

## **TITULO:**

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA BALANCEAR UNA BOLA  
EN UNA VIGA UTILIZANDO MATLAB

## **AUTORES:**

Douglas René Ponce López<sup>1</sup>, Mauricio Ricardo Boada Herrera<sup>2</sup>, Juan F. Del Pozo L.<sup>3</sup>,  
Sara Ríos Orellana<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Ingeniero Eléctrico, especializado en Electrónica y Automatización Industrial 2006.

<sup>2</sup>Ingeniero Eléctrico, especializado en Electrónica y Automatización Industrial 2006.

<sup>3</sup>Director de Tópico: Ingeniero Eléctrico en Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1968, Maestría USA, Universidad Missouri-Rolla 1978, Profesor de la ESPOL desde 1971.

<sup>4</sup>Profesora de Materia Complementaria de Tópico: Ingeniera Eléctrica especialidad Electrónica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1996, Maestría ECUADOR, Escuela Superior de Postgrado de Administración de Empresas ESPAE 2004, Profesora de la ESPOL desde 1996.

## **RESUMEN**

La implementación de un sistema de control para balancear una bola en una viga utilizando MATLAB, es diseñado con la finalidad de implementar una planta para prácticas del Laboratorio de Control Automático, con el objetivo de que el estudiante pueda elaborar prácticas experimentales-teóricas y de esta manera complementar los conocimientos teóricos adquiridos en la asignatura de Control Automático.

El Sistema físicamente está constituido por dos computadores y la planta; uno es el computador principal (Host), el cual realiza el control del sistema desde software, y el otro es el computador remoto (Target) en la cual esta conectado a la planta para adquirir información de la misma en tiempo real; la planta consiste de una barra de acero acanalada y una bola de acero limpia de libre rodamiento. El sensor lineal mide la posición de la bola en el riel midiendo el voltaje en la barra. Un motor DC, conectado al final de la barra controla la posición de la barra y la bola de acero.

En el desarrollo de nuestra planta también se utilizó una herramienta llamada MATLAB, la cual nos ha facilitado el cálculo, análisis con aplicaciones importantes como un Simulador (Simulink), Identificador de Sistemas (System Identification).

## **ENGLISH**

The Implementation of Control System to balance a ball in a beam using MATLAB, it is designed with the purpose of implementing a plant for practical of the Laboratory of Automatic Control, with the objective that the student can elaborate practical experimental-theoretical and this way to supplement the theoretical knowledge acquired in the subject of automatic control.

The System physically is constituted by two computers and the plant; one is the called main computer Host, which carries out the control of the system from software, and the other one is the remote or called computer Target in the one which this connected one to the plant to acquire information of the same one in real time, and the plant consists of a grooved steel bar and free rolling stainless steel ball. The linear sensor measures the position of the ball on the track by measuring the output voltage from the bar. A DC motor, connected to the one end of the bar controls the positions of the bar and the steel ball.

In the development of our plant also a called tool Matlab was used, which has facilitated us the calculation, analysis with important applications as a Shammer (Simulink), badge of systems (System Identification)

## **INTRODUCCIÓN**

La ESPOL comprometida con la ciencia y el desarrollo tecnológico en correspondencia a mejorar la calidad humana a través de los aportes académicos y profesionales en el campo tecnológico; demanda que sus estudiantes al egresar y obtener el título profesional realicen un proyecto tecnológico; y como estudiantes egresados, actores de este proceso nos comprometimos a realizar el proyecto sobre “Implementación de un Sistema de Control para Balancear una Bola en una Viga utilizando MATLAB”, el mismo que tiene como finalidad proyectar un proceso didáctico de aprendizaje del Laboratorio de Control Automático; de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC) aplicando el Programa MATLAB.

Además aplicar la herramienta System Identification (Identificador de Sistemas) de MATLAB, para identificar el modelo de la planta como experimento para el laboratorio de control automático de la FIEC.

## CONTENIDO

### Descripción de la planta.

El sistema de la bola y la viga fue construido con el propósito de estudiar uno de los problemas más difíciles en control automático, como es el diseño de control de sistemas inestables. El problema consiste en que los sistemas inestables verdaderos son generalmente peligrosos y no se pueden reproducir en condiciones reales en el laboratorio.

