

- morias de Eventos Científicos, 1984, p.p. 47-55.
10. Corsi Otálora, Carlos. *La Liberación*. Bogotá, colección Nueva Civilización, Universidad La Gran Colombia, p. 240. 1987.
  11. Piaget, Jean. *A dónde va la Educación*. Barcelona, Editorial Teide, S.A., 1973, p. 9.
  12. Hummel, Charles. *La Educación hoy frente al mundo del mañana*. Bogotá, Editorial Voluntad-Unesco, 1977, p.p. 39-49.
  13. Mora, Julia. *Orientación pedagógica del futuro docente a nivel de licenciatura* en ICFES. La orientación pedagógica en los programas de formación de docentes: Memorias. Bogotá, D.C., Subdirección Académica, 1988, p. 34.
  14. Batista J. Enrique E. *Formación pedagógica de maestros colombianos: una propuesta* en ICFES. La Orientación Pedagógica en los Programas de Formación de Docentes - Reunión de Decanos - Memorias. Bogotá, D.C., 1989, p. 39.
  15. ICFES. *Hacia una recuperación de la reflexión pedagógica* en ICFES. La Orientación Pedagógica en los Programas de Formación de Docentes - Reunión de Decanos - Memorias. Bogotá, D.C., 1989, p. 39.
  16. Batista J., *Ibidem*, p. 39.
  17. Universidad Pedagógica Nacional. *Hacia la definición de una política para la investigación en la Facultad de Ciencia y Tecnología*. Bogotá, D.C., Facultad de Ciencia y Tecnología, 1989, p.p. 1-2.
  18. Yepes Parra, Antonio. *Hacia una acción nacional educativo-cultural*. Bogotá, D.C. Discurso pronunciado por el Ministro de Educación Nacional en el acto de instalación del Congreso Pedagógico Nacional, 18 de agosto de 1987, p.4.
  19. ICFES. *Hacia una recuperación de la reflexión pedagógica...* op. cit., p.p. 5-6.
  20. Corsi, op. cit. p. 245.
  21. Tames, María Adela. *Los equipos de trabajo en educación*, en García Hoz y otros. Perfiles de la Educación Contemporánea. Bogotá, Ediciones del Instituto Superior de Educación, 1972, p.p. 61-62.

## ANÁLISIS Y EVALUACION DEL CONTROL DEL ACTUADOR DE UN ROBOT

JOSE ANTONIO ABADIA  
Profesor Titular Univalle, Cali

FEDERICO J. BULDIN  
Ing. de Sistemas Bucaramanga

LEONILA GUTIERREZ  
Ing. Industrial Pereira

### RESUMEN

Un robot es hoy día un elemento importante de la producción que se caracteriza principalmente por su flexibilidad. Esta flexibilidad lo convierte en una herramienta de propósito general, que puede adaptarse a aquello que debe producirse en cualquier momento simplemente mediante un cambio de programa. Esta característica lo hace novedosos con respecto a las máquinas automáticas. En la Universidad del Valle, Departamento de Electricidad, se está realizando un proyecto en robótica industrial que tiene como fin construir un prototipo de un robot de soldadura, basados en el robot Miller MR-5 evaluado en Univalle y utilizado actualmente en la empresa *Codinter Ltda.*

El trabajo presentado en este artículo contiene el análisis y la evaluación de las características del sistema de control de una articulación del robot Miller MR-5, primero llegado a Colombia.

Las características analizadas se basaron en los elementos del control, en las relaciones de velocidad y ángulo en función del tiempo y del torque del motor utilizado en función de la velocidad.

Se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio, el diagrama general de bloques del sistema de control, el diagrama de bloques del control de la articulación, la función de transferencia y las curvas de las relaciones mencionadas arriba.

### 1. INTRODUCCION

Los robots tienen varias aplicaciones como son: soldadura, pintura, transporte de material pesado o explosivo, etc. La aplicación seleccionada para el proyecto fue la soldadura, debido a varios aspectos, entre ellos:

- a. La soldadura es una de las áreas que requiere de condiciones técnicas difíciles y peligrosas para el ser

humano como precisión, intensidad y energía liberada.

