

**CONTROL CON MODOS DESLIZANTES DISCRETO APLICADO A UN  
CONVERTIDOR DE POTENCIA BUCK****DISCRETE SLIDING MODE CONTROL APPLIED TO A BUCK POWER  
CONVERTER****MSc. Oscar Ivan Higuera Martínez, PhD. Juan Mauricio Salamanca****Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia**

Grupo de Investigación en Procesamiento de Señales DSP-UPTC.

Escuela de Ingeniería Electrónica. Cale 4 Sur # 15-134, Sogamoso, Boyaca, Colombia.

Tel.: 57-8-7705450, Ext. 241

E-mail: {oscar.higuera, juan.salamanca}@uptc.edu.co, ohiguera@gmail.com

**Abstract:** This paper presents the design of a controller with discrete sliding mode controls applied to a Buck power converter; the converter model in space states and the robust control law design are presented. The controller is proved in a converter model with real parameters simulated in Matlab/Simulink and the results obtained are showed considering different model parameters disturbances and changes, The analysis of results are presented

**Keywords:** Discrete, sliding mode, robust, power converter, variable structure.

**Resumen:** Este artículo presenta el diseño de un controlador basado en modos deslizantes discreto aplicado a un convertidor de potencia Buck, se presenta el modelo del convertidor en espacio de estados y el diseño de la ley de control robusta. El controlador se prueba en un modelo del convertidor con parámetros reales simulado en Matlab/Simulink y se muestran las gráficas de los resultados obtenidos frente a diferentes perturbaciones y cambios en los parámetros del modelo, realizando un análisis de los resultados reportados.

**Palabras clave:** Discreto, modo deslizante, robusto, convertidor de potencia, estructura variable.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores DC-DC se usan ampliamente en la industria, un buen convertidor debe satisfacer requerimientos económicos, de rendimiento estático y dinámico, es así que los avances en el estudio de diversos métodos de control de estos dispositivos le han hecho una herramienta muy utilizada en la teoría de control.

Los sistemas de estructura variable son aquellos en los que su topología cambia en el tiempo de forma intencionada y consecuentemente la acción de

control es discontinua y la planta es no lineal. La característica distintiva de los controladores de estructura variable es su habilidad de resultar en un sistema de control robusto y bajo algunas condiciones resulta un control invariante (Emelyanov: 1995).

La principal característica que distingue a los sistemas de control de modo deslizante es su insensibilidad a la incertidumbre de parámetros y perturbaciones externas. Sin embargo el esquema de control de modo deslizante es especialmente satisfactorio para el control en lazo cerrado en

sistemas de convertidor de potencia con baja variación en la carga.

Debido al uso de los computadores para control, el concepto de diseño de controladores con modos deslizantes digitales o discretos (DSM) ha sido un tema de investigaciones durante los últimos años. Algunos algoritmos basados en control conmutado para sistemas discretos pueden ser encontrados en la literatura (Sarpurk: 1987) – (Liu: 1992). En el caso de diseño de DSM, la entrada de control es aplicada solo en ciertos instantes de muestreo y el esfuerzo de control es constante sobre el intervalo de muestreo. Es más, cuando los estados alcanzan la superficie de conmutación, el subsecuente control debe hacer que los estados permanezcan dentro de la superficie, como resultado, el DSM puede solo ocurrir como el modo cuasi deslizante (QSM).

Este documento presenta el desarrollo de una estrategia de control basada en modos deslizantes discreto aplicada a un convertidor Buck, el diseño de la ley de control está basado en el modelo discreto del sistema, la ley de control se diseña en base a la aproximación de ley de alcance continua, la cual cumple los requerimientos de estabilidad de Lyapunov. La simulación del sistema controlado se realiza con el modelo continuo del sistema, la estrategia de control se implementa de forma discreta utilizando retenedor de orden cero, el sistema empleando para simulación se puede observar en la Figura 1.