Por este motivo, se lo propuso como nuestro proyecto de tópicos; el objetivo principal del sistema es equilibrar la bola sobre el punto medio de la viga, es decir a 20 cm. del extremo de la viga. El conjunto bola y viga se observa en la figura 1.

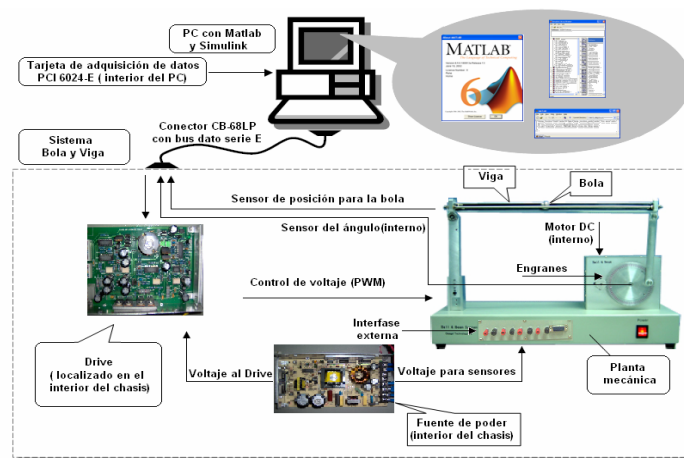


FIGURA 1. ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL.

### Descripción y esquema del sistema.

El control implementado en este tipo de sistema fue un lazo de doble realimentación, más conocido como control en cascada, el cual es diferente al sistema de control con

realimentación que emplea un solo controlador; pues emplea dos controladores. Uno interno llamado esclavo o secundario y el otro externo llamado maestro o primario.

En este tipo de esquema la acción del controlador maestro fija el punto de ajuste para el controlador esclavo, es decir el resultado que produce el controlador maestro es el punto de ajuste (referencia) que debe seguir el controlador esclavo. A diferencia de lo que ocurre en un esquema de realimentación en la que el punto de ajuste se fija externamente.

Para nuestro sistema la función del lazo secundario es controlar la posición del ángulo de la viga, y el primario se encarga de controlar la posición de la bola a lo largo de la viga, a pesar de que una perturbación se haga presente en el sistema. Cuando la bola es perturbada (mover la bola en cualquier dirección a lo largo de la viga), el sistema comienza a reaccionar, hasta que la bola llegue a su posición de partida (referencia).

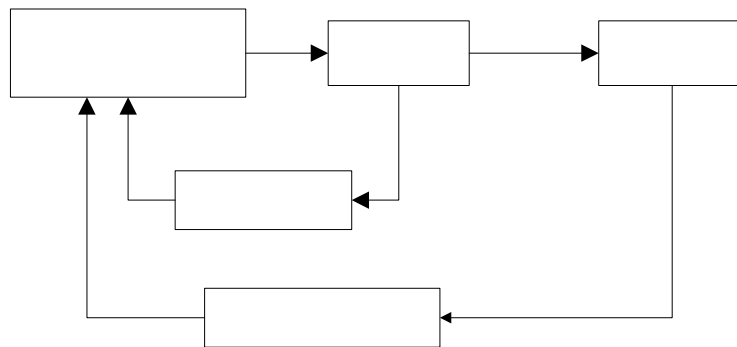


FIGURA 2. ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA BOLA Y VIGA.

La viga es básicamente un potenciómetro lineal y la bola hace las veces de cursor del potenciómetro; es decir, en base al valor medido de resistencia se obtiene una señal de voltaje analógica directamente proporcional a la posición de la bola a lo largo de la viga, la cual es ingresada al computador por medio de la tarjeta de adquisición de datos.

Al sistema ingresamos un punto de operación o posición deseada, por software desde el programa en el monitor del computador Principal, esta entrada representa en escala la posición de la bola que se ingresa al sistema, el controlador debe procesar las variables para ajustar las condiciones de equilibrio del sistema para obtener la posición deseada de la bola sobre la viga con y sin perturbaciones, a esta posición la llamaremos posición obtenida (simulada).