- b. Análisis socio-económicos muestran aspectos que justifican esta área en Colombia, según resultados de una investigación dirigida por Francisco Urrea, profesor de la Universidad del Valle.
- c. Se cuenta con el apoyo científico en el área de soldadura de la Unidad de Metalurgia de Univalle.

La intención general del proyecto es la investigación, promoción y desarrollo de robots industriales en Colombia. El proyecto total se reorganizó en dos etapas más como conclusión de las dos primeras. En la tercera se elaborarán los requerimientos, las especificaciones y el diseño de un eje. Para la cuarta etapa se propone la construcción del prototipo de robot.

El sistema de control de MR-5 gobierna los actuadores que mueven la estructura mecánica en función de las órdenes emitidas por el usuario y de los datos recogidos por los sensores.

#### 1.1 Características de un robot industrial

Un robot es un manipulador reprogramable de uso general, con sensores externos, que puede efectuar diferentes tareas. Los sensores asociados con el sistema de control proveen cierto rango de autonomía e inteligencia al robot.

Un robot industrial es un manipulador de uso general controlado por computador que consiste de algunos componentes rígidos conectados en serie, mediante articulaciones prismáticas o de revolución. El final de la cadena está fijo a una base soporte, mientras el otro extremo está libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar tareas de montaje. Se diseña para alcanzar una pieza localizada dentro de su volumen de trabajo. Dicho volumen es la esfera de influencia de un robot cuyo brazo puede colocar

el montaje de la muñeca en cualquier punto dentro de la esfera.

#### 1.2 Propiedades típicas de un robot

Dos de las propiedades que caracterizan a un robot son:

##### a) La versatilidad:

Es la potencialidad (posibilidad) estructural (mecánica) de ejecutar tareas diversificadas y/o ejecutar una misma tarea de forma diversificada.

##### b) La autoadaptabilidad al entorno:

Esta palabra significa, simplemente, que un robot debe, por sí solo, alcanzar su objetivo (la ejecución de una tarea), a pesar de las perturbaciones imprevistas (pero limitadas) del entorno, a lo largo de la ejecución de la tarea.

Esta propiedad, que empieza justamente a aparecer en los robots industriales que nos interesan, supone que el robot sea consciente de su entorno, por lo tanto que posea sentidos artificiales. En este campo, lo que sabe hacerse todavía es muy modesto en relación con la potencia de comprensión del entorno que tiene el hombre. Pero es por este lado donde las investigaciones son más intensas.

#### 1.3 Funcionamiento de un robot:

El controlador o "cerebro" del robot tiene el papel principal.

Posee en sus memorias:

##### a) Un modelo del robot físico:

Es decir, las relaciones entre las señales de excitación de los accionadores y los desplazamientos que son consecuencia de ellas.

##### b) Un modelo del entorno:

Es decir, una descripción de lo que se encuentra en el espacio que puede alcanzar, por ejemplo, las zonas que no debe atravesar ya que hay obstáculos.

##### c) Programas:

Que le permiten controlar el robot físico con el fin de que éste ejecute lo que debe. Son los algoritmos de control. A lo largo de la ejecución de una tarea, el ordenador, en todo instante:

percibe el estado del robot gracias a la información propioceptiva.

— percibe el estado del entorno gracias a la información exteroceptiva.

— recurre a diversos modelos y programas registrados, y

— genera una orden (es decir, señales de potencia de los accionadores), que hace progresar el robot físico hacia la ejecución correcta de la tarea que se le ha pedido.

#### 1.4 El robot MR-5

El robot Miller MR-5 se utiliza principalmente en soldadura tipo GMAW. Es del tipo articulado horizontalmente con cinco ejes manejados por servomotores DC. (Ver Figura 1).

Utiliza el método de enseñanza directo con capacidad de 48 kbytes en memoria de burbuja magnética. Tiene capacidad de 255 programas, cada uno con un máximo de 999 secuencias.

La unidad de control consiste de: interfaz al computador, interfaz a la fuente de soldadura, módulo de programación, módulo de operación y módulo de arranque.

