—	—	—	—	PWMIE	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
IPC9	00A8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0100 0100 0100 0100
IPC10	00A8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0100 0100 0100 0100
PTCON	01C0	PTEN	—	—	—	—	—	—	—	—	PTOPS<3:0>	—	—	—	—	PTMOD<1:0>	—	0000 0000 0000 0000
PTMR	01C2	PTDIR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
PTPER	01C4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0111 1111 1111 1111
SEVTCMP	01C8	SEVTDIR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
PWMCON1	01C8	—	—	—	—	—	PMOD3	PMOD2	PMOD1	—	PEN3H	PEN2H	PEN1H	—	FEN3L	PEN2L	PEN1L	0000 0000 0000 0000
PWMCON2	01CA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	IUE	OSYNC	UDIS	0000 0000 0000 0000
DTCOEN1	01CC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	DTAPS<1:0>	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
Reserved	01CE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000 0000 0000 0000
FLTACON	01D0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Reserved	01D2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OVDCON	01D4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PDC1	01D8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PDC2	01D8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PDC3	01DA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Note 1: Reset state of PEN<sub>xxx</sub> control bits depends on the state of the PWMPIN device configuration bit.  
 2: Shaded register and bit locations not implemented for the 6-output MCPWM module.  
 3: The IUE bit is not implemented on the dsPIC30F8010 device.

## ANEXO E. REGISTROS MODULO UART dsPIC30F2010

**Table 19-3: Registers Associated with UART1**

SFR Name	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Reset State	
U1MODE	UARTEN	—	USIDL	—	reserved	ALTIO	reserved	reserved	WAKE	LPBACK	ABAUD	—	—	PDSEL<1:0>	STSEL	—	0000 0000 0000 0000	
U1STA	UTXISEL	—	—	—	UTXBRK	UTXEN	UTXBF	TRMT	URXISEL<1:0>	ADDEN	RIDLE	PERR	FERR	OERR	URXDA	—	0000 0001 0001 0000	
U1TXREG	—	—	—	—	—	—	—	UTX8	Transmit Register								—	0000 0000 0000 0000
U1RXREG	—	—	—	—	—	—	—	URX8	Receive Register								—	0000 0000 0000 0000
U1BRG	Baud Rate Generator Prescaler																	
IFS0	CNIF	M12CIF	S12CIF	NVMIF	ADIF	U1TXIF	U1RXIF	SPI1IF	T3IF	T2IF	OC2IF	IC2IF	T1IF	OC1IF	IC1IF	INT0	0000 0000 0000 0000	
IEC0	CNIE	M12CIE	S12CIE	NVMIE	ADIE	U1TXIE	U1RXIE	SPI1IE	T3IE	T2IE	OC2IE	IC2IE	T1IE	OC1IE	IC1IE	INT0IE	0000 0000 0000 0000	
IPC2	—	ADIP<2:0>		—	—	U1TXIP<2:0>		—	U1RXIP<2:0>		SPI1IP<2:0>		—				0100 0100 0100 0100	

**Note:** The registers associated with UART1 are shown for reference. See the device data sheet for the registers associated with other UART modules.

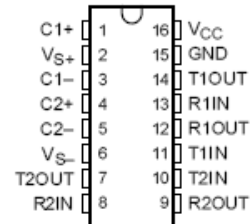
# ANEXO F. INTEGRADO MAX 232

## MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS0471 – FEBRUARY 1989 – REVISED OCTOBER 2002

- Meet or Exceed TIA/EIA-232-F and ITU Recommendation V.28
- Operate With Single 5-V Power Supply
- Operate Up to 120 kbit/s
- Two Drivers and Two Receivers
- $\pm 30$ -V Input Levels
- Low Supply Current . . . 8 mA Typical
- Designed to be Interchangeable With Maxim MAX232
- ESD Protection Exceeds JESD 22 – 2000-V Human-Body Model (A114-A)
- Applications
  - TIA/EIA-232-F
  - Battery-Powered Systems
  - Terminals
  - Modems
  - Computers

MAX232 . . . D, DW, N, OR NS PACKAGE  
MAX232I . . . D, DW, OR N PACKAGE  
(TOP VIEW)



### description/ordering information

The MAX232 is a dual driver/receiver that includes a capacitive voltage generator to supply EIA-232 voltage levels from a single 5-V supply. Each receiver converts EIA-232 inputs to 5-V TTL/CMOS levels. These receivers have a typical threshold of 1.3 V and a typical hysteresis of 0.5 V, and can accept  $\pm 30$ -V inputs. Each driver converts TTL/CMOS input levels into EIA-232 levels. The driver, receiver, and voltage-generator functions are available as cells in the Texas Instruments LinASIC™ library.

### ORDERING INFORMATION

TA	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	PDIP (N)	Tube	MAX232N	MAX232N
		Tube	MAX232D	MAX232
	Tape and reel	MAX232DR		
	SOIC (DW)	Tube	MAX232DW	MAX232
		Tape and reel	MAX232DWR	
	SOP (NS)	Tape and reel	MAX232NSR	MAX232
–40 °C to 85 °C	PDIP (N)	Tube	MAX232IN	MAX232IN
		Tube	MAX232ID	MAX232I
	Tape and reel	MAX232IDR		
	SOIC (DW)	Tube	MAX232IDW	MAX232I
		Tape and reel	MAX232IDWR	

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

LinASIC is a trademark of Texas Instruments.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated

**MAX232, MAX232I**  
**DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS**

SLLS0471 – FEBRUARY 1989 – REVISED OCTOBER 2002

**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†**

Input supply voltage range, $V_{CC}$ (see Note 1)	–0.3 V to 6 V
Positive output supply voltage range, $V_{S+}$	$V_{CC} - 0.3$ V to 15 V
Negative output supply voltage range, $V_{S-}$	–0.3 V to –15 V
Input voltage range, $V_I$ : Driver	–0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V
Receiver	±30 V
Output voltage range, $V_O$ : T1OUT, T2OUT	$V_{S-} - 0.3$ V to $V_{S+} + 0.3$ V
R1OUT, R2OUT	–0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V
Short-circuit duration: T1OUT, T2OUT	Unlimited
Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Note 2): D package	73°C/W
DW package	57°C/W
N package	67°C/W
NS package	64°C/W
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C
Storage temperature range, $T_{stg}$	–65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTE 1: All voltage values are with respect to network ground terminal.  
2. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

**recommended operating conditions**

		MIN	NOM	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage	4.5	5	5.5	V
$V_{IH}$	High-level input voltage (T1IN, T2IN)	2			V
$V_{IL}$	Low-level input voltage (T1IN, T2IN)			0.8	V
R1IN, R2IN	Receiver input voltage			±30	V
$T_A$	Operating free-air temperature	MAX232	0	70	°C
		MAX232I	–40	85	

**electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature (unless otherwise noted) (see Note 3 and Figure 4)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
$I_{CC}$ Supply current	$V_{CC} = 5.5$ V, All outputs open, $T_A = 25^\circ\text{C}$		8	10	mA

‡ All typical values are at  $V_{CC} = 5$  V and  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

NOTE 3: Test conditions are C1–C4 = 1  $\mu\text{F}$  at  $V_{CC} = 5$  V  $\pm 0.5$  V.

# MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047I – FEBRUARY 1989 – REVISED OCTOBER 2002

## DRIVER SECTION

electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature range (see Note 3)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP†	MAX	UNIT
V <sub>OH</sub>	High-level output voltage	T1OUT, T2OUT	R <sub>L</sub> = 3 kΩ to GND	5	7		V
V <sub>OL</sub>	Low-level output voltage‡	T1OUT, T2OUT	R <sub>L</sub> = 3 kΩ to GND		-7	-5	V
r <sub>o</sub>	Output resistance	T1OUT, T2OUT	V <sub>S+</sub> = V <sub>S-</sub> = 0, V <sub>O</sub> = ±2 V	300			Ω
I <sub>OS</sub> §	Short-circuit output current	T1OUT, T2OUT	V <sub>CC</sub> = 5.5 V, V <sub>O</sub> = 0		±10		mA
I <sub>IS</sub>	Short-circuit input current	T1IN, T2IN	V <sub>I</sub> = 0			200	μA

† All typical values are at V<sub>CC</sub> = 5 V, T<sub>A</sub> = 25°C.

‡ The algebraic convention, in which the least positive (most negative) value is designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels only.

§ Not more than one output should be shorted at a time.

NOTE 3: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V<sub>CC</sub> = 5 V ± 0.5 V.

switching characteristics, V<sub>CC</sub> = 5 V, T<sub>A</sub> = 25°C (see Note 3)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
SR	Driver slew rate		R <sub>L</sub> = 3 kΩ to 7 kΩ See Figure 2			30	V/μs
SR(t)	Driver transition region slew rate		See Figure 3		3		V/μs
	Data rate		One TOUT switching		120		kbit/s

NOTE 3: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V<sub>CC</sub> = 5 V ± 0.5 V.

