

CONTROL NEURODIFUSO DE UN MÓVIL AUTONOMO

CARLOS ARIEL CORDOBA

WILBER AUGUSTO NAVIA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

POPAYÁN

2003

CONTROL NEURODIFUSO DE UN MÓVIL AUTONOMO

CARLOS ARIEL CORDOBA

WILBER AUGUSTO NAVIA

Monografía para optar el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director

JUAN FERNANDO FLÓREZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

POPAYÁN

2003



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**Carlos Ariel Cordoba Montenegro.  
Wilber Augusto Navia.**

## **CONTROL NEURODIFUSO DE UN MOVIL AUTONOMO**

Monografía para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director  
Ing. Juan Fernando Flórez.

Departamento de Electrónica Instrumentación  
y Control.  
Popayán, 2003

*A nuestras madres...*



## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Otilio Alberto Navia Cerón, por facilitarnos su infraestructura para construir el Robot AMI.

Juan Fernando Florez, Ingeniero Electrónico director del proyecto

Leandro Cortés, Ingeniero de sistemas, por su colaboración.

Elena Muñoz España, Ingeniera en Electrónica.

Oscar Andrés Vivas Albán, Ingeniero Electrónico.

Pedro Vera Vera, Ingeniero Electrónico, Decano de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron al desarrollo del robot AMI.



## CONTENIDO

	Pag.
<b>Introducción</b>	0
<b>1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA</b>	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 ELEMENTOS BÁSICOS PARA SOLUCIÓN	3
1.2.1 Base conceptual	3
1.3 MODELO MATEMÁTICO	11
1.4 RECONOCIMIENTO DEL AMBIENTE	14
1.4.1 Rejilla de certeza	15
1.4.2 Red radial Basis	17
1.4.3 Estructura de la red Radial Basis	18
1.4.4 Métodos de aprendizaje	19
1.5 DIRECCIONAMIENTO DEL MÓVIL	20
1.5.1 Controlador difuso para dirección del móvil	20
<b>2. ESPECIFICACIONES HARDWARE</b>	23
2.1 SISTEMA MECÁNICO	23
2.1.1 Chasis	24
2.1.2 Carrocería	25
2.1.3 Conjunto Delantero	26
2.1.4 Conjunto Trasero	28



2.2 SISTEMA DE ULTRASONIDO	31
2.2.1 Sensores de Ultrasonido	31
2.2.2 Descripción del sistema ultrasónico	36
2.2.3 Transmisor de Ultrasonido	37
2.2.4 Circuito de Recepción	38
3. ESPECIFICACIONES SOFTWARE	42
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	42
3.2 MÓDULOS SOFTWARE IMPLEMENTADOS EN SERVIDOR	44
3.2.1 Módulo Comunicaciones	45
3.2.2 Módulo Cinemático	50
3.2.3 Módulo Muestreo Ultrasónico	51
3.3 MÓDULO RECONOCIMIENTO NEURONAL	53
3.4 MÓDULO CONTROLADOR DIFUSO REAL	67
3.4.1 Comportamiento alcanzar meta	68
3.4.2 Comportamiento Evasión	70
3.5 MODULOS SOFTWARE IMPLEMENTADOS EN EL ROBOT	72
4. RESULTADOS OBTENIDOS	75
4.1 SISTEMA MECÁNICO	75
4.1.2 Limitaciones	77
4.2 SISTEMA DE ULTRASONIDO	77
4.2.1 Anillo de Sensores	79
4.2.2 Restricciones	95
4.3 PRUEBAS CON OBSTÁCULOS	96
4.3.1 Configuración Uno	97
4.3.2 Configuración Dos	98
4.3.3 Configuración Tres	99

4.3.4	Configuración Cuatro	101
4.3.5	Configuración Difícil	102
4.3.6	Trayectorias con retorno	103
4.3.7	Trayectorias con retorno para varios obstáculos	105
4.3.8	Pasillo Corto	107
4.3.9	Trayectoria con ubicación opuesta respecto a la meta	108
4.3.10	Restricciones	109
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
5.1	Orientación del móvil	110
5.2	Sensores de Ultrasonido	112
5.3	Software Embebido	113
5.4	Sistema de Comunicaciones	114
5.5	Aplicaciones	114
	BIBLIOGRAFIA	116

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Diagrama del sistema Robot-Servidor	2
Figura 1. 2 Diagrama de los subsistemas del robot AMI	3
Figura 1.3 Modelo básico de una Neurona Artificial	5
Figura 1.4 Red multicapa FeedForward	5
Figura 1.5 Conjunto Clásico	8
Figura 1.6 Conjunto Difuso	8
Figura 1.7 Controlador difuso	9
Figura 1.8 Esquema del Robot	11
Figura 1.9 Representación vectorial de la posición del móvil	12
Figura 1.10 Angulos de orientación del móvil	13
Figura 1.11 Proyección del campo de vista	17
Figura 1.12 Estructura de la red Radial Basis	19
Figura 2.1a Bastidores	24
Figura 2.1b Bastidores. Vista Interior	25
Figura 2.2a y 2.2b Carrocería. Vista lateral	25
Figura 2.3 Carrocería	26
Figura 2.4 Conjunto Delantero	27
Figura 2.5 Soporte de las llantas	27
Figura 2.6 Conjunto trasero	28
Figura 2.7 sistema de impulsión	29
Figura 2.8 Esquema caja de reducción	30

Figura 2.9 Caja de reducción	30
Figura 2.10 Propagación del ultrasonido en el aire	31
Figura 2.11 Campo de acción	32
Figura 2.12 Efecto Cross Talk	34
Figura 2.13 Diagrama en bloques del anillo de sensores	36
Figura 2.14 Esquema del Transmisor y Receptor	37
Figura 2.15 Pulsos transmitidos	37
Figura 2.16 Esquema del Transmisor	38
Figura 2.17 Diagrama en bloques del circuito de recepción	38
Figura 2.18 Salida primera etapa de amplificación del receptor	39
Figura 2.19 Salida Segunda etapa de amplificación del receptor	40
Figura 2.20 Forma de onda de la señal de salida del receptor	40
Figura 2.21 Salida del recortador y limpiador	41
Figura 3.1 Diagrama esquemático del sistema	44
Figura 3. 2a Estructura de la trama básica	45
Figura 3. 2b Subdivisión del byte de encabezado	45
Figura 3. 3 Localización del módulo cinemático	50
Figura 3. 4 Ubicación de los sensores	51
Figura 3. 5 Arquitectura de la red Radial Basis	54
Figura 3.6 Configuración típica de obstáculos	59
Figura 3. 7 Resultado de la red Neuronal	60
Figura 3. 8 División de la rejilla de certeza	64
Figura 3. 9 Histograma instantáneo	65
Figura 3. 10 Histograma polar	66
Figura 3. 11 Diagrama del controlador difuso	67
Figura 3. 12 Universos de la variable difusa de entrada ANGDIFFER	68

Figura 3. 13 Universos de la variable de salida THETA	69
Figura 3. 14 Conjunto de salida THETA2	71
Figura 3. 15 Estructura del sistema móvil	72
Figura 3. 16 Diagrama de flujo del sistema de medición de distancias	73
Figura 4.1a Robot Simple	76
Figura 4.1b Robot Oruga	76
Figura 4.2a Orientación de los sensores en el robot	79
Figura 4.2b Ubicación de los sensores de ultrasonido	80
Figura 4.3 Medida real Vs Pareja de sensores 1	87
Figura 4.4 Medida real Vs Pareja de sensores 2	88
Figura 4.5 Medida real Vs Pareja de sensores 3	89
Figura 4.6 Medida real Vs Pareja de sensores 4	90
Figura 4.7 Medida real Vs Pareja de sensores 5	91
Figura 4. 8 Medida real Vs Pareja de sensores 6	92
Figura 4.9 Medida real Vs Pareja de sensores 7	93
Figura 4.10 Medida real Vs Pareja de sensores 8	94
Figura 4.11 y 4.12 Objeto no detectado	96
Figura 4.13 Configuración básica	97
Figura 4.14 Configuración con dos obstáculos	98
Figura 4.15 Configuración con dos obstáculos	99
Figura 4.16 Configuración con tres obstáculos	100
Figura 4.17 Configuración con tres obstáculos	101
Figura 4.18 Configuración con cuatro obstáculos	101
Figura 4.19 Configuración con cuatro obstáculos	102
Figura 4.20 Configuración difícil	103
Figura 4.21 Trayectoria con retorno para un obstáculo	104

Figura 4.22 Configuración con retorno para dos obstáculos	105
Figura 4.23 Trayectoria con retorno para cuatro obstáculos	106
Figura 4.24 Trayectoria con retorno para cinco obstáculos	107
Figura 4.25 Trayectoria en forma de corredor corto	108
Figura 4.26 Trayectoria con ubicación opuesta a la meta	109
Figura 5.1 Representación del error cometido por el robot	111

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 3.1 Funciones de movimiento	46
Tabla 3. 2 Funciones de ultrasonido	46
Tabla 3.3 Funciones auxiliares	47
Tabla 3.4 Valores reformados por las funciones del robot	49
Tabla 4.1 Nombre de las parejas de sensores de acuerdo a su ubicación	79
Tabla 4.2 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido uno	82
Tabla 4.3 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido dos	83
Tabla 4.4 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido tres	84
Tabla 4.5 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido cuatro	85
Tabla 4.6 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido cinco	86
Tabla 4.7 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido seis	87
Tabla 4.8 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido siete	88
Tabla 4.9 Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido ocho	89

## GLOSARIO

**ANTIMONIO:** Nombre dado a un material de aleación usado para la fabricación de piñones, tapas y otras partes mecánicas.

**BASTIDOR:** Armazón metálico que soporta la carrocería de un automóvil.

**CENTROIDE:** Centro de gravedad.

**DEMULTIPLICACIÓN:** Disminuir la velocidad por medio de engranajes.

**EFFECTO CROSS TALK:** Fenómeno ocurrido cuando un receptor recibe un eco diferente al que está esperando.

**FUZZY:** Difuso, borroso.

**LÓGICA DIFUSA:** Lógica en la cual, en contraste a la lógica formal, una variable puede tomar un valor en el rango de 0 a 1.

**MACATRONICO:** Modelo que involucra partes mecánicas y Electrónicas.

**PIC:** Familia de microcontroladores de Microchip.

**PIEZOELECTRICO:** Fenómeno por el cual un material produce vibraciones mecánicas debido al estímulo de un campo eléctrico o viceversa.

**RED NEURONAL ARTIFICIAL:** Elemento simple de procesamiento que recibe N entradas y las procesa simultáneamente.

**REGIÓN DE ACTUALIZACIÓN:** Región al alcance del ultrasonido desde la posición del robot.



TRANSDUCTOR: Dispositivo que convierte una variable física en una variable eléctrica.

CONJUNTO DELANTERO: Partes mecánicas que forman el sistema de rueda delantero.

CONJUNTO TRASERO: Partes mecánicas que forman el sistema de rueda trasero.

ULTRASONIDO: Sonido en frecuencias superiores a 20 KHz.

UNIVERSO DIFUSO: Rango de una variable difusa.

ZONA MUERTA: Espacio de tiempo seguido a una transmisión de pulsos ultrasónicos, en la cual aparece una señal no deseada en el receptor.



## RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo mecatrónico, el cual consta de un robot móvil y un Hardware de control y detección. El vehículo es capaz de desplazarse de un punto de origen, a otro de destino en un ambiente desconocido, utiliza sensores de ultrasonido y un sistema neurodifuso. Emplea el ultrasonido para detectar los obstáculos, estas señales son enviadas a un servidor que posee un software basado en redes neuronales encargado de elaborar un mapa aproximado del ambiente, y lógica difusa como estrategia de control para dirigir los movimientos del móvil.

## INTRODUCCIÓN

*Eres el camino y eres la meta;  
no hay distancia entre la meta y tu.  
Eres el buscador y eres lo buscado;  
no hay distancia entre el buscador  
y lo buscado.  
Eres el adorador y eres lo adorado.  
Eres el discípulo y eres el maestro.  
Eres los medios y eres el fin.  
Este es el gran camino.*

Osho

El campo de la robótica móvil tiene como objetivo primordial el diseño y construcción de robots que puedan desplazarse de un punto a otro en un espacio desconocido con el fin de realizar alguna tarea específica. Para el adecuado desplazamiento por el ambiente, con el fin de detectar y evadir los obstáculos, se utilizan técnicas como el ultrasonido, los infrarrojos, cámaras de vídeo, y switches de precisión, entre otras. Para esta aplicación se optó por utilizar ultrasonido únicamente.

Los robots en la actualidad hacen parte de nuestra vida en forma directa o indirecta, se encuentran ensamblando en las fabricas, explorando el espacio o el fondo del mar, se introducen en el cuerpo para diagnosticar enfermedades, o simplemente se juega con ellos como si fuesen mascotas.

