

Control de un motor de inducción utilizando algoritmo predictivo

Por: Elkin Alonso Loaiza López . Juan Diego Nieto Sierra

Autores

ELKIN LOAIZA LÓPEZ

Estudiante de décimo semestre de Ingeniería en Instrumentación y Control - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Integrante del Semillero de Investigación en Gases, Técnico Soldador – Sena. elkinloaiza@lycos.es

JUAN DIEGO NIETO SIERRA

Estudiante de décimo semestre de Ingeniería en Instrumentación y Control - Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Integrante del Semillero de Investigación en Gases. Estudiante de Traducción Inglés - Francés - Español - Universidad de Antioquia. Correo electrónico: juandnieto@gmail.com

Resumen

En este estudio se diseña un algoritmo de control predictivo basado en modelos para regular la velocidad de un motor de inducción. Se obtiene el modelo matemático del motor y se implementa la ley de control por medio de un variador de velocidad, el cual se constituye como el elemento final de control; se realizan las simulaciones necesarias y finalmente se prueba el diseño en el sistema real. Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos como la interfaz entre el variador y el computador y viceversa. En el computador se hace todo el desarrollo del control predictivo, los cálculos necesarios y los patrones a seguir. Se utiliza la técnica de identificación por el método de curva de reacción para obtener el modelo matemático del sistema, que es indispensable para trabajar con el control predictivo y generar la ley de control para el proceso. La ley de control se optimiza dependiendo del horizonte de predicción y del horizonte de control, es decir, se ajusta el desempeño del algoritmo predictivo consiguiendo una velocidad de respuesta, robustez y exactitud considerables, dando margen para la optimización del proceso o sistema donde interactúa este algoritmo de control.

Palabras claves

Control Predictivo, Horizonte de Control, Horizonte de Predicción, Matlab, Puerto Paralelo, Variador.

Abstract

Concepts, characteristics, simulations and an introduction into the Model Based Predicted Control (MBPC) applied to alternating current motors are presented. The identification and predictive control system are development in MATLAB 6.5, allowing to take advantage of this tool for purifying the predictive control algorithm. The application shows the fine results of this kind of control in an alternating current motor.

Key words

Simulation tools, predictive control, graphical design environment, alternating current motor, speed regulation, mathematical model. Copyright IFAC.

Control de un motor de inducción utilizando algoritmo predictivo

Por: Elkin Alonso Loaiza López. Juan Diego Nieto Sierra

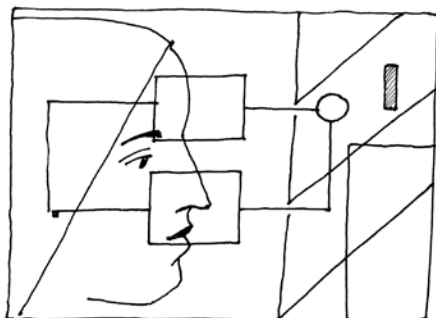
POLITÉCNICA No. 2 | Medellín, noviembre - diciembre de 2005, p.p. 73-84

1. Introducción

En el campo industrial todas las aplicaciones de control han evolucionado en todo su entorno práctico y funcional, demostrando efectividad y resultados excelentes para cada proceso, esto se ha llevado a cabo con base en técnicas de control convencionales y teorías establecidas a partir de ensayo y error en forma empírica. En este contexto se puede reconocer hoy en día el "control predictivo basado en modelos" como una de las técnicas avanzadas más prácticas y con gran acogida y futuro en su incursión en el campo industrial.¹ Uno de los campos de aplicación de estas leyes de control no convencionales es el control de motores de corriente directa (cd), que proporciona una regulación amplia y progresiva de la velocidad y por ende es clave en muchos procesos de desarrollo industrial; sin embargo, las máquinas de

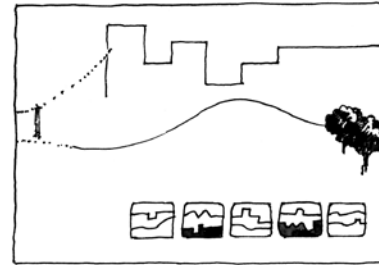
corriente alterna ca son económicas y de construcción sencilla, con lo cual vienen desplazando, poco a poco, en media y alta potencia, a los motores de cd, simplificando y economizando también su operación y costo, debido a su baja necesidad de mantenimiento.