## RECEIVER SECTION

electrical characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature range (see Note 3)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP†	MAX	UNIT
V <sub>OH</sub>	High-level output voltage	R1OUT, R2OUT	I <sub>OH</sub> = -1 mA	3.5			V
V <sub>OL</sub>	Low-level output voltage‡	R1OUT, R2OUT	I <sub>OL</sub> = 3.2 mA			0.4	V
V <sub>IT+</sub>	Receiver positive-going input threshold voltage	R1IN, R2IN	V <sub>CC</sub> = 5 V, T <sub>A</sub> = 25°C		1.7	2.4	V
V <sub>IT-</sub>	Receiver negative-going input threshold voltage	R1IN, R2IN	V <sub>CC</sub> = 5 V, T <sub>A</sub> = 25°C	0.8	1.2		V
V <sub>hys</sub>	Input hysteresis voltage	R1IN, R2IN	V <sub>CC</sub> = 5 V	0.2	0.5	1	V
r <sub>i</sub>	Receiver input resistance	R1IN, R2IN	V <sub>CC</sub> = 5, T <sub>A</sub> = 25°C	3	5	7	kΩ

† All typical values are at V<sub>CC</sub> = 5 V, T<sub>A</sub> = 25°C.

‡ The algebraic convention, in which the least positive (most negative) value is designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels only.

NOTE 3: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V<sub>CC</sub> = 5 V ± 0.5 V.

switching characteristics, V<sub>CC</sub> = 5 V, T<sub>A</sub> = 25°C (see Note 3 and Figure 1)

PARAMETER		TYP	UNIT
t <sub>PLH(R)</sub>	Receiver propagation delay time, low- to high-level output	500	ns
t <sub>PHL(R)</sub>	Receiver propagation delay time, high- to low-level output	500	ns

NOTE 3: Test conditions are C1–C4 = 1 μF at V<sub>CC</sub> = 5 V ± 0.5 V.

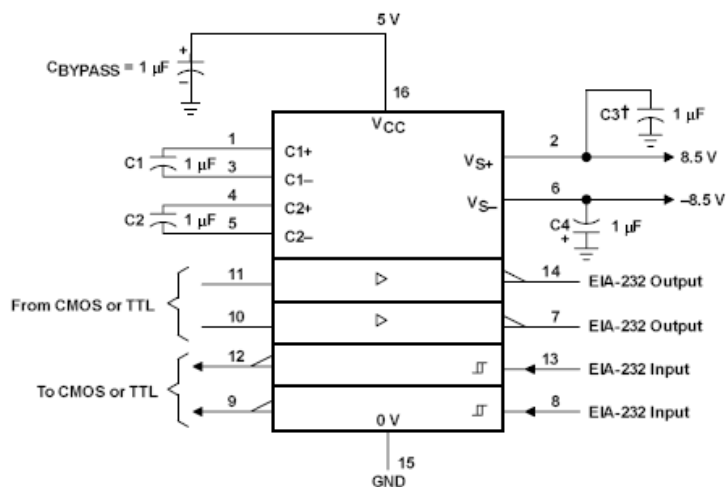


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

MAX232, MAX231  
DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SLLS047I - FEBRUARY 1989 - REVISED OCTOBER 2002

APPLICATION INFORMATION



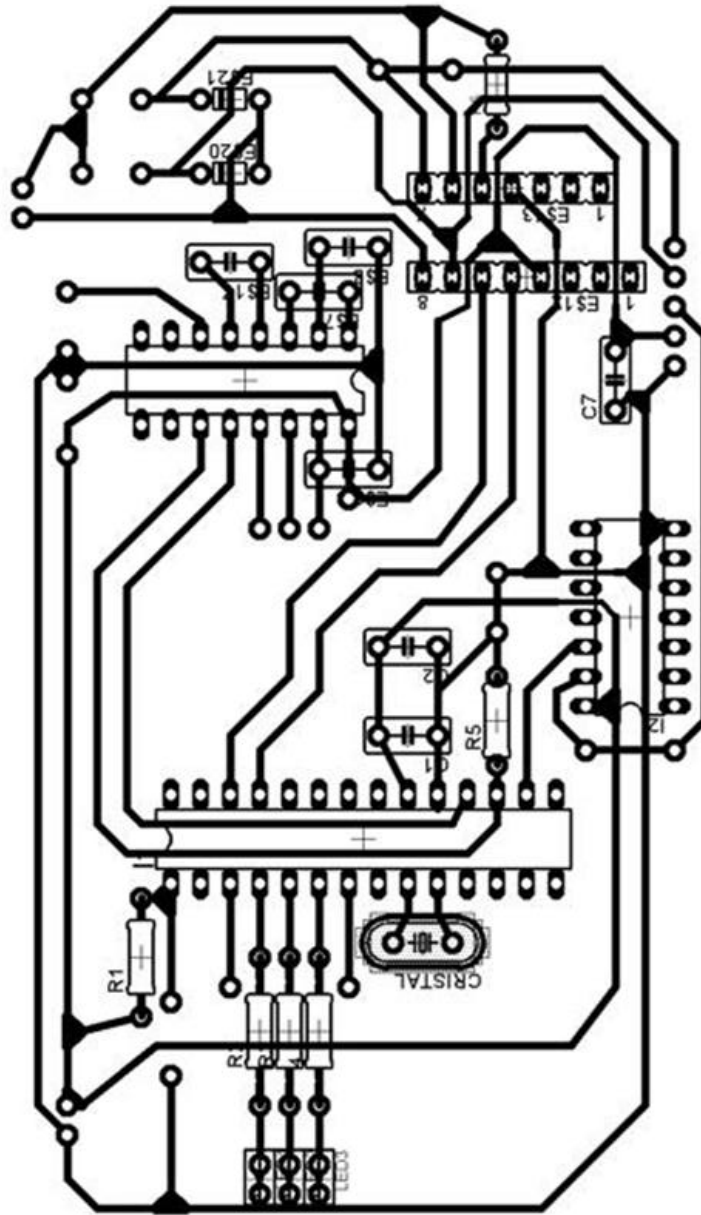
† C3 can be connected to V<sub>CC</sub> or GND.

