

# SISTEMA DE GUIADO PARA UN ROBOT MÓVIL, BASADO EN LÓGICA DIFUSA<sup>1</sup>

Rodrigo Carrasco Sch. y Aldo Cipriano Z.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile  
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. Email: rax@ing.puc.cl

**Resumen:** Este trabajo presenta un nuevo método de guiado para un robot móvil de dos ruedas independientes, basado en reglas difusas, el que ofrece diversas ventajas respecto a los más conocidos. Se analizan dos problemas de control: llevar el robot de un punto fijo a otro y que el robot sea capaz de perseguir una referencia móvil. Se considera primeramente el sistema en lazo abierto, que permite determinar los parámetros necesarios para el diseño. Posteriormente se presenta un control PID que sirve para comparar con los controladores difusos analizados: un control PI difuso tipo Mamdani, un control difuso tipo Takagi – Sugeno y uno basado en reglas de conocimiento.

**Abstract:** This work presents a new guidance system for a two independent wheeled mobile robot, based on fuzzy logic, which offers several advantages over the most known controllers. Two control problems will be analysed: moving the robot from one point to another, and making the robot chase a mobile reference. First, using the open loop model of the robot, the design parameters will be determined and then, a PID controller will be presented, which will be used for a comparison with three fuzzy controllers: a fuzzy PI Mamdani type controller, a Takagi – Sugeno type one and one based on heuristic rules.

**Keywords:** fuzzy control, fuzzy logic, robot control, robot navigation, tracking.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se utilizan robots móviles para un gran número de tareas, ya sea por la facilidad que tienen para movilizarse en algunos terrenos o por los riesgos y dificultades que tiene que enfrentar el ser humano (Dorf *et al.*, 2000). Ejemplos de ello son los robots Pathfinder y Nomad, ambos diseñados para la exploración espacial. También existen robots encargados de explorar en nuestro planeta, al interior de volcanes, en las profundidades del océano o en los laberintos de las pirámides, logrando llegar a lugares inaccesibles para el hombre. En los últimos años ha surgido también una gran gama de robots destinados al entretenimiento, todos los cuales requieren de sofisticados sistemas de control para desarrollar sus variadas funciones.

En este trabajo se pretende comparar, usando

simulación, el desempeño de sistemas de control automático que permitan guiar un robot móvil de dos ruedas. Los sistemas de control tendrán dos fines principales. Primero, deben ser capaces de llevar el robot de un punto a otro, estando inicialmente en reposo y en cualquier dirección; esto considera también que la llegada al punto objetivo debe ser a baja velocidad, ya que al llegar, el robot debe detenerse por completo. Un segundo objetivo, consiste en lograr que el robot alcance un punto de referencia que se encuentre en movimiento, del cual sólo se conocerá la posición. El problema se transforma así en uno de “tracking”.

Para realizar las comparaciones, se utilizarán modelos matemáticos programados en Simulink. En el caso de la referencia en movimiento, ésta tendrá una trayectoria circular en torno a la posición inicial del robot. Se modificará la velocidad del objetivo, para así determinar en qué rango es posible que el robot logre alcanzarlo.

---

<sup>1</sup> Este trabajo fue presentado en el XV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (Octubre 2002)

Como criterios de comparación, se utilizará el tiempo de respuesta y la velocidad angular que deben alcanzar los motores, la que está asociada a la energía requerida.

## 2. MODELO DEL ROBOT

### 2.1 Variables del Modelo

Se ha optado por utilizar como modelo un robot móvil de dos ruedas, cada una de las cuales se encuentra conectada a un motor independiente. Se establecen como variables manipuladas las velocidades angulares de las ruedas ( $\omega_1 = \dot{\theta}_1$  y  $\omega_2 = \dot{\theta}_2$ ), las que se miden con gran precisión utilizando shaft encoders conectados a las ruedas. Se obtiene así un modelo más general, que permite la consideración de cualquier tipo de robot, sin importar su sistema de motores.

Para realizar el control, se requiere medir las variables de posición del robot (sus coordenadas cartesianas con respecto a un origen), y la dirección en la que se encuentra. Esto se puede implementar a partir de los shaft encoders antes mencionados, y conociendo las condiciones iniciales (posición y dirección) del robot. Se comprobará posteriormente, que el sistema de control difuso basado en reglas de conocimiento requiere sólo conocer la distancia y la posición relativa del objetivo con respecto al robot, es decir si está enfrente o atrás, y si se encuentra a su derecha o izquierda.