El presente trabajo de grado pretende contribuir con el desarrollo de los sistemas robóticos móviles en nuestro medio, su propósito es diseñar y construir una plataforma móvil autónoma para aplicar los sistemas neurodifusos en la solución de un problema en

particular: controlar el movimiento de un robot móvil en un ambiente desconocido. El interés principal es probar la plataforma móvil y las soluciones particulares enfocadas a la lógica difusa y al neuro cómputo.

Este trabajo está dividido en cinco capítulos enfocados a soportar teórica y prácticamente la construcción del sistema. El capítulo uno describe el planteamiento del problema y los elementos básicos para la solución; se da una breve revisión del trabajo de simulación precedente. El capítulo dos describe la estructura mecánica así como el hardware del móvil. El capítulo tres contiene las especificaciones software del sistema, describe los módulos desarrollados para controlar la detección de obstáculos, el procesamiento de la información y los movimientos del robot. El capítulo cuatro analiza los resultados obtenidos. Al final del documento se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Este capítulo es la parte introductoria al diseño y construcción del Robot AMI (Auto Móvil Inteligente), se expone el problema y se da una descripción general del procedimiento para resolverlo.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto móvil autónomo tiene tres etapas. Las dos primeras, ya realizadas, fueron: Sistema de Reconocimiento de Ambientes utilizando Redes Neuronales<sup>1</sup> y Simulación de un Vehículo Guiado Automáticamente empleando Sistemas Neurodifusos<sup>2</sup>. La tercera parte consiste en la construcción física del Hardware y la implementación del Software de control.

El presente trabajo de grado está orientado a llevar a la realidad la simulación, lo cual implica obtener un modelo mecatrónico, es decir: partes mecánicas, electrónicas y software, Ver figura 1.1; de tal manera que pueda ser acoplado fácilmente a la simulación realizada. En términos generales el Robot AMI está en capacidad de realizar las siguientes acciones:

---

<sup>1</sup> ESPAÑA MUÑOZ, Elena Y FLÓREZ, Juan Fernando: Sistema de reconocimiento de ambientes usando redes neuronales. Popayán, 1997, 140 p. Trabajo de grado (Ingenieros Electrónicos): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica. Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.

<sup>2</sup> MOSSO, John Alexander: Simulación de vehículo guiado automáticamente empleando sistemas neuro difusos. Popayán, 1999, 112p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica. Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.

- Dado un punto de origen y un punto de destino en la pantalla del servidor (representación a escala del mundo real), el robot se desplaza entre estos dos puntos.
- Si en la trayectoria el robot encuentra obstáculos los evade y retoma la ruta para alcanzar la meta.

Características:

- El robot se comunica con el servidor en forma serial por medio de un cable (o radioenlace).
- El servidor contiene los algoritmos inteligentes para reconocimiento de ambientes, alcanzar meta y evadir obstáculos.
- En el robot solo se encuentran los actuadores, sensores y sistema de comunicaciones.
- El robot estará siempre en comunicación con el servidor.



Figura 1.1 Diagrama del sistema Robot - Servidor

## 1.2 ELEMENTOS BÁSICOS PARA LA SOLUCIÓN

El sistema tiene en general tres partes constitutivas las cuales se diferencian sutilmente una de otra; ninguna de estas funciona por separado. Con el fin de realizar una descripción "clara" se hace la distinción Mecánica – Electrónica – Software. El trabajo precedente "Simulación de un Vehículo Guiado Automáticamente empleando Sistemas Neurodifusos" es únicamente Software, el cual se adaptó y se acopló al robot.

Los componentes electrónicos del robot interactúan con el software; la electrónica controla los actuadores mecánicos (Motores) y los sensores (transductores de ultrasonido piezoeléctricos ). Del adecuado desempeño de la mecánica depende el buen funcionamiento del Sistema. (Véase figura 1.2).

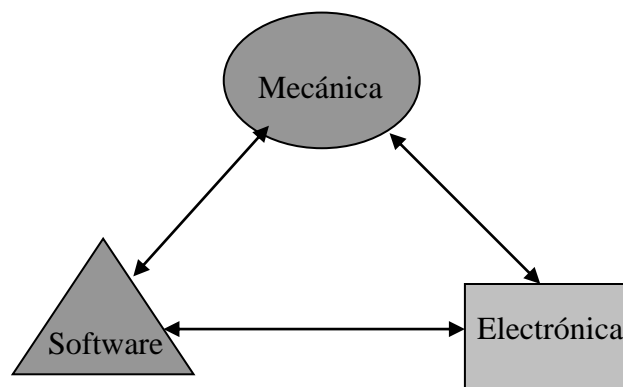


Figura 1.2 Diagrama de los Subsistemas Componentes del Robot AMI

**1.2.1 Base Conceptual** Las Redes Neuronales Artificiales son estructuras capaces de sintetizar tareas complejas para el computo convencional, gracias a su capacidad de aprendizaje, utilizando para ello patrones de entrenamiento. Esta cualidad le proporciona características excepcionales para ser utilizadas en aplicaciones no aptas para el computo tradicional, tales como: Identificación, Clasificación, Predicción, Optimización, Control, Diagnóstico médico, Aproximación de funciones, Procesamiento de señales, etc.



La Lógica Difusa permite definir en que grado pertenece un elemento a un conjunto específico; esta característica brinda la cualidad de representar y manejar información ambigua, la cual está presente en el entorno de todo sistema real. La lógica formal indica simplemente si un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto en particular.

Por las razones anteriores, una hibridación entre Redes Neuronales para identificación y Lógica Difusa para tomar decisiones, representa una de las mejores opciones para el control de un Robot Móvil Autónomo e Inteligente.

**Neurona artificial** Es un elemento simple de procesamiento que recibe N entradas y las procesa simultáneamente. Su diseño está basado en el funcionamiento de las neuronas biológicas. El modelo básico se muestra en la Figura 1.3. Cada entrada tiene un peso asociado ( $w_i$ ), éste representa la importancia del enlace. La neurona inicialmente calcula la suma de entradas ponderadas por sus pesos, es decir:

$$\text{ent} = \sum X_i * w_i$$

Posteriormente efectúa un proceso que transforma el valor obtenido anteriormente en un valor final de salida  $a_1$ . Este proceso puede ser lineal o no lineal y se modela con una función llamada función de activación.

Luego: 
$$a_1 = F [ \sum w_i * X_i ]$$

Las funciones de activación más utilizadas en redes neuronales son: escalón, sigmoide y gaussiana.

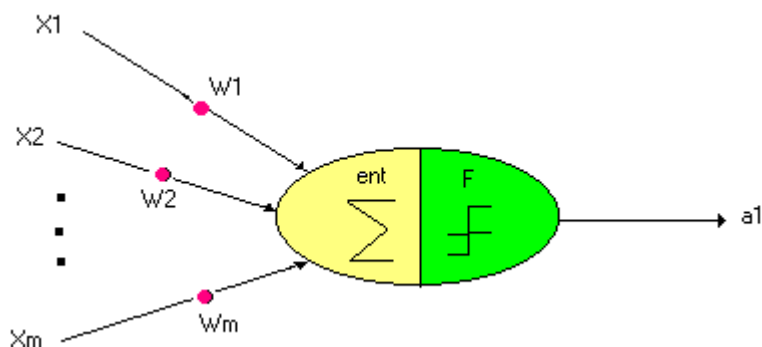


Figura 1.3 Modelo básico de una neurona artificial

**Estructura de redes** Varios procesadores elementales se pueden conectar entre sí para formar diferentes topologías de redes neuronales de acuerdo a la geometría de la red. Por ejemplo:

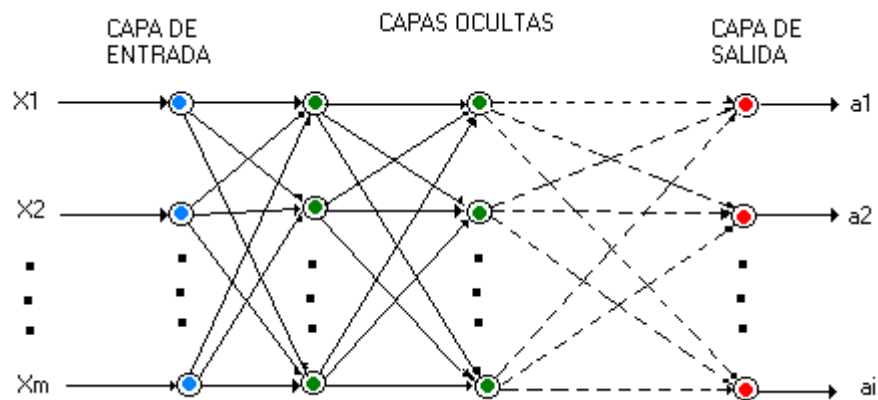


Figura 1.4 Red multicapa FeedForward.

Donde:

$x_i$ : Señales de entrada

$a_i$ : Señales de salida

Como se observa en la Figura 1.4, dentro de una red multicapa se pueden distinguir básicamente tres capas o niveles:

- Capa de entrada: Recibe la información de fuentes externas a la red. Solamente tiene una capa.

- Capa oculta: Está compuesta por cualquier capa intermedia entre la entrada y la salida, es interna en la red y no tiene contacto directo con el medio ambiente externo. Puede tener varias capas.
- Capa de salida: Entregan la respuesta de la red al exterior. Solamente una capa

La red aprende gracias a un proceso de modificación de sus pesos, el cual se logra con entrenamiento, y este puede ser supervisado o no supervisado. Para el aprendizaje, se excita la red con un conjunto de patrones específicos y gracias a un algoritmo de entrenamiento se logra la actualización de los pesos. La información se almacena en los pesos de las conexiones. El procesamiento de información se realiza en forma paralela y no secuencialmente como en el cómputo convencional.

Las redes de una capa o multicapa pueden ser:

**Feedforward:** Las salidas de una capa son la entrada de la siguiente.

**Feedback:** Las salidas son realimentadas, la realimentación puede ser: hacia la entrada, hacia la capa intermedia o hacia la capa oculta. Las redes realimentadas con lazo cerrado son llamadas redes recurrentes.

Los tipos de redes mas conocidos son:

*Feedforward:*

Perceptron

Red multicapa con Algoritmo Backpropagation

Redes con funciones de base Radial (RBF)

Redes neuronales Lineales.

*Feedback:*

Competitivas : ART, EX-IN.

Mapas autoorganizativos (SOM).

Memoria de Hopfield.

Memorias asociativas.

En síntesis, una RNA es un procesador paralelo de información con las siguientes características:

- Es un modelo matemático inspirado en las neuronas biológicas.
- Consisten de un alto número de elementos interconectados.
- El conocimiento está representado en los pesos de las conexiones de la red.
- Tienen la "habilidad" para aprender, recordar y generalizar desde datos de entrenamiento, gracias al ajuste de pesos.
- Colectivamente tienen un alto poder computacional.
- Robustas (tolerancia a fallas)<sup>3</sup>.

**Lógica difusa** En la lógica clásica un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto dado, esto quiere decir que solamente hay dos estados posibles 1 (Pertenece) o 0 (No pertenece) como muestra la Figura 1.5.

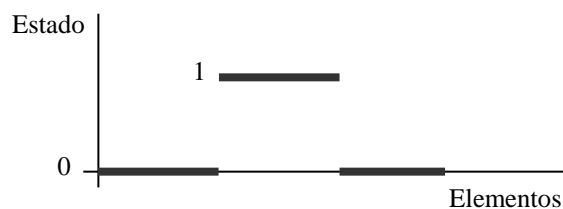


Figura 1.5 Conjunto Clásico

<sup>3</sup> LIN, Chin-Ten y LEE, George. Neural Fuzzy Systems. New Jersey: Prentice-Hall, 1996 p.207

En la lógica difusa cabe la posibilidad de que un elemento pertenezca simultáneamente a varios conjuntos, pero con diferentes grados de pertenencia siempre y cuando los grados de pertenencia entre conjuntos complementarios sumen uno, de esta forma pueden pertenecer parcialmente a varios conjuntos. Un elemento tiene un grado de pertenencia a un conjunto en particular, este grado es un valor entre 0 y 1.

Ejemplo: Consideremos un universo de la edad del hombre y consideremos un subconjunto Tercera Edad con rango 50 años en adelante como muestra la Figura 1.6.

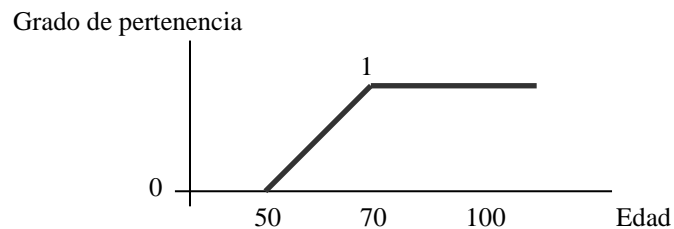
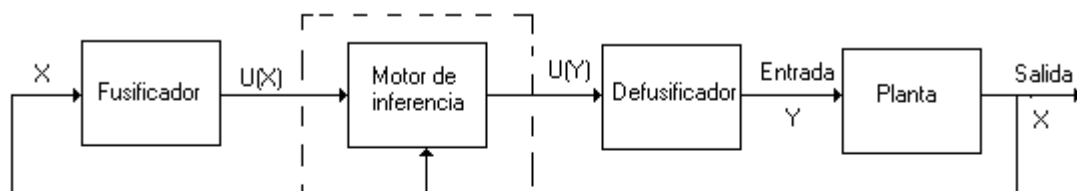


Figura 1.6 Conjunto Difuso

Analizando el planteamiento se puede concluir que las personas con edad entre (50 y 70] no pertenecen completamente al subconjunto Tercera Edad como muestra la figura cuatro. Ellos tienen un grado de pertenencia al subconjunto que aumenta a medida que la edad se aproxima a los 70 años.