Figure 4. Typical Operating Circuit

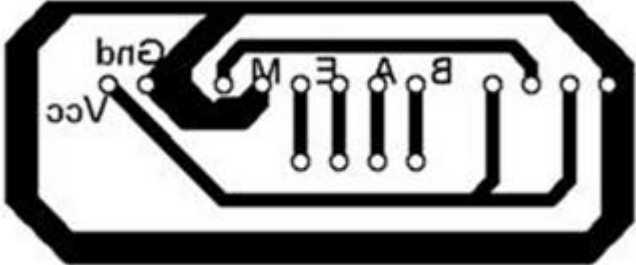


POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

# ANEXO G. BAQUELITA MODULO POSICIÓN

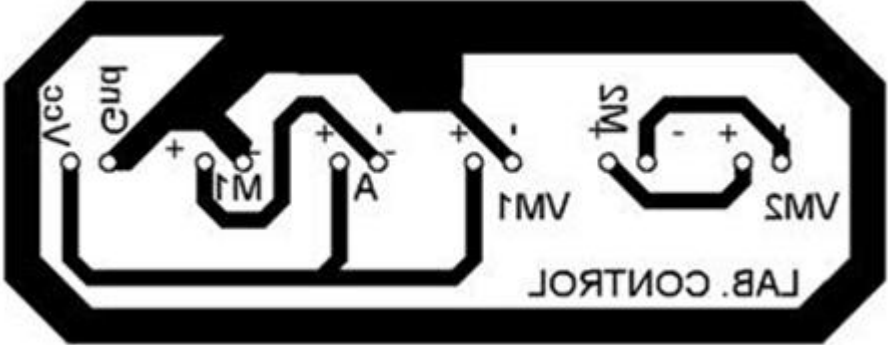


**ANEXO H. BAQUELITA MODULO MOTOR UNICO**

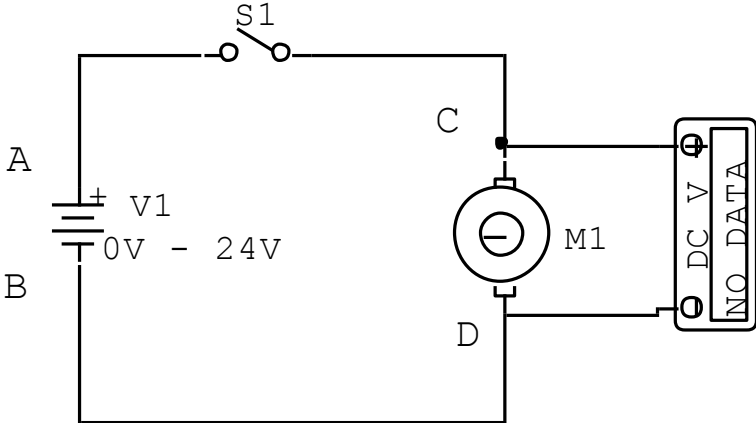




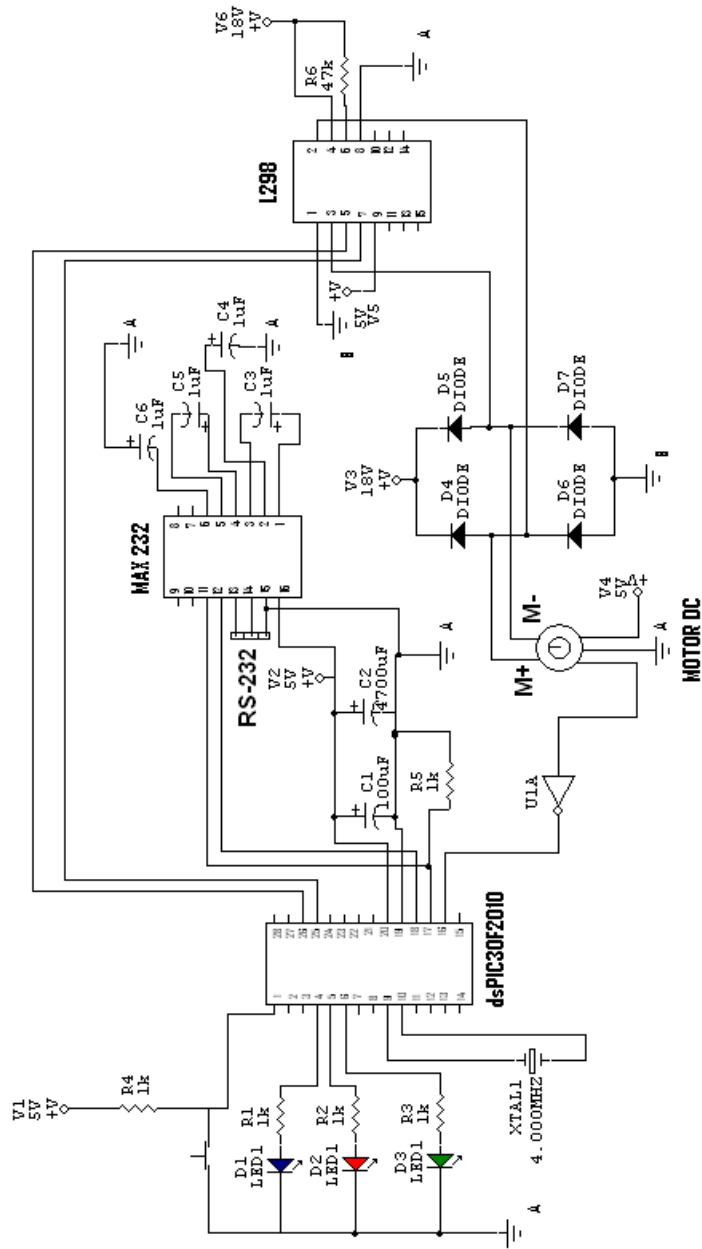
ANEXO I. BAQUELITA MODULO ACOPLE



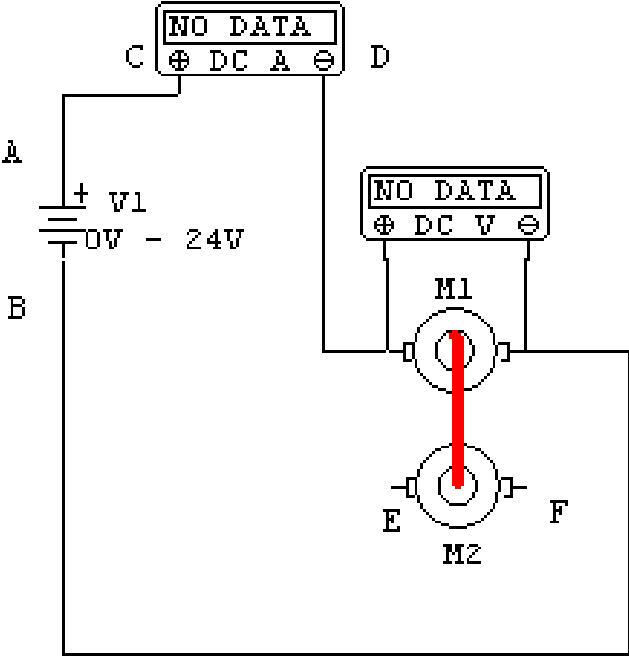
ANEXO J. CIRCUITO MODULO UNICO



# ANEXO K. CIRCUITO MODULO POSICIÓN



ANEXO L. CIRCUITO MODULO ACOPLE



## ANEXO M. GUIAS DE EXPERIENCIAS PARA EL ESTUDIANTE

### EXPERIENCIA Nº 1

#### DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE ARMADURA ( $R_a$ )

##### OBJETIVO

- Hallar experimentalmente la resistencia de armadura de los servomotores de corriente directa.

##### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores de DC
- Amperímetro
- Voltímetro o Osciloscopio digital Fluye 123
- Fuente de corriente continua
- Conectores

##### MARCO TEORICO

###### ➤ RESISTENCIA DE ARMADURA:

La resistencia de armadura se encuentra aplicando la ley de Ohm, a través del ajuste de un voltaje para una cuarta parte de la corriente nominal de armadura, la cual se halla aplicando el voltaje nominal de placa y sin carga.

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

A está resistencia es necesario adicionarle el valor de la resistencia de los devanados de armadura, contacto por escobillas y elementos de conmutación.

###### ➤ RESISTENCIA DINAMICA

La resistencia dinámica es la protección del motor cuando este se encuentra en movimiento, el incremento de voltaje y de corriente permiten que esta resistencia sea mayor que la estática, en el arranque la corriente alcanza un pico generalmente tres veces la corriente nominal por lo tanto en este instante la resistencia será mayor.

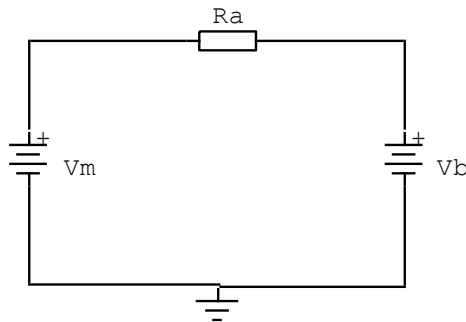
###### ➤ RESISTENCIA ESTATICA

La resistencia estática puede ser definida como el valor óhmico cuando el motor se encuentra en estado de reposo, generalmente es de un valor muy pequeño, ya que no hay presencia de corriente y voltaje y por lo tanto no cumple con la ley de Ohm.

$$V = I \times R$$

➤ **FCEM (Fuerza contra-electromotriz)**

La fuerza contra electromotriz es un voltaje que es causado por el giro del motor, ya que debido a la resistencia o arrollamientos internos de este elemento se genera una caída de tensión, por lo tanto el voltaje de alimentación será mayor que el voltaje generado en la salida de este.



$$V_m = V_b + (I_a \times R_a)$$

La **FCEM** es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Si el motor tiene rotor con imán permanente esta constante es:

$$K = \frac{v_b}{N_d}$$

Donde:

$K$  = Constante de FCEM del motor y se expresa en Voltios / rpm.

$N_d$  = Velocidad de giro del motor en rpm.

$V_B$  = Voltaje de giro del motor en V.

Nota: rpm = revoluciones por minuto

## PROCEDIMIENTO

Figura 1. Módulo de acople de motores.

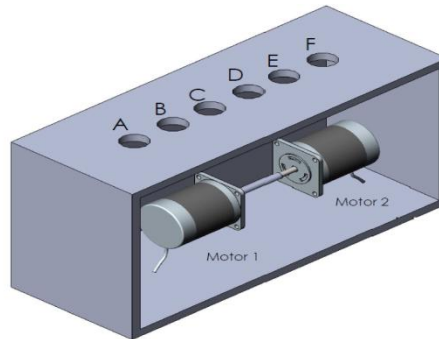
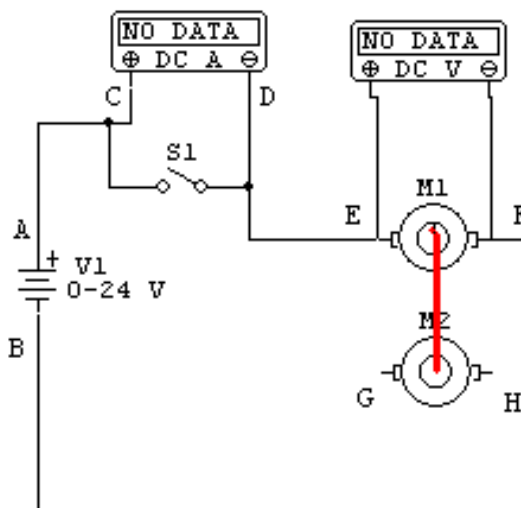


Figura 2. Conexión interna del módulo de acople de motores.



## MEDICION DE LA RESISTENCIA DINÁMICA

- El módulo de acople se encuentra diseñado por dos motores de corriente continua 24V, los cuales se encuentran acoplados por medio de un eje en bronce, y se encuentran alineados correctamente, uno funciona como generador y otro como carga, ya que solo uno recibe alimentación.
- Se debe conectar inicialmente la fuente de corriente continua a los terminales A y B del módulo de acople de los servomotores, los cuales se

encuentran acoplados por medio del eje y con régimen de velocidad reducida, los dos servomotores poseen las mismas características, en los terminales C y D del módulo se conectara el amperímetro, en el E y F, estará ubicado el voltímetro para el voltaje de motor, en G y H se puede leer el voltaje del generador.

- La fuente debe ser ajustada al valor del voltaje de armadura colocando el motor en movimiento por medio de una elevación de voltaje proporcional hasta alcanzar aproximadamente una cuarta parte de la corriente nominal.
- La corriente nominal de armadura se obtiene aplicando el voltaje nominal de armadura (24V), al servomotor sin carga. El servomotor debe girar a velocidad constante, si este efecto no se produce se debe aumentar de 25% en 25% el voltaje nominal hasta que se cumpla con este requisito.
- Debido a que los valores de resistencia están especificados para 25°C, es aconsejable tomar los valores rápidamente para evitar el efecto de calentamiento.
- El valor de la resistencia calculada incorpora el valor de la resistencia de los devanados de armadura y la resistencia de contacto por escobillas, más los elementos de conmutación.