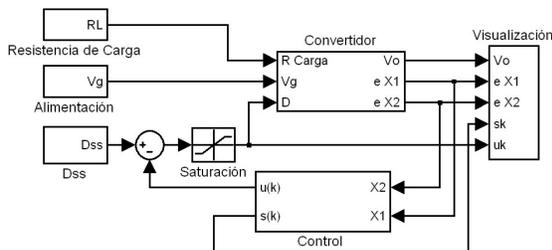


Fig. 1: Sistema empleado para simulación

## 2. MODELO DEL CONVERTIDOR

En la figura 2 se puede observar la estructura típica de un convertidor Buck. Los convertidores de potencia presentan diferentes tipos de modelado, pero en forma general pueden ser descritos según la expresión (1), en donde el vector de estado  $X$  está formado por la corriente en la bobina y la tensión en el condensador, ya sea que se esté trabajando el modo de conducción continua o en modo de conducción discontinua (Fang: 1997).

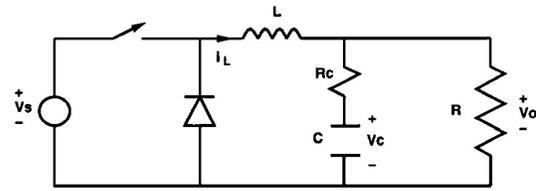


Fig. 2: Convertidor DC/DC Buck

$$S_1 = \begin{cases} \dot{X} = A_{ON} X + B_{ON} U \\ V_0 = C_{ON} X \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} \dot{X} = A_{OFF} X + B_{OFF} U \\ V_0 = C_{OFF} X \end{cases} \quad (1)$$

$$S_3 = \begin{cases} \dot{X} = A_{DCM} X + B_{DCM} U \\ V_0 = C_{DCM} X \end{cases}$$

Las matrices del sistema  $A_{ON}$ ,  $B_{ON}$  y  $C_{ON}$  son obtenidas cuando el elemento conmutador está en ON;  $A_{OFF}$ ,  $B_{OFF}$  y  $C_{OFF}$  cuando está en OFF; y  $A_{DCM}$ ,  $B_{DCM}$  y  $C_{DCM}$  cuando la corriente en la bobina es cero, es decir el modo de conducción discontinua.

En este artículo sólo se trabajara el modo de conducción continua. Entonces se considerarán los dos posibles estados del sistema presente en la figura 2 para realizar el modelado y control sobre el convertidor Buck,

### 2.1 Modelo General del Convertidor

Un sistema convertidor está descrito por las ecuaciones de estado y los estados de conmutación, el cual es un modelo discontinuo.

En (Higuera, 2009T) se encuentra el modelo simplificado, para este convertidor se puede determinar que  $A_{ON} = A_{OFF} = A$ ,  $B_{ON} = B$  y  $B_{OFF} = 0$ , con lo cual se obtiene:

$$x(k+1) = (I + T_p A)x(k) + T_p B U_{ss} d(k) + T_p B D_{ss} u(k) \quad (2)$$

El cual es un sistema lineal con polos fijos en el plano  $Z$ , su función con respecto a la entrada  $u(k)$  es una función lineal de  $D_{ss}$ , y con respecto a la entrada de ciclo útil es función lineal de  $U_{ss}$ . Teniendo ya la generalización, las matrices del sistema para el convertidor Buck presente en la Figura 2 son:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Rr_c + Rr_L + r_c r_L}{L(R+r_c)} & -\frac{R}{L(R+r_c)} \\ \frac{R}{C(R+r_c)} & -\frac{1}{C(R+r_c)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_{ON} = \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_{OFF} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$v_o = \begin{bmatrix} \frac{Rr_c}{R+r_c} & \frac{R}{R+r_c} \end{bmatrix} x \quad (5)$$

### 3. LEY DE CONTROL

Para realizar el diseño del controlador, primero se debe establecer la condición de alcance discreto, entre algunos trabajos donde se proponen diferentes condiciones de alcance están [2 - 3], [11-14]. Antes de realizar el diseño del controlador, primero se dan algunos atributos del control de estructura variable (VSC) discreto, así como otras definiciones importantes [4, 15].

#### 3.1 Atributos de VSC discreto

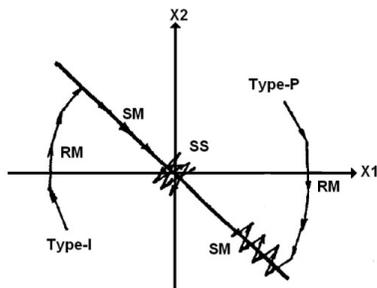


Fig. 3. Trayectorias de un sistema de control de estructura variable discreto.