Gracias a las cualidades de la lógica difusa es posible representar y manipular información con incertidumbre como la que maneja el lenguaje natural humano.

**Controlador difuso** Un controlador difuso tiene cuatro elementos básicos: Fusificador, Motor de Inferencia, Base de Conocimientos y un Defusificador como muestra la Figura 1.7.



- Fusificador: Mide los valores de entrada y los transforma en variables lingüísticas convenientes, es decir, convierte valores normales (del entorno) en valores fuzzy.
- Base de Conocimientos: Almacena el conocimiento empírico del proceso (reglas, definiciones, etc.)
- Motor de Inferencia: Es el núcleo del controlador, tiene la capacidad de simular decisiones humanas; "razona" para decidir cual es la estrategia de control óptima.
- Defusificador: Toma valores fuzzy y los transforma en valores apropiados para realizar el control adecuado sobre un proceso.

**Robótica móvil** Un robot es un agente artificial, activo, cuyo entorno es el medio físico<sup>4</sup>. El principal objetivo de la robótica móvil es el diseño y construcción de robots capaces de explorar el ambiente que los rodea, moverse libremente, evadir los obstáculos y peligros que se le presenten, y planear itinerarios para llegar de un punto a otro.

### **Tipos de robots móviles**

---

<sup>4</sup> RUSSELL, Stuart J. y NORVIG, Peter. Inteligencia artificial un enfoque moderno. México: Prentice Hall, 1996 p. 815.

- **Robots Programables:** El proceso de control está soportado por un microprocesador o por un microcontrolador. Las actividades que debe desarrollar se ordenan por medio de un lenguaje de programación e involucra:
  - Lectura de sensores.
  - Interpretar lecturas.
  - Tomar decisiones.
  - Ejecutar acciones.

- **Robots BEAM (Biology, Electronics, Aesthetics and Mechanics):**

Interpretan su ambiente sin el uso de microprocesadores y gracias a un diseño adecuado en cuanto a mecánica y circuitos electrónicos, el robot responde a estímulos del medio. Están inspirados en insectos, pretendiéndose trabajar con mínimos componentes electrónicos, usando materiales reciclados y fuentes de energía económica. Este tipo de robots se rigen por principios diferentes a los de la robótica clásica: Proteger su existencia, Adquirir más energía de la consumida y Buscar continuamente mejores fuentes de energía.

- **Robots Cibernéticos:** Pretenden acoplar circuitos electrónicos con seres vivos para aprovechar la sensibilidad de sensores y actuadores biológicos como el sistema nervioso y el sistema de locomoción. También estudia el uso de prótesis humanas.

### **1.3 MODELO CINEMÁTICO**

El modelo cinemático del robot móvil está determinado por las dimensiones mecánicas, la técnica de avance y la forma en que efectúa los giros.

El modelo adoptado es un carro con tracción trasera, tiene un motor en cada llanta; para avanzar o retroceder las llantas traseras giran en el mismo sentido, para efectuar un giro a la izquierda la llanta **L** gira hacia atrás y la llanta **R** hacia adelante, para efectuar un giro a la derecha la llanta **L** gira hacia adelante y la llanta **R** hacia atrás, Figura 1.8.

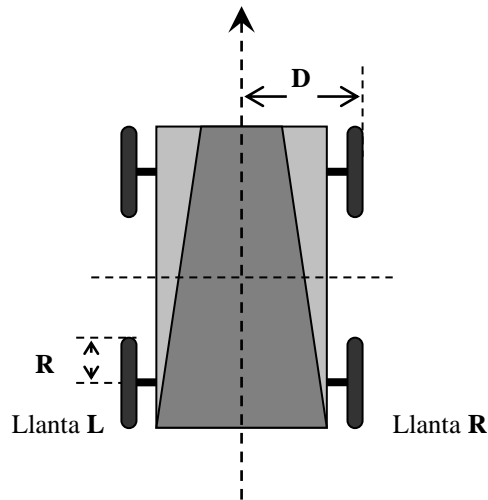


Figura 1.8 Esquema del Robot

Donde:

**D** Distancia del eje vertical a las llantas

**R** Radio de las llantas

Se considera como punto de referencia el centro geométrico del robot.

El modelo cinemático es determinado de tal forma que dado un punto de origen y un punto de destino el robot es capaz de desplazarse desde el origen hasta el destino.



El robot tiene capacidad para girar sobre su propio eje ya que la configuración mecánica se lo permite; por tal motivo el modelo cinemático se simplifica y como resultado se obtienen dos ángulos, uno para efectuar movimientos de avance o retroceso y otro para realizar los giros.

Se propone un modelo cinemático inverso, el cual permite encontrar las coordenadas articulares (ángulos) en función de las coordenadas cartesianas, figura 1.9.

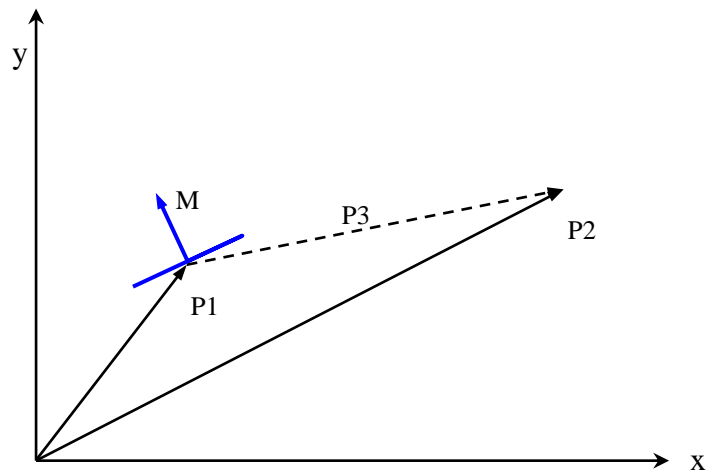


Figura 1.9 Representación vectorial de la posición del móvil

Donde:

- M** Vector unitario que representa al robot. Orientación actual
- P<sub>1</sub>** Vector posición inicial del robot móvil
- P<sub>2</sub>** Vector posición final del robot móvil
- P<sub>3</sub>** vector desplazamiento

El robot debe girar desde M hasta P<sub>3</sub> y luego avanzar la magnitud de P<sub>3</sub>.

Aislando M y P<sub>3</sub> , Figura 1.10.

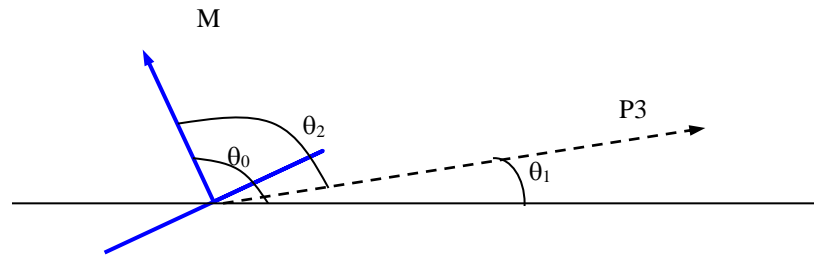


Figura 1.10 Angulos de orientación del móvil y vector de destino

Donde:

$\theta_0$  Angulo de orientación actual del móvil

$\theta_1$  Angulo de orientación del vector  $P_3$ , requerido para llegar a la meta

$\theta_2$  Angulo de giro del robot para llegar de M a  $P_3$

Del gráfico se deduce que:

$$\theta_2 = \theta_0 - \theta_1$$

Obteniendo  $\theta_2$ .

Se procede a obtener la magnitud de  $P_3$ , para obtener la distancia que se debe desplazar el robot después de hacer el giro.

Sea:

**S** Distancia a recorrer

$P_{1x}$  componente en el eje X de la posición actual del móvil

$P_{1y}$  componente en el eje Y de la posición actual del móvil

$P_{2x}$  componente en el eje X de la posición final del móvil

$P_{2y}$  componente en el eje Y de la posición final del móvil

$$S = |P_3|$$

Del diagrama se obtiene:

$$P_3 = P_1 - P_2$$

La magnitud de  $P_3$ :

$$S = \sqrt{\left((P_{2x} - P_{1x})^2 + (P_{2y} - P_{1y})^2\right)}$$

Esta es la distancia que debe recorrer el robot para ir del punto  $P_1$  a  $P_2$ .

En resumen para que el móvil se mueva de un punto a otro se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Definir la posición y orientación actual del robot.
- Fijar el punto de llegada, definir sus coordenadas cartesianas.
- Calcular el ángulo  $\theta_2$
- Girar el ángulo  $\theta_2$
- Calcular la magnitud de  $P_3$
- Recorrer la distancia  $P_3$

## 1.4 RECONOCIMIENTO DEL AMBIENTE

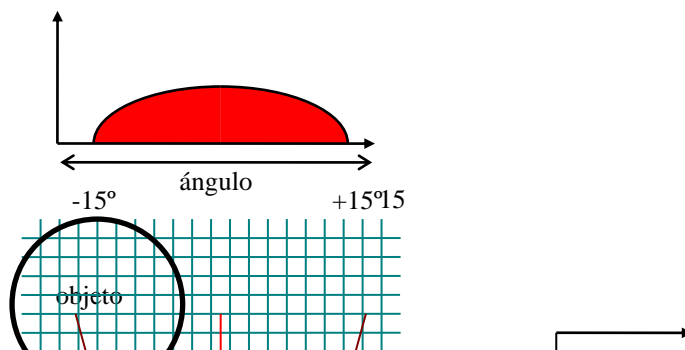
Se utiliza el ultrasonido como mecanismo para medir la distancia a la que se encuentran los obstáculos; para ello se emplean sensores de ultrasonido. Solo son detectados obstáculos que están dentro de un radio de 127 cm, esta zona de alcance se denomina *Región de Actualización*. El ambiente que rodea al móvil es reconocido por una red neuronal Radial Basis.

**1.4.1 La rejilla de certeza para la representación de obstáculos** Este es un método para la representación probabilística de obstáculos en un ambiente modelado en forma de rejilla. Este modelo del ambiente, denominado *rejilla de certeza* es especialmente

apropiado para tratar con datos inexactos como los proporcionados por sensores ultrasónicos.

En la rejilla de certeza el área de trabajo del robot está representada por un arreglo bidimensional de elementos cuadrados, denominados celdas. Cada celda contiene un *valor de certeza* que indica la medida de seguridad que se tiene sobre la existencia de un obstáculo al interior del área de esa celda. Los valores de certeza son actualizados por una función de probabilidad que toma en cuenta las características de un sensor dado. Los sensores ultrasónicos, por ejemplo, tienen un campo de vista cónico. Un sensor ultrasónico típico retorna una medida radial de la distancia al objeto más cercano al interior del cono sin especificar la localización *angular* del objeto. Si un objeto es detectado por el sensor ultrasónico es más probable que el objeto esté más cercano al eje acústico del sensor que a la periferia del campo cónico de vista. Por esta razón la función de probabilidad incrementa los valores de certeza de las celdas más cercanas al eje acústico que los valores de certeza en las celdas de la periferia. ( Véase figura 1.11 ).

Al iniciar el robot móvil permanece estático mientras realiza una exploración panorámica ultrasónica del medio, luego la función de probabilidad es aplicada a estos datos actualizando la rejilla de certeza. Posteriormente el robot se mueve a una nueva localización, se detiene y repite el procedimiento. Después de que el robot cruza el medio de esta forma, la rejilla de certeza resultante presenta un mapa bastante aproximado del entorno. Ahora puede aplicarse un método global de planeamiento de trayectorias para calcular fuera de línea nuevos caminos a seguir por el robot.



**1.4.2 Red Radial Basis<sup>5</sup>** Las redes Radial Basis (RBF) fueron desarrolladas para interpolación de datos en un espacio multidimensional. El problema de interpolación se describe de la forma: Dado un conjunto de vectores  $\{ y_i \}$  y un conjunto de datos escalares asociados  $\{ \mu_i \}$ , encontrar una función de estos vectores  $F( )$  que satisface todos estos puntos, es decir :

$$\mu_i = F( y_i ).$$

La función obtenida puede ser empleada para calcular valores asociados de vectores que no se encuentran en el conjunto original. La RBF es básicamente una función de base radial.