## **MEDICION DE LA RESISTENCIA ESTATICA**

- Es importante realizar la medición de forma estática, o sea utilizando el óhmetro, aplicado directamente sobre los terminales de armadura encontrándose el servomotor desenergizado y realizando la comparación con el resultado anterior.

### **RESISTENCIA ESTATICA**

- Se debe realizar la misma operación pero utilizando el osciloscopio digital Fluke 123 en la escala de ohmios.
- Para calcular el valor del error relativo, para este procedimiento se toma como referencia el valor de la resistencia estática medida por el osciloscopio digital y el valor experimental será el valor de la resistencia leída por el óhmetro.



$$Error_{relativo} = \left[ \frac{(V_{ref} - V_{exp})}{V_{ref}} \right] \times 100\%$$

$V_{ref}$  = Valor de referencia

$V_{exp}$  = Valor experimental

- Realice el mismo procedimiento anterior pero el valor de referencia será la resistencia estática medida por el óhmetro y el valor experimental la resistencia dinámica.
- Igualmente realice lo mismo pero el valor de referencia será la resistencia estática medida con el osciloscopio y el valor experimental será la resistencia dinámica.

## DATOS OBTENIDOS.

### RESISTENCIA DINAMICA

- $V_{nominal}$  = \_\_\_\_\_
- $I_{nominal}$  = \_\_\_\_\_
- $V_{armadura}$  = \_\_\_\_\_
- $I_{armadura}$  = \_\_\_\_\_
- $R_{armadura}$  = \_\_\_\_\_

$$R_a = \frac{V}{I_a}$$

### RESISTENCIA ESTÁTICA

- $R_{estatica}$  (Ohmetro) = \_\_\_\_\_
- $R_{estatica}$  (Osciloscopio) = \_\_\_\_\_

### ERRORES RELATIVOS

- $Error_{relativo}(R_{estatica} \text{ (Ohmetro)} - R_{estatica} \text{ (Osciloscopio)}) = \underline{\hspace{2cm}}$
- $Error_{relativo}(R_{estatica} \text{ (Ohmetro)} - R_{dinamica}) = \underline{\hspace{2cm}}$
- $Error_{relativo}(R_{estatica} \text{ (Osciloscopio)} - R_{dinamica}) = \underline{\hspace{2cm}}$

## PREGUNTAS

- ¿A que atribuye usted, la gran diferencia entre los valores obtenidos de la resistencia dinámica y la estática?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- ¿De que factores depende la exactitud de los resultados hallados durante la práctica?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- **ANALISIS DE RESULTADOS.**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- **CONCLUSIONES.**

---

---

---



## EXPERIENCIA N° 2

### DETERMINACION DE LA INDUCTANCIA DE ARMADURA ( $L_a$ ) Y LA CONSTANTE DE TIEMPO ELECTRICA ( $t_e$ ) DE LOS MOTORES DC.

#### OBJETIVOS

- Hallar el valor de la inductancia de armadura de un servomotor DC, mediante la determinación previa de la constante de tiempo eléctrica.
- Calcular la constante eléctrica del servomotor.

#### ELEMENTOS

- Modulo de Servomotor de DC.
- Osciloscopio digital Fluke 123
- Fuente variable de voltaje

#### MARCO TEORICO

##### ➤ INDUCTANCIA

La bobina o inductor es un elemento que reacciona contra cambios de corriente a través de él, generando un voltaje que se opone al voltaje aplicado y es proporcional al cambio de la corriente. A diferencia del condensador o capacitor, que almacena energía en forma de campo eléctrico, la bobina o inductor por su forma (espiras de alambre arrollados) almacena energía en forma de campo magnético.

Todo cable por el que circula una corriente, tiene a su alrededor un campo magnético, siendo el sentido de flujo del campo magnético, el que establece la ley de la mano derecha. Al estar el inductor hecho de espiras de cable, el campo magnético circula por el centro del inductor y cierra su camino por su parte exterior.

Una característica interesante de los inductores es que se oponen a los cambios bruscos de la corriente que circula por ellas. Esto significa que a la hora de modificar la corriente que circula por ellos

La inductancia mide el valor de oposición de la bobina al paso de la corriente y se miden en Henrios (H), pudiendo encontrarse valores de mili-henrios (mH).

El valor depende de:

- El número de espiras que tenga la bobina (a más vueltas mayor inductancia  $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$ ).
- El diámetro de las espiras (a mayor diámetro, mayor inductancia).
- La longitud del cable de que está hecha la bobina.
- El tipo de material de que esta hecho el núcleo, si es que lo tiene.

En motores de corriente continua la medición de la inductancia de armadura se puede verificar aplicando diferentes técnicas como lo son el puente Maxwell, pero así mismo con la instrumentación moderna se puede hallar con ayuda del osciloscopio digital, ya que se obtiene la constante de tiempo, por lo tanto se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$L_a = t_e \times R_a$$

$R_a$  = Resistencia de armadura  
 $t_e$  = Constante de tiempo eléctrica  
 $L_a$  = Inductancia de armadura

Otro método es utilizar el dispositivo de puente de impedancias.

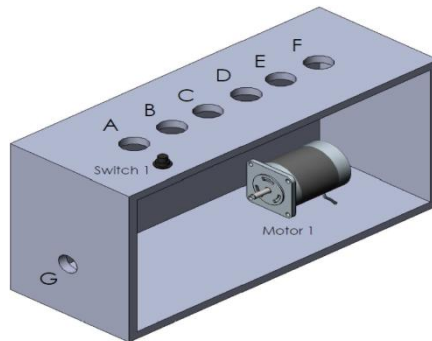
### **CONSTANTE DE TIEMPO ELECTRICA ( $t_e$ )**

Es el tiempo transcurrido para que la corriente alcance el 63.2% de su valor estable, por medio de esta medida se puede encontrar el tiempo mínimo de reacción de la corriente, para una mejor lectura del tiempo el motor debe estar quieto para que la constante de tiempo mecánica no influya dentro de la medición.

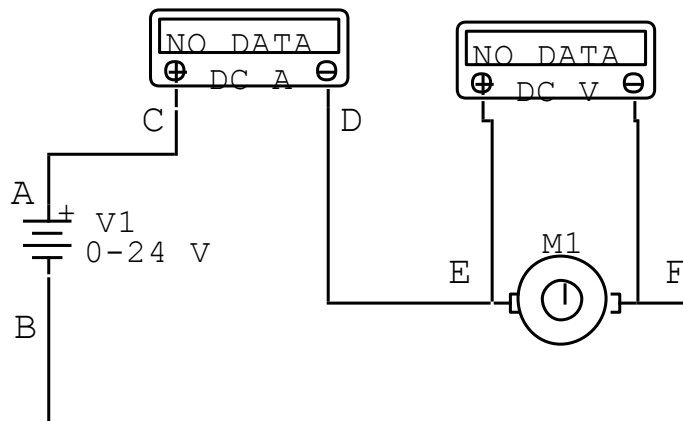
### **PROCEDIMIENTO**

- Conectar los puntos A y B del módulo del servomotor a la fuente variable, ajustando previamente el valor de la tensión nominal del servomotor.
- Conectar el osciloscopio digital Fluke 123 en los puntos C y D el cual debe ser ajustado en el modo para captura y exhibición de la forma de onda eligiendo la opción de disparo único (Single Shot) o abriendo el Menú (Tigger) y la función (On Trig), de esta manera se logrará obtener la repuesta transitoria. Se deben ajustar al inicio las escales de amplitud y base de tiempo de la señal que se desea obtener.

**Figura 1. Módulo motor único.**



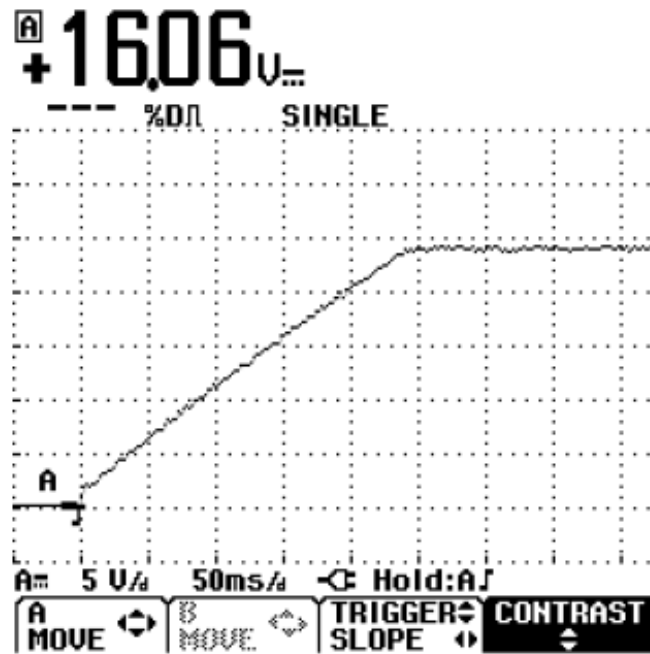
**Figura 2. Conexión interna del módulo**



- Por medio del cierre del interruptor se produce un voltaje tipo escalón, el cual es aplicado directamente a la armadura del motor, esto permite que circule inicialmente una corriente transitoria de armadura.
- El osciloscopio digital Fluke 123, permite la captura de dicha forma de la señal y la representa en la pantalla.
- Si se mide el tiempo requerido para que la corriente alcance el 63.2% de su valor final. Dicha lectura se basará en los escalamientos fijados previamente. Este tiempo hallado corresponde a la constante de tiempo eléctrica ( $t_e$ ).
- El valor de  $Y_t$  debe ser prolongado en la escala de  $Y_{estable}$  el valor encontrado es el valor  $t_e$ .