COMPUTADORA XPC PRINCIPAL Voltaje MOT C

Definidas cada una de las funciones de transferencia de los componentes del sistema, y estableciendo las variables de entrada y salida a controlar, diseñamos el diagrama de bloque de nuestro sistema interno (esclavo).

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA INTERNO IDENTIFICADO SIN PERTURBACIÓN

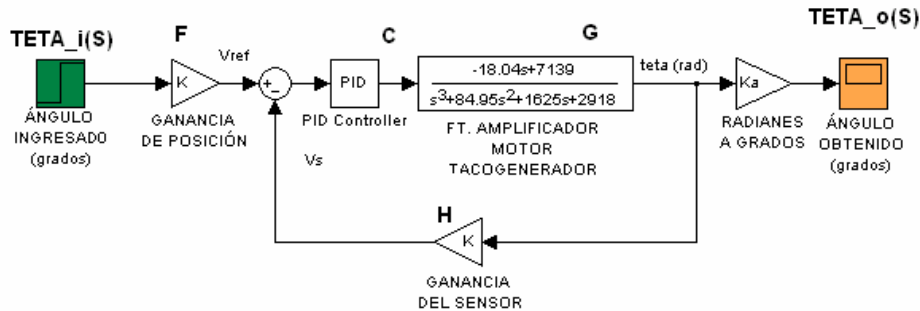


FIGURA 3. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA INTERNO.

### Sistema de control.

Para determinar el controlador de nuestro sistema utilizamos la herramienta **SISO** del Matlab. Pero previamente se hizo la identificación del sistema utilizando una aplicación del Matlab (System Identification), el cual nos dio la siguiente función de transferencia, en base a la velocidad de salida y voltaje ingresado al motor.

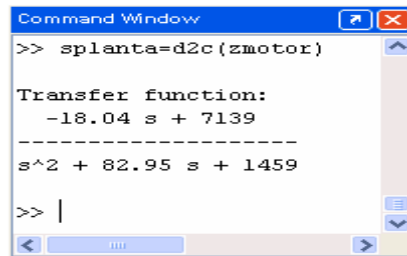


FIGURA 4. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN TRANSFORMADA DE LAPLACE DEL MODELO REAL DE LA PLANTA G INTERNA.

Cabe notar que en nuestro análisis para el lazo interno, se procedió a identificar en relación a la velocidad y no a la posición, por cuanto se obtuvo un porcentaje mucho mayor de aceptación en la identificación. La función de transferencia que relaciona el voltaje de entrada al motor y la posición de salida en la carga en términos de radianes, es la siguiente:

$$\frac{V_m(s)}{\theta_L(s)} = \frac{-18.04s + 7139}{(s + 2)(s^2 + 82.92s + 1459)}$$

## AJUSTE DEL CONTROLADOR DEL MODELO INTERNO

El SISO es una herramienta que nos permite ajustar el controlador por medio del criterio de la trayectoria de las raíces, a partir de la función de transferencia, del modelo matemático o real.

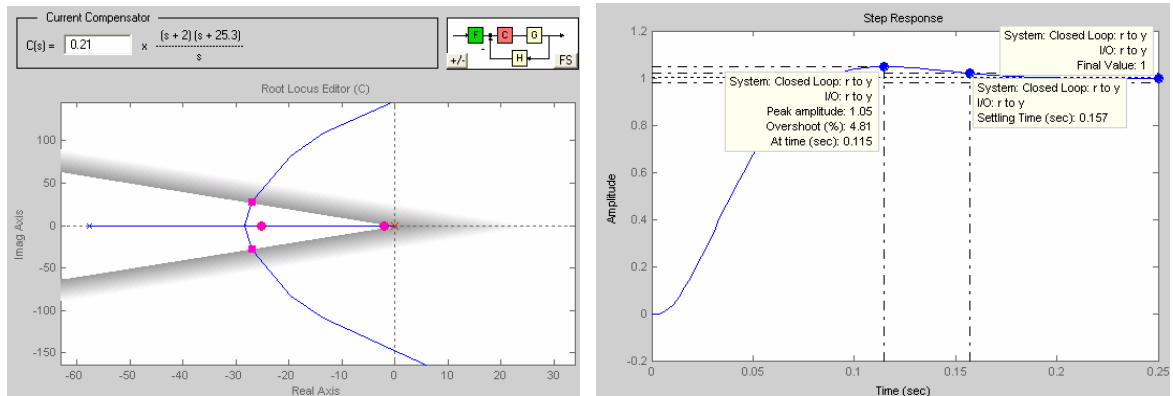


FIGURA 5. LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES DEL MODELO REAL Y RESPUESTA DEL SISTEMA INTERNO A UNA ENTRADA ESCALON