Una función radial típica es la Gaussiana, la cual en el caso de entrada escalar tiene la forma :

---

<sup>5</sup>MOSSO, John Alexander: Simulación de vehículo guiado automáticamente empleando sistemas neurodifusos. Popayán, 1999, 112p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica. Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.

$$h(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2r^2}\right)$$

sus parámetros son el centro  $c$  y el radio de influencia  $r$ . Una función radial Gaussiana decrece monótonamente con respecto a la distancia al centro, dan una respuesta significativa solo en una vecindad de su centro.

La selección de la red radial basis para reconocer el ambiente radica principalmente en la reducción drástica en el tiempo de entrenamiento. La red RBF construida constituye una sólida estructura para aproximar la superficie de probabilidad del espacio de entrada y los resultados obtenidos al comparar con otras redes es satisfactorio.

Emplear la red como aproximador significa que la red implementa una función de densidad de probabilidad que satisface los puntos de muestreo en el espacio de entrada. Una vez la red implementa esta función, se procede a mostrar puntos no enseñados esperando como resultado la generalización. Entre mayor sea el número de patrones muestra mejor será la aproximación de dicha función.

**1.4.3 Estructura de la red RBF** Las redes RBF están compuestas por tres capas como se muestra en la figura 1.12. La capa de entrada pasa sus entradas a la capa oculta a través de un conjunto de conexiones no pesadas. La capa oculta está compuesta por funciones radiales básicas o *campos receptivos*. Normalmente se emplea el núcleo Gaussiano el cual realiza la transformación no lineal :

$$R_i(x) = \exp \left\{ -\frac{\|x - c_i\|^2}{\sigma_i^2} \right\}$$

Donde  $x$  es el vector de entrada,  $c_i$  es el centro de la función básica  $i$ -ésima y  $\sigma_i$  caracteriza el ancho o radio de influencia de la función. La norma  $\|\cdot\|$  expresa la norma Euclidiana :

$$\|x\| = \sqrt{x^T x}$$

La función con núcleo Gaussiano es local ya que  $R_i(x) \rightarrow 0$  cuando  $\|x - c_i\| \rightarrow \infty$ .

La capa de salida combina linealmente las salidas de cada uno de los campos receptivos o neuronas. De esta forma, la salida de la red es computada como la suma pesada de las salidas de funciones básicas de la forma :

$$f_i(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m w_{i,i} R_i(x)$$

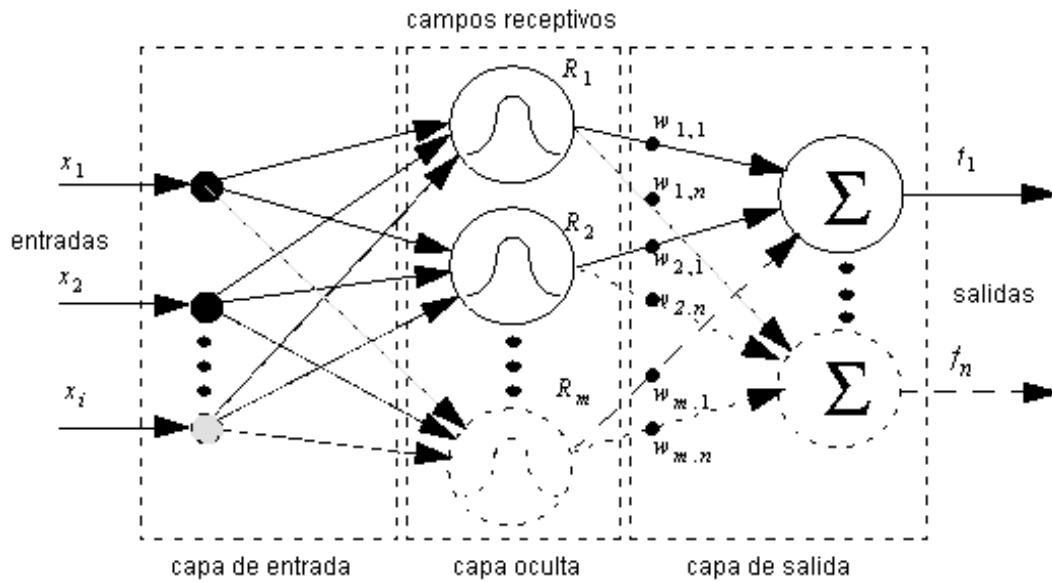


Figura 1.12 Estructura de la red Radial Basis

**1.4.4 Métodos de aprendizaje** Los métodos de aprendizaje pueden ser divididos en cuatro categorías :

1. Los centros de las funciones base son fijados uniformemente en el espacio de entrada.
2. Los centros son seleccionados de los datos de entrenamiento.
3. Los centros son seleccionados por un algoritmo de agrupamiento.
4. Los centros son parámetros en un procedimiento de optimización.

Para este caso los centros son seleccionados directamente de los datos de entrenamiento y son entregados por los sensores de ultrasonido.



## 1.5 DIRECCIONAMIENTO DEL MÓVIL

La red Neuronal entrega un conjunto difuso llamado OCUPACIÓN el cual representa la densidad polar de obstáculos. Este conjunto en asocio con el ÁNGULO DE DESVIACIÓN DEL MÓVIL y el ALCANCE son los encargados de controlar el desplazamiento y la rotación del móvil en el ambiente.

**1.5.1 Controlador Difuso Para Dirección Del Móvil** El controlador difuso se ha construido con base en maniobras exhibidas por un conductor para sortear situaciones encontradas en la conducción de un vehículo. El controlador difuso toma acciones específicas para una situación en particular, estas son alcanzar meta o evadir obstáculo.

Si el móvil se encuentra en un sitio sin alguna clase de obstáculos ; su función primordial será entonces alcanzar la meta dada, sin realizar en ningún momento un comportamiento de evasión. De otra forma si encuentra obstáculos, las acciones están orientadas a evadirlos y en un segundo plano queda el comportamiento de alcanzar la meta.

En la práctica, el conjunto de reglas para cada comportamiento es de la forma :

**SI  $A_i$  ENTONCES  $C_i$**

Donde  $A_i$  es una fórmula de lógica difusa construida a partir de predicados difusos empleando las conectivas  $\wedge$  ( mín ),  $\vee$  ( máx ) y  $\neg$  ( complemento a 1 ) y  $C_i$  es el conjunto difuso de control. La defusificación se realiza por el método del centroide aplicado sobre toda la distribución de salida.

**Comportamiento alcanzar meta** Se refiere a: Dada una ubicación y orientación cualquiera del móvil, alcanzar una vecindad sin obstáculos del punto fijado como meta.

Una vecindad de la meta se define como una circunferencia de radio  $r$  con centro en el punto de destino. Se considera un éxito que el móvil llegue al área delimitada por esta vecindad.

El conjunto de reglas que permite alcanzar meta en esencia es:

<b>SI</b>	la meta está	a la <i>derecha</i>	<b>ENTONCES</b>	gire a la derecha.
<b>SI</b>	la meta está	a la <i>izquierda</i>	<b>ENTONCES</b>	gire a la izquierda.
<b>SI</b>	la meta está	al <i>frente</i>	<b>ENTONCES</b>	siga de frente.

**Comportamiento Evasión** Provee respuesta inmediata a situaciones impredecibles en el ambiente, tales como la aparición repentina de un objeto en la vecindad del robot.

La premisa adoptada para este comportamiento es sencillamente "no chocar". No se emplea ningún método para evasión, en lugar de ello el móvil decidirá qué camino elegir en función de qué sector está más libre o una vez combinados los comportamientos, en función de hacia dónde se dirige.

La formulación de las reglas es aunque simple, un tanto más abstracta que la realizada para el comportamiento *alcanzar meta*. Se parte del concepto de hacia donde dirigir las acciones, un sitio a dónde llegar, un mapa parcial o total de entorno y de una u otra forma, un plan global para la trayectoria. La premisa para la evasión se basa en qué sector está más libre si está ocupada la dirección de movimiento. Se formulan entonces las siguientes reglas difusas :

**SI** *giroizquierda* es OCUPADO Y *giroderecha* es NOOCUPADO **ENTONCES** GIRE A LA DERECHA ( 1 )

**SI** *giroizquierda* es NOOCUPADO Y *giroderecha* es OCUPADO **ENTONCES** GIRE A LA IZQUIERDA ( 2 )

Existen además dos reglas necesarias que proporcionan reactividad inmediata cuando se encuentra un obstáculo lateral a la dirección de movimiento. Estas reglas provocan que el robot se aleje de un obstáculo a sus lados manteniéndolo a distancia segura. Estas reglas son :

**SI *corredorizq* es OCUPADO Y *frente* es NOOCUPADO ENTONCES GIRE A LA DERECHA ( 3 )**

**SI *corredorder* es OCUPADO Y *frente* es NOOCUPADO ENTONCES GIRE A LA IZQUIERDA ( 4 )**

Estas reglas tienen mayor peso *si el frente esta libre* evitando así conflicto con las reglas ( 1 ) y ( 2 ).

## **2. ESPECIFICACIONES HARDWARE**

Este capítulo describe los módulos hardware implementados para construir el robot AMI v1.0. Presenta una descripción del hardware en general y luego especifica cada módulo para dar una panorámica más amplia de la plataforma móvil.

El hardware del Robot AMI se encuentra localizado en su mayor parte en el móvil, El robot se divide en tres sistemas:

- Sistema Mecánico
- Sistema de Ultrasonido
- Sistema de Comunicaciones

Aunque este capítulo está dedicado al hardware en algunos casos se hace referencia al software para dar mayor claridad del funcionamiento de las partes mecánicas y electrónicas.

### **2.1 SISTEMA MECÁNICO**

El proceso de diseño y construcción del móvil autónomo se realizó por etapas y consta de: Chasis, Carrocería, Conjunto delantero, Conjunto Trasero, Sistema Motor. El material seleccionado para la fabricación fue Aluminio por sus características de bajo peso y fácil manipulación. Para guiar el vehículo se optó por un sistema de tracción y dirección tipo oruga, cuando las ruedas giran a igual velocidad en el mismo sentido se obtiene un desplazamiento lineal, si giran en sentido contrario se puede hacer rotar el móvil a la

derecha o a la izquierda según la necesidad. Este tipo de tracción le permite al móvil rotar sobre si mismo, lo cual le da un gran poder de maniobrabilidad. Como sistema de impulsión se utilizaron motores paso a paso

**2.1.1 Chasis** Lo conforman dos bastidores con una longitud de 28.6 cm y separados una distancia de 20 cm; figura 2.1a. Estos Sirven de soporte; con el propósito de minimizar el peso final del vehículo se utilizó rectángulo de aluminio como bastidores.

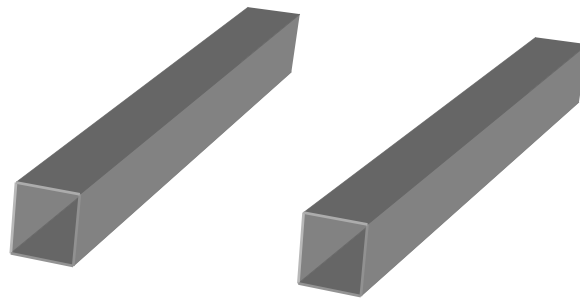
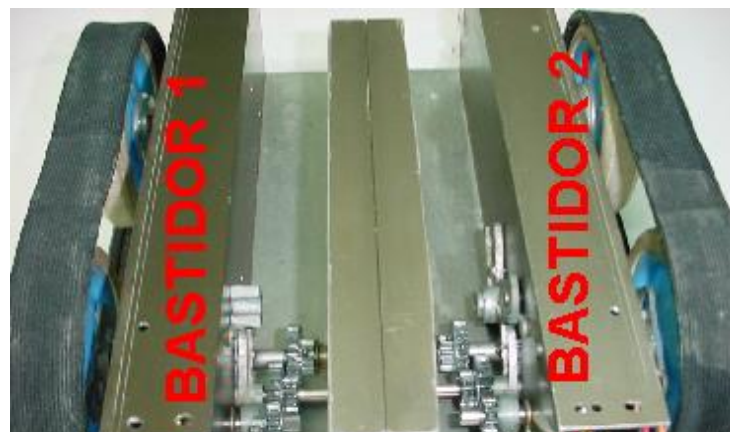


Figura 2.1a Bastidores

En el espacio interior formado por los dos bastidores se fijan dos ejes para soportar un conjunto de engranajes encargados de incrementar el torque de los motores. Para el mejor aprovechamiento de espacio en el interior de cada bastidor se ubica un motor paso a paso, encargados de girar las ruedas y así proporcionar movimiento al robot. (Véase figura 2.3b).