## 2. CONTROL DE MANIPULADORES DE ROBOTS

El objetivo del control del robot es mantener la respuesta dinámica del mismo, de acuerdo con algún criterio de funcionamiento preespecificado.

El problema de control de movimiento consiste en:

- a) Obtener los modelos dinámicos del manipulador.

- b) Utilizar estos modelos para determinar leyes o estrategias de control para conseguir la respuesta y el funcionamiento del sistema deseado.

Para efectos del análisis de control, el movimiento de un brazo robot se efectúa en dos fases distintas:

- a) Control del movimiento de aproximación  
b) Control del movimiento fino.

El control de aproximación sucede cuando el brazo se mueve desde una posición/orientación inicial hasta la cercanía de la posición/orientación final deseada a lo largo de una trayectoria planificada.

El control de movimiento fino sucede cuando el efector final del brazo interacciona dinámicamente con el objeto utilizando información de la realimentación sensorial para completar la tarea.

## 3. SISTEMA DE CONTROL DEL ROBOT MR-5

Un robot industrial es un sistema que debe trabajar en tiempo real, puesto que ha de ser capaz de calcular la posición de cada eje en periodos muy pequeños, denominados periodos de muestreo. Esto supone, en algunos casos, la ejecución de complejos cálculos matemáticos para la realización de las transformaciones de coordenadas, cálculo de la posición de cada eje en función del punto efectivo de la herramienta en el espacio euclidiano y viceversa. Además, deben realizarse las tareas propias del control de posición de cada eje mediante la ejecución de algoritmos que, en el caso del MR-5 se basan en criterios de control PID.

El robot MR-5 posee una arquitectura jerárquica multiprocesador representada en la Figura 3, típica en aplicaciones de tiempo real.

Al ser ejecutado por un microprocesador el algoritmo de regulación PID,

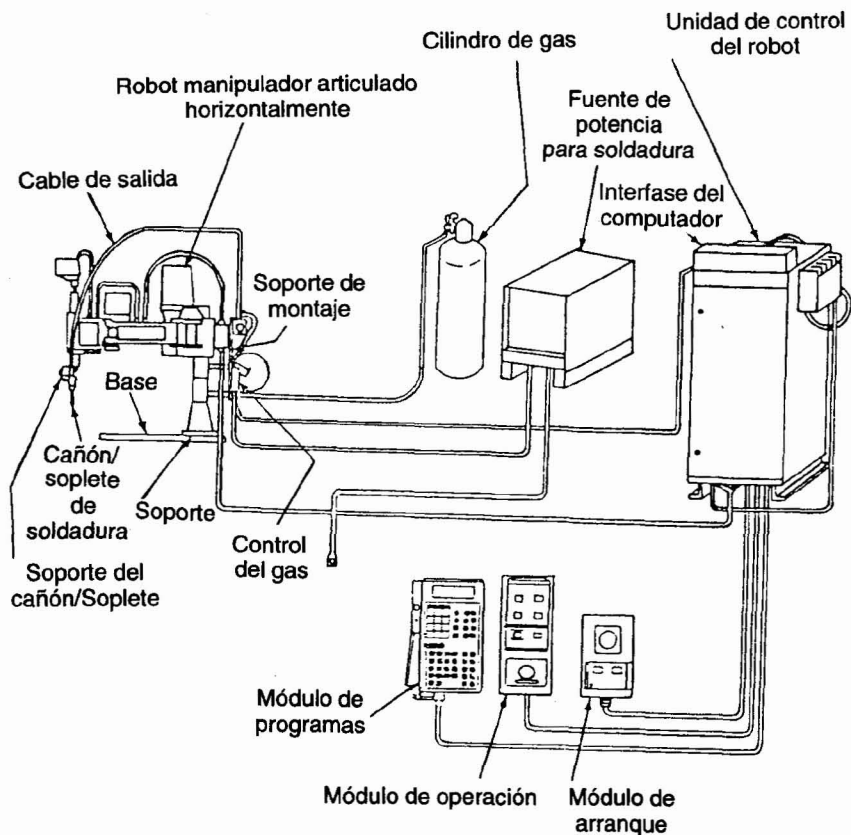


Figura 1. Componentes del sistema MR-5.

los coeficientes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  pueden ajustarse a tal punto que no se hace estrictamente necesario conocer la estructura detallada del proceso a controlar. Para la programación en un computador digital se puede escribir:

$$Ep(k) = Ep(k-1) + dEp(k)$$

donde  $k$  es el instante actual de muestreo.