- Ejemplo

Figura 3. Respuesta transitoria de un motor de corriente continua



$$Y_t = 0.632 \times Y_{estable}$$

$$Y_t = 0.632 \times 16.06V$$

$$Y_t = 10.1499$$

- Por medio de la expresión:

$$L_a = t_e \times R_a$$

Se calcula el valor de la inductancia de armadura ( $L_a$ ) en el servomotor de prueba.  $R_a$  es la resistencia de armadura la cual debe ser conocida anteriormente.

## DATOS OBTENIDOS


➤  $t_e =$  \_\_\_\_\_

➤  $R_a =$  \_\_\_\_\_

➤  $Y_t =$  \_\_\_\_\_

➤  $Y_{estable} =$  \_\_\_\_\_

➤  $L_a =$  \_\_\_\_\_

## PREGUNTAS

- Realice una descripción breve de las técnicas de medición de inductancias por los métodos experimentales: Puente de Maxwell y Puente de Hay.

---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- ¿Por que puede ser confiable la exactitud de la medición de la inductancia utilizando la técnica del osciloscopio digital?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- ¿Cual es la importancia de hallar la constante de tiempo eléctrica en los servomotores?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

➤ **ANALISIS DE RESULTADOS**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## EXPERIENCIA Nº 3

### DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL MOMENTO DE INERCIA (J) DE LOS SERVOMOTORES.

#### OBJETIVOS

- Implementar una técnica sencilla, para encontrar con cierta precisión el valor del momento de inercia del inducido en los servomotores de corriente continua.

#### ELEMENTOS

- Inducido de un servomotor de prueba
- Módulo para la medición del momento inercial
- Cilindro maestro de prueba
- Cronometro

#### MARCO TEORICO

##### ➤ MOMENTO DE INERCIA

El momento de inercia es una medida de la inercia rotacional de un cuerpo, es decir cuanto se opone un cuerpo para ponerse en movimiento. Más concretamente el momento de inercia es una magnitud escalar que refleja la distribución de masas de un cuerpo o un sistema de partículas en rotación, respecto al eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro; pero no depende de las fuerzas que intervienen en el movimiento.

El momento de inercia desempeña un papel análogo al de la masa inercial en el caso del movimiento rectilíneo y uniforme. Es el valor escalar del momento angular longitudinal de un sólido rígido.

Para una masa puntual y un eje arbitrario, el momento de inercia es:

$$I = m \times r^2$$

donde  $m$  es la masa del punto, y  $r$  es la distancia al eje de rotación.

La inercia es una propiedad inherente de los cuerpos, que se expresa en una súbita resistencia de todos los cuerpos físicos a aceptar cambios de estado. La medida de esta propiedad se denomina momento de inercia. Si dicha magnitud relaciona a un cuerpo referido a un eje de rotación, su momento de inercia también se llama Inercia rotacional.

Para la mayoría de los cuerpos dependiendo de su forma geométrica y distribución de masa regulares, tienen una ecuación diferente para hallar su valor. Para encontrar el valor del momento de inercia de un servomotor existen dos métodos. El primero involucra un dispositivo medidor de inercia llamado máquina medidora de inercias; mientras que el segundo método aplica la técnica del péndulo de torsión, ambos métodos relacionan el momento de inercia con la proporcionalidad matemática existente con el cuadrado del periodo de oscilación.

## **METODOS PARA CALCULAR EL MOMENTO DE INERCIA**

### **➤ TECNICA DE LA MAQUINA I.M.D (Inertial Measuring Device)**

La máquina I.M.D corresponde a un dispositivo, el cual se monta sobre un buje receptor el inducido del servomotor, luego se imprime un giro al conjunto y enseguida se leerá el periodo de oscilación sobre un registrador digital. Posteriormente se retira la armadura del buje y se da un nuevo giro al buje solamente, leyendo también su periodo de oscilación. Entonces el momento de inercia se calculará por la expresión:

$$J = C \times (t_1^2 - t_2^2)$$

$J$  = Momento de inercia

$C$  = Constante de calibración del aparato

$t_1$  = Tiempo del periodo de oscilación del inducido más el buje

$t_2$  = Tiempo del periodo de oscilación del buje solamente.

### **➤ TECNICA DEL PENDULO DE TORSIÓN (Cuerda de guitarra)**

Este método requiere de la construcción previa de un cilindro maestro y un buje o casquillo con momentos de inercia conocido. El cilindro maestro debe ser aproximadamente del mismo tamaño del inducido de prueba.

La experiencia se realiza inicialmente colgando y sujetando el inducido del motor a determinar el momento de inercia a través de hilo metálico a un soporte con elevación adecuada. Estando el cuerpo en reposo, se aplica media o una vuelta de giro completa sobre el inducido, se suelta y se permite que este oscile libremente. Luego con un cronometro se mide el tiempo para veinte oscilaciones.

Posteriormente se retira el inducido y se cuelga el “cilindro maestro” y se repite la operación de medición para veinte oscilaciones.

Con los resultados obtenidos se calcula el momento de inercia del inducido a través de la expresión:

$$J = J_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^2 - J_2$$

$J$  = Momento de inercia del inducido de prueba.

$J_1$  = Momento de inercia del cilindro maestro y buje.

$J_2$  = Momento de inercia del buje.

$t_2$  = Tiempo para 20 oscilaciones del cilindro maestro y buje

$t_1$  = Tiempo para 20 oscilaciones del inducido bajo prueba y buje.

El momento de inercia del cilindro maestro y buje es equivalente a la suma algebraica de los momentos de cada cuerpo parcial si ellos están referidos al mismo eje de rotación.

## PROCEDIMIENTO

**Figura 1. Módulo para medición del momento de inercia.**



- Inicialmente se debe sujetar el inducido de prueba al módulo para la medición del momento inercial a través del buje.
- Estando el cuerpo en reposo, se aplica media o una vuelta de giro completa sobre el inducido, se suelta y se permite que esté oscile libremente.
- Con un cronómetro se mide el tiempo para 20 oscilaciones.

- Posteriormente se retira el inducido y se instala el cilindro maestro, se repiten las mismas operaciones anteriormente realizadas para el inducido del servomotor de prueba.
- Con los resultados obtenidos se calcula el momento de inercia del inducido a través de la expresión:

$$J = J_1 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^2 - J_2$$

### **MOMENTO DE INERCIA DEL CILINDRO MAESTRO**

Como el cilindro maestro tiene una geometría definida se puede calcular de forma sencilla su momento de inercia mediante la fórmula:

$$J_1 = \frac{(m \times r)^2}{2}$$

Donde  $m$  es la masa del cilindro:

$$P = m \times g$$

El valor de  $g$  es  $980 \frac{m}{s^2}$ .

$P$  es el peso del cilindro

El valor de  $r$  es el radio del cilindro (cm)

### **DATOS OBTENIDOS.**

$J =$  \_\_\_\_\_

$J_1 =$  \_\_\_\_\_

$J_2 =$  \_\_\_\_\_

$t_2 =$  \_\_\_\_\_

$t_1 =$  \_\_\_\_\_

Radio del cilindro (cm): \_\_\_\_\_

Peso de cilindro (gr): \_\_\_\_\_

### **PREGUNTAS**

- Describir analíticamente cual es la función de transferencia obtenida para un servomotor de corriente continua.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- ¿Cuando en la prueba anterior no se utiliza buje, y solo se cuelga el inducido al hilo de acero, como se modificaría la fórmula? ¿Cambia la exactitud esperada en la prueba?

---

---

---

---

---

---

---

---

➤ **ANALISIS DE RESULTADOS**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---





## EXPERIENCIA N° 4

### OBTENCION DE LA CONSTANTE DE VOLTAJE ( $K_e$ ) PARA LOS SERVOMOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

#### OBJETIVO

- Determinar experimentalmente la constante de voltaje  $K_e$ , para servomotores de corriente continua, por medio del módulo adecuado para la realización de estas mediciones.

#### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores de DC.
- Tacómetro
- Voltímetro (2)
- Fuente DC variable
- Cables y conectores

#### MARCO TEORICO

##### ➤ FCEM (Fuerza contra-electromotriz)

La fuerza contra electromotriz es un voltaje es causado por el giro del motor en presencia de un campo magnético y se calcula por medio de la ley de Faraday  $E = l(V \times B)$ .

Como el rotor está construido de alambres conductores estos al ser movidos dentro de un campo magnéticos se crea una tensión que se llama fuerza contra electromotriz.

La FCEM es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Si el motor tiene rotor con imán permanente esta constante es:

$$K_e = \frac{V_b}{N_d}$$

Donde:

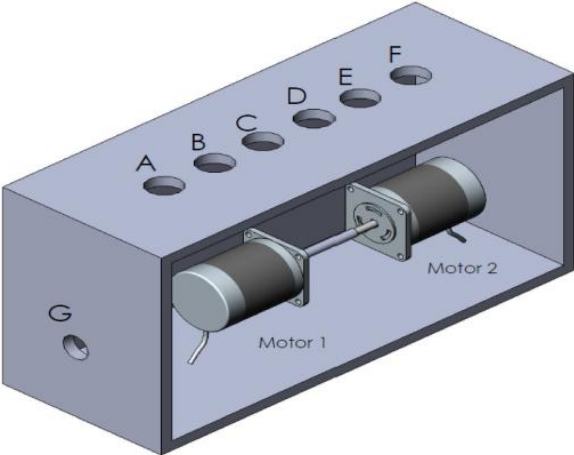
$K_e$  = Constante de FCEM del motor y se expresa en Voltios / rpm.