Aunque el motor de (ca) presenta muchas ventajas en su estructura física, necesita ser controlado o manipulado a partir de modelos matemáticos precisos y en cierta medida complejos por su dificultad en el momento de hacerle un tratamiento lógico en un computador o en cualquier dispositivo electrónico como lo son los microcontroladores y el Procesador Digital de Señales (DSPs), entre otros sistemas, aumentando así el costo computacional con lo cual podría aumentar el costo económico. Al observar estas características a favor y en contra de los motores de ca, surge entonces la posibilidad de utilizar el control predictivo basado en modelos implementado a través de un variador, el cual tiene como objetivo controlar y optimizar el consumo de energía para procesos con dinámicas difíciles.



¹CAMACHO E. F. y BORDONS C. *Model Predictive Control*. Springer, 1999.

Estrategia del control predictivo basado en modelos



La estrategia utilizada se representa en la Figura 1, que tiene las siguientes características:

- Las salidas futuras para un horizonte determinado, llamado horizonte de predicción, se predicen en cada instante t usando el modelo

del proceso. Estas salidas predichas $y(t+k|t)$ para $k=1\dots N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante t (salidas pasadas y futuras) y de las señales de control futuras $u(t+k|t)$, $k=0 \dots N-1$, que son enviadas al sistema para ser calculadas.

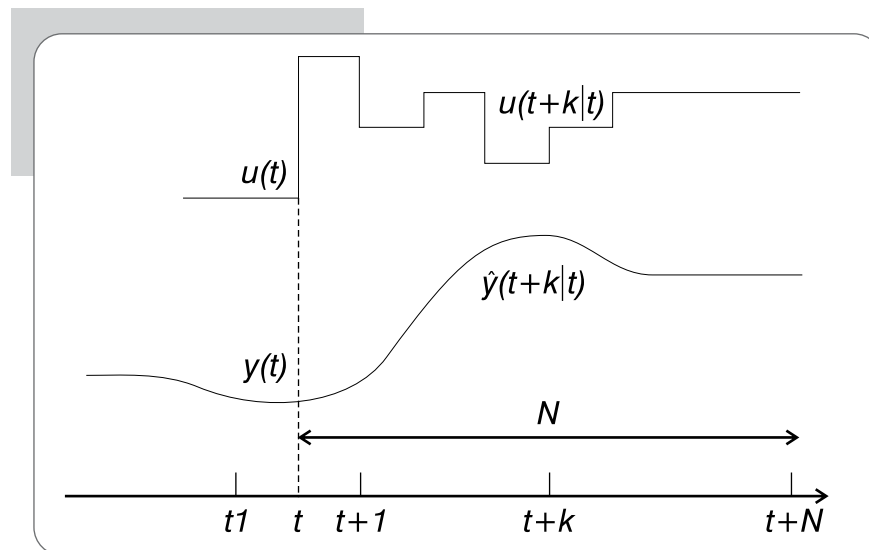


Figura 1. Estrategia del MBPC.

- El conjunto de las señales de control futuras se calculan para optimizar un criterio determinado a fin de mantener el proceso tan cerca como sea posible a la trayectoria de referencia $w(t+k)$. Este criterio usualmente toma la forma de una función cuadrática de los errores entre la señal de salida predicha y la trayectoria de referencia predicha.

- La señal de control $u(t|t)$ se envía al proceso aunque las siguientes señales de control calculadas se rechazan, porque en el siguiente instante muestreado $y(t+1)$ ya es conocido y el escalón 1 es repetido con este nuevo valor

y todas las secuencias. A fin de implementar esta estrategia se utiliza la estructura básica mostrada en la figura 2. Se utiliza un modelo para predecir las salidas futuras de la planta, basado en los valores presentes y pasados, y en las acciones futuras de control propuestas. Estas acciones son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de costo, así como las restricciones. El modelo escogido tiene que ser capaz de capturar las dinámicas del proceso, así como de predecir con precisión las salidas futuras de forma que sean fáciles de implementar y de entender.²

² Ídem.