### 3.1 Estructura del sistema de control

El sistema de control es un conjunto de programas que tienen la responsabilidad de gestionar los recursos tanto físicos (actuadores, sensores, visualizadores, disco, etc.) como lógicos (ta-

reas de operación, programas de ayuda, etc.) y coordinar los sucesos del robot (secuencia de órdenes, lectura de sensores, etc.)

El nivel de operación elemental está formado por cinco subsistemas basados cada uno en un microprocesador Z-80 encargados de los algoritmos de control del sistema de actuación de un eje.

## 4. CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL DE MR-5

A continuación se enumeran los dispositivos principales de control del robot MR-5 y su función principal:

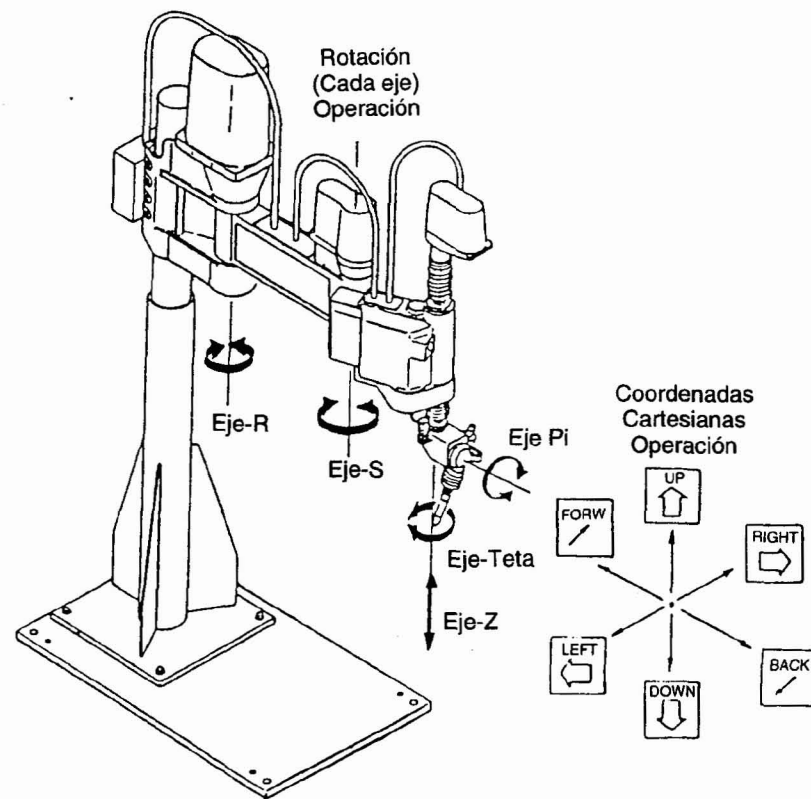


Figura 2. Grados de libertad del Robot MR-5.

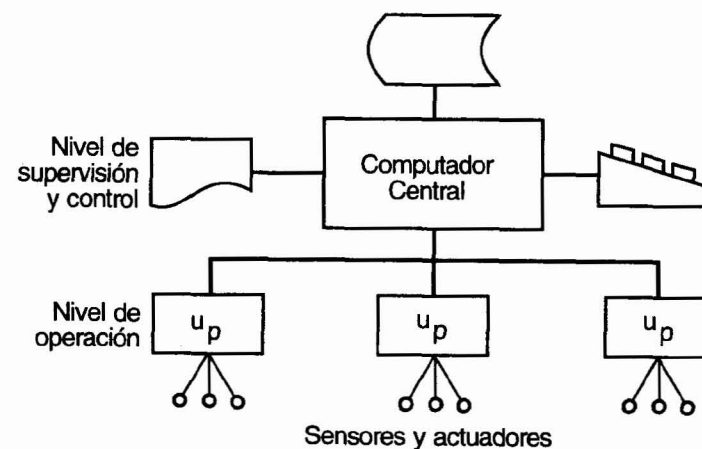


Figura 3. Arquitectura típica de sistemas en tiempo real.