Algunos atributos que es considerable conocer al momento de trabajar con sistemas discretos para que la trayectoria deseada de estados de un VSC discreto se dé son: (Figura 3)

A1 Partiendo de un estado inicial, la trayectoria se moverá monótonamente hacia el plano de conmutación y cruzará este en un tiempo finito.

A2 Una vez la trayectoria ha cruzado el plano de conmutación la primera vez, esta deberá atravesar el plano otra vez en todos los sucesivos periodos de muestreo, resultando en un movimiento de zigzag sobre el plano.

A3 El tamaño de cada sucesivo zigzag no incrementará y la trayectoria permanecerá dentro de una banda específica.

#### 3.2 Definiciones

D1 El movimiento de un sistema VSC discreto que satisface los atributos A2 y A3 es llamado un modo cuasi deslizante (QSM). La banda específica que contiene el QSM es llamada la Banda del modo cuasi deslizante (QSMB) y está definida por:

$$\{X \mid -\Delta < s(x) < +\Delta\} \quad (6)$$

Donde  $2\Delta$  es el ancho de la banda.

D2 El QSM se torna en un modo ideal cuasi deslizante (IQSM) cuando  $\Delta = 0$ .

D3 Un VSC discreto se dice que satisface una condición de alcance si el sistema resultante posee todos los 3 atributos.

#### 3.3 Ley de Alcance

El procedimiento para diseñar el sistema de control es sintetizar la ley de control de la ley de alcance en conjunto con un modelo conocido de la planta. En (Hung: 1993) se plantea una Ley de alcance conveniente para un VSC de un sistema continuo:

$$\dot{s}(t) = -e \operatorname{sgn}(s(t)) - qs(t), \quad e > 0, \quad q > 0 \quad (7)$$

Para el VSC de un sistema discreto, una forma equivalente de esta ley de alcance es:

$$\frac{s(k+1) - s(k)}{T_p} = -e \operatorname{sgn}(s(k)) - qs(k) \quad (8)$$

La cual cumple la aproximación discreta de Lyapunov (24) – (25).

$$v(k+1) - v(k) < 0 \quad (9)$$

$$v(k) = \frac{1}{2} [s(k)]^2 > 0 \quad (10)$$

Si y sólo si:

$$e > 0, \quad q > 0, \quad 1 - qT_p > 0 \quad (11)$$

La inecuación para  $T_p$  garantiza el atributo A1, lo cual implica que la selección de  $T_p$  está restringida a  $T_p < 1/q$ . La presencia del término  $\operatorname{sgn}$  en (7) garantiza los atributos A2 y A3.

### 3.4 Ley de Control Discreta

Considerando un plano de conmutación lineal

$$s(x) = C^T X \quad (12)$$

El modo cuasi deslizante satisface que:

$$s(k+1) = s(k) = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

La ley de alcance (7) siempre satisface la condición de alcance, el sistema VSC discreto diseñado usando esta ley de alcance es siempre estable (Gao:1993). La ley de control para el VSC discreto se deriva en la ley de alcance seleccionada. Definiendo el sistema (14) y con el cambio incremental de  $s(k)$ , se obtiene (15).

$$x(k+1) = Apx(k) + Bpu(k) + \Delta Ax(k) + f(k) \quad (14)$$

Con

$$\Delta A = Bp\tilde{A} \quad \Rightarrow \quad \tilde{A} \text{ Vector Fila}$$

$$f(k) = Bp\tilde{F} \quad \Rightarrow \quad \tilde{F} \text{ Constante}$$

$$s(k+1) - s(k) = C^T Apx(k) + C^T Bpu(k) + C^T \Delta Ax(k) + C^T f(k) - C^T x(k) \quad (15)$$

Comparando está en la ley de alcance (7) y resolviendo para  $u(k)$  se obtiene la ley de Control.

$$u(k) = -(C^T Bp)^{-1} [C^T Apx(k) - C^T x(k) + eTp \operatorname{sgn}(s(k)) - qTps(k)] + Sc + Fc \quad (16)$$