**2.1.2 carrocería** La cubierta del vehículo está elaborada en lámina de aluminio, en sus extremos posee un doblez que actúa como refuerzo, mejora la estabilidad y facilita fijarla a los bastidores con tornillos y tuercas; posee dos laminas como cubiertas, una en la parte superior y otra en la inferior del móvil. (Véase las figuras 2.2 y 2.3). Estos elementos cumplen una función de protección y soporte para los circuitos y engranajes, también de estética y acabado;

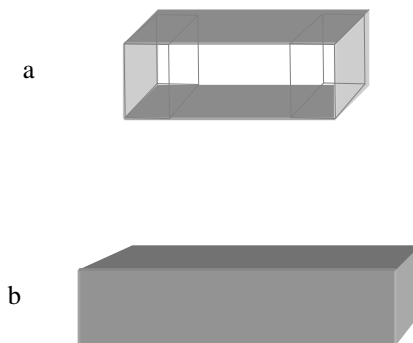
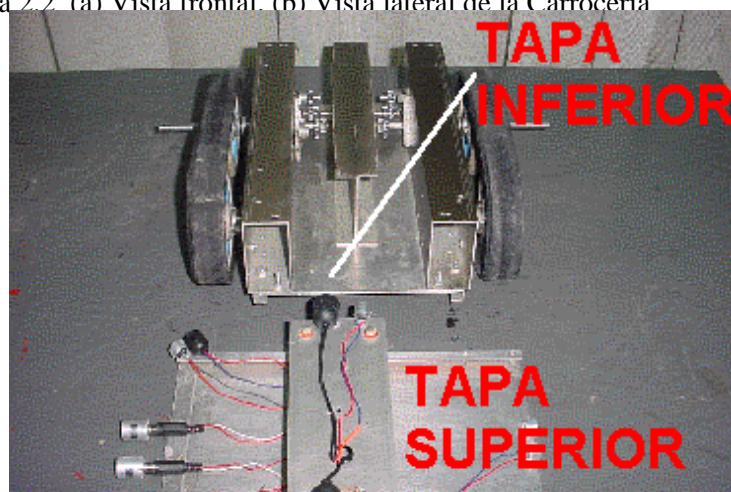
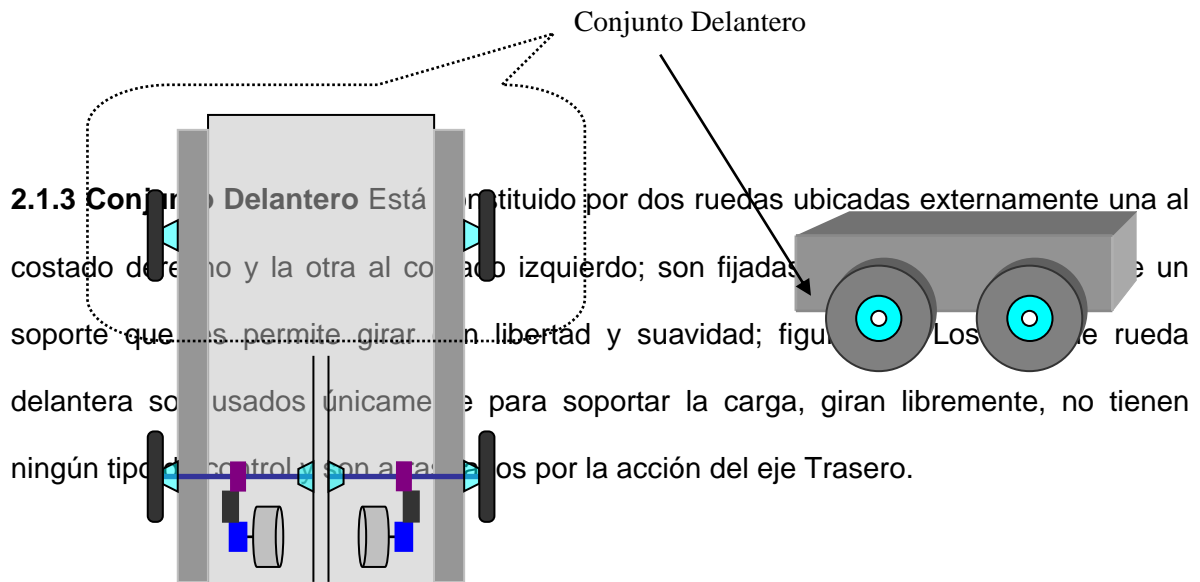


Figura 2.2 (a) Vista frontal. (b) Vista lateral de la Carrocería

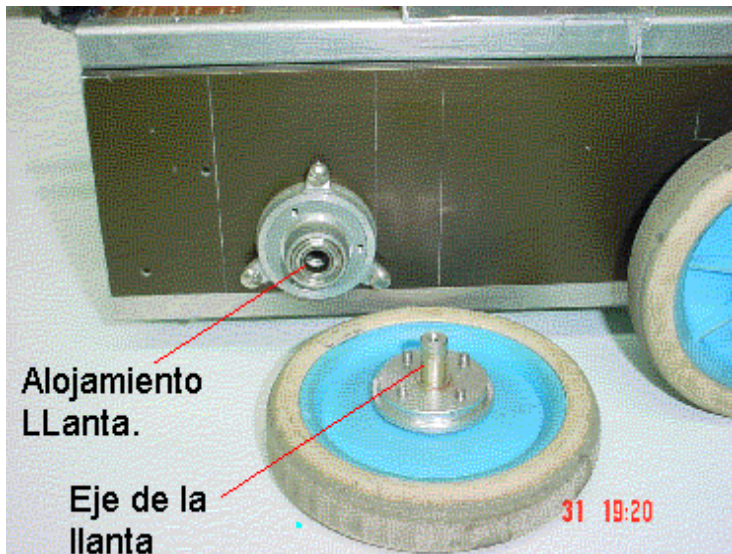




**2.1.3 Conjunto Delantero** Está constituido por dos ruedas ubicadas externamente una al costado derecho y la otra al costado izquierdo; son fijadas a un soporte que les permite girar con libertad y suavidad; figura 2.4. Los ejes de rueda delantera son usados únicamente para soportar la carga, giran libremente, no tienen ningún tipo de control, son accionados por la acción del eje Trasero.

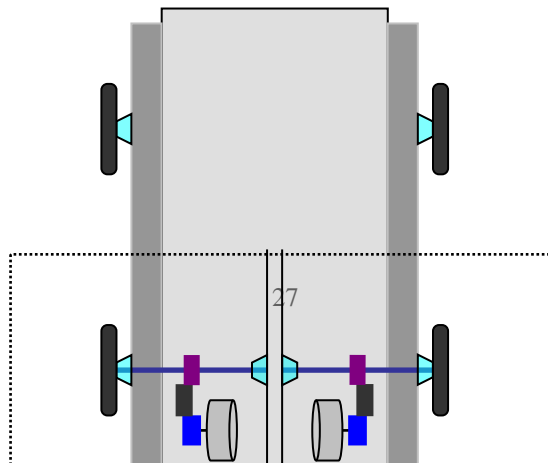
El sistema sobre el que giran las ruedas consta de un soporte con balineras atornillada al chasis y un eje saliente de las llantas; Este soporte posee internamente un orificio sobre el cual se ajustan a presión dos balineras, una a continuación de la otra. En la llanta se ha fijado con tornillos una base circular de cuyo centro sale un eje que entra a presión en el orificio interno de las balineras. (Véase la figura 2.5).

Al acoplar el eje (que hace parte de la base previamente fijada a la llanta) al interior de las balineras que están aseguradas a su respectivo soporte tenemos un sistema similar a un eje flotante; es decir el eje y la llanta giran sobre dos balineras que están sujetas al chasis a través de un soporte.



**2.1.4 Conjunto Trasero** Está encargado de realizar las funciones de tracción y dirección. Formado por un sistema de impulsión y una caja de reducción; figura 2.6.

Figura 2.5. Soporte de las llantas





**Sistema de impulsión** Como sistema de impulsión (tracción) se eligieron dos motores paso a paso. (Véase figura 2.7); estos permiten conocer la posición del móvil actualizando el número de pasos recorridos. Tienen un consumo total de un Amperio trabajando en modo de alto torque. Para manejarlos se usa un circuito de potencia basado en transistores Darlington. (Véase el anexo A).

Posee dos llantas, cada una es manejada por un motor en forma independiente, de tal manera que puedan girar en sentido contrario si esa es la instrucción del controlador. Los motores están ubicados al interior del extremo trasero de cada bastidor. Con el propósito de incrementar el torque cada motor posee un conjunto de engranajes que realiza una demultiplicación total de cuatro.

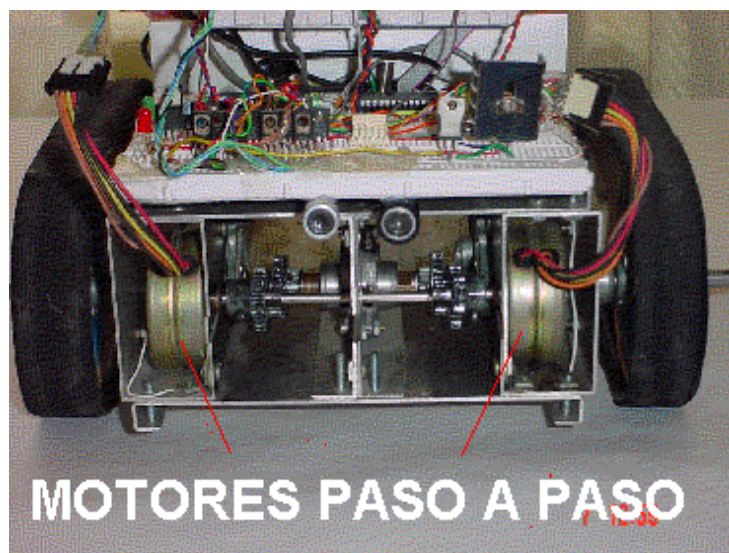


Figura 2.7. Sistema de Impulsión

**Caja de reducción** Para aumentar el torque, entre cada motor y llanta se acopló un engranaje formado por tres piñones rectos de Antimonio, dos dobles y uno sencillo. (Véase figuras 2.8 y 2.9).

El piñón de entrada E1 está acoplado al motor y tiene 10 dientes, se une a un piñón doble E2 que tiene 20 dientes de entrada y 10 de salida, finalmente se engrana la salida del piñón anterior con un piñón E3 de veinte dientes. De esta forma se transmite la fuerza de rotación del motor a la llanta y se obtiene un sistema que proporciona una demultiplicación total de cuatro, lo que implica que la velocidad se reduce cuatro veces y el torque final se multiplica por cuatro.

El piñón de salida E3 de la reducción es doble pero solo aprovecha un lado (trabaja como sencillo), se puede utilizar para futuras mejoras de torque si se conecta un piñón sencillo de 20 dientes se obtendría una demultiplicación total de ocho.

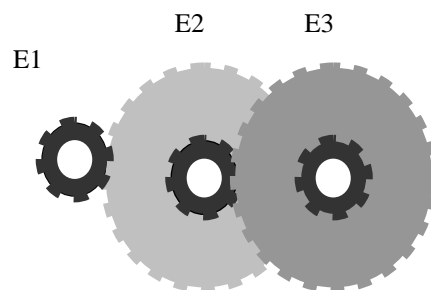


Figura 2.8 Esquema caja de reducción.

E1: Piñón de Entrada.

E2: Piñón Intermedio.

E3: Piñón de Salida. 29

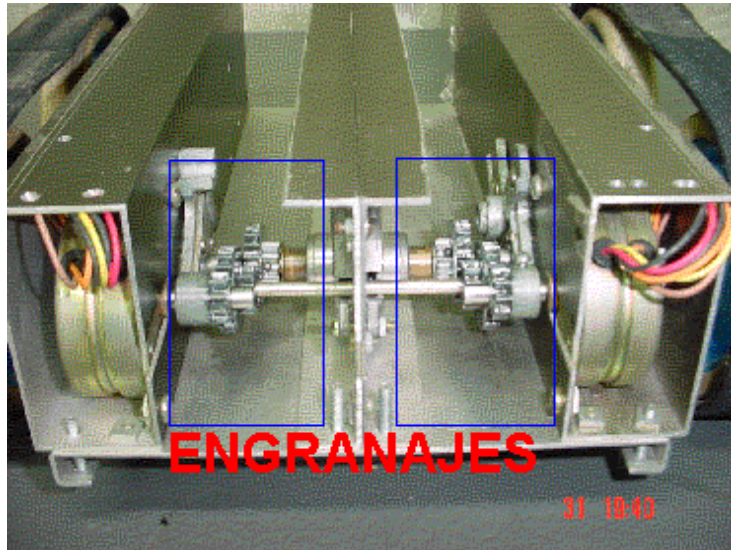
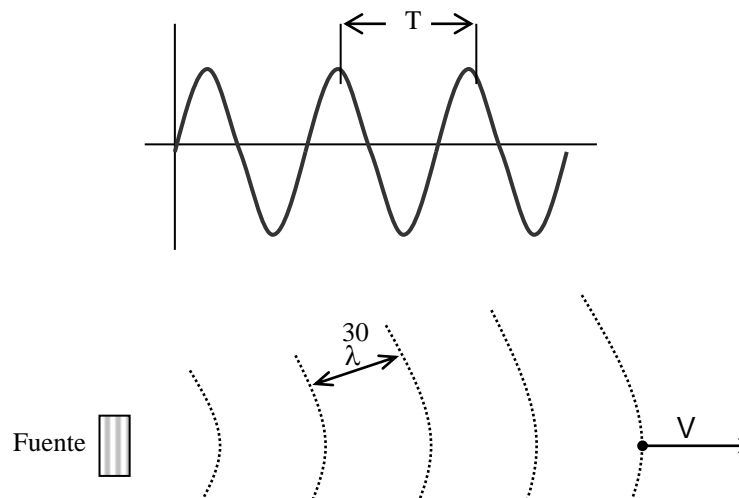


Figura 2.9 Caja de reducción

## 2.2 SISTEMA DE ULTRASONIDO

Para realizar la detección de obstáculos se usa un anillo de ocho sensores de ultrasonido ubicados alrededor del vehículo.