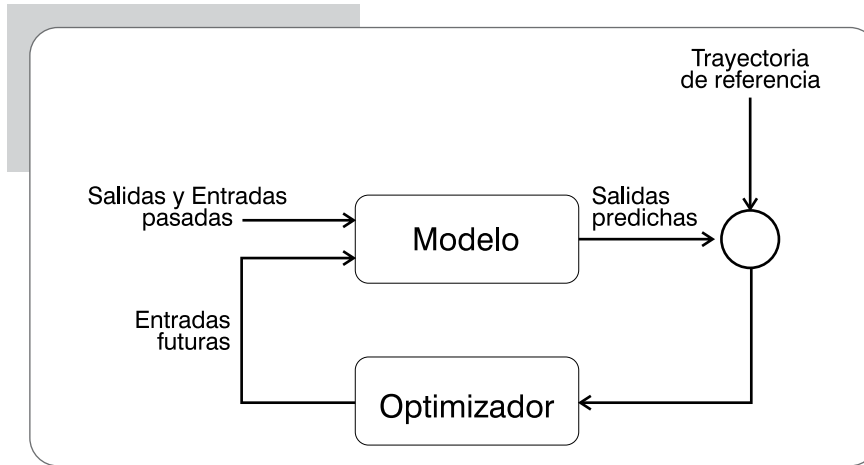


Figura 2. Estructura Básica del MBPC

Elementos del MBPC

Todos los algoritmos del MBPC poseen elementos comunes y se pueden seleccionar adecuaciones para cada uno de estos elementos dando eficacia a los diferentes algoritmos. Estos elementos son:

Modelo de Predicción

Es el primer paso para el desarrollo del MBPC; un diseño completo deberá incluir los mecanismos para obtener el mejor modelo posible, en este caso se hizo a partir de la función de transferencia descrita por³:

$$\hat{y}(t+k|t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(t+k|t)$$

Función Objetivo

En esta función se busca que las salidas futuras del horizonte de predicción considerado, se encuentren a partir de la señal de referencia determinada penalizando a la vez el horizonte de control. Ésta es representada por la siguiente ecuación⁴ y⁵

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) \cdot [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \cdot [u(t+j-1)]^2$$

³SANCHIS J. y MARTÍNEZ M. *Control Predictivo Basado en Modelos*, II Congreso de la Asociación Colombiana de Automática. 1998.

⁴Ibíd.

⁵CLARKE D. *Advances in Model Based Predictive Control*. New York, Oxford University Press Inc., 1994

1. Cálculo de la Ley de Control

Permite obtener los valores del controlador, esto es necesario para minimizar la función, lo que hace que los valores de las salidas predichas, se calculen como una función de valores pasados de entradas y salidas y de

señales de control futuras, haciendo uso del modelo seleccionado y sustituido en la función de costo (función objetivo), obteniéndose una expresión cuya minimización conlleva a los valores buscados.

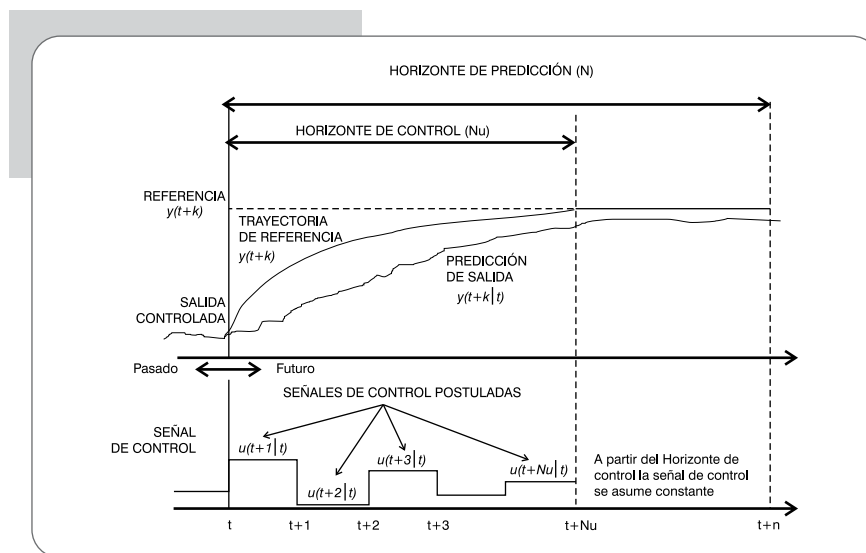


Figura 3. Trayectoria de referencia y señal de control constante a partir del horizonte de control (Nu)