Donde  $Sc$  y  $Fc$  son determinados como en (Hung: 1993), y están basados en las incertidumbres y perturbaciones  $\tilde{A}, \tilde{F}$ , obteniendo:

$$\begin{aligned} Sc &= S_0 + d_s \operatorname{sgn}(s) \\ Fc &= F_0 + d_f \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (17)$$

Asumiendo que el sistema es balanceado con respecto a la incertidumbre y perturbación, por consiguiente las variaciones se realiza sobre el modelo nominal, entonces  $S_0 = 0, F_0 = 0$ , por lo cual la ley de control está dada por:

$$u(k) = -(C^T Bp)^{-1} [C^T Apx(k) - C^T x(k) + eTp \operatorname{sgn}(s(k)) - qTps(k)] + (d_s + d_f) \operatorname{sgn}(s) \quad (18)$$

Sustituyendo (18) en (14), y sin tener en cuenta el efecto de las perturbaciones e incertidumbres, se encuentra la respuesta del sistema VSC discreto como:

$$x(k+1) = Apx(k) - Bp(C^T Bp)^{-1} [C^T Apx(k) - C^T x(k) + eTp \operatorname{sgn}(s(k)) - qTps(k)] \quad (19)$$

La definición del QSMB está determinada por (6). Es decir se determina la banda en la cual permanecen los estados después de haber entrado allí. Reordenando la ley de alcance (7) se obtiene:

$$s(k+1) = -eTp \operatorname{sgn}(s(k)) + (1 - qTp)s(k) \quad (20)$$

El signo del segundo término del lado derecho es el mismo que el signo de  $s(k)$ , y el signo del primer termino del lado derecho es opuesto al de  $s(k)$ . Por las definiciones mencionadas anteriormente, el signo de  $s(k+1)$  debe ser opuesto al de  $s(k)$ . La región en el espacio de estados donde satisfacen esta condición, constituye la QSMB, entonces el ancho de banda esta dado por (Gao:1995):

$$2\Delta = 2 \frac{eTp}{1 - qTp} \quad (21)$$

De (21) se observa que el ancho de banda decrece cuando disminuye el periodo de muestreo, lo cual es claro. De manera natural la implementación de un control digital por modos deslizantes conlleva la aparición de chattering, la idea adicional es seleccionar la matriz  $C^T$  de forma que este chattering sea mínimo.

## 4. EJEMPLO SIMULADO Y RESULTADOS

Para ilustrar el desempeño de esta estrategia se simula en Matlab/Simulink un convertidor de potencia DC/DC tipo Buck, modelado anteriormente con los siguientes parámetros:  $R=100 \text{ O}, r_c=1.18 \text{ O}, r_l=0.7 \text{ O}, L=400\text{mH}, C=10\mu\text{F}, V_g=10 \text{ V}, f_s=60\text{KHz}$

$$\begin{aligned}
 A_p &= I + ATp \\
 B_p &= Tp + BUss \\
 u(k) &= 0 \\
 d(k) &\rightarrow \text{Es la entrada de control}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

La ley de control aplicada es la ley obtenida en (18), las matrices del convertidor Buck empleado están en (3)-(5).

Para la selección de los parámetros de  $C^T = [C_1 \ C_2]$ , se realiza de forma que el sistema nominal con control equivalente sea estable. Obteniendo finalmente que el sistema es estable si satisface la siguiente condición:

$$\frac{K_1 C_2}{K_2} > C_1 > \frac{K_3 C_2}{K_4}; \text{ con } A_p = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{bmatrix}
 \tag{23}$$

#### 4.1 Simulación del Sistema Controlado

En esta sección se mostraran los resultados de la simulación teniendo en cuenta que  $Tp=Ts$ ,  $D=0.7$ ,  $C^T=[57 \ 57]$ ,  $eTp=0.5$  y  $qTp=0.5$ , estos valores son seleccionados para obtener un rizado mínimo en la variable de salida, obteniendo que el ancho de banda debe ser  $QSMB = 2$ , los resultados de las simulaciones se ilustran en las figuras 4 y 5, la simulación se realiza con un rizado de la fuente de alimentación de 5% y a partir de 100 msec de 10%.