### 2.2 Ecuaciones de Movimiento

Utilizando relaciones geométricas simples, se asocia el ángulo de giro ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ) de ambas ruedas a la velocidad y dirección de movimiento del robot a través de las siguientes relaciones:

$$\varphi = \frac{r(\theta_1 - \theta_2)}{2b} \quad (1)$$

$$V = \frac{r(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)}{2} \quad (2)$$

donde  $\varphi$  es el ángulo de dirección del robot con respecto a un eje fijo,  $V$  su velocidad tangencial,  $b$  la distancia entre las ruedas y  $r$  su radio (Wise, 1999). Proyectando estas relaciones sobre ejes ortogonales, se obtienen las ecuaciones de movimiento finales para el robot según cada eje:

$$\dot{x} = V \cos \varphi = \frac{r(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)}{2} \cos \left( \frac{r(\theta_1 - \theta_2)}{2b} \right) \quad (3)$$

$$\dot{y} = V \sin \varphi = \frac{r(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)}{2} \sin \left( \frac{r(\theta_1 - \theta_2)}{2b} \right) \quad (4)$$

Invirtiendo el sistema de ecuaciones (1) y (2), se deducen las siguientes relaciones, que son más simples para propósitos de control:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{V + b\dot{\varphi}}{r} \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{V - b\dot{\varphi}}{r} \quad (6)$$

Así, actuando sobre  $V$  y  $\varphi$ , se varían las velocidades angulares, las que se utilizan como variables manipuladas del robot.

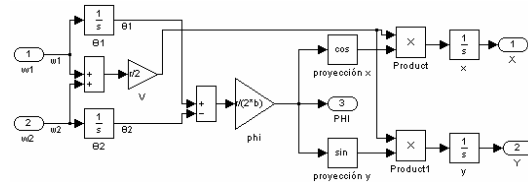


Fig. 1 Modelo del Robot Móvil en Simulink

## 3. SIMULACIÓN DEL MODELO

En base a las ecuaciones (3) y (4), se programó un modelo en Simulink (ver figura 1) que permite analizar la evolución en el tiempo de las variables del modelo y comparar su comportamiento ante diferentes sistemas de control.

El modelo programado se empleó para analizar el comportamiento dinámico del sistema ante perturbaciones y cambios en las variables de control. El análisis se realizó modificando  $V$ ,  $\varphi$  y las velocidades angulares  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , comprobándose que las salidas se encuentran acopladas, ya que cambios en cualquiera de las variables, produce variaciones en ambas componentes de la posición. Se deduce que es difícil lograr un control independiente para cada coordenada, por lo que conviene actuar sobre ambas. Otro aspecto importante a destacar es la no-linealidad de las ecuaciones, las cuales implican generalmente dificultades para el diseño de un controlador PID con respuesta óptima.

## 4. SISTEMAS DE CONTROL

Para el diseño de sistemas de control de robots es habitual utilizar criterios, como que no exista

sobreoscilación (overshoot) y que el error en estado estacionario sea menor al 1%. En este caso, además, se requiere que la velocidad de llegada sea baja, del orden de 0.01 [m/s], para que el robot se detenga por completo en poco tiempo.

Con el fin de comparar el desempeño de los sistemas de control difuso, se diseñó primero un sistema de control PID para manejar el robot. También se intentó con un controlador realimentado en el estado, pero este no entregó buenos resultados como el PID.

#### 4.1 Control PID

Este sistema de control consta de dos controladores PID desacoplados, uno para la velocidad  $V$  y otro para el ángulo  $\varphi$ . Las salidas de los controladores son introducidas en las ecuaciones (5) y (6) para determinar los valores de las velocidades angulares que se aplican al modelo del robot.

Para la sintonización de los parámetros, se utilizó el modelo linealizado del robot y el método del lugar de las raíces.

#### 4.2 Control PID Difuso Tipo Mamdani

Empleando los mismos criterios de diseño, se diseñó un control PI tipo Mamdani para mejorar el control de la dirección (Reinfrank, 1996). La velocidad del robot se controla con el mismo PID diseñado anteriormente, pues entregó buenos resultados.