Como primer paso de ajuste de nuestro sistema interno en lazo cerrado, quisiéramos que la respuesta del sistema a un cambio de referencia tipo Escalón, tenga un Sobrenivel Porcentual  $\leq 5\%$ . El efecto deseado se logra cuando ubicamos el primer cero con la misma magnitud del polo dominante del sistema, es decir en -2 del plano S.

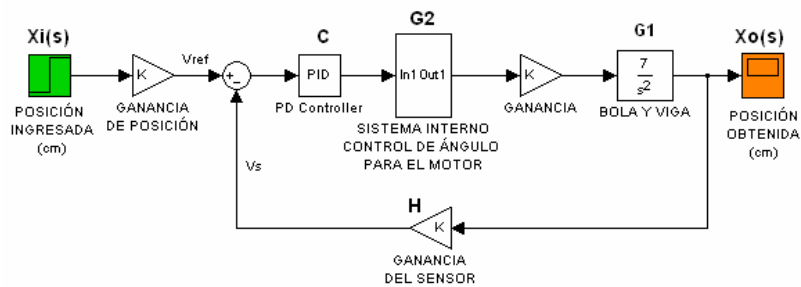
El siguiente paso es lograr obtener un tiempo de estabilización menor a 0.2 seg; por cuanto este sistema tiene que trabajar muy rápido comparado con el sistema externo. Esto se logra colocando el segundo cero del controlador en el mismo sitio del segundo polo dominante de la planta en -25.3; con lo cual se obtiene un tiempo de estabilización menor a 0.16 seg, como se observa en la figura 5 y también se logra obtener un sistema de segundo orden; que nos facilita el análisis posterior.

El Controlador Proporcional Integral Derivativo, obtenido es el siguiente:

$$\text{PID: } 5.733 + (10.616/S) + (0.21S)$$

Para nuestro diseño del control del lazo externo (maestro), se utilizó el esquema mostrado en la figura 6, en el cual se puede observar el lazo interno, explicado con anterioridad.

### DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA BOLA Y VIGA TOTAL



G2: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA INTERNO IDENTIFICADO SIN PERTURBACIÓN

FIGURA 6. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA TOTAL.

La función de transferencia total del sistema en lazo abierto a controlar es la siguiente:

$$\frac{V_1(s)}{X(s)} = \frac{32.5984s + 1.28990286e004}{s^4 + 53.85s^3 + 1499s^2}$$

### AJUSTE DEL CONTROLADOR DEL MODELO TOTAL

El SISO es una herramienta que nos permite ajustar el controlador por medio del criterio de la trayectoria de las raíces, a partir de la función de transferencia, del modelo matemático o real.