En las figuras 4 y 5 se observa el correcto funcionamiento del sistema de potencia, los estados del sistema mantienen un error inferior a 0.001, el zigzag en el voltaje de salida es inferior a 0.001 y  $s(k)$  permanece con el zigzag tal que el  $QSMB = 0.04$ .

#### 4.2 Simulación del sistema frente a perturbaciones e incertidumbre

Para esta sección se realiza el cambio de la resistencia de carga (R), los cambios se realizaron disminuyendo el valor nominal de 1000 hasta 200, en esta simulación el rizado de la fuente permanece igual a la simulación anterior. Los resultados de las simulaciones se ilustran en las figuras 6 a 8, donde se observa el comportamiento del sistema.

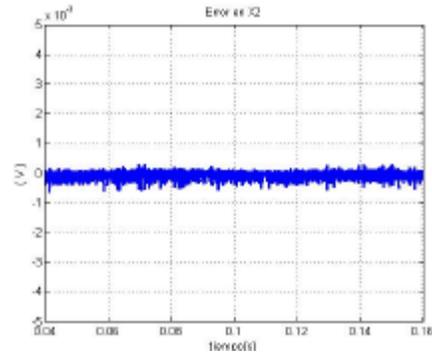


Fig. 4: Error en el estado  $X_2$

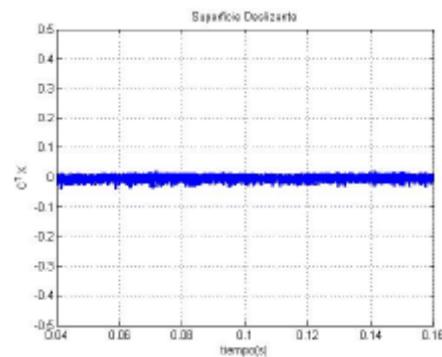


Fig. 5: Superficie deslizante  $s(x)$

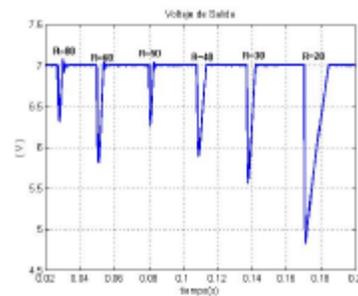


Fig. 6: Voltaje de Salida, Variación de Resistencia de Carga RL.

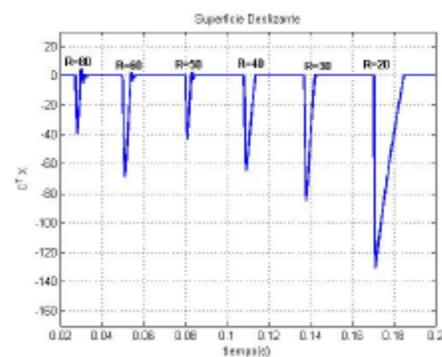


Fig. 7: Superficie  $S(k)$ , Variación RL.

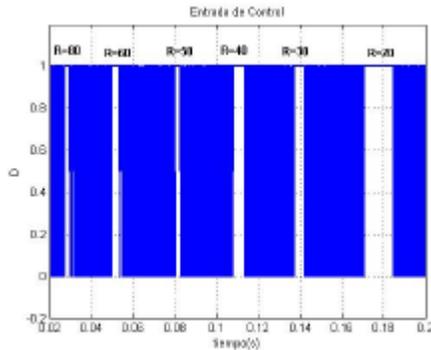


Fig. 8: Señal de Control, Variación RL.

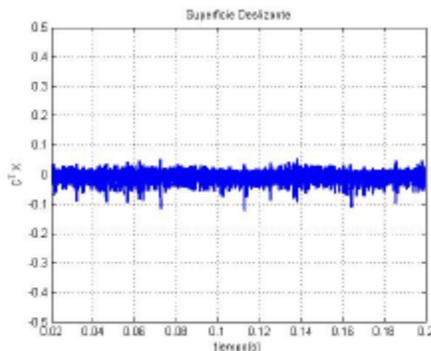


Fig. 9: Superficie  $S(k)$ , Incertidumbre en parámetros.