Para un control PI tipo Mamdani, la base de reglas es de la forma:

$$\text{If } E \text{ is } LE \text{ and } \Delta E \text{ is } L\Delta E \text{ then } \Delta\varphi \text{ is } L\Delta\varphi \quad (7)$$

donde  $E$  representa el error y  $\varphi$  la dirección del robot.

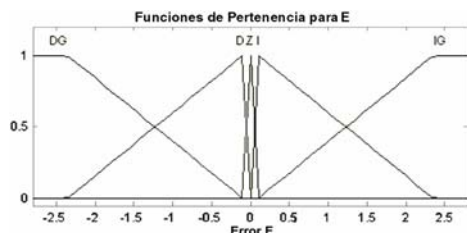


Fig. 2 Funciones de pertenencia para el error.

Las figuras 2, 3 y 4 muestran las funciones de pertenencia utilizados para cada variable, mientras la

tabla 1 presenta la base de reglas. El diseño de las funciones de pertenencia se basó en la observación de los resultados entregados por el control PID, para determinar los rangos de acción del error y de su variación. Las funciones de pertenencia para la variación del ángulo de dirección se determinaron en forma intuitiva, sobre la base del comportamiento que se deseaba.

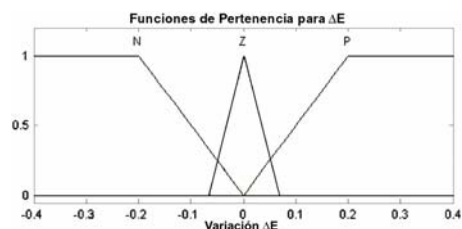


Fig. 3 Funciones de pertenencia para la variación del error.

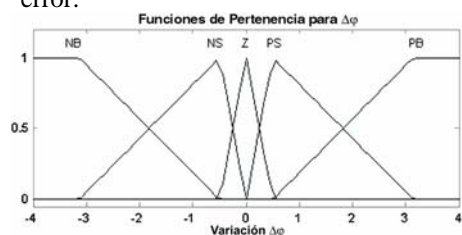


Fig. 4 Funciones de pertenencia para la variación de la dirección.

Tabla 1 Base de Reglas para el Control PI Tipo Mamdani

	PI Tipo Mamdani				
P	NB	Z	PS	PB	NB
Z	NB	NS	Z	PS	PB
N	PB	NB	NS	Z	PB
	ATD	ADD	ADZ	ADI	ATI

e

El controlador tipo Takagi-Sugeno se diseñó linealizando el sistema en diferentes puntos de operación y determinando un controlador PID para cada uno de ellos (Palm *et al.*, 1998). Los resultados obtenidos por simulación, fueron muy similares a los alcanzados con el control difuso tipo Mamdani, por lo cual no se analizará en mayor detalle.

#### 4.3 Control Difuso Basado en Reglas de Conocimiento

Considerando el problema de control desde un punto de vista cualitativo, es posible definir un conjunto de reglas que actúe directamente sobre las velocidades angulares de las ruedas, permitiendo un control efectivo del robot. La principal ventaja de este control es su simplicidad.

En este caso, las variables controladas son la distancia al objetivo y su dirección relativa al robot, simplificando los cálculos que se requiere hacer para determinarlas. Las variables manipuladas, son las velocidades angulares de los motores.

Las figuras 5, 6 y 7 muestran las funciones de pertenencia determinadas para este sistema de control. Las funciones de pertenencia para el ángulo de dirección se definen analizando el comportamiento del robot, intentando que realice las vueltas lo más cerradas que sea posible, para evitar giros largos que consuman tiempo y potencia. Se asignaron cinco funciones de pertenencia, según la posición del objetivo: atrás a la derecha (ATD), adelante a la derecha (ADD), adelante al centro (ADZ), adelante a la izquierda (ADI) y atrás a la izquierda (ATI). En el caso de las funciones de pertenencia para la distancia, éstas se determinaron basándose en el requerimiento de velocidad de llegada, pues se asoció las funciones que implican una mayor cercanía a una menor velocidad de los motores. En este caso se usan tres funciones de pertenencia: cerca (C), lejos (L) y muy lejos (ML). Las funciones de pertenencia para las velocidades angulares se determinaron considerando los rangos de operación de motores convencionales e intentando generar una desaceleración importante al llegar al objetivo para cumplir con los requisitos de diseño. Se utilizaron cinco funciones de pertenencia: gira hacia atrás rápido (ATR), hacia atrás a velocidad media (ATM), gira lento (L), hacia adelante a velocidad media (ADM) y hacia adelante rápido (ADR).