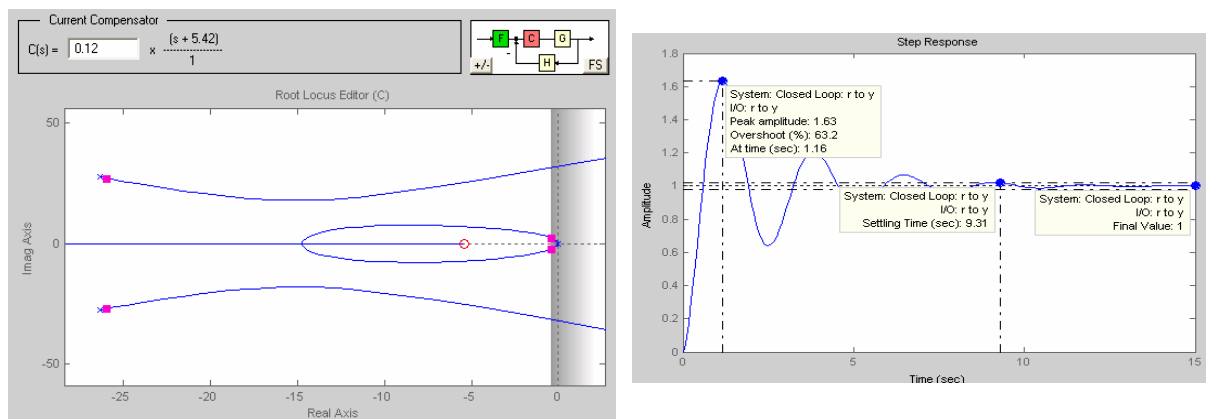


FIGURA 7. LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES DEL MODELO TOTAL Y RESPUESTA DEL SISTEMA TOTAL A UNA ENTRADA ESCALON

Como primer paso de ajuste de nuestro sistema total en lazo cerrado, quisiéramos que la respuesta del sistema a un cambio de referencia tipo Escalón, tenga un Sobrenivel Porcentual  $\leq 70\%$ . Como se observa en la figura 7, se introduce un cero al controlador; cuya función es la de halar las trayectorias de las raíces hacia la izquierda, para que el sistema se haga estable.

El efecto deseado se logra cuando ubicamos el cero en -5.42, con lo cual obtenemos una ganancia de 0.22; pero el tiempo de estabilización se desea que sea menor a 10

segundos para que se pueda apreciar experimentalmente dicha respuesta a un cambio de referencia o perturbación; sin afectar la respuesta del sistema interno. Esto se logra bajando la ganancia a 0.12; con lo cual el sistema total tiene un sobrenivel porcentual de 63.2% y un tiempo de estabilización de 9.31 seg.

$$\text{PD: } 0.6504 + (0.12S)$$

De acuerdo a diferentes pruebas que se realizo a la planta total, se llego a calibrar el Controlador Proporcional Derivativo; obteniendo el siguiente resultado:

$$\text{PD: } 0.67488 + (0.18S)$$

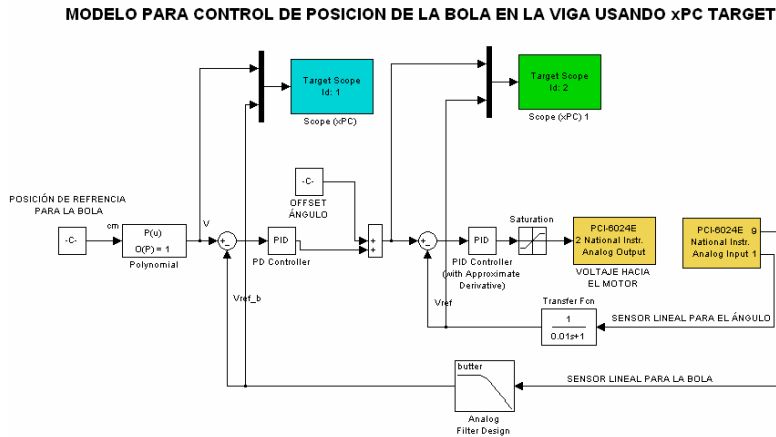


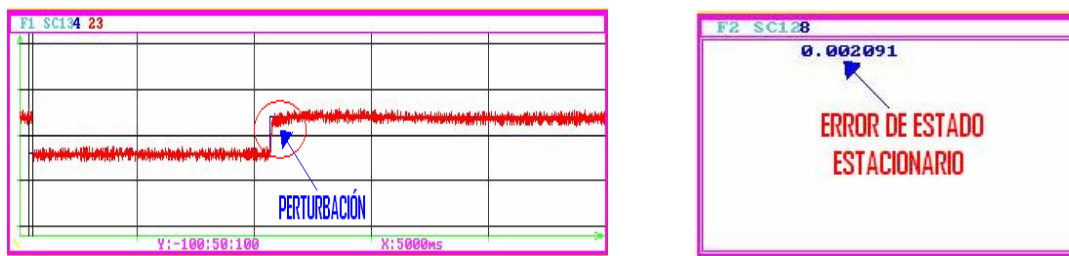
FIGURA 7. DISEÑO DEL SISTEMA TOTAL EN TIEMPO REAL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

**RESULTADOS.**

**Planta interna**

Se concluye que el Controlador Proporcional Integral Derivativo hallado por el SISO del modelo real de la planta interna, trabaja correctamente en la puesta en marcha de la misma, cumpliendo con el objetivo de controlar y estabilizar el sistema dentro del punto de operación establecido cero grados. Las graficas mostradas a continuación, son obtenidas utilizando la aplicación xPC Target.