2. Metodología

Para obtener los resultados de este estudio se diseñó un algoritmo de control predictivo basado en modelos, para regular la velocidad de un motor de inducción, a través del GUIDE de MATLAB 6.5, el cual cuenta con herramientas como toolbox de control que facilita la obtención de los cálculos, resultados, ambiente gráfico y manejo del puerto entre otros beneficios. Posteriormente se obtuvieron los datos de respuesta del sistema por medio de una tarjeta de adquisición de datos de 8 bits y cuatro canales, la cual fue diseñada de acuerdo a los requerimientos del sistema de control. Esta tarjeta tiene su interfase con el computador por medio del puerto paralelo y genera una señal eléctrica equivalente al

número digital que proporciona el computador para el sistema o en sentido contrario.

En la siguiente etapa del estudio se obtuvo el modelo matemático del motor, utilizando el método de la curva de reacción y empleando el GUIDE, las S-FUNCTIONS de MATLAB 6.5 y el toolbox de control, se implementó la ley de control por medio del GUIDE y un variador de velocidad, el cual se constituye como el elemento final de control.

Se realizaron las simulaciones necesarias para la identificación de la dinámica de la planta y el algoritmo de control. Finalmente se probó el diseño en el sistema real obteniéndose resultados satisfactorios.

3 Resultados

3.1 Realización del modelo dinámico del motor e implementación de los algoritmos de control predictivo.

Las características del motor utilizado son las siguientes:

Voltaje de alimentación: 220 V
 Corriente de alimentación: 1.7 A
 Caballos de potencia: 0.5 HP
 Velocidad: 1640 RPM

Se escogió el escalón ascendente del 40% al 50%, como información básica para identificar el sistema, a partir de los datos presentes en la base de datos. Se identificó la respuesta del sistema para un escalón de magnitud 10%, entre el 40% y el 50% del estímulo total.

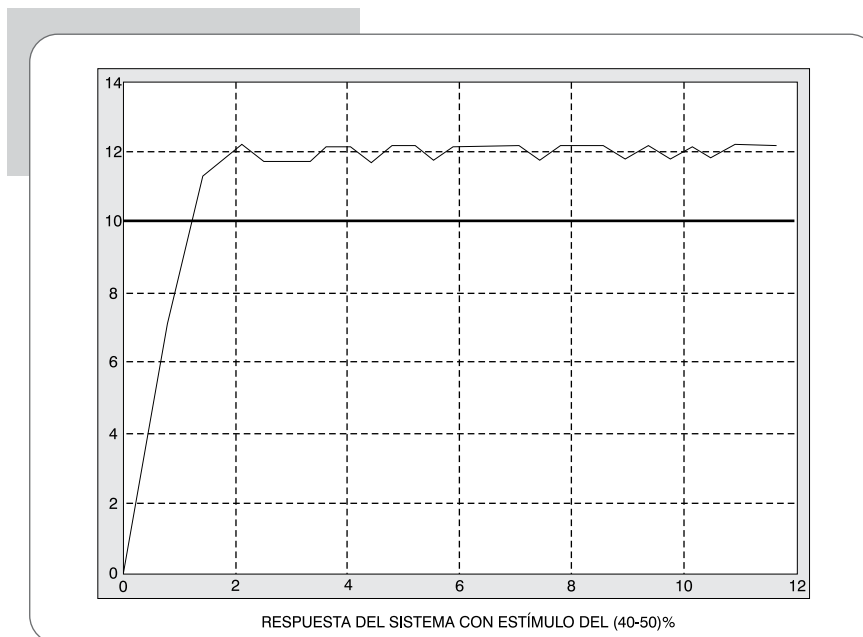


Figura 4. Respuesta del sistema con estímulo del (40-50)%

3.2 Modelo del sistema de primer orden (P.O.R).

Para hallar el modelo se abre el lazo de control (controlador manual) antes del elemento final de control y se da un estímulo tipo escalón para provocar un cambio en el proceso.