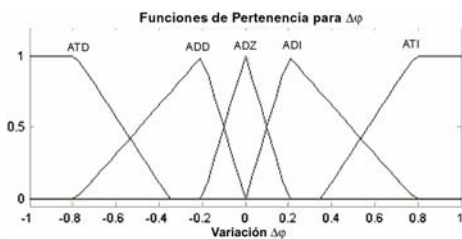


Fig. 5 Funciones de pertenencia para el error en la dirección.

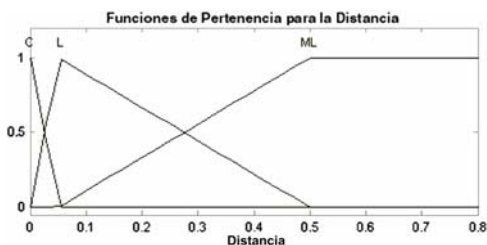


Fig. 6 Funciones de pertenencia para la distancia al objetivo.

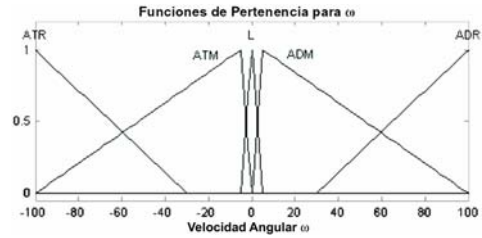


Fig. 7 Funciones de pertenencia para las velocidades angulares.

Las tablas 2 y 3 muestran la base de reglas para cada una de las velocidades angulares, siendo  $\omega_1$  la velocidad de la rueda derecha del robot y  $\omega_2$  la velocidad de la rueda izquierda. Estas reglas intentan que el robot inicialmente gire lo más rápido posible, y luego se dirija a su objetivo, minimizando así el tiempo de respuesta y la energía necesaria.

Tabla 2 Base de Reglas para el Control de  $\omega_1$  Utilizando Reglas de Conocimiento

	C	ATR	ATM	L	ADM	ADR
dist	L	ATR	L	ADM	ADM	ADR
ML	ATR	ADM	ADR	ADR	ADR	ADR
	<b>ATD</b>	<b>ADD</b>	<b>ADZ</b>	<b>ADI</b>	<b>ATI</b>	

$\Delta\phi$

Tabla 3 Base de Reglas para el Control de  $\omega_2$  Utilizando Reglas de Conocimiento

	C	ADR	ADM	L	ATM	ATR
dist	L	ADR	ADM	ADM	L	ATR
ML	ADR	ADR	ADR	ADM	ADM	ATR
	<b>ATD</b>	<b>ADD</b>	<b>ADZ</b>	<b>ADI</b>	<b>ATI</b>	

$\Delta\phi$

El diseño de la base de reglas se realizó utilizando conceptos cualitativos simples. Si el objeto está a la derecha, se debe girar la rueda izquierda hacia adelante y la trasera hacia atrás, para quedar apuntando en forma directa el objetivo, razón por la cual se buscó que la función de pertenencia correspondiente al conjunto ADZ (figura 5), sea lo más aguzada posible. Esto implica que el robot se dirige casi en línea recta hacia su objetivo, sin importar la dirección inicial.

## 5. PRUEBAS DE SIMULACIÓN

Las pruebas de simulación permitieron comprobar el cumplimiento de los dos objetivos de control por separado, para cada uno de los controles diseñados. Primero se llevó al robot desde el origen al punto (-2, 1), a partir de diferentes direcciones iniciales. Después, se buscó que siguiera un objetivo móvil que gira a velocidad constante en torno al punto inicial del robot, cuyo movimiento se inicia en una

dirección fija dada por  $\varphi=3\pi/4$ . Esto es equivalente a tener referencias sinusoidales para ambas coordenadas del robot. Cabe destacar que para esta prueba no se consideró el requisito de velocidad final pequeña.