**xPC Target.**



A)

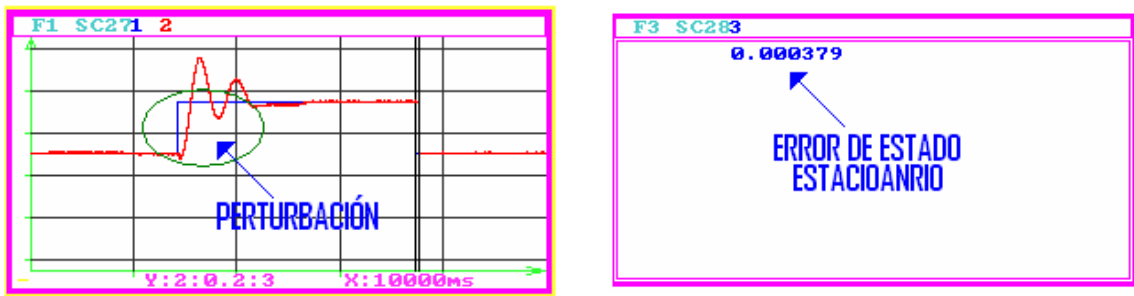
FIGURA 8. GRÁFICAS DEL TARGET PC EN TIEMPO REAL; A) SISTEMA ESTABLE.



### Planta total

Se concluye que el Controlador Proporcional Derivativo hallado por el SISO del modelo real de la planta total, trabaja correctamente en la puesta en marcha de la misma, cumpliendo con el objetivo de controlar y estabilizar el sistema dentro del punto de operación establecido 20 cm. Las graficas mostradas a continuación, son obtenidas utilizando la aplicación xPC Target.

### xPC Target.



A)

FIGURA 9. GRÁFICAS DEL TARGET PC EN TIEMPO REAL; A) SISTEMA TOTAL ESTABLE.



FIGURA 10. POSICIÓN DE CONTROL DE LA BOLA EN LA VIGA.

### CONCLUSIONES

Se puede concluir que se consiguió lo esperado, por cuanto la respuesta de cada controlador es buena. Este proyecto servirá para demostrar a los estudiantes de dicha facultad algunas de las capacidades de los sistemas de control. Los estudiantes podrán cambiar los parámetros de los controladores y observar cómo afectan a la repuesta del sistema. Hay también, otros tipos de controladores que podrían controlar este sistema, pero se escogió un control PID para el lazo interno (esclavo) y un PD (maestro) para el lazo externo, por su facilidad de entendimiento y diseño.

Se diseñó un controlador PD para estabilizar al sistema total en lazo cerrado, pero el sistema muestra error de estado estacionario; debido a la diferencia que existe entre la fricción estática y dinámica de la bola.

Para las perturbaciones externas comúnmente conocido como ruido ya sea de los sensores de posición angular y lineal, de dispositivos conectados a la línea de alimentación ó debido a defectos mecánicos en el sistema se implementaron filtros analógicos pasa bajas, los cuales atenúan significativamente dichas perturbaciones, estos filtros fueron implementados vía software, por economía y facilidad de diseño.

El uso de tecnología de última generación en el campo de la adquisición de datos y programación, facilita los estudios y cálculos necesarios para la implementación del sistema de control y se logró reemplazar dispositivos convencionales, demostrando que es posible, mediante software mejorar sistemas tradicionales y alcanzar alta confiabilidad y eficiencia.

## **REFERENCIAS**

### **a) Libro**

1. Carlos A. Smith, Armando B. Corripio, Control Automático de Procesos (Limusa S.A., Grupo Noriega; 1997).
2. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern Control Systems (9na. Edición, Prentice Hall).
3. K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna (Prentice Hall).
4. Matlab, The Language of Technical Computing, Simulink, Power System Blockset, xPC Target Applications, 2000)

### **b) Referencia de Internet**

6. Compañía Mathworks, Junio 2005, Massachussets, <http://www.mathwoks.com/company/>