Al obtener las curvas representativas de la respuesta, se eligen dos puntos. En general, los pun-

tos escogidos son los correspondientes cuando la respuesta ha alcanzado el 28.3 % y el 63.2 % del valor final. Con lo cual se tiene que estos dos puntos representan dos valores en el tiempo observando la gráfica, permitiendo hallar los valores respectivos para, y, quedando entonces así:

$$G(s) = \frac{1.17647.e^{-0.285094.S}}{0.30748.S + 1} \quad \text{F. de T. de Primer Orden} \quad (3)$$

Se seleccionó el período de muestreo por el criterio del ancho de banda, para discretizar la función en un rango dado por⁶:

$$0.0741328 \leq T \leq 0.111199$$

Siendo entonces:

$$T = 0.092666 \text{ seg}$$

La función de transferencia discreta será:

$$G(z) = \frac{0.29526.z + 0.01604}{z^2 - 0.7398.z} \quad (4)$$

Para el proceso del cálculo del controlador predictivo se trabajó con la función de transferencia de primer orden, para ser comparada con el modelo ARIMA⁷.

3.3 Validación del sistema

Se comparan los valores obtenidos en la identificación del sistema y los datos arrojados por el modelo matemático cuando se estimula con el escalón correspondiente a la magnitud en la identificación, con lo que se comprueba la verdadera eficiencia de la identificación .

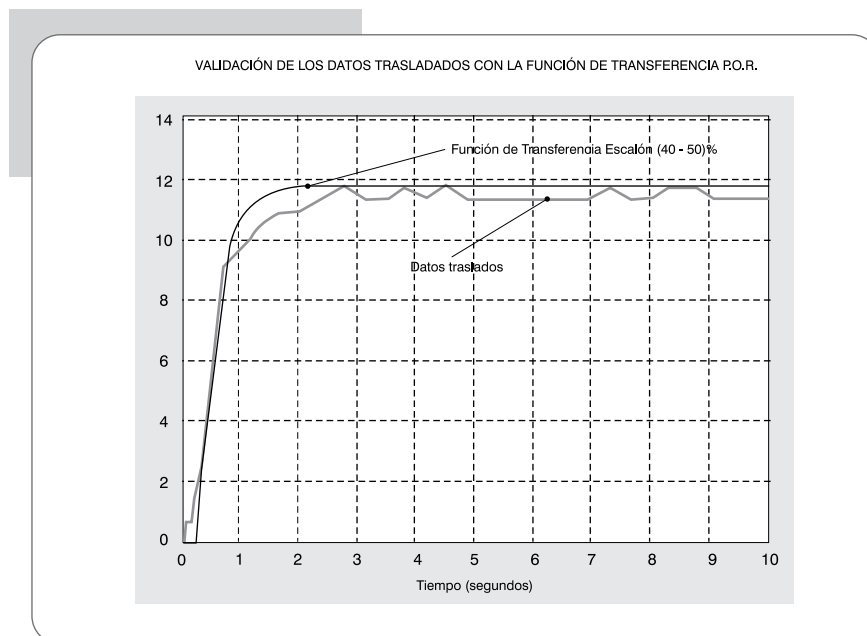


Figura 5. Validación de los datos trasladados con la función de transferencia P.O.R.

⁶ OGATA, Katsuhiko. *Discrete Time Control System*. 1987

⁷ CAMACHO E. F. y BORDONS C. *Model Predictive Control*. Springer, 1999.

⁸ *Ibíd.*

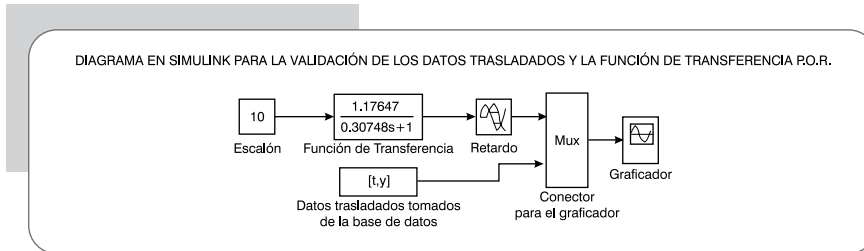


Figura 6. Diagrama de la validación de los datos trasladados y la función de transferencia P.O.R.