**CPU PCB:** Operación de entrada/salida de señales de comando.

**Servo D/A PCB:** Entra el pulso de comando desde la CPU PCB y el pulso de realimentación de posición del codificador dentro del contador de desviación, se ejecuta la conversión D/A de esta salida del contador y sale la señal analógica como un comando de velocidad al servoamplificador.

**Unidad Módulo Transistor:** Saca la corriente para manejar el servomotor directamente.

**Servo motor (M):** Directamente maneja el manipulador.

**Tacómetro (TG):** Monitorea el trabajo de velocidad del robot.

**Codificador (E):** Detecta la posición y dirección rotacional del robot. También detecta la posición original del robot (origen)

## 5. FUNCION DE TRANSFERENCIA

Explicaremos el diseño conceptual de un sistema de control con realimentación y su diagrama esquemático. No-

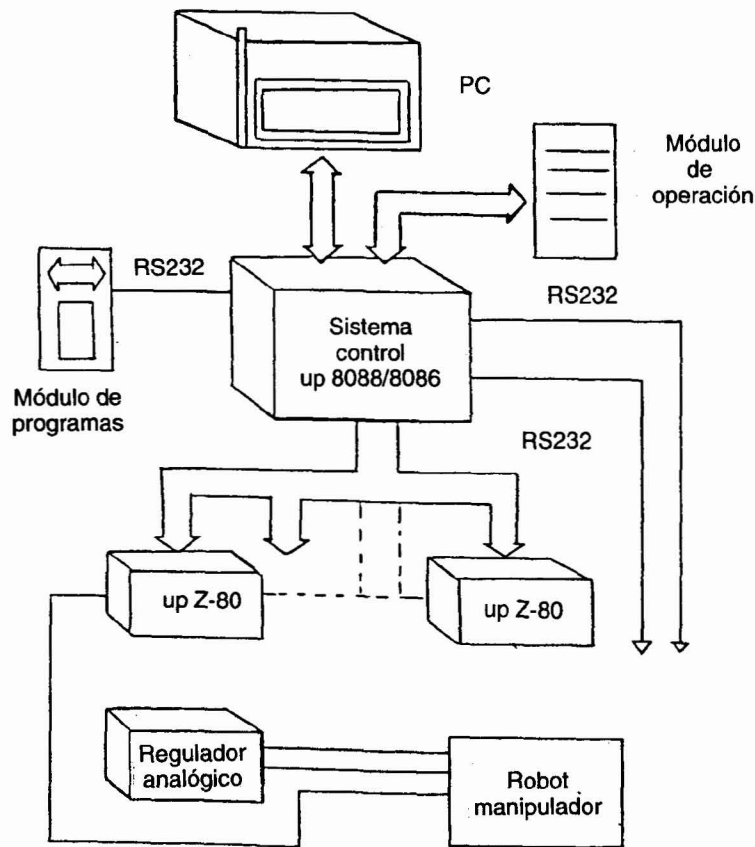


Figura 4. Arquitectura del MR-5.

sotros obtenemos su modelo matemático lineal y lo presentamos en forma de diagrama de bloque y la representación de las variables de estado. La representación de las ecuaciones de estado puede ser obtenida directamente tanto de las ecuaciones como del diagrama bloque.

La forma estándar de la representación de estado que nosotros empleamos se describe por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Planta: } \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_1v(t) \quad (1)$$

$$\text{Ley de Control: } u(t) = Nr(t) - Kx(t) \quad (2)$$

$$\text{Salida: } y(t) = Cx(t) \quad (3)$$

El sistema a ser controlado y el actuador son comúnmente llamados la *planta* en la terminología de control. En las ecuaciones anteriores,  $x(t)$  es un vector de estado  $n$ -dimensional,  $u(t)$  es la entrada de control  $m$ -dimensional,  $v(t)$  representa los disturbios,  $r(t)$  es un vector de entrada de comandos  $m$ -dimensional, y  $y(t)$  es un vector de salida de control  $m$ -dimensional. Se asume que las dimensiones de  $u$ ,  $r$ ,  $e$  y con las mismas. Aquí,  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$ ,  $N$ ,  $K$  y  $C$  son matrices constantes de dimensiones apropiadas.