**2.2.1 Sensores de ultrasonido** La mayoría de estos sensores se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica; figuras 2.10 y 2.11.



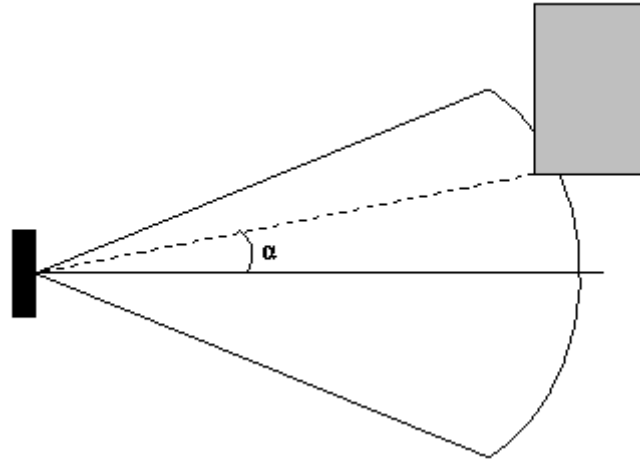
Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la fórmula:

$$D = 1/2Vt$$

Donde **V** es la velocidad del sonido en el aire y **t** es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso. Sin embargo, factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Por lo tanto, es necesario un conocimiento de las diversas fuentes de incertidumbre que afectan a las medidas para poder tratarlas de forma adecuada, minimizando su efecto en el reconocimiento del entorno que se desea explorar. Entre los diversos factores que alteran las lecturas que se realizan con los sensores de ultrasonido cabe destacar:

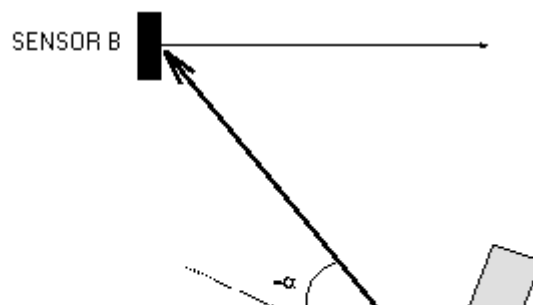
- El campo de acción del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo. Aunque la máxima probabilidad es que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono acústico, la probabilidad de que el eco se haya producido por un

objeto presente en la periferia del eje central no es en absoluto despreciable y debe ser tomada en cuenta y tratada convenientemente. (Véase Figura 2.11)



- La cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie reflectora debe ser comparable a la longitud de onda de la onda de ultrasonido incidente.
- En los sensores de ultrasonido de bajo costo se puede utilizar el mismo transductor como Emisor-Receptor. Después de la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Esto implica que existe una distancia mínima ( $d$ ) (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión. Por lo general, todos los objetos que se encuentren por debajo de esta distancia,  $d$ , serán interpretados por el sistema como que están a una distancia igual a la distancia mínima.

- Los factores ambientales tienen una gran repercusión sobre las medidas: Las ondas de ultrasonido se mueven por un medio material que es el aire. Por otro lado, los sensores de ultrasonido móviles (como, por ejemplo, los que están instalados en el robot móvil) experimentarán un efecto perturbador debido a las pequeñas turbulencias de aire que se producen delante del transductor. En este caso, y al contrario del efecto de la temperatura, la influencia de las turbulencias sobre la señal ultrasónica es muy difícil de ser cuantificada.
- Un factor de error muy común es el conocido como falsos ecos; figura 2.12. Estos falsos ecos se pueden producir por razones diferentes: Puede darse el caso en que la onda emitida por el transductor se refleje varias veces en diversas superficies antes de que vuelva a incidir en el transductor (si es que incide). Este fenómeno, conocido como reflexiones múltiples, implica que la lectura del sensor evidencia la presencia de un obstáculo a una distancia proporcional al tiempo transcurrido en el viaje de la onda; es decir, una distancia mucho mayor que a la que está en realidad el obstáculo más cercano, que pudo producir la primera reflexión de la onda. Otra fuente más común de falsos ecos, conocida como crosstalk, se produce cuando se emplea un cinturón de ultrasonidos donde una serie de sensores están trabajando al mismo tiempo. En este caso puede ocurrir (y ocurre con una frecuencia relativamente alta) que un sensor emita un pulso y sea recibido por otro sensor que estuviese esperando el eco del pulso que él había enviado con anterioridad (o viceversa).



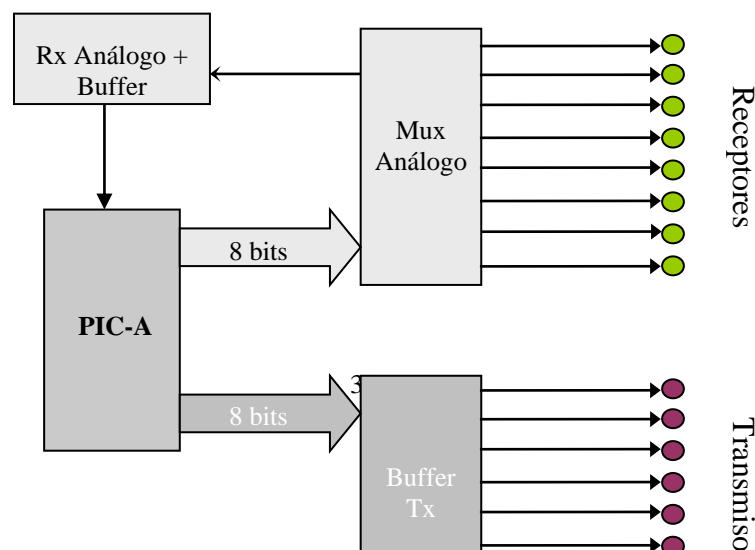
- Las ondas de ultrasonido obedecen a las leyes de reflexión de las ondas, por lo que una onda de ultrasonido tiene el mismo ángulo de incidencia y reflexión respecto a la normal a la superficie. Esto implica que si la orientación relativa de la superficie reflectora con respecto al eje del sensor de ultrasonido es mayor que un cierto umbral, el sensor nunca recibirá el pulso de sonido que emitió.
- Para emitir un pulso de ultrasonido hay que excitar la membrana del transductor con una señal en forma de delta de Dirac. Sin embargo, en los sensores de bajo costo, la señal excitadora es en la práctica un pulso cuadrado por lo que el efecto resultante es el de la emisión de todo un tren de ondas de ultrasonidos que emergen de la membrana del sensor.

El momento  $t_i$  en el que se emite la onda se suele considerar como el momento en el que se emitió la onda excitadora. La dificultad estriba en determinar el momento  $t_f$  en que se recibe el eco de la señal emitida: Tanto la forma la envolvente de tren de ondas de la señal emitida como la recibida, crece desde cero hasta alcanzar un valor máximo y vuelve a decrecer hasta cero. En definitiva, la incertidumbre en la determinación del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción se traduce en un error  $\pm E$  en la medida.

Los diferentes factores que provocan errores o incertidumbre en la medida de un sensor de ultrasonido se pueden clasificar en errores o incertidumbres intratables, tratables directamente y tratables indirectamente. Como errores intratables pueden considerarse la no reflexión de la señal por superficies poco rugosas. Afortunadamente las superficies lisas que se encuentran en entornos reales suelen tener alguna que otra pequeña irregularidad que en un momento dado hacen que la señal se refleje en la superficie. Mediante la generación de un mapa del entorno este problema se podría resolver parcialmente. Otras fuentes de incertidumbre en la lectura de la medida realizada, como el tiempo de relajamiento o la resolución del sensor, se pueden tratar directamente modificando y mejorando la tecnología del transductor.

**2.2.2 Descripción del sistema ultrasónico** Este modulo está conformado por un conjunto de ocho parejas transmisor y receptor de ultrasonido ubicados en ángulos estratégicos.

Un PIC es el encargado de controlar el proceso de transmisión y detección para realizar la localización de los obstáculos. El servidor hace la petición al PIC y este a su vez activa un sensor en particular para que realice la medición, el PIC retorna al servidor la distancia medida. El sistema se ilustra en la figura 2.13. (Véase el Anexo A)





El sistema de transmisión y detección para cada pareja de transductores se ilustra en la figura 2.14. El circuito de recepción tiene dos etapas amplificadoras; la primera etapa permite medir distancias cortas y la segunda mide distancias largas.

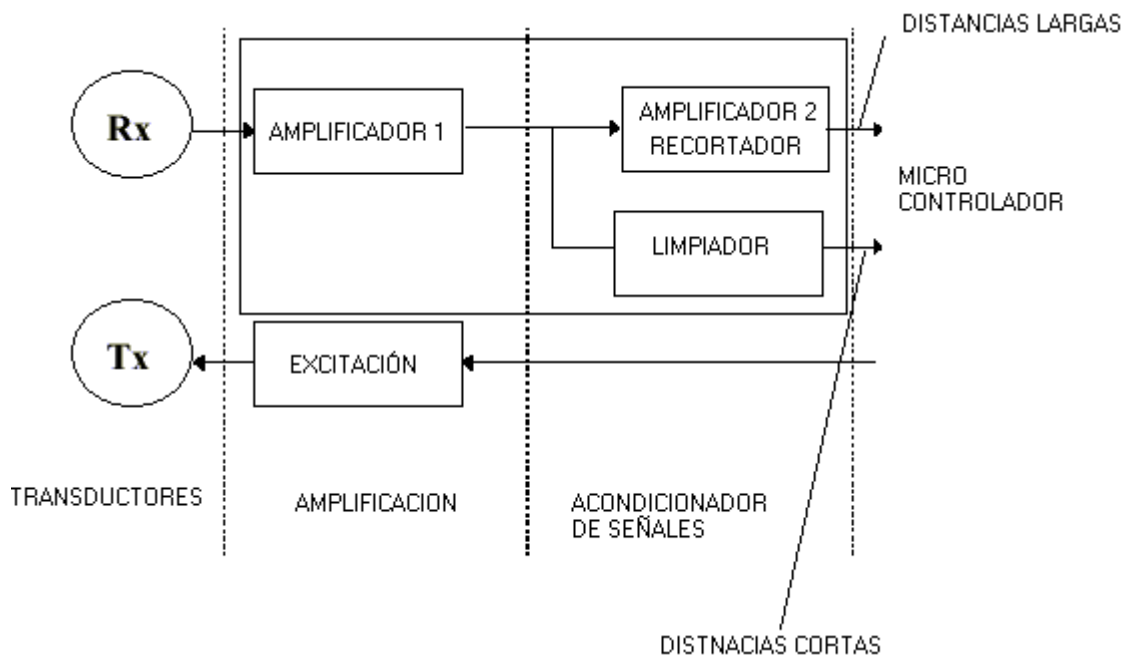


Figura 2.14 Esquema del Transmisor y receptor

**2.2.3 Transmisor de ultrasonido** La Señal de transmisión es un tren de siete pulsos de 40 KHz generado por el **PIC A** y luego Elevados a 24 Voltios pico a pico para ser entregados al transductor de ultrasonido, esto con el fin de aumentar la potencia radiada. (Véase las figuras 2.15, 2.16 y Anexo A).



Figura 2.15 Pulsos transmitidos

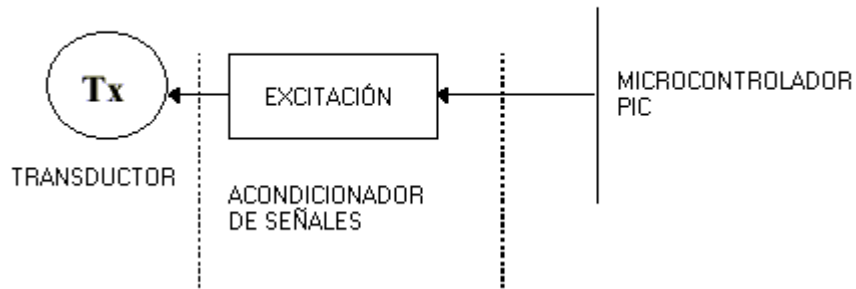


Figura 2.16 Esquema del Transmisor

**2.2.4 Circuito de recepción** Una vez transmitida la señal de ultrasonido, al incidir sobre un objeto es reflejada y puede aparecer en el receptor un rebote (eco), este es detectado por el receptor de ultrasonido, luego es amplificado, después se le efectúa un proceso de recorte de nivel y limpieza, estas funciones las realiza el circuito de recepción; finalmente la señal obtenida es introducida al microcontrolador quien mide la distancia al objeto.