3.4 Cálculo del control predictivo

Se determina el tipo de modelo definido para el control a partir de la identificación de la planta. La función de transferencia que identifica el sistema es:

$$G(z) = \frac{0.29526 + 0.01604 \cdot z^{-1}}{1 - 0.74392 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-1} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-1}$$

$$a = -0.74392 \quad b_0 = 0.29526 \quad b_1 = 0.01604$$

$$d = 0 \quad N_1 = d + 1 = 1 \quad N = Nu = 3 \quad C(z^{-1}) = 1$$

$$(1 - a \cdot z^{-1}) \cdot Y(t) = (b_0 + b_1 \cdot z^{-1}) \cdot U(t-1) + \frac{e(t)}{\Delta} \quad (5)$$

Se utiliza la ecuación Diofantina:⁹

$$C(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) \cdot \hat{A}(z^{-1}) + z^{-j} \cdot F_j(z^{-1}) \quad (6)$$

$$\frac{1}{\hat{A}(z^{-1})} = E_j(z^{-1}) + z^{-j} \cdot \frac{F_j(z^{-1})}{\hat{A}(z^{-1})} \quad (7)$$

Se aplican las fórmulas para hallar los polinomios predictores

$$E_j(z^{-1}) \text{ y } F_j(z^{-1}) \cdot E_1 = 1$$

$$E_{j+1} = E_j + f_{j,0} \cdot z^{-j} \quad (8)$$

$$F_{j+1} = z^{j+1} \cdot [1 - E_{j+1} \cdot \hat{A}] \quad (9)$$

$$E_1 = 1$$

$$F_1 = 1.74392 - 0.74392 \cdot z^{-1}$$

$$E_2 = 1 + 1.74392 \cdot z^{-1}$$

$$F_2 = 2.3 - 1.3 \cdot z^{-1}$$

$$E_3 = 1 + 1.74392 \cdot z^{-1} + 2.3 \cdot z^{-2}$$

$$F_3 = 2.71 - 1.71 \cdot z^{-1}$$

⁹ Ibídem.

Se calculan los $G_j = E_j \cdot B$ para hallar la salida:

$$Y(t+d+j|t) = G_{d+j} \cdot \Delta U(t+j-1) + F_{d+j} \cdot Y(t)$$

$$\begin{bmatrix} Y(t+1) \\ Y(t+2) \\ Y(t+3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.29526 & 0 & 0 \\ 0.52604 & 0.29526 & 0 \\ 0.71 & 0.52604 & 0.29526 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U(t) \\ \Delta U(t+1) \\ \Delta U(t+2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01604 \cdot \Delta U(t-1) + 1.74392 \cdot Y(t) - 0.74392 \cdot Y(t-1) \\ 0.03 \cdot \Delta U(t-1) + 2.3 \cdot Y(t) - 1.3 \cdot Y(t-1) \\ 0.04 \cdot \Delta U(t-1) + 2.71 \cdot Y(t) - 1.71 \cdot Y(t-1) \end{bmatrix}$$

Se halla $H^{-1} \cdot b = (G^T \cdot G + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot G^T$ La primera fila de $H^{-1} \cdot b$ es k , necesaria

para hallar $\Delta U(t) = k \cdot (W - f)$ con $\lambda = 3.8$.

$$H^{-1} \cdot b = \begin{bmatrix} 0.0643 & 0.1065 & 0.1371 \\ -0.008 & 0.0577 & 0.1065 \\ -0.0031 & -0.008 & 0.0643 \end{bmatrix}$$

$$\Delta U(t) = k \cdot (W - f) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta U(t) = & 0.0643 \cdot W(t+1) + 0.1065 \cdot W(t+2) + \\ & 0.1371 \cdot W(t+3) - 0.0097 \cdot \Delta U(t-1) - \\ & 0.7286 \cdot Y(t) + 0.4207 \cdot Y(t-1) \end{aligned}$$

Finalmente para hallar la ley de control

$$\Delta = (1 - z^{-1})$$

$$U(t) = 0.9903 \cdot U(t-1) - 0.0097 \cdot U(t-2) - 0.7286 \cdot Y(t) + 0.4207 \cdot Y(t-1) + 0.0643 \cdot W(t+1) + 0.1371 \cdot W(t+3)$$

Luego de haber tenido estos cálculos se implementaron en MATLAB 6.5, con ayuda del GUIDE y demás herramientas ofrecidas por este programa para la comunicación paralela y la depuración del algoritmo, en¹⁰ se profundiza mucho más esta comunicación

¹⁰ GOMEZ RUIZ, Julio C. Control con realimentación del Estado con MATLAB 6.5 y Puerto Paralelo. En: Politécnica, Medellín: Politécnico Jaime Isaza Cadavid, junio octubre de 2005, Vol. 1 N° 1, p.p. 105 a 118



Figura 7. Presentación del software de control predictivo desarrollado en el GUIDE de MATLAB 6.5 para la aplicación.