Las ecuaciones de estado del sistema de control de lazo cerrado, se obtienen sustituyendo  $u$  de la ecuación (2) en la ecuación (1) así:

La función de transferencia que relaciona la salida  $y$  con la entrada  $r$  en el sistema en lazo cerrado

$$\dot{x}(t) = (A-BK)x(t) + BNr(t) + B_1v(t) \quad (4)$$

se puede obtener directamente el diagrama de bloques o desde las ecuaciones de estado, ecuación (2) y (4), como sigue. Haciendo transformaciones de Laplace a la ecuación (7.4) con condiciones iniciales  $x(0) = 0$ , nosotros obtenemos:

$$sX(s) = (A-BK)X(s) + BNR(s) + B_1V(s)$$

y de aquí tenemos que:

$$(sI-A+BK)X(s) = BNR(s) + B_1V(s)$$

donde  $I$  es una matriz identidad de  $n \times n$ . Entonces,

$$X(s) = (sI-A+BK)^{-1} BNR(s) + (sI-A+BK)^{-1} B_1V(s)$$

Haciendo transformada de Laplace a la ecuación (3) y sustituyendo  $X(s)$  en la ecuación precedente, obtendremos:

$$Y(s) = C(sI-A+BK)^{-1} BNR(s) + C(sI-A+BK)^{-1} B_1V(s) \quad (5)$$

Entonces tenemos:

$$(sI-A+BK)^{-1} = \frac{\text{Adj}(sI-A+BK)}{\det[sI-A+BK]}$$

la función de transferencia en lazo cerrado que relaciona la salida  $Y(s)$  con el comando de entrada  $R(s)$  está dada por:

$$G(s) = \frac{C[\text{Adj}(sI-A+BK)]BN}{\det[sI-A+BK]} \quad (6)$$

y la que relaciona la salida  $Y(s)$  con los disturbios o perturbaciones  $V(s)$  por:

$$G(s) = \frac{C[\text{Adj}(sI-A+BK)]B_1}{\det[sI-A+BK]} \quad (7)$$

Teniendo esta función de transferencia la podemos convertir en una forma matemática apropiada para llevarla al computador, con el fin de demostrar el funcionamiento del servomecanismo y así podemos investigar los diversos diseños del posible robot a construir y entender el control del actuador.

## 6. EVALUACION EN LABORATORIO DE TACOMETRO/CODIFICADOR Y MOTOR

La evaluación en el laboratorio consiste en alimentar un motor con una fuente variable de 0 a 12 voltios, este motor está acoplado mediante una correa al tacómetro y éste a su vez se encuentra acoplado por otra correa con el codificador. Con los osciloscopios se toman las medidas en los dos dispositivos.