Con el fin de comparar el desempeño de los diferentes sistemas de control implementados, se determinó el tiempo  $t_{fin}$  que tarda en promedio cada sistema para cumplir con el objetivo de control, y se calculó la expresión (8), que entrega información sobre el consumo de energía necesario:

$$J = \int_{t=0}^{t=t_{fin}} (\omega_1^2 + \omega_2^2) dt \quad (8)$$

### 5.1 Control PID

La figura 8 muestra los resultados de la simulación obtenidos con control PID, para direcciones iniciales  $\varphi=\pi$ ,  $\varphi=3\pi/4$ ,  $\varphi=\pi/4$  y  $\varphi=-\pi/4$ . Se observa que las curvas son bastante abiertas, lo que implica un tiempo de respuesta grande, al tener el controlador que ir corrigiendo continuamente la dirección de movimiento. Además, para su implementación es necesario determinar instante a instante las velocidades necesarias en cada rueda.

Con este control, la velocidad de llegada es en promedio 0,0093 [m/s], lo que cumple perfectamente los requisitos. El tiempo de respuesta varía entre 40,58 [s] y 41,74 [s]. Por su parte, el indicador (8) es en promedio  $J = 2,48 \cdot 10^5$ .

La figura 9 muestra la posición del robot y la referencia cada 0,2 [s]. Se puede observar como, debido a los giros lentos que realiza el robot, este tarda mucho en alcanzar la referencia, lográndolo sólo después de 12,92 [s].

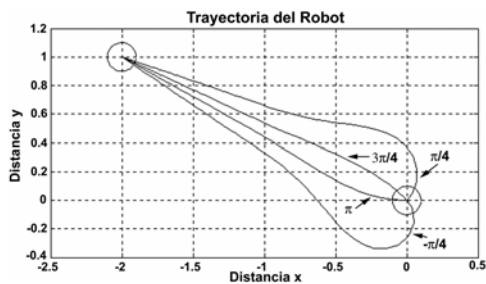


Fig. 8 Trayectorias usando el control PID.

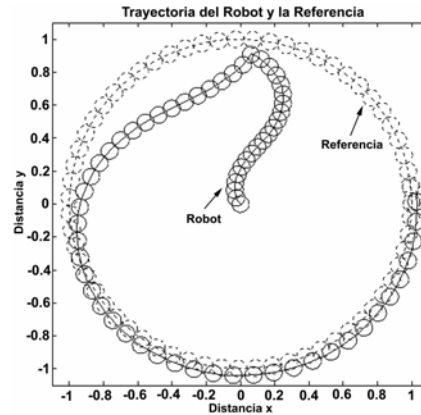


Fig. 9 Tracking usando el control PID.

### 5.2 Control PI Difuso Tipo Mamdani

En la figura 10, se aprecia claramente como disminuye el diámetro de las curvas obtenidas con el controlador PI difuso tipo Mamdani, lo cual se debe a que el sistema genera giros muy rápidos. Esto lleva a una pequeña reducción de los tiempos de respuesta, obteniéndose entre 40,53 [s] y 41,11 [s]. Para este caso, el indicador corresponde a  $1,67 \cdot 10^5$ , que es menor que con control PID.

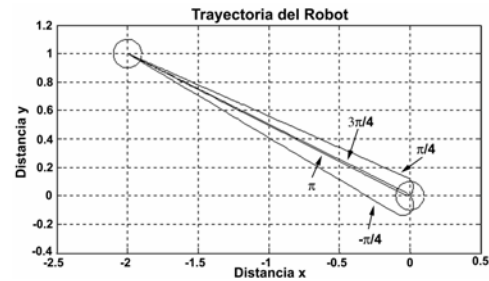


Fig. 10 Trayectorias usando el control PI difuso.

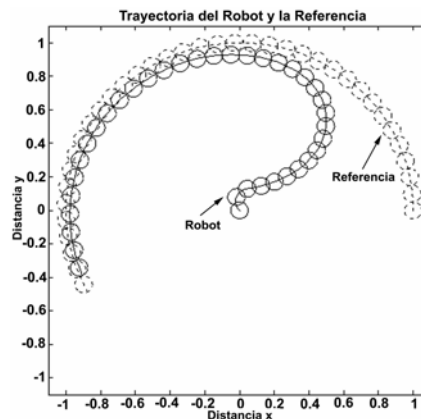


Fig. 11 Tracking usando el control PI difuso.