La sección amplificadora tiene dos etapas conectadas en cascada construidas con operacionales LF353. Como circuito recortador se usa un transistor 2N2222 y como limpiador un schmitt trigger. (Véase la figura 2.17 y Anexo A)

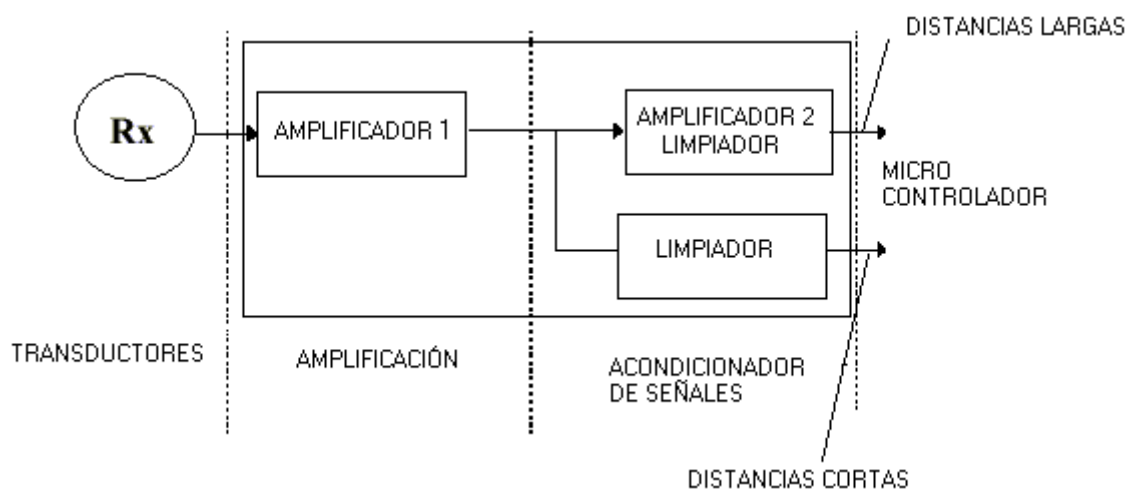


Figura 2.17 Diagrama en bloques del circuito de recepción

La etapa de recepción es multiplexada, esto permite la utilización de solamente un circuito de recepción para todos los sensores ultrasonicos; unicamente llega la señal del receptor ultrasonico deseado.

La señal obtenida en la primera etapa tiene un un nivel en la Zona Muerta muy pequeño comparado con el nivel del Eco. (Véase la figura 2.18); esta cualidad nos permite medir distancias pequeñas comprendidas en el rango de 2 cm a 50 cm sin la interferencia de la señal de Zona Muerta; el Eco obtenido después del primer amplificador se introduce a un circuito limpiador que deja pasar al PIC solamente la señal reflejada y elimina la señal de Zona Muerta. La detección de distancias cortas es una gran ventaja para navegar en la proximidad de los obstaculos y alertar al móvil de la presencia de un obstaculo demasiado cerca lo que puede significar una inminente colisión.

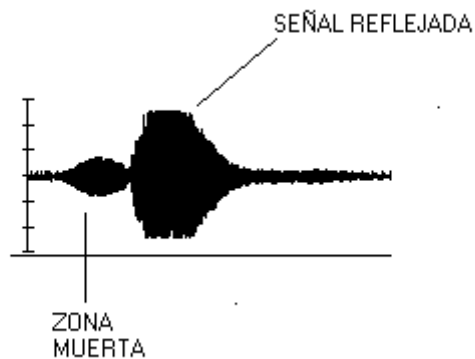


Figura 2.18. Salida primera etapa de amplificación del circuito de recepción

La segunda etapa permite medir distancias de 30cm hasta 2mts, pero para este trabajo en el PIC solamente se está midiendo distancias hasta 127 cm ( 7 bits de resolución); la amplificación total obtenida hace que la Zona Muerta tenga un nivel Comparable con el

eco, por lo tanto, para evitar errores de medición el receptor permanece inactivo, un tiempo suficiente para salvar la Zona Muerta, inmediatamente transmitidos los pulsos. Las señales se observan en las figuras 2.19 y 2.20

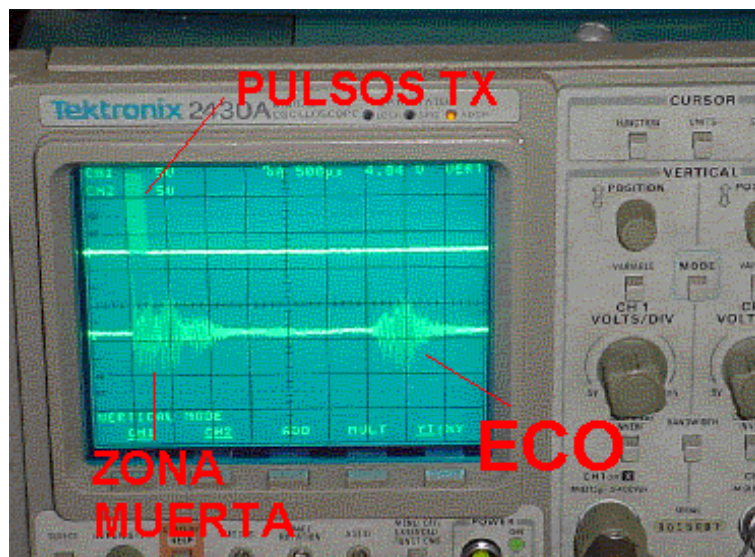


Figura 2.19 Salida de la segunda etapa de amplificación. Señal transmitida y Reflejada, Zona Muerta

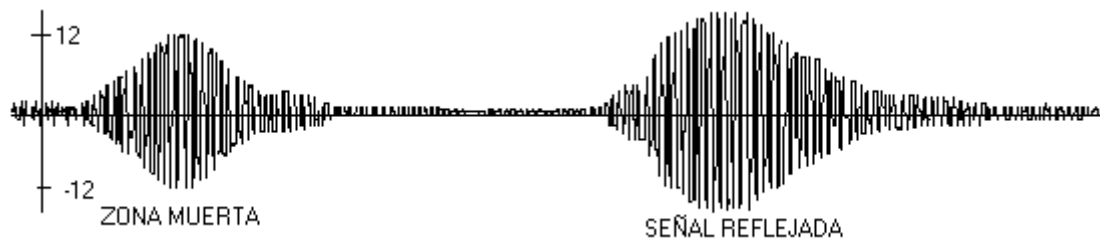


Figura 2.20. Forma de onda de la señal de salida. Segunda etapa de

La salida de la segunda etapa amplificadora tiene la forma de la figura 2.20.

Esta señal tiene un nivel alto, los picos máximos miden alrededor de 12 voltios, posteriormente son recortados a cinco voltios y se les realiza un proceso de limpieza. (Véase la figura 2.21)

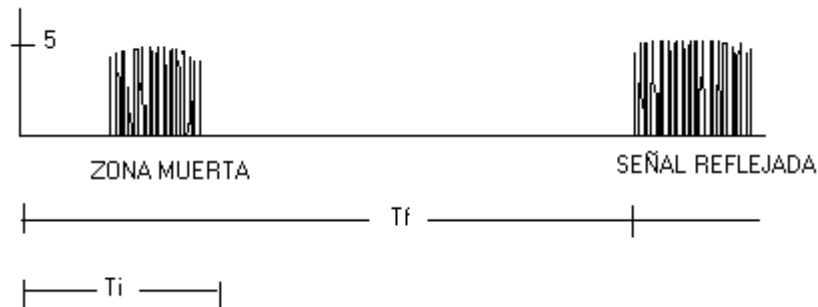


Figura 2.21 Salida del Recortador y Limpiador

la zona muerta es comparable con el eco por lo tanto para evitar errores el receptor permanece inactivo un tiempo  $T_i$  después de transmitir los pulsos, se usó un tiempo de 1.5 mseg, lo que implica que en este modo no es posible medir distancias menores a 25 cm. Las distancias menores a este rango son medidas en la primera etapa.

El eco demora un tiempo  $T_f$  que depende de la distancia del sensor al obstáculo, con  $T_f$  el microcontrolador calcula la distancia a la cual se encuentra ubicado el obstáculo.

### **3. ESPECIFICACIONES SOFTWARE**

Este capítulo presenta la descripción de los módulos software implementados para llevar a la realidad el trabajo "Simulación de vehículo guiado automáticamente empleando sistemas neurodifusos". Se da una descripción del sistema en general y luego se detalla cada módulo.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

El software del Robot AMI en su mayoría se encuentra alojado en el servidor, en el robot se ubica un software embebido en dos microcontroladores PIC encargados del control de motores y activación de sensores de ultrasonido.

El software del robot se ha dividido en seis sistemas a saber:

- Sistema de Muestreo
- Sistema Motriz
- Sistema de Reconocimiento Neuronal
- Sistema de Control Difuso
- Sistema de Comunicaciones
- Sistema de control embebido en el móvil

Cada sistema es funcional solamente cuando todos sus componentes están integrados, cabe aclarar que un sistema puede tener tanto partes mecánicas como electrónicas y su

software puede estar tanto en el robot como en el servidor. En un principio se hace una descripción holística, para entender el funcionamiento.

Ver figura 3.1 para comprender mejor la interacción de los diferentes sistemas.

El sistema de muestreo posee partes eléctricas, electrónicas y software, este último es el maestro encargado de dirigir las operaciones de activación y lectura de distancias.

El sistema motriz, en conjunto, posee partes mecánicas, software, eléctricas y electrónicas. La función del software de este sistema es determinar las señales de control para enviarlas al PIC manejador de motores, basándose en el modelo cinemático, y este genere las secuencias apropiadas para cada motor paso a paso.

El sistema de reconocimiento neuronal es el encargado de hacer un análisis de los datos entregados por el sistema de muestreo, este sistema es completamente Software y está contenido en el servidor.

El sistema de control difuso dirige los movimientos del robot, orientados a evadir obstáculos o alcanzar meta, este sistema es Software y esta alojado en el servidor.

El sistema de comunicaciones es el responsable del transporte de la información entre el servidor y el robot, está constituido por un modulo Software en el servidor y un modulo Software embebido en el robot, adicionalmente posee un Hardware encargado de adecuar señales en el robot y en el servidor según el enlace se realice vía cable o vía radio.

El sistema de control embebido en el móvil cumple funciones de decodificación de datos y de control, es un software embebido en un microcontrolador, envía las secuencias apropiadas a los motores, activa el sistema de ultrasonido cuando el servidor lo solicita y devuelve al servidor la distancia medida.

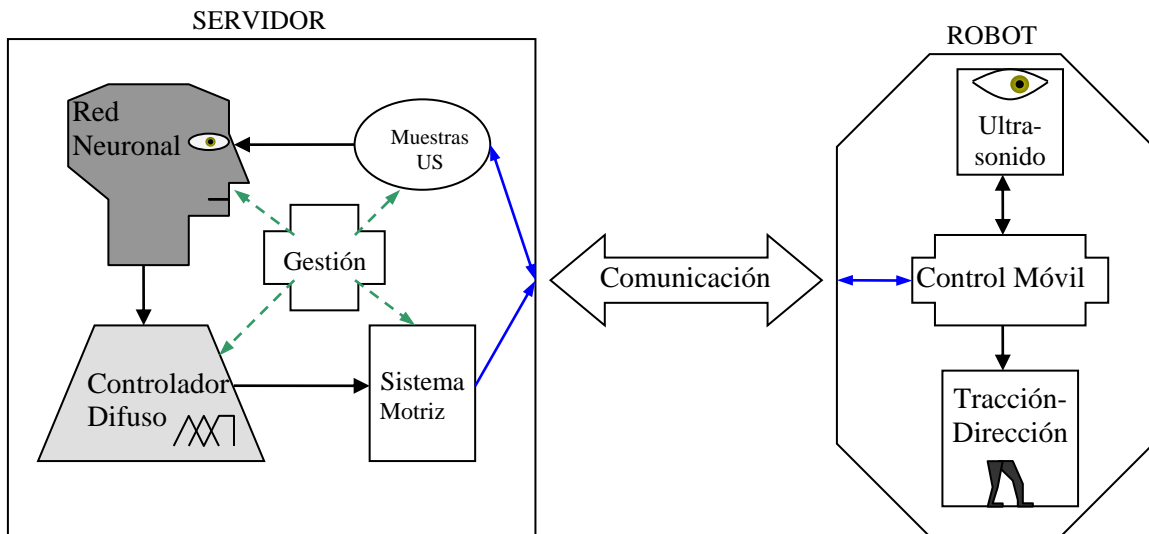


Figura 3.1. Diagrama esquemático del sistema

### 3.2 MÓDULOS SOFTWARE IMPLEMENTADOS EN EL SERVIDOR

El software del servidor está desarrollado en Visual C++. Los módulos de software de la simulación precedente han sido reutilizados en gran parte, especialmente lo correspondiente a la interfaz gráfica la cual es fundamentalmente la misma con sutiles variaciones. La parte de la red neuronal se mantiene; en cuanto al controlador difuso se hicieron cambios en los rangos de los conjuntos difusos y en las reglas. A continuación se describen los módulos orientados a la implementación del robot.



3.2.1 **Módulo Comunicaciones** La comunicación entre el servidor y el robot se efectúa en forma serial utilizando la interfase RS232, se dispone de un canal de subida y un canal de bajada.

**Protocolo de comunicación Servidor - PIC** Se ha desarrollado un protocolo de comunicaciones propietario con las siguientes características:

1. El tamaño de la trama básica es de 3 Bytes.

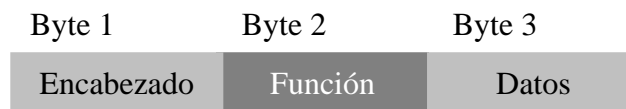


Figura 3.2a Estructura de la trama básica



Figura 3.2b Subdivisión del byte de Encabezado

2. El byte de **Encabezado** se subdivide en dos grupos de cuatro bits. El nible alto señala el inicio de la trama, el nible bajo se utiliza para contar el número de tramas enviadas por el servidor al PIC y sirve para verificar el sincronismo de la comunicación.
3. El byte **Función** contiene el identificador de la función que se desea ejecutar el robot, se utilizan siete bits para este propósito, el bit de mayor peso se usa para direccionar la función al microcontrolador PIC-A o PIC-B .
4. El byte **Datos**, contiene el parámetro de la función, este byte es 0 si la función no necesita parámetro.
5. A cada PIC se le ha asignado un byte ID que lo identifica, predefinido en el PIC, comprendido en el rango hexadecimal 0x61 a 0x6F, correspondientes a los símbolos

ASCII: a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o. Esto permite verificar el enlace y monitorear desde el servidor el estado de las comunicaciones con cada PIC.

**Descripción de las funciones** Las funciones se dividen en tres grupos: Funciones de movimiento, funciones de ultrasonido, funciones auxiliares.

*Tabla No. 3.1 Funciones de Movimiento*

<b>Código HEX</b>	<b>Código ASCII</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
0x4E	N	FIJ_MODO_PASO (id-modo)	Elige movimiento a Medio Paso o Un paso para los motores P.P
0x4F	O	FIJ_FACT_VEL (n)	Factor multiplicativo de la velocidad
0x50	P	FIJ_VELOCIDAD (x)	Cambio de velocidad
0x51	Q	M_ADELANTE (n)	Mover robot adelante n pasos
0x52	R	M_ATRAS (n)	Mover robot atrás n pasos
0x53	S	M_IZQUIERDA (n)	Mover robot a la izquierda n pasos
0x54	T	M_DERECHA (n)	Mover robot a la derecha n pasos
0x55	U	M_DIRECTO (secuencia)	Envía las secuencias de movimiento de los motores directamente desde el servidor

*Tabla No. 3.2 Funciones de Ultrasonido*

<b>Código Hex</b>	<b>Código ASCII</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
0x42	B	FIJ_MIN_DIST (x)	Fija mínima distancia a medir
0x43	C	FIJ_NUM_CICL (x)	Fija el numero de ciclos transmitidos
0x44	D	FIJ_TIM_MUER (x)	Fija el tiempo para salvar zona muerta
0x45	E	FIJ_MODO_US (id-modo)	Fija el modo de medida, del ultrasonido, distancias largas o cortas
0x46	F	US_MED_CORTA (id-sensor)	Fija modo CORTAS y hace medida con sensor elegido
0x47	G	US_MED_LARGA (id-sensor)	Fija modo LARGAS y hace medida con sensor elegido
0x48	H	US_MED_DIRECT (id-sensor)	Hace medidas con la ultima configuración con el sensor elegido

0x49	I	US_LEER (0)	Retorna la última medida tomada
------	---	----------------	---------------------------------

Tabla No. 3.3 Funciones auxiliares

Codigo HEX	Codigo ASCII	Nombre	Descripción
0x41	A	INICIO_COM (x)	Retorna al servidor el ID del PIC al que se le envió esta función, permite verificar la conexión. Si la función es enviada al PIC-B el robot emite un sonido de duración igual a x
0x5A	Z	TEST_COM (x)	Retorna al servidor el byte x enviado como parámetro en esta función, permite verificar conexión. Si la función es enviada al PIC-B el robot emite un sonido doble de duración igual a x

El modulo software encargado de las comunicaciones en el servidor es un conjunto de funciones que permiten realizar una comunicación fácil y rápida, estas funciones se han diseñado para que puedan ser llamadas desde cualquier parte del programa. Son las siguientes:

- **StatusComm( )** Lee el estado del puerto de comunicaciones, entrega un valor verdadero si el puerto fue abierto en forma exitosa.
- **InitComm( )** Inicializa los registros básicos del puerto tales como numero del puerto, velocidad, bits de parada, bits de datos etc.
- **OpenComm( )** Abre el puerto serial, retorna un valor verdadero si se logra satisfactoriamente, falso en caso contrario.
- **CloseComm( )** Cierra el puerto serial, solo si previamente fue abierto.
- **WriteComm(dato)** Envía un dato del tamaño de un byte por el puerto serial.
- **ReadComm( )** Lee un byte desde el puerto serial, retorna el primer byte en la cola del buffer de recepción del puerto.

- **EnviarTrama ( id\_pic, función, valor)** Se encarga de formar la trama y enviarla por el puerto serial, **id\_pic** es 0 si la trama va para el PIC\_A y es 1 si va para el PIC\_B, **función** es el identificador de la función de acuerdo a las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, **valor** es el parámetro de la función.

El proceso seguido para establecer las comunicaciones es el siguiente:

- 1 Inicializar los registros del puerto serial que se desea abrir con InitComm().
- 2 Abrir el puerto con OpenComm().
- 3 Verificar la apertura del puerto con StatusComm().
- 4 Enviar la función INICIO\_COM al PIC A.
- 5 Esperar la respuesta del PIC A, si el pic responde en un tiempo prudencial se ha establecido la comunicación con el PIC A.
- 6 Hacer los pasos 3 y 4 con el PIC B

Con estos pasos el enlace entre el servidor y el robot ha sido establecido.

**Protocolo de comunicación PIC - Servidor** Para los datos enviados del robot al servidor el protocolo de comunicación es ligeramente diferente pues el servidor solicita la información al robot y este se la envía en un formato de un solo byte, el servidor lee el dato enviado y lo valida, si es erróneo vuelve a solicitarle al robot el envío del dato.

El byte retornado por el robot depende de la última función ejecutada, al finalizar la ejecución de cada función el PIC-A o PIC-B transmite un byte al servidor de acuerdo a la tabla 3.4

*Tabla No. 3.4 Valores retornados por las funciones del robot*

<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Valor retornado</b>
FIJ_MIN_DIST (x)	PIC-A	0x42

FIJ_NUM_CICL (x)	PIC-A	0x43
FIJ_TIM_MUER (x)	PIC-A	0x44
FIJ_MODO_US (id-modo)	PIC-A	0x45
US_MED_CORTA (id-sensor)	PIC-A	Distancia a obstáculo
US_MED_LARGA (id-sensor)	PIC-A	Distancia a obstáculo
US_MED_DIREC T (id-sensor)	PIC-A	Distancia a obstáculo
US_LEER (0)	PIC-A	Distancia a obstáculo
FIJ_MODO_PASO (id-modo)	PIC-B	0x4E
FIJ_FACT_VEL (n)	PIC-B	0x4F
FIJ_VELOCIDAD (x)	PIC-B	0x50
M_ADELANTE (n)	PIC-B	0x51
M_ATRÁS (n)	PIC-B	0x52
M_IZQUIERDA (n)	PIC-B	0x53
M_DERECHA (n)	PIC-B	0x54
M_DIRECTO (secuencia)	PIC-B	No retorna
INICIO_COM (x)	PIC-A y PIC-B	Identificador de PIC
TEST_COM (x)	PIC-A y PIC-B	Byte parámetro (x)

**3.2.2 Módulo Cinemático** Esta parte del programa cumple funciones de control del sistema de motores ubicados en el robot. (Véase la Figura 3.3). Dispone de un conjunto de funciones localizadas entre el controlador difuso y el modulo de comunicaciones, encargadas de traducir las salidas del controlador difuso en movimientos del robot.

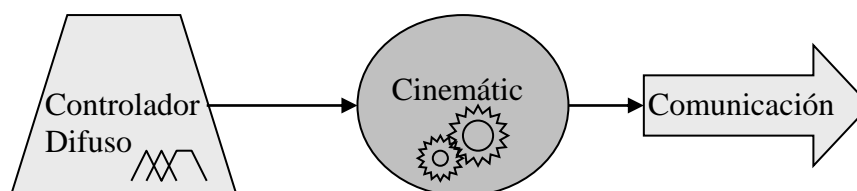


Figura 3.3 Localización del módulo cinemático

Las funciones principales de este modulo son:

- **ModeloDinámico( )** Función encargada de calcular el ángulo de giro y la distancia real a avanzar por el robot, los datos son tomados del controlador difuso y procesados de acuerdo al modelo cinemático visto en el capítulo uno agregando las constantes adecuadas y validando los resultados.
- **MoverMotor( )** Envía las señales de control para que el PIC haga girar o avanzar el robot. Primero se efectúa el giro y luego el avance conforme al modelo cinemático.

Para efectuar el avance del robot se sigue las siguientes etapas:

- 1 Tomar el ángulo de control entregado por el controlador difuso.
- 2 Invocar a la función ModeloDinámico() para obtener el ángulo de movimiento real del robot y la distancia a recorrer según el tamaño del paso establecido.
- 3 Llamar a la función MoverMotor() con los datos entregados por modelo dinámico.

El tamaño del paso es la distancia mínima capaz de desplazarse el robot, depende del factor de escala. Los giros no se ven afectados por el cambio de escala.

**3.2.3 Módulo Muestreo Ultrasónico** Esta parte del programa efectúa un muestreo del ambiente que rodea al robot, se han seleccionado ocho puntos estratégicos para la ubicación de los sensores de ultrasonido. (Véase la Figura 3.4). Estas muestras entran a la red neuronal para su posterior procesamiento. Se ha conservado la representación de la información diseñada para la simulación con algunas variaciones.

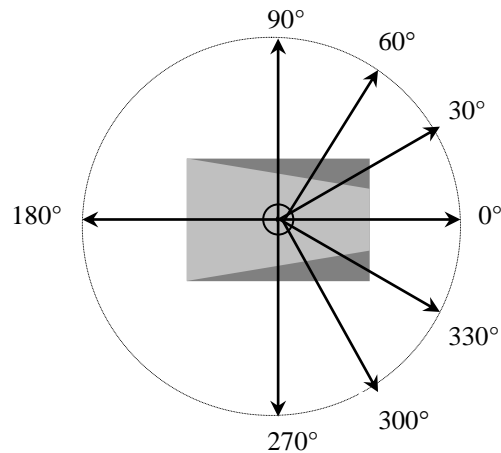


Figura 3.4. Orientación de los sensores en el robot con respecto a su centro geométrico, considerando que el frente del robot esta a 0°.

En el caso de la simulación el sistema toma 12 muestras, una cada 30 grados obteniendo 12 puntos de choque ya sea con un obstáculo o con los límites de la *región de actualización*, la cual es una ventana de 21 celdas por 21 celdas cuyo centro es el móvil (en la realidad una celda corresponde a 10 centímetros).

Para el caso real se opto por tomar solamente ocho muestras las cuales se pueden ver en la figura 3.4, con esto se busca disminuir el tiempo de muestreo utilizando un anillo de ocho sensores en contraste a usar solamente un sensor giratorio; también disminuir el consumo de energía pues un motor consume mas que todos los sensores y su hardware asociado.

Tanto para el caso real como simulación a los puntos de choque con obstáculos se les asigna la probabilidad  $P=1$  y a los puntos de choque con los límites de la región de actualización se les asigna  $P=0$ . Además existe un punto de muestreo extra equivalente a la posición del móvil a la cual se le asigna  $P=0$ .

Al interior del programa, una muestra ultrasónica se almacena en una estructura de datos que contiene los siguientes parámetros:

- El punto de choque (par ordenado(x, y).
- El valor de choque (probabilidad  $P=0$  o  $P=1$ )
- Distancia (entre el centro geométrico del robot y el punto de choque)
- Angulo de muestra

Los dos primeros parámetros son los que servirán como patrones de entrenamiento para la red neuronal encargada de reconocer el ambiente.

Los dos últimos se usan para elaborar un mapa del entorno en la pantalla del servidor.

En cuanto a las funciones que permiten el “muestreo” ultrasónico son:

- **MuestreoReal( )** Efectúa el barrido de los ocho sensores reales y obtiene los parámetros correspondientes, para compatibilidad con la simulación las otras cuatro muestras se rellenan con  $P=0$  es decir como si dichos sensores no detectaran obstáculos.
- **MedirDistancia( )** Supervisa el proceso de medida de la distancia por cada sensor, activa el proceso de medida y solicita el resultado. Es utilizada por MuestreoReal().

### 3.3 MÓDULO RECONOCIMIENTO NEURONAL<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