El codificador muestra primero la señal de  $B$  y después la señal de  $A$ , se



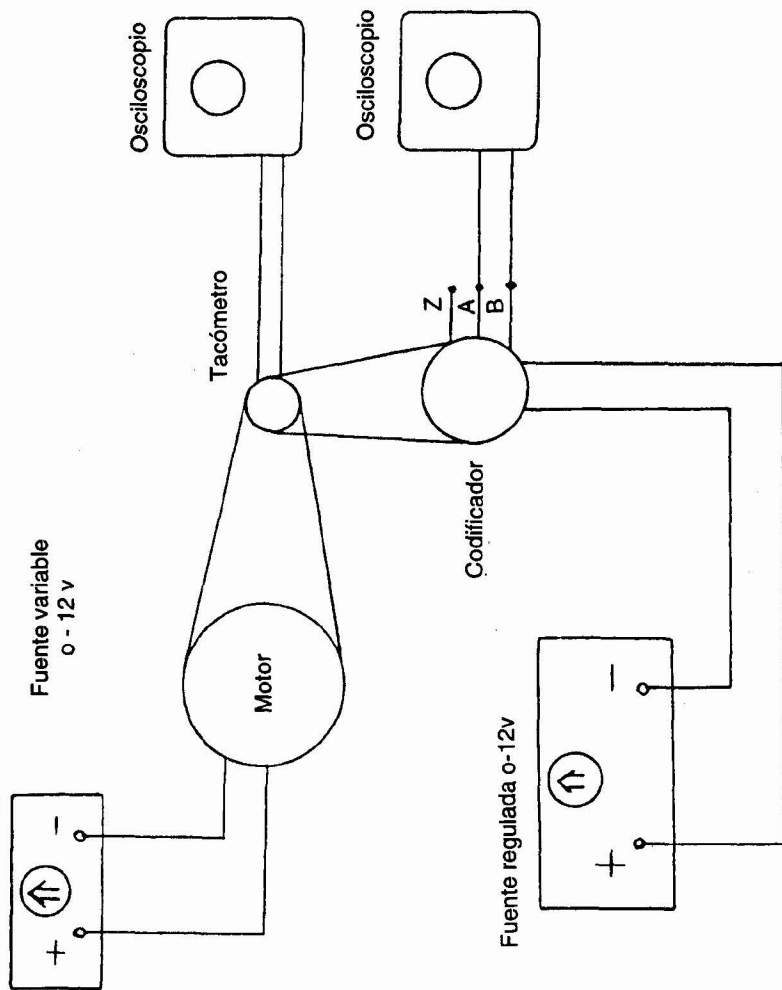


Figura 5. Diagrama de bloques codificador-tacómetro.

nota que al invertir el giro sale primero la señal de A y luego la señal de B.

La señal de Z no se pudo evaluar porque los elementos de laboratorio disponibles no lo permiten.

La prueba del motor consistió en conocer algunas características del servomotor utilizado en una articulación del robot MR-5.

En el laboratorio se acopló un generador de características similares al servomotor y se tomaron los datos que dio el generador. Se simuló una carga con una resistencia. Los datos técnicos del motor son 3.000 RPM, 1.7 amperios y 75 voltios, por su parte, los datos de placa del generador son 2.000 RPM, 1.3 amperios y 48 voltios.

Como el motor es de mayor potencia que el generador, 80 wattios del motor contra 62.4 del generador, éste no da toda la carga al motor porque cuando se aumenta, cae la tensión en los terminales del generador.

Las condiciones del generador no se dan como lo indican sus datos de placa. El generador funciona en shunt, no ofrece la tensión de salida que se esperaba para una carga determinada. Al poner 0.3 amperios en la carga se cae el voltaje en los terminales del generador y realmente su capacidad es hasta de 1.3 amperios. El generador funciona correctamente como motor, pero como generador tiene problemas, esto puede ser debido a problemas internos del motor que trabajamos como generador.

## 7. CONCLUSIONES

- La estructura de control varía enormemente en función del tipo de robot y de las prestaciones que debe presentar. Cuanto menor es la complejidad del robot, más integradas están las funciones en una estructura compacta.
- El sistema de control utilizado en una articulación del robot MR-5 es

de lazo cerrado, con realimentación negativa y de servomecanismo.

- El sistema de control de robot MR-5, a nivel de la articulación es de tipo Control Digital Directo (DDC), donde los controladores analógicos convencionales son reemplazados por software.
- El sistema de control del robot MR-5, a nivel de la tarjeta máster es de tipo supervisor y su función es colocar los set points. Este control se encuentra a un nivel superior del control digital directo (DDC).
- La tarjeta máster del robot MR-5, funciona con un microprocesador 8086 y a nivel de las articulaciones trabaja con microprocesadores Z-80.
- En el robot MR-5 la realimentación de velocidad es analógica y la de posición es digital.
- El actuador utilizado por el robot MR-5 es un servomotor DC, con 3.000 RPM, 1.7 amperios, 75 voltios y 80 wattios.
- El sensor utilizado para realimentación de posición es un tacómetro. El sensor utilizado para realimentación de posición es un codificador incremental.
- El motor, el tacómetro y el codificador están acoplados entre sí por correas dentadas para evitar el deslizamiento.
- La técnica utilizada para hallar la función de transferencia de la articulación es por ecuaciones de estado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abadía, J.A. *Proyecto Robótica Industrial - Etapa III*. Univalle, Cali, 1990.
- Abadía, J.A. *Proyecto Robótica Industrial - Informe Etapa II*. Univalle, Cali, Nov. 1989.
- Ramírez, J.M. *Notas de clase, curso Teoría de Sistemas de Control I*, Univalle, Cali, 1990.