$N_d$  = Velocidad de giro del motor en rpm (revoluciones por minuto).

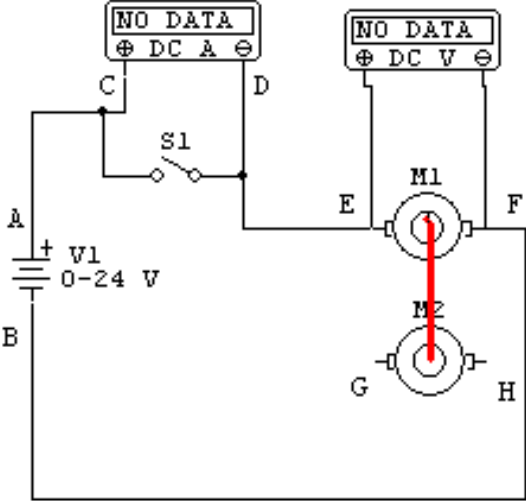
$V_B$  = Voltaje de giro del motor en V.

**PROCEDIMIENTO**

**Figura 1.** Módulo de acople de motores.



**Figura 2.** Conexión interna módulo de acople de motores.







---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## EXPERIENCIA Nº 5

### DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE TORQUE ( $K_t$ ) DE LOS SERVOMOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

#### OBJETIVOS

- Mediante las técnicas de procedimiento teórico y práctico se trata de hallar la constante de torque  $K_t$  para servomotores de corriente continua.

#### MARCO TEORICO

La ley de Ampere dice que en si un conductor transporta corriente está dentro del campo magnético se crea una fuerza que trata de expulsar el conductor del campo magnético mediante la formula:

$$F = l(ixB)$$

La máquina de corriente continua si se comporta como generador o como motor debe tener una corriente eléctrica en el rotor. Como este rotor está dentro de un campo magnético (creado por lo imanes permanentes) en el se crea una fuerza. Esta fuerza es tangencial al roto. Como la máquina es rotativa ya no se habla de fuerza sino de torque o par, la relación entre la fuerza y el par es dada por:

$$\tau = Fxr.$$

En una máquina de corriente continua el par está relacionado con la corriente en el rotor por medio de la ecuación:

$$\tau = K_t I_a$$

A la constante  $K_t$  se le llama la constante de torque.

Para poder medir la constate de par se pueden hacer dos montajes, una es por medio de una polea que ata un cuerpo de peso conocido. El motor se hace girar a velocidad conocida, se mide la corriente y por medio de ecuaciones se puede hallar el torque desarrollado por el motor.

El segundo método usado es por medio del método paramétrico, este método se puede aplicar cuando se conoce el valor de la  $K_e$  y por medio de una ecuación se puede conocer le valor de  $K_t$ .

## PROCEDIMIENTO

- Este método es no experimental como, ya se tiene el valor de la constante de voltaje  $K_e$  se puede determinar  $K_t$  por medio de las siguientes ecuaciones:

$$K_t(\text{oz} - \text{in}) = 1.3524K_e \left( \frac{V}{\text{Krpm}} \right)$$

## DATOS OBTENIDOS

$K_e =$  \_\_\_\_\_  
 $K_t =$  \_\_\_\_\_

## PREGUNTAS

- ¿Podría señalar alguna objeción, con respecto al método Paramétrico – Decimal?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- Escriba la expresión de la función de transferencia para un servomotor DC que involucra la constante de torque  $K_t$ .

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---





## EXPERIENCIA N° 6

### DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE TIEMPO MECANICA ( $t_m$ ) DE LOS SERVOMOTORES.

#### OBJETIVOS

- Comprobar mediante dos métodos optativos, uno experimental y otro paramétrico como hallar la constante de tiempo mecánica de los servomotores de corriente continua.

#### ELEMENTOS

- Módulo de acople de servomotores DC
- Osciloscopio digital Fluke 123
- Voltímetro
- Fuente de corriente continua
- Cables y conectores

#### MARCO TEORICO

##### ➤ CONSTANTE DE TIEMPO MECÁNICA

La ecuación de movimiento de motor de corriente continua es dada por la expresión:

$$\tau_e - \tau_r = j \frac{d\omega}{dt} + b\omega$$

Donde:

$T_e$  = Es el torque eléctrico.

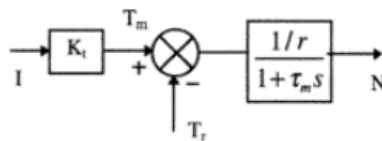
$T_r$  = Es el torque resistente.

$J$  = Es el momento de inercia.

$W$  = Es la velocidad de giro.

$B$  = Es el coeficiente de fricción viscosa.

Si se toma la transformada de Laplace a esta ecuación se puede hallar como:



Siendo  $\tau_e = \frac{j}{b}$  la constante de tiempo mecánica.

Dicho de otra manera la constante de tiempo mecánica es una constante que dice que tan rápido cambia la velocidad de una motor cuando está expuesto a un para aplicado.

## PROCEDIMIENTO

### METÓDO EXPERIMENTAL PARA HALLAR LA CONSTANTE DE TIEMPO MECANICA $t_m$ .

Figura 1. Módulo de acople de motores.

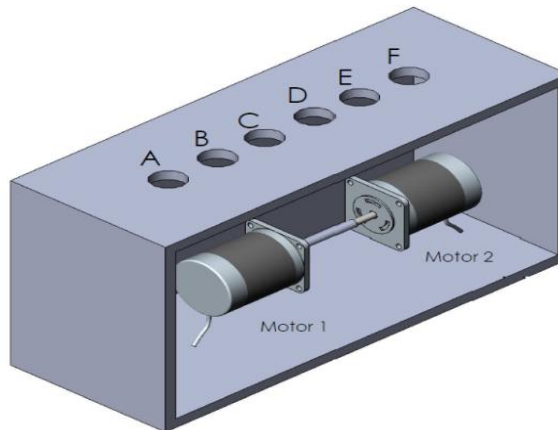
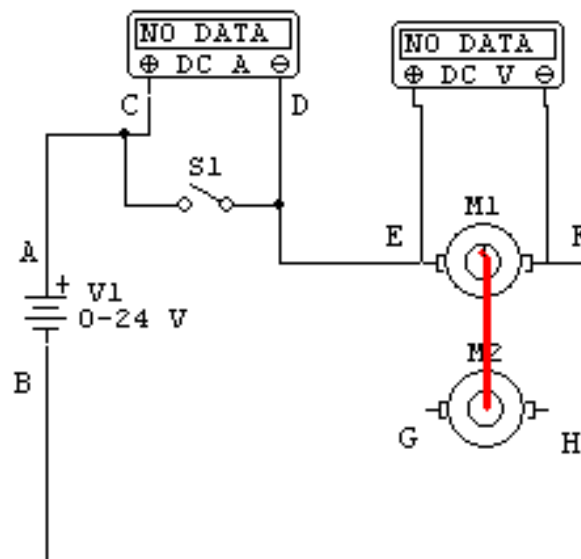


Figura 2. Conexión interna módulo de acople de motores



- Los terminales del motor generador es decir los puntos H y G, se conectan al osciloscopio digital Fluke 123, y los puntos A y B que son los correspondientes al motor de prueba son conectados a la fuente de corriente continua.
- Cerrando el interruptor, se ajusta previamente el voltaje nominal de inducido y se abre nuevamente el interruptor.
- Se efectúan los ajustes requeridos en el osciloscopio para la captura, congelación y exhibición de la repuesta transitoria de voltaje del motor-generador.
- Se aplica un voltaje tipo escalón a la armadura del motor cerrando rápidamente el interruptor. El osciloscopio construirá la característica equivalente de velocidad.
- Se mide el tiempo requerido para el cual la velocidad alcanza el 63.2% de su valor de estado estable. Dicho tiempo corresponderá a la constante de tiempo mecánica  $t_m$ .

## METODO PARAMETRICO

Esté método combina al conocimiento de parámetros ya obtenidos o conocidos tales como:

$$T_m(s) = \left( \frac{J \times R_a}{K_t \times K_e} \right)$$

El momento de inercia ( $J$ )  
 Resistencia de armadura ( $R_a$ )  
 Constante de torque ( $K_t$ )  
 Constante de voltaje ( $K_e$ )

## DATOS OBTENIDOS

### METÓDO EXPERIMENTAL PARA HALLAR LA CONSTANTE DE TIEMPO MECANICA $t_m$ .

Figura 3. Respuesta transitoria de motores acoplados.


$$T = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$t_m = \underline{\hspace{2cm}}$$

### METODO PARAMETRICO

➤  $J = \underline{\hspace{2cm}}$

➤  $R_a = \underline{\hspace{2cm}}$

➤  $K_t = \underline{\hspace{2cm}}$

➤  $K_e = \underline{\hspace{2cm}}$

➤  $t_m = \underline{\hspace{2cm}}$

## PREGUNTAS

- Establecer un estudio comparativo entre los dos métodos aplicados para hallar la constante de tiempo mecánica.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- ¿Es posible sobre la característica de repuesta de velocidad hallar el valor de velocidad transitoria para 4 constantes de tiempo? En caso afirmativo, indíquese dicho valor.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

- **ANALISIS DE RESULTADOS**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## EXPERIENCIA N° 7

### OBTENCION DEL TORQUE DE FRICCION Y DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE EN LOS SERVOMOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

#### OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente el valor de la corriente de arranque de un servomotor de corriente continua y hallar analíticamente su torque de fricción estático.

#### ELEMENTOS

- Servomotor de corriente continua
- Amperímetro
- Voltímetro
- Fuente de corriente continua

#### MARCO TEORICO

##### TORQUE DE FRICCIÓN Y CORRIENTE DE ARRANQUE.

Es una pérdida de fricción estática originada por una oposición al desarrollo de la dinámica inicial del movimiento o freno inicial que presentan las superficies en contacto.

En un motor se manifiesta este estado cuando la corriente de armadura inicial es insuficiente para superar el torque causado por dicha fricción el cual al ir incrementado la corriente en un momento dado supera el torque de fricción y se inicia la rotación del eje.

Esta corriente mínima se denomina corriente de arranque y dicha fricción estática se llamará torque de fricción  $T_f$ .

$$T_f = K_t \times I_a$$

Cuando se utiliza una máquina de inducción para arrancar y accionar una carga mecánica a una velocidad determinada, es posible que sucedan tres situaciones diferentes:

El torque eléctrico de arranque que se suministra a la máquina puede ser inferior al torque mecánico que requiere la carga en reposo para comenzar a moverse. En esta situación la máquina no puede acelerar, el rotor está detenido o bloqueado. La corriente es varias veces la corriente nominal produciendo un recalentamiento y provocando un daño al motor.

El torque eléctrico es exactamente igual al torque de la carga. Esta situación tiene los mismos problemas que el primer caso. Si los torques eléctricos y mecánico están equilibrados, no es posible acelerar la máquina.

El torque eléctrico de arranque es mayor que el torque mecánico de la carga. En estas condiciones, existe un torque acelerante que permite incrementar la velocidad del rotor, hasta un punto de la característica torque eléctrico - deslizamiento donde se equilibran los torques de la máquina y de la carga. Si la velocidad alcanzada en este punto es cercana a la velocidad sincrónica, la corriente disminuye a un nivel que permite la operación en régimen permanente. Cuando la máquina opera en este punto, un pequeño incremento de la carga mecánica, reduce la velocidad e incrementa el torque eléctrico de accionamiento, obteniéndose un nuevo punto de operación.

Una máquina con alta resistencia en el rotor tiene deslizamientos de operación más grandes. Las pérdidas en el rotor se incrementan durante la operación en régimen permanente cuando se utilizan resistencias grandes en estas bobinas, y esto repercute desfavorablemente en el rendimiento de la máquina.

Es deseable que una máquina eléctrica produzca un torque de arranque elevado y un rendimiento cercano a la unidad. Estas dos características de la máquina se contraponen con respecto a la variación de la resistencia del rotor. Por esta razón en algunas máquinas de inducción se añade en el eje del rotor anillos deslizantes, cada uno de ellos se conecta a un extremo de las fases del rotor. Estos anillos, permiten conectar elementos en el exterior de la máquina con las bobinas, mediante contactos deslizantes - carbones o escobillas -. Al disponer de acceso al circuito del rotor, es posible incluir resistencia adicional con la finalidad de incrementar el torque eléctrico de la máquina durante el arranque. Cuando la máquina está operando en régimen permanente es posible eliminar o cortocircuitar la resistencia adicional para mejorar el rendimiento.

El rotor bobinado con acceso mediante anillos rozantes, es capaz de regular el torque de arranque, disminuir las corrientes durante el proceso de aceleración y aumentar el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa.

Sin embargo, esta solución encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

El rotor bobinado con acceso mediante anillos rozantes, es capaz de regular el torque de arranque, disminuir las corrientes durante el proceso de aceleración y aumentar el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa.

Sin embargo, esta solución encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

## **PROCEDIMIENTO**

Este valor se halla teóricamente pero teniendo en cuenta los valores anteriormente establecidos.







## EXPERIENCIA Nº 8

### CONTROL DE POSICIÓN DE SERVOMOTORES

#### OBJETIVOS

- Observar el comportamiento del controlador PID de acuerdo al cambio de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

#### ELEMENTOS

- Modulo de posición
- Cable Null-modem Serie de 3 hilos
- 2 Fuentes de voltaje

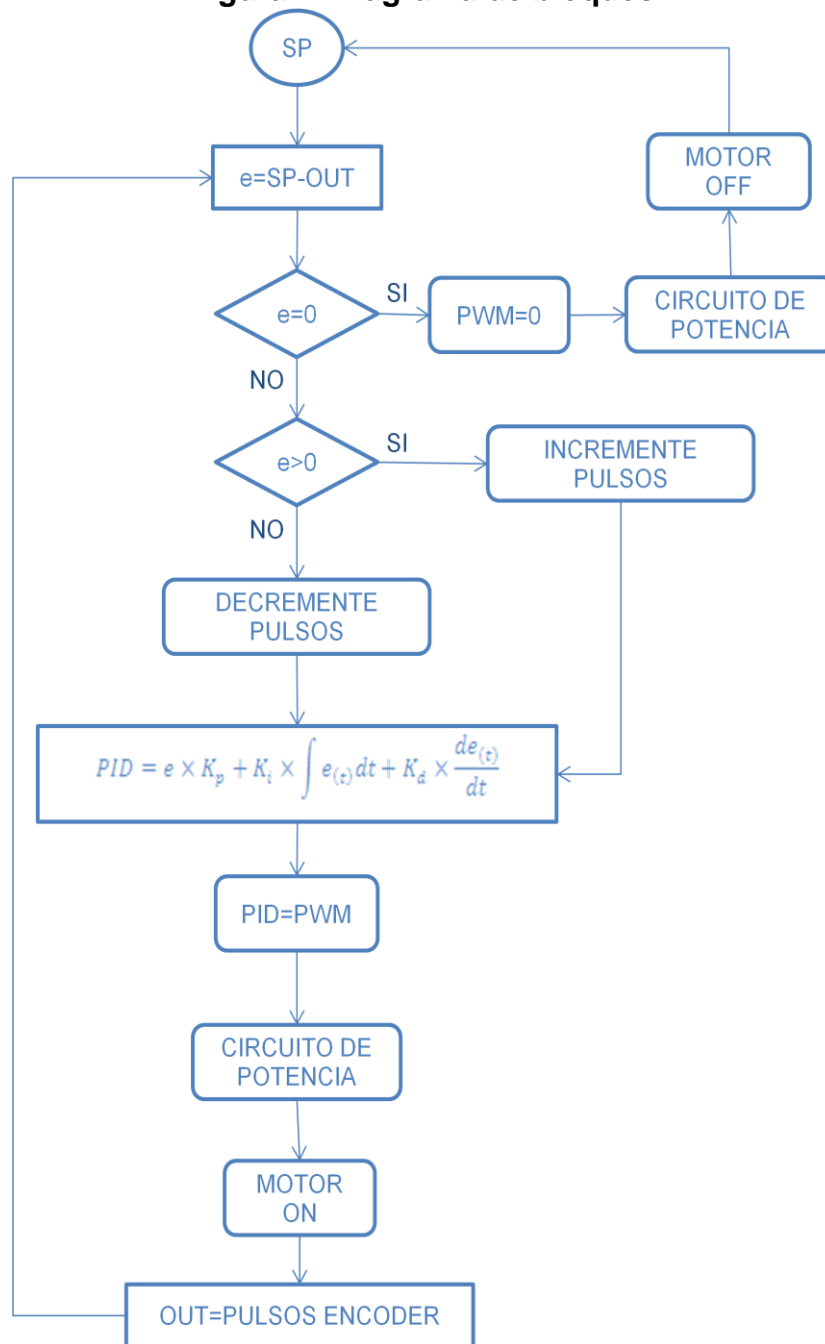
#### MARCO TEORICO

- **Control de posición PID de un servomotor con un dsPIC30F2010**

Este modulo está compuesto por una interfaz RS232, un microcontrolador dsPIC30F2010, un circuito de potencia y un servomotor con encoder (100 pulsos por cada revolución). Por medio de una interfaz con el computador el estudiante ingresa el valor de las constantes del PID, el valor del Set Point (en milímetros) y el número de muestras a tomar. En el microcontrolador el valor del Set Point en milímetros es multiplicado por 100, para que sea equivalente a pulsos por giro de  $360^\circ$  (1 revolución). El microcontrolador envía un pulso PWM con el cual se controla la potencia del motor, es decir su velocidad; el lazo cerrado se completa al leer la salida del encoder, esta señal cuadrada llega al microcontrolador el cual cuenta la cantidad de pulsos para ser comparada con el valor del Set Point, de acuerdo al valor de el error, el cual es el resultado de dicha comparación, el controlador PID realizara su acción de corrección hasta encontrar que el error sea igual a cero, esto quiere decir que el Set Point deseado se ha encontrado.

A continuación se presenta un diagrama de bloques el cual explica en que consiste el programa de control de posición PID de un servomotor con un dsPIC30F2010

**Figura 1. Diagrama de bloques**



SP= Set Point (mm).

e= Error

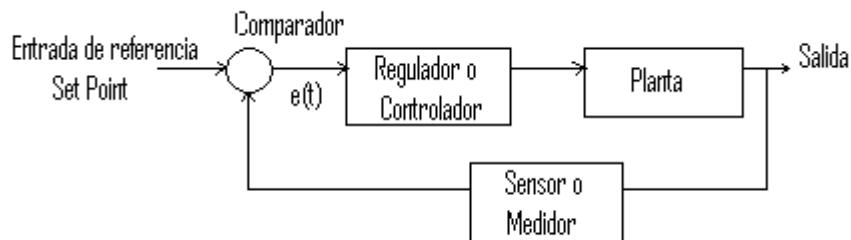
OUT= Salida (Pulsos del encoder)

Nota: Cada revolución del motor es equivalente a un milímetro (mm) de desplazamiento, el encoder del motor que se utiliza en esta práctica por cada revolución emite 100 pulsos. Por lo tanto 1 revolución=1mm=100pulsos.

- **Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)**

En un sistema de control de lazo cerrado la señal de salida hace una comparación con un nivel de referencia ajustado a la entrada y utilizando esta diferencia como parámetro de control ( $e(t)$ ) denominado señal de error actual.

**Figura 2. Sistema de control de lazo cerrado**



El controlador permite mantener la salida dentro de límites aceptables de acuerdo al Set Point. Para que el controlador se pueda efectuar, el sistema debe ser de lazo cerrado, el controlador (PID) mueve a la planta (Motor), la planta debe afectar la medición de la salida (encoder) y la señal de salida debe llegar al comparador (dsPIC30F2010) para posteriormente llegar al controlador.

El controlador PID es la suma de tres controladores: proporcional, integral y derivativo.

$$PID = e \times K_p + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times \frac{de}{dt}$$

- **Proporcional**

La acción proporcional multiplica el error por una constante ( $K_p$ ), la cual también es conocida como ganancia del controlador, para lograr un error en estado estacionario cercano a cero.

$$Salida = (K_p)e(t)$$

La respuesta proporcional es la base de el controlador, ya que no considera el tiempo, para eliminar el error permanente se le agregan componentes que si tienen en cuenta el tiempo como lo son las acciones integral y derivativa.

- **Integral**

La acción integral tiene como fin eliminar el error en estado estacionario causado por la acción proporcional. Para esto el error es integrado, la cual suma el error

por un periodo de tiempo determinado y posteriormente multiplicando este resultado por una constante integral ( $K_i$ ).

$$Salida = K_i \int e(t)dt$$

Si existe error entre la medición y el Set Point, la acción integral variara la salida hasta que el error no exista. Cuanto más acción integral exista en el controlador, mas rápido cambia la salida en función del tiempo.

- **Derivativo**

La acción derivativa se opone a un cambio en el error, su objetivo es tratar de mantener un error mínimo, si el error es constante solo actúan la acción proporcional y la acción integral. Para esto el error es derivado y posteriormente se multiplica este resultado por una constante derivativa ( $K_d$ ).

$$Salida = K_d \frac{de}{dt}$$

Cuanto mas grande sea el tiempo de acción de derivada provocara inestabilidad al sistema y cuanto mas pequeño sea el tiempo de acción de derivada la salida oscilara demasiado con respeto al Set Point.

- **Ajustes del controlador PID**

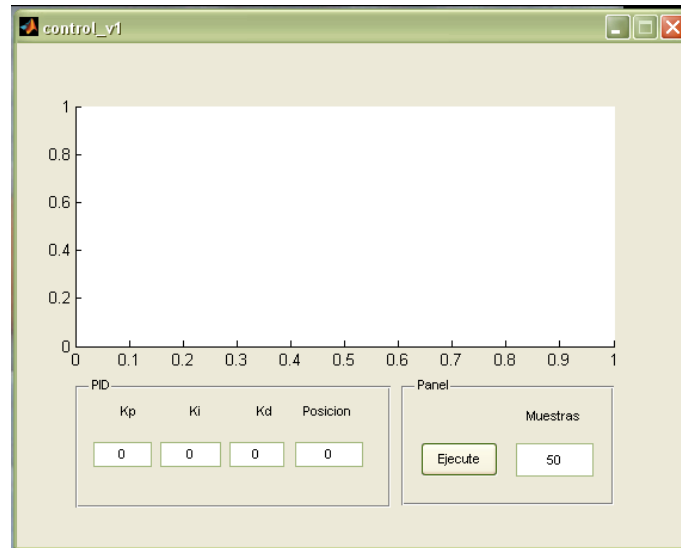
Se debe lograr que el controlador corrija en el mínimo tiempo las perturbaciones del sistema, obteniendo la mínima integral del error. Para esto se debe escoger las constantes ( $K_i, K_p, K_d$ ) correctas de lo contrario el sistema será inestable y no se llegara a la respuesta deseada (Set Point). Si solo se desea dar estabilidad al sistema solo se utiliza la acción proporcional, pero como este produce un error estacionario para eliminarlo se utiliza la acción integral si se desea que la respuesta sea rápida ante errores grandes se utiliza la acción derivativa la cual reduce es error.

- **MATLAB**

MATLAB es un software que permite el desarrollo de cálculos numéricos y simbólicos el cual posee características graficas que facilita el trabajo científico y de ingeniería. Uno de las facilidades que ofrece MATLAB es crear programas de fácil entendimiento para el usuario como Interfaces gráficas en MATLAB usando GUIDE (Graphical User Interfase Development Environment). MATLAB también permite realizar comunicación serial, la cual se utilizo para conectar el computador con el microcontrolador dsPIC30F2010 con la ayuda de un MAX232. Esta comunicación en conjunto con la interfaz grafica permite introducir el valor del Set Point deseado para el control de posición.

- Como utilizar el programa

**Figura 3. Ventana Programa Control**

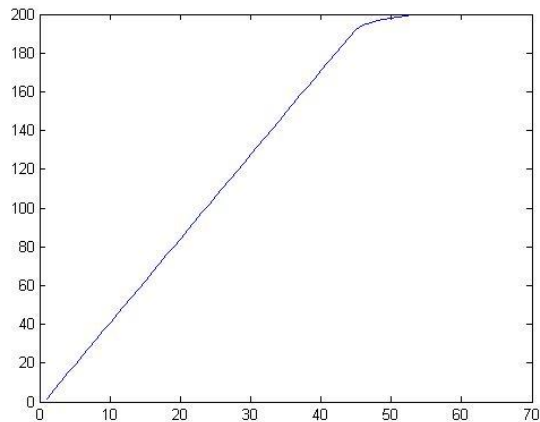


Para la realización de este modulo se realizo una interfaz con MATLAB para introducir el valor de la posición del motor y las constantes del controlador PID ( $K_p, K_i, K_d$ ). El programa realizado se encuentra ubicado en el computador en la carpeta work (disco local (C) -Archivos de programa-MATLAB- Work). Se debe abrir el archivo control v1 y el archivo tomar, se ubica en la ventana de control v1 y dar ejecutar, aparecerá el programa mostrado en la figura 3, el cual se utiliza de la siguiente manera:

1. Se deben definir los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ , de la misma manera el valor de Set Point que es el mismo dato del valor de posición. En el ítem de muestras se identificara la escala de tiempo con la cual se realiza el muestreo de la señal. Si el sistema no genera la señal completa es necesario ampliar el valor de rango de las muestras.
2. Para ejecutar el programa y observar la señal de Control se debe hacer clic en el ítem Ejecute.
3. Para tener un historial de cada una de las señales es necesario dar clic encima de la gráfica después de estar finalizada, ya que el programa tiene la opción de guardar todas las señales realizadas en este.

4. Para guardar la señal dentro de su sistema de información del computador es necesario en la opción archivo guardarla nuevamente, ya que lo único que me permite está es tener una visualización previa.

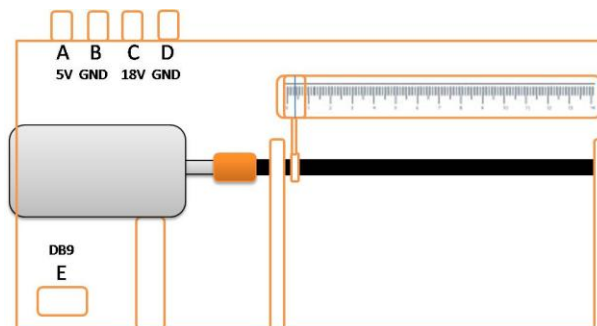
**Figura 4. Ventana Grafica PID**



## PROCEDIMIENTO

- Conectar el cable Null-modem Serie de 3 hilos al modulo de posición (punto E) y a el conector serial del computador.

**Figura 4. Modulo Posición**



- Ajustar la fuente de voltaje 1 a 5V DC, conectar los terminales a los puntos A (-) y B (+), Ajustar la otra fuente de voltaje a 18V DC y conectar los terminales a los puntos C (-) y D (+). Encender las fuentes.



- Ejecutar y ajustar en el programa Control, las constantes PID ( $K_p, K_i, K_d$ ) de 0 a 9, el valor del set point (0 a 100) y el numero de muestras que se desea graficar.
- Variar las constantes para un mismo Set Point y observar el comportamiento del controlador. Guardar las graficas de comportamiento del controlador PID.
- Repetir el paso anterior para otros puntos de desplazamiento. De acuerdo con el comportamiento de las graficas, ¿cuál cree que son las constantes ideales para este controlador PID de posición y porque?

**DATOS OBTENIDOS**

Toma	Setpoint	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

**PREGUNTAS**

- Que es un controlador PID.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---