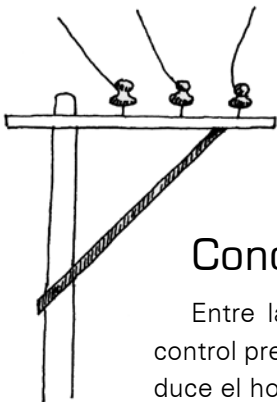


Figura 8. Respuesta del sistema con variación en el horizonte de control

4. Análisis de Resultados

Uno de los principios básicos de los motores de ca se da al aplicar una serie de voltajes trifásicos en el estator, con lo cual se produce una circulación de corrientes trifásicas en los devanados de armadura, obteniéndose un campo magnético uniforme y giratorio, y al originarse un campo magnético de estado estacionario teniendo una serie de corrientes trifásicas en un devanado trifásico, en el rotor, se produce un campo magnético de estado estacionario, el cual tiende a alinearse con el campo del estator, como si se alinearan dos barras magnéticas seguidas.

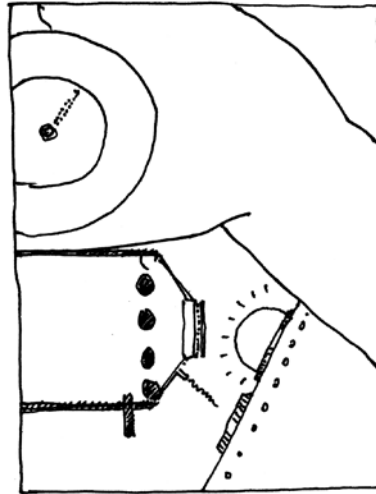
La identificación del sistema se estableció para el escalón del (40-50)% por la buena respuesta del sistema al estímulo. Solamente en la identificación para los escalones, la respuesta alcanzaba una saturación inmediata hacia un 100%, al sobrepasar el estímulo del 80 %.



Conclusiones

Entre las características identificadas en el control predictivo, se observó que cuando se reduce el horizonte de control (N_u) o al incrementar el factor de ponderación se reduce la amplitud de la señal de control y estos parámetros también afectan el comportamiento del sistema, mostrando algunas oscilaciones.

Se observó que en el inicio de la predicción del control, por no contar con valores ya preestablecidos a raíz de su falta de comportamientos pasados del sistema, se presentó una fuerte oscilación aunque con un periodo corto para el tiempo de establecimiento; después de obtener los datos mínimos que se abarcan en el horizon-



te de control, la respuesta fue mas acorde, concisa y eficiente para cualquier punto de ajuste.

Se encontró un acorde (λ), adecuado para la respuesta requerida, se varió el valor hasta penalizar un poco el esfuerzo de control, logrando una mejor estabilización y una disminución en la sobre oscilación. Los valores encontrados 1.5 y 3.8 respectivamente proporcionaron los mejores comportamientos en las diferentes zonas de estimulación.

Los software utilizados para la validación del diseño del algoritmo de control predictivo e identificación del sistema fueron desarrollados en MATLAB 6.5, aprovechando las ventajas proporcionadas con la comunicación paralela, el manejo de matrices, el entorno GUIDE y las S-FUNCTIONS, logrando agilizar los cálculos necesarios para el desarrollo y obtener un ambiente gráfico de mucho análisis, siendo entonces una de las principales herramientas para el logro de los objetivos de aplicación.

En un motor de inducción de ca, la corriente en el conductor del rotor es lograda por inducción, esto es, por el campo del estator pasando a través y generando corrientes inducidas en las barras del rotor. Así, la misma corriente forzada dentro de los bobinados del estator aumenta el flujo del motor e induce la corriente del rotor .

Uno de los inconvenientes que se presentaron, fue la elevada carga computacional exigida por la naturaleza de la depuración del algoritmo predictivo, sobre todo cuando se seleccionan o establecen valores altos para los horizontes de control y de predicción, sin embargo la respuesta del control sigue siendo muy eficiente para cualquier estímulo del sistema.