Strum, R.D.; Kirk D.C. *First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing*. Addison-Wesley Publishing Company.

Gayakwad, R.; Sokoloff, L. *Analog and digital control systems*. Prentice Hall International Editions.

*Curso teórico-práctico control digital, Memorias*. Asociación Nacional de Ingeniería de Control. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín.

Fu, K.S.; González, R.C.; Lee C.S.G. *Robótica. Control, detección, visión e inteligencia*. Mc Graw-Hill/Interamericana de España S.A., 1988.

Ferraté G.; Amat, J. y otros. *Robótica industrial Marcombo* - Boixareu Editores, Barcelona - México, 1986.

Hostetter, G.H. Savant, C.J.; Stefani R.T. *Sistemas de control*. Nueva Editorial Interamericana S.A. de C.V. México, D.F. 1984.

Klafter, R.D.; Chmielewski, T.A.; Negin, M. *Robotic engineering and integrated approach*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1989.

D'sonza, A.F. *Design of control systems*. Prentice Hall International Editions.

Coiffet, P. Chirouze, M. *Elementos de robótica*. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1986.

Miller Electric MFG. Co. *MR-5 Owner's Manual*.

## LA EFICIENCIA DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN CALI

GUSTAVO LOPEZ MERCADO

Economista de la Universidad Nacional, Bogotá. Especialización en Finanzas Públicas, Naciones Unidas. Estudios Magíster de Administración Industrial, Universidad del Valle. Asesor y Consultor Económico, Profesor de la Universidad del Valle, ESAP, ICESI.

### INTRODUCCION

Para analizar el transporte público en Cali se limita la observación diferenciada a los dos modos de transporte urbano que configuran el común denominador de su oferta y demanda, me refiero a los buses TSS y a los ejecutivos.

Para los países en vías de desarrollo como el nuestro, los costos de transporte representan una variable de proporción significativa dentro de los gastos de las familias o de las personas. Por tal motivo, es imperioso racionalizarlos al proponer políticas económicas y estrategias que beneficien tanto a la oferta (empresas privadas) como a la demanda (los usuarios o consumidores); que permitan descender los costos, brindar un mejor servicio y la posibilidad de reducir las tarifas o no incrementarlas durante un prudente período. Esta situación encaja dentro de las perspectivas de la Apertura Económica propuesta por el actual gobierno. Así como se hacen diálogos y pactos con la Andi, la guerrilla y otros grupos de presión, donde el gobierno es siempre generoso en sus propuestas con el fin de obtener el bienestar colectivo y lógi-

camente con las estupendas ganancias que consiguen esos grupos de presión; sería entonces oportuno suprimir los aranceles para la importación de buses y repuestos en el transporte público, la eliminación de los monopolios del sector transporte y otorgar suficiente crédito con intereses adecuados. La contrapartida por parte de los empresarios privados al implementarse la libre competencia, se encaminaría a renovar el equipo, adquiriendo modernos buses con amplia capacidad instalada que suscitaría a reducir sus tarifas y que todos los estratos sociales tengan acceso a un buen servicio.

Este cambio convendría a los transportadores, usuarios y en fin a toda la sociedad, al recibir mayores beneficios, incremento de ganancias, comodidad, rapidez, alta operación en las horas pico, mayor cobertura, reducción de la contaminación por eliminación de ruidos y gases, mejor uso de las rutas, menores costos de operación y mantenimiento de los buses y reducción de gastos en la conservación de las vías.

Esto se afirma, con base en la evaluación económica, donde concluyo