La figura 11 muestra que para alcanzar la referencia, el robot se desplaza con giros más cerrados, lo cual le permite alcanzar en forma más rápida la referencia. Con este control, el robot tarda 7,29 [s], tiempo significativamente menor al obtenido con control PID.

### 5.3 Control Difuso Basado en Reglas de Conocimiento

La figura 12 muestra claramente que el resultado obtenido con el esquema de control propuesto, es superior al alcanzado con los otros controladores. Esto se debe a que inicialmente el robot se dirige directamente a su objetivo, perdiendo menos tiempo y energía en las vueltas. El tiempo de respuesta decae significativamente, quedando entre 24,86 [s] y 27,53 [s], a la vez que el indicador de mérito se reduce en un orden de magnitud, obteniéndose  $J = 2,89 \cdot 10^4$ , con lo cual se cumple con los requisitos de velocidad de llegada pequeña. Como era de esperar, una respuesta mucho más rápida implica que el robot alcanzará la referencia en un menor tiempo, logrando hacerlo en sólo 1,75 [s].

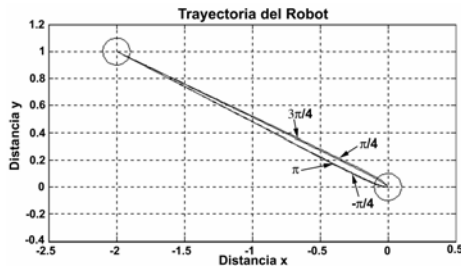


Fig. 12 Trayectorias usando el control difuso basado en reglas de conocimiento.

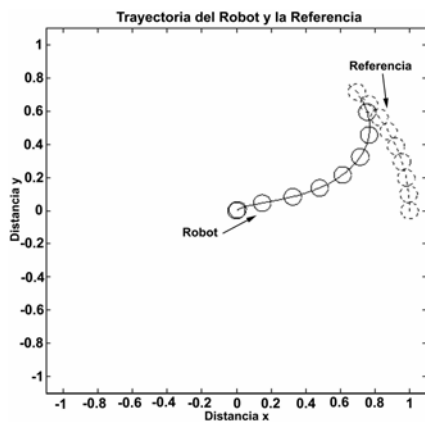


Fig. 13 Tracking usando el control difuso basado en reglas de conocimiento.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo presentado muestra que el control difuso ofrece importantes ventajas en el guiado de un robot móvil, al permitir la incorporación en el control de la lógica que usaría un ser humano para alcanzar su objetivo. Por una parte, se reducen así significativamente los tiempos de respuesta, en especial en el caso del control difuso basado en reglas de conocimiento, pues éste se encarga de localizar su objetivo y luego alcanzarlo lo más rápido posible. Además, se logra disminuir el consumo de energía requerido en el proceso, pues ésta se usa de mejor manera, realizando giros más pequeños y siguiendo caminos más cortos que en el caso del PID.

Otra implicancia importante que se desprende de este trabajo, es que la implementación de un control difuso es simple y no requiere de cálculos muy elaborados para sintonizar los parámetros de las funciones de pertenencia, para lo cual basta conocer los parámetros máximos de tolerancia de los motores; el controlador basado en reglas de conocimiento tiene además la ventaja de ser más simple en su implementación al nivel de hardware.

Como proyección de este trabajo, se estima interesante analizar el comportamiento de robots móviles con un mayor número de ruedas, en los que la tracción está generada por algunas de ellas, mientras la dirección la entregan otras. Dado que esos robots móviles también permiten la incorporación de reglas de conocimiento, es posible que se obtengan mejoras importantes en su funcionamiento al aplicar técnicas de control difuso.

## 7. REFERENCIAS

- Dorf, R. y R. Bishop (2000). *Modern Control Systems*. Prentice Hall.
- Palm, R., D. Driankov y H. Hellendoorn (1996). *Model Based Fuzzy Control*. Springer.
- Reinfrank, M. (1996). *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer.
- The Mathworks Inc. (1998). *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide*.
- Wise, Edwin (1999). *Applied Robotics*. Delmar Learning.