Ahora se realiza la simulación cuando se presenta cambios en los parámetros:  $L$  y  $C$  disminuyen en un 20 %,  $r_c$  aumenta en un 5 %, y  $r_L$  aumenta en un 10%, igual que en los casos anteriores el rizado de la fuente de alimentación se mantiene, la superficie se puede apreciar en la figura 9.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una estrategia de control basada en modos deslizantes discreto para el control de convertidores de potencia DC-DC, determinando el ancho de banda del modo cuasi deslizante. Así como se realiza la determinación del controlador en un ejercicio para un convertidor Buck, mostrando un gran desempeño frente a perturbación y cambios en la fuente de alimentación.

El controlador responde adecuadamente a perturbaciones acotadas de salida amortiguándola rápidamente. En el sistema se logra ver que es estable si se escogen adecuadamente los valores de  $q$ ,  $T_p$ ,  $e$  y  $C^T$ , en los resultados se observa que el rizado de la fuente es perfectamente contrarrestado, al igual que el cambio en la resistencia de carga, así como la variación de parámetros del sistema y la

superficie siempre permanece en el interior del ancho de banda dado por [21].

## REFERENCIAS

- Emelyanov, S.V. Korovin, S.K. Mamedov, I.G. (1995). *Variable Structure Control Systems, Discrete and Digital*. MIR Publishers, Moscow. CRC Press.
- Sarpturk, S. Z. Istefanopulos, Y. y Kaynak, O. (1987) *On the stability of discrete-time sliding mode control systems*, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-32, no. 10, pp. 930-932.
- Furuta, K.(1990) *Sliding mode control of a discrete system*, Syst. Contr. Lett., vol. 14, pp. 145-152.
- Gao, W. Wang, Y. Homaifa, A. (1995) *Discrete Time Variable Structure Control systems*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol 42, No 2.
- Utkin, V. Guldner, J. Shi, J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Taylor y Francis.
- Higuera, O.I. Salamanca, J.M. y Díaz, H. (2008) *Discrete time variable structure control for switching converters*. Proceedings IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition - Latinamerica.
- Higuera, O.I. Salamanca, J.M. y Díaz, H. (2008) *Control de Estructura variable Discreto basado en estabilidad de Lyapunov*. XIII Congreso Latinoamericano de control automático.
- Higuera, O.I. Salamanca, J.M. y Díaz, H. (2009) *Modos Deslizantes Discretos Aplicado a Sistemas de Estructura Variable*. VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática.
- Higuera, O.I. (2009) *Desarrollo de una Estrategia de Control de Estructura Variable Discreta para Convertidores de Potencia Modelados como Plantas de Tiempo Discreto*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Liu, X.Q. Ge, W.Q. y Chui, Y.T. (1992) *Variable structure predictor controller with quasi sliding mode for systems with delay*. IEEE Proc. Symposium on Industrial Electronics, pp 211-214.
- Fang, C-C. (1997) *Sampled-Data Analysis and Control of DC-DC Switching Converters*. Tesis Doctoral, Institute For Systems Research, Harvard University.
- Hulielhel, F. Yaakov, S.B. (1991) *Low-frequency sampled data models of switched mode DC-DC converters*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 6, No 1.

- Martinelli, R.M. (1984) *A state variable modeling technique for personal computer simulation of converter dynamic properties*, in Proc Powercon, vol 11, H3, pp 1-9.
- Vergheese, G.C. Elbuluk, M.E. Kassakian, J.G. (1989) *Averaged and sampled -data models for current mode: A reexamination*, in PESC Rec. pp 484- 491.
- Hung, J.Y. Gao, W. Hung, J.C. (1993) *Variable Structure Control: A Survey*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1.
- Dote, Y. Hoft, R.G.(1980) *Microprocessor based sliding mode controller for DC motor drives*, presentado en Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting. Cicinnati, OH.
- Milosavljevic, D. (1985). *General conditions for the existence of a quasi-sliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems*, Automat. Remote Contr., vol. 46, pp. 307-314.
- Bartoszewics, A. (1998) *Discrete Time Quasi Sliding Mode Control strategies.*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol 45, No 4.
- Gao, W y Hung, J.C. (1993) *Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1.