

# **Sistema de control en modo deslizante para regular la posición y la velocidad de un motor de corriente directa**

**Ernesto Cornieles y Jacobo Ramírez**

Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Control,  
Maracaibo, Edo. Zulia. Venezuela. Apartado 10259, Tele-Fax: +58-261-4128753

cornieles.ernesto@gmail.com, ramirezjcb@hotmail.com

Recibido. 13-09-2013 Aceptado: 14-04-2015

## **Resumen**

En el presente trabajo se aplica la teoría de un Sistema de Control en Modo Deslizante, para regular la posición y velocidad de un motor de corriente directa. El desarrollo matemático que permitirá diseñar el controlador será expresado a través de instrumentos virtuales en el diagrama de bloques del software de LabView®, que permite manipular variables en tiempo real gracias a la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024E de la National Instruments. Todos los datos ingresan y salen del computador de forma analógica vista físicamente como una señal de voltaje. Esta inserción de datos es posible a través de un tacómetro digital que interpreta los pulsos del obturador óptico diseñado como rad/seg para el caso de la velocidad o en radianes para la posición. La salida de datos se adecua a través de un circuito de amplificación y un circuito de potencia que regularán la tensión de excitación. Con la finalidad de obtener una mayor precisión en la posición del eje del motor el controlador aplicará una tensión constante cuyo valor no excede los 2 voltios en los terminales del motor. La velocidad del motor no excederá los 190 rad/seg, es decir, trabajará en un rango de tensión comprendido entre 0 y 10 voltios en terminales, con esto se garantizará el óptimo funcionamiento del circuito de potencia sin alcanzar sus límites de operación. Todos los resultados estarán basados en ensayos realizados a un motor de corriente directa el cual estará sometido a distintos requerimientos de velocidad y posición.

**Palabras clave:** Modo deslizante, controlador, labview®, Motor

## **Sliding mode control to regulate the speed and position of a motor of direct current**

### **Abstract**

In the following paperwork the theory of Sliding Mode Control is applied, to regulate the position and speed of a motor of direct current. The mathematical development that will allow designing the controller will be expressed through virtual instruments in the block diagram of the LabView® software, which allows to manipulate variables in real time thanks to the card of data acquisition DAQ6024E of the National Instruments. All the data is entered and got from the computer in an analogical form seen like a voltage signal. This insertion of data is possible through a digital tachometer that it interprets the pulses of the designed optical stopper as rad/seg for the case of the speed or in radians for the position. The exit of data is adapted through the amplification circuit and a power circuit that regulate the excitation voltage. With the purpose of obtaining a greater precision in the position of the

axis of the motor the controller applied a constant tension whose value does not exceed the 2 volts in the terminals the motor. The engine speed will not exceed 190 rad/seg, so it may work in a rank of tension between 0 and 10 volts in terminals, with this was guaranteed the optimal operation of the circuit of power without reaching his limit of operation. All the results will be based on tests made to a motor of direct current which will be put under different requirements from speed and position.

**Key words:** Sliding Mode, controller, Labview®, Motor

## Introducción

Los sistemas de control automatizados han jugado un papel vital en el avance de la ciencia en general, especialmente en el área de ingeniería. Sus innumerables aplicaciones crecen día a día para facilitar y optimizar los procesos de producción industriales. Los sistemas de Control por Modo Deslizante (CMD) representan una parte fundamental de la teoría de sistemas no lineales propuestos en la antigua Unión Soviética por S.V. Emelyanov del Institute of Control Sciences, e Itkis V.A. Utkin (HUNG 1993, UTKIN 1977-1978, ITKIS 1976). Esta teoría consiste en el empleo de acciones de control conmutadas o discontinuas sobre una o varias superficies de conmutación. La teoría de CMD se ha combinado con la teoría de sistemas inteligentes tales como lógica difusa, redes neuronales, razonamiento probabilístico, algoritmos fanáticos, entre otros. La presente investigación parte de la necesidad de implementar un CMD para regular la posición y velocidad de un motor de corriente directa [1]. Es importante mencionar que este motor de imanes permanentes no esta acoplado a encoders u otros sistemas de frenado, por lo que la precisión en el control de posición resulta un verdadero reto. Para tal fin, se implementará el software LabView®, donde se diseñará una lógica controladora que a través de la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024, creara la interfaz computador -usuario -motor, para regular los parámetros anteriormente mencionados [2].

## Características del sistema

### • Selección del Motor

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó un motor de corriente directa y de imanes permanentes con las características presentadas en la tabla 1.

**Tabla 1. Placa característica del motor de corriente directa.**

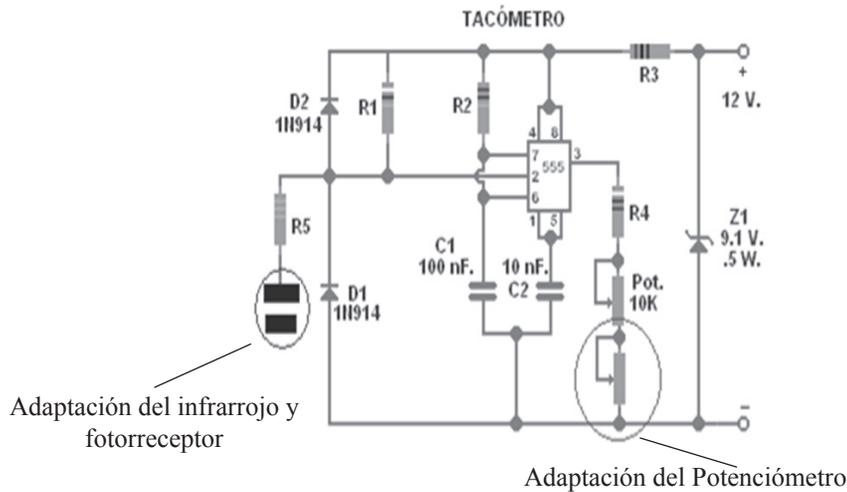
<b>MARCA</b>	Dayton Electric MFG (Imán Permanente)	
<b>MODELO</b>	4Z529	
<b>CLASE</b>	B	
<b>HP</b>	<b>VOLT. ARMADURA</b>	<b>RPM</b>
1/6	12v	1800
1/3	24v	4200
$I_{\text{ARMADURA}}$ DC 16 <sup>a</sup>		
Torque 6.38 lbs.pulg		

### • Construcción del tacómetro.

Para la selección del tacómetro apropiado fue necesario conocer las características de la tarjeta de adquisición DAQ 6023E. Es decir, entradas y salidas, de señales analógicas o digitales, de tensión o corriente que maneja el dispositivo.

Se realizó la adaptación de un tacómetro electrónico diseñado para automóviles, sustituyendo la entrada por dispositivos opto-electrónicos (infrarrojo y fotorreceptor) y la salida analógica del miliamperímetro por un potenciómetro de modo que se obtengan lecturas de tensión. Para ello se implementó el circuito electrónico mostrado en la figura 1.

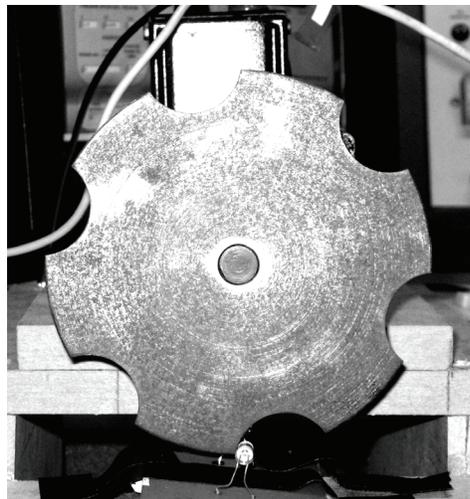
**Figura 1. Diagrama del tacómetro electrónico.**



• *Diseño del obturador óptico.*

Inicialmente se consideró acoplar un disco con una sola perforación por el cual atravesará la señal del infrarrojo y de este modo obtener un pulso por cada revolución que diera el eje motor, esta consideración se realizó tomando en cuenta que en el diseño original del tacómetro realiza la excitación para el disparo del integrado 555 mediante los platinos que se encuentran en el motor de arranque del vehículo. Pero con este primer diseño no se podrán realizar lecturas a altas velocidades (pérdidas de precisión), por lo que se decidió realizar 6 perforaciones de igual tamaño y equidistantes una de otra en el disco como se muestra en la figura 2; con lo que se logrará realizar lecturas a diferentes velocidades sin tener que realizar una nueva modificación del tacómetro.

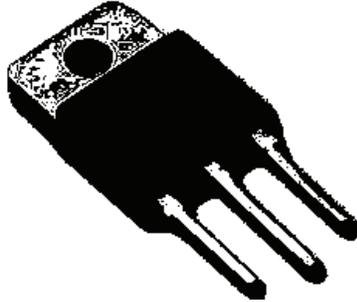
**Figura 2. Obturador óptico hecho de acero con seis perforaciones para realizar el muestreo de pulsos y determinar la posición y velocidad del motor.**



- *Selección de los Transistores.*

Se utilizaron transistores de potencia complementarios de silicio modelo TIP3055, figura 3. Estos transistores soportan una corriente máxima de 15A y una tensión de colector emisor igual a 70V en corriente directa.

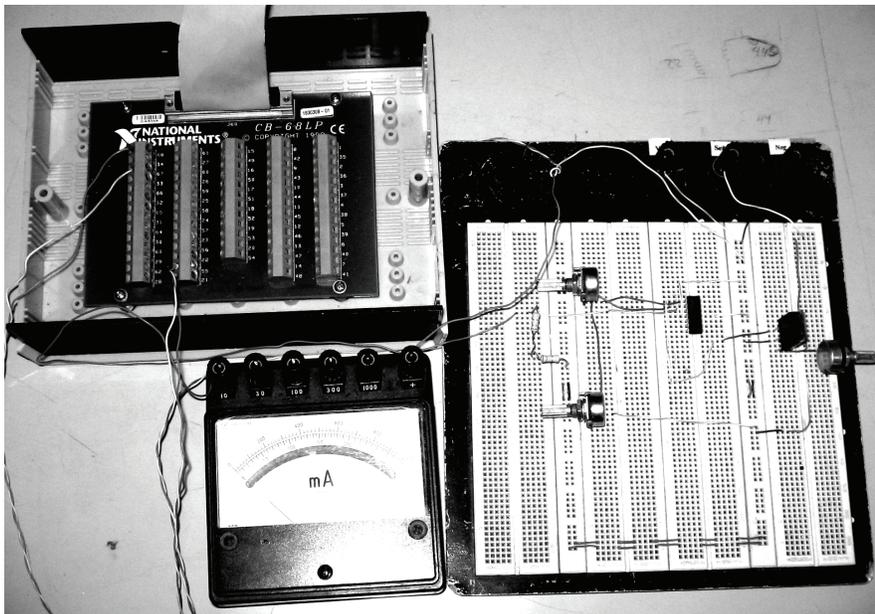
**Figura 3. Transistor de Silicio TIP3055.**



- *Circuito de amplificación.*

Fue necesaria la adaptación de un circuito amplificador, figura 4, a la salida de la tarjeta de adquisición con la finalidad de obtener los niveles de tensión requeridos por los transistores para realizar el disparo de los transistores por sus respectivas bases.

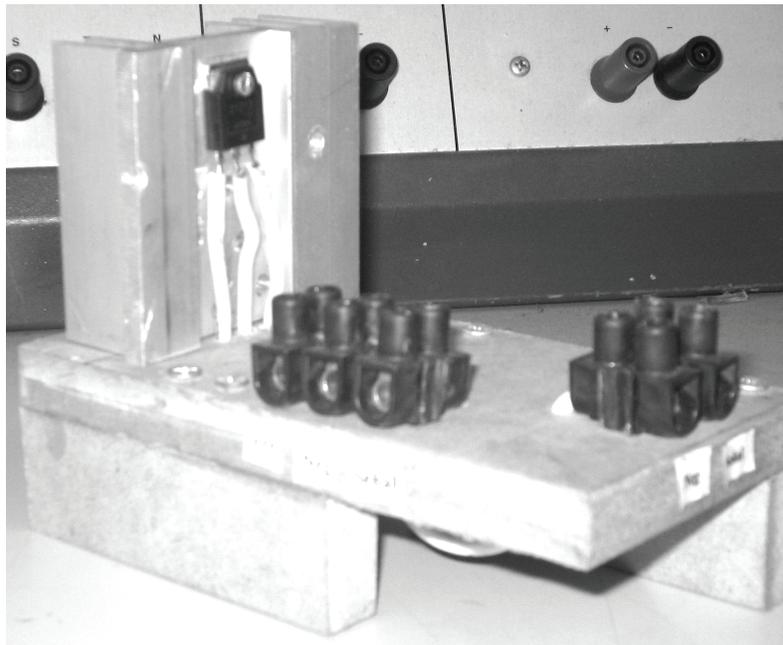
**Figura 4. Circuito amplificador de tensión armado sobre un proto board.  
Relación de amplificación 1:2.**



- *Circuito de potencia.*

El circuito de potencia figura 5, consta de un transistor de potencia BJT de tipo (npn) cuyo disparo por la tensión base proviene de la salida del circuito amplificador, este circuito será el encargado de suministrar la corriente necesaria para el arranque y funcionamiento del motor.

**Figura 5. Circuito de potencia. Construido con un solo transistor de potencia D1213 (TIP3055), con características  $V_n = 30v$  e  $I_n = 16A$ .**



### Estructura del controlador en modo deslizante

El desarrollo matemático que permitirá diseñar el controlador será expresado a través de instrumentos virtuales mediante el software de LabView® [2], que permite manipular variables en tiempo real gracias a la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024E de la National Instruments. En este diseño todos los datos ingresan y salen del computador de forma analógica vista físicamente como una señal de voltaje [1]. Esta inserción de datos es posible a través de un tacómetro digital que interpreta los pulsos del obturador óptico acoplado al eje del motor. La salida de datos se adecúa a través de un circuito amplificación y de potencia que regularán la tensión de excitación. Los resultados estarán basados en ensayos realizados a un motor de corriente directa que estará sometido a distintos requerimientos de velocidad y posición.

Partimos de la siguiente ecuación:

$$LT \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + (L+T) \frac{dX(t)}{dt} + X(t) = KU(t) \quad (1)$$

Esta ecuación describe el comportamiento del proceso y queda expresada directamente en función de la entrada salida del proceso  $X(t)$ , el tiempo muerto  $L$ , la constante de tiempo  $T$ , con respecto a la ganancia enérgica del proceso  $K$  y a la salida del controlador  $U(t)$ .

*El Modelo Matemático del Sistema y determinación de los parámetros del motor viene dada por:*

$$y(t) = \left[ A + Be^{-p_1 t} + Ce^{-p_2 t} \right] 1(t) \quad (2)$$

donde,  $A > 0$ ,  $B < 0$  y  $C = -B$ , con:

$$y_{1(t)} = A + Be^{-p_1 t} \quad y_{2(t)} = Ce^{-p_2 t} \quad (3)$$

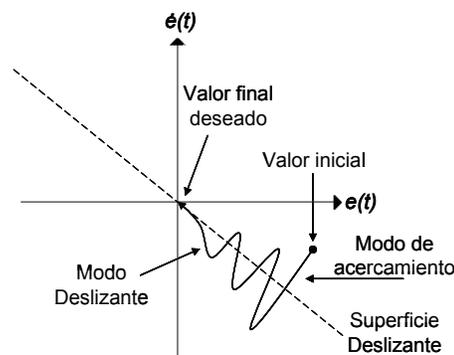
En un CMD[1], la superficie de deslizamiento se expresa mediante la ecuación (4):

$$S_{(t)} = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int_0^t e_{(t)} dt \quad (4)$$

Donde:

$e(t)$  representa el error,  $n$  es el orden del sistema y es un parámetro de ajuste, que define  $S(t)$ . Este término seleccionado para determinar la función del sistema en la superficie deslizante [1,3]. La meta, ver figura 6, es lograr que la variable controlada sea igual al valor de referencia esto se logra haciendo el error  $e(t)$  igual a cero junto con sus derivadas. De esta manera nuestro controlador se hace parte la familia de controladores PID donde se disminuye el error medido entre la señal de referencia a la entrada del proceso y el valor de la variable obtenida a la salida del proceso

**Figura 6. Interpretación gráfica del control en modo deslizante.**



Teniendo en cuenta la ecuación (4), se procede a diseñar la Ley de Control, a partir de la estructura del Sistema Deslizante [1]. La acción de control total;

$$U_{(t)} = U_{c(t)} + U_{d(t)} \quad (5)$$

dependerá de una parte continua  $U_c(t)$  y una parte discontinua  $U_d(t)$ :

$$U_{c(t)} = f[X_{(t)}, R_{(t)}] \quad (6)$$

$$U_{d(t)} = K_d \frac{S_{(t)}}{|S_{(t)}| + \delta} \quad (7)$$

Donde  $R(t)$  es una función que depende de la variable del proceso  $X(t)$  y del valor de referencia, y es responsable de mantener la variable sobre la superficie deslizante, y la parte discontinua  $U_d(t)$ , es la responsable de alcanzar la superficie, generalmente incorpora elementos no lineales [1,3]. Al analizar un Sistema de Control en Modo Deslizante de Primer Orden, considerando el tiempo muerto, obtenemos para  $n = 2$ ,

$$S_{(t)} = \frac{de_{(t)}}{dt} + \lambda_1 e_{(t)} + \lambda_0 \int_0^t e_{(t)} dt \quad (8)$$

donde la salida del controlador o la acción de control se obtiene utilizando la ecuación (1), donde L es el tiempo muerto en segundos y T la constante de tiempo en segundos [1].

$$U_{c(t)} = \left(\frac{LT}{K}\right) \left[ \left(\frac{L+T}{LT} - \lambda_1\right) \frac{dX_{(t)}}{dt} + \frac{X_{(t)}}{LT} + \lambda_0 e_{(t)} \right] \quad (9)$$

donde:

$$\lambda_1 = \frac{L+T}{LT} \quad \lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4}$$

Lo que finalmente nos permite obtener la expresión de la *ley de control*:

$$U_{(t)} = \left(\frac{LT}{K}\right) \left[ \frac{X_{(t)}}{LT} + \lambda_0 e_{(t)} \right] + K_d \frac{S_{(t)}}{|S_{(t)}| + \delta} \quad (10)$$

La parte discontinua del controlador viene dada por la expresión (7) y se determina a partir de valores estimados y utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Kd = \frac{0.51}{|K|} \left[ \frac{T}{L} \right]^{0.76} \quad (11)$$

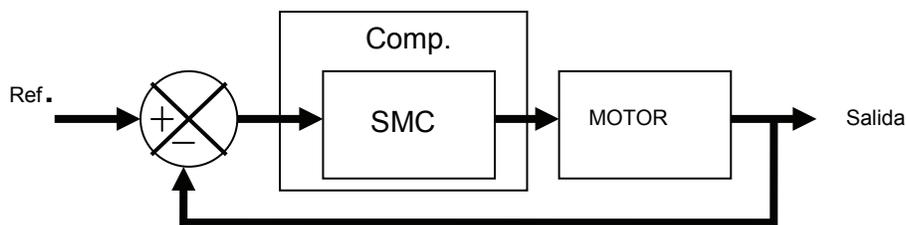
$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_d \lambda_1) \quad (12)$$

El control total en modo deslizante viene dado por la expresión (5).

• *Diagrama de bloques utilizando el Sistema de Control en Modo Deslizante*

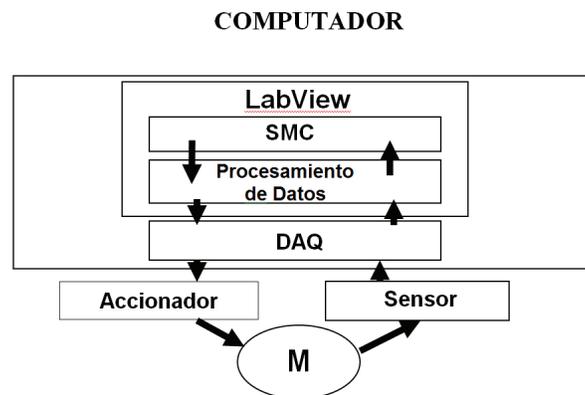
En la figura 7, se muestra el diagrama del sistema de control en modo deslizante

**Figura 7. Diagrama de bloques implementando CMD para el control del motor.**



En la figura 8 se muestra el sistema completo y la adquisición de datos utilizando unas tarjetas de adquisición de datos de tipo Labview®, un computador y un motor de corriente continua.

Figura 8. Arquitectura del Computador implementando CMD en el programa LabView.

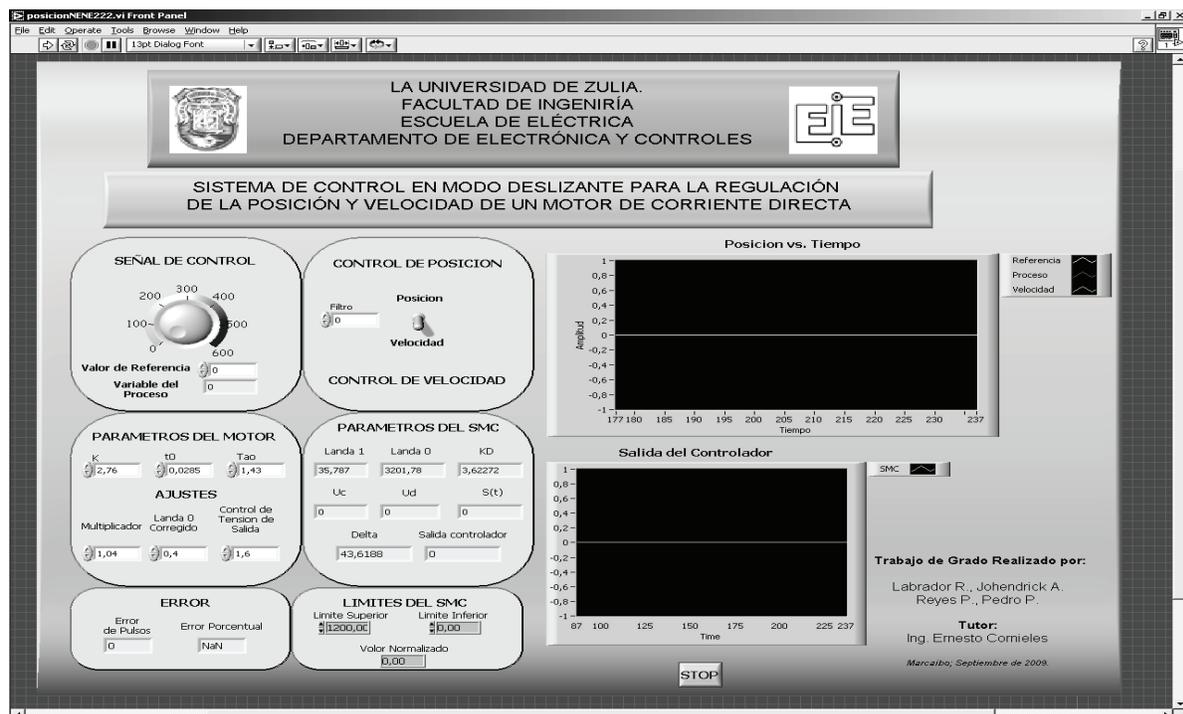


## Descripción del software diseñado

- Pantalla de trabajo del programa.

Esta será la pantalla como se muestra en la figura 9, en el cual el usuario podrá acceder al programa. El panel de trabajo cuenta con una serie de controles para introducir los parámetros del motor, factor multiplicador (interpretar los pulsos como radianes), corrección del factor  $\lambda_0$  y tensión de salida en la tarjeta de adquisición. Del mismo modo, se muestran unos indicadores donde se puede observar el cálculo de los diferentes factores que conforman la ley de control en modo deslizante; tales como:  $U_{c(t)}$  (parte continua del controlador),  $U_{d(t)}$  (parte discontinua del controlador),  $S_{(t)}$  (superficie deslizante),  $K_D$  y  $\delta$  que expresan la ley de control en forma porcentual (0 a 100) y la salida del controlador [4,5].

Figura 9. Pantalla de trabajo del programa elaborada en LabView.



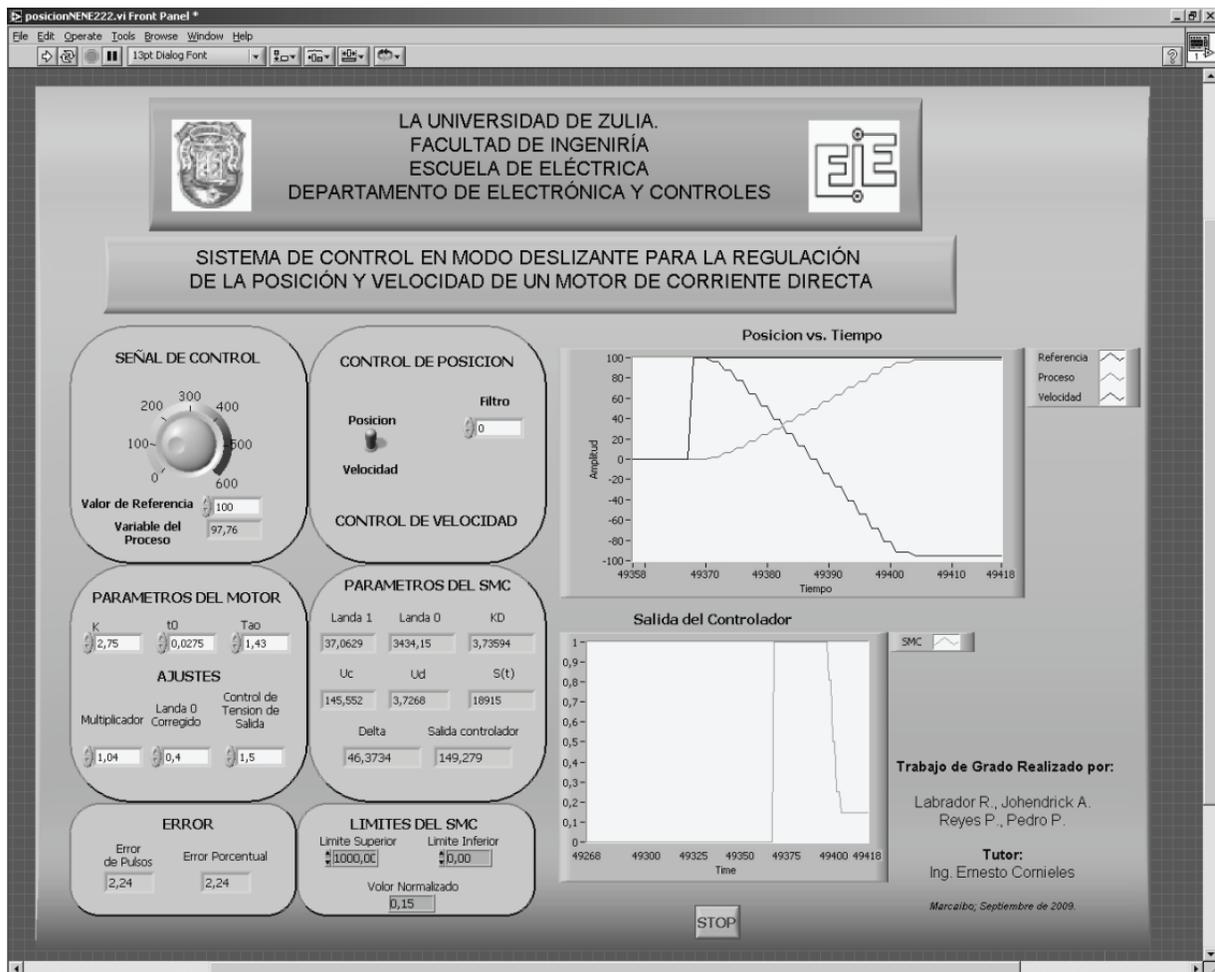
## Resultados experimentales

- *Control de posición utilizando LabView®*

La posición en este sistema es medida en radianes para cual se interpretan los pulsos enviados por cada giro que realiza el eje del motor como radianes, cabe destacar que estas perforaciones hechas al obturador óptico están igualmente espaciadas ente sí.

Este ensayo consiste en observar el comportamiento del sistema al exigirle que se posicione a 100 radianes desde el reposo (0 radianes), mostrando en el panel de la figura 10, la experiencia realizada.

**Figura 10. Ensayo de posición desde 0 a 100 radianes.**



En la gráfica de Posición vs. Tiempo, se muestra el comportamiento del motor ante una señal de tipo escalón de amplitud 100 (Línea color Blanca). Partiendo del reposo el eje del motor adquiere un giro constante con lo cual se comienza a realizar el conteo de los pulsos, este comportamiento se expresa con la línea roja. Se observa que los pulsos disminuyen a medida que llega a la señal de referencia. Del mismo modo, se observa el comportamiento de la velocidad (Línea color Verde), el cual permanece constante y disminuye a medida que se acerca al valor de referencia (tiende a cero). Por otro lado, la gráfica de la Salida del Controlador anterior muestra la salida del control en modo deslizante, apreciando una señal similar a una onda cuadrada; esta analogía se debe al hecho de presentar un primer flanco positivo en el cual su valor cambia de 0 a 1 casi instantáneamente, luego alcanza el valor pico el cual se

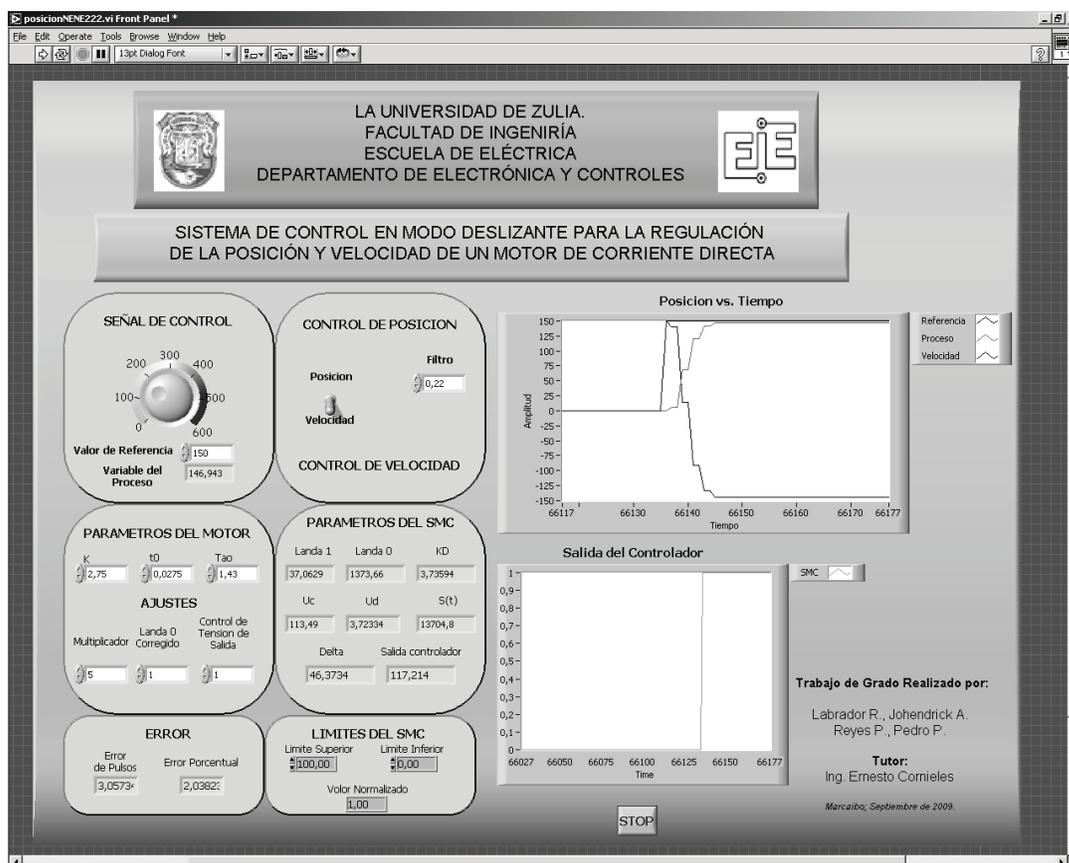
mantiene mientras se acumulan los pulsos necesarios para que la señal del proceso esté muy próxima a la señal de referencia y por último se aprecia un flanco negativo con una pequeña desviación debida a la acción de frenado aplicada por el motor (disminución de la velocidad), hasta que la señal de referencia y la del proceso se igualan.

- *Control de velocidad utilizando LabView®*

La velocidad en este sistema es medida en radianes por segundo para cual se interpretan los pulsos enviados por cada giro que realiza el eje del motor como radianes por una unidad de tiempo definida.

Este ensayo consiste en observar en la figura 11, el comportamiento del sistema al exigirle que alcance una velocidad de 150 rad/seg desde el reposo (0 rad/seg).

**Figura 11. Ensayo de velocidad desde 0 a 150 radianes.**



En la gráfica de Posición vs. Tiempo se muestra el comportamiento del motor ante una señal de tipo escalón de amplitud 150 rad/seg. (Línea Negra). Se observa que el motor alcanza la velocidad deseada casi de forma instantánea. Luego de alcanzado el valor deseado la tensión de alimentación del motor permanece constante. La línea azul de la gráfica representa la variación de la señal del proceso que se estabiliza simultáneamente con la velocidad. La velocidad del proceso presenta un comportamiento estable debido a la entonación del filtro sin embargo, se observa una pequeña distorsión para ciertos períodos de tiempo, esta distorsión de la onda se interpreta como variación de la señal de salida del controlador (Picos negativos en la señal de salida del controlador), como se muestra en la gráfica de la Salida del Controlador.

## Conclusiones

El procedimiento utilizado para conocer las características y respuestas del proceso de un motor de corriente directa ante diferentes entradas permitió establecer de forma muy precisa el modelo matemático del sistema, con esto se logró determinar sus parámetros (ganancia propia del motor, tiempo muerto y tiempo de respuesta), de manera que se pudiera aplicar la ley de control deseada. Todas las entradas aplicadas consistieron en señales de tensión tipo escalón de diferentes amplitudes.

Se determinó una secuencia lógica de pasos que permitió desarrollar un diagrama de bloques que permita al usuario implementar este sistema en investigaciones posteriores, cada diagrama que se desarrolló esta dirigido a una función específica (reconocer el proceso como un sistema a lazo cerrado, conocer la lógica en la adquisición y envíos de señales con el software LabView® y mostrar cada etapa que componen el sistema a lazo cerrado). La representación del control en modo deslizante partió de la determinación de los parámetros del motor de corriente directa, seguidamente de la implementación de la señal de control considerando la parte continua y discontinua de dicha señal, del mismo modo se determinó la superficie deslizante para la variación del error (diferencia entre la señal de referencia y la variable de salida del proceso). Para construir la ecuación de control se implementó una serie de instrumentos virtuales del software LabView® los cuales permitieron interpretar las señales de entradas, procesarlas y expresarlas de modo que se pudieran representar las fórmulas matemáticas aplicadas al control en modo deslizante.

El diseño de una interfaz usuario-máquina se basó en el desarrollo de circuitos electrónicos de amplificación, potencia y adquisición (amplificador de tensión, transistores de BJT de potencia y tacómetro, respectivamente), bajo los cuales todas las señales puedan ser interpretadas de forma efectiva por el computador sin ocasionar daños a los equipos. Debido a las variaciones de tensión y giro que presentó el motor durante las pruebas se determinó que la entrada y salida de datos óptima para el sistema consistiría en señales analógicas, las cuales serán convertidas en señales digitales por el computador. Se desarrolló un panel de trabajo con un lenguaje de alto nivel, con la finalidad de hacerlo amigable y fácil de manipular por el usuario. En los ensayos realizados para el control de posición se pudo observar un comportamiento sobreamortiguado en la señal del proceso. Del mismo modo, se observó que la amplitud de la señal de referencia es directamente proporcional al tiempo de respuesta del controlador; y la señal de salida del controlador presentó una forma similar a una onda cuadrada; donde el pico de la onda coincide con el tiempo de operación del motor. En la regulación de velocidad, la forma de onda de la señal del proceso presentó un comportamiento sobreamortiguado con un tiempo de respuesta mucho menor (casi instantáneo), en comparación con los ensayos de variación de posición. Esto se debe principalmente a que el rango de operación de la tensión de excitación fue ajustado entre 0 y 10 voltios, mientras que para el control de posición esta tensión era constante menor a 2 voltios. La señal de salida del controlador, presentó en este caso, una forma de onda similar a un escalón, es decir, parte desde cero y cambia de valor de forma instantánea y este valor se mantiene durante la simulación lo que representa que la tensión en terminales es invariante.

## Referencias bibliográficas

1. Oscar Camacho y Rubén Rojas, *A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes*. Transactions of the ASME, Vol. 122, Dic 2000
2. National Instruments® (2000). *daq 6023/6024e/6025e user manual*. <http://www.ni.com> (marzo 2008)
3. Carlos Saavedra, *Desarrollo De Un Algoritmo Para Simulación De Un Controlador En Modo Deslizante Para Procesos Lineales Y No Lineales De Primer Y Segundo Orden De Una Variable*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia. Maracaibo, junio 2005

4. John Dorsey, *Sistemas de Control Continuos y Discretos, Modelado, Identificación, Diseño e Implementación*. Mc. Graw Hill. Atlanta, Georgia, sept 2004
5. Kaya Ibrahim, *Sliding Mode Control Of Stable Chemical Processes*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Diyarbakur, Turquía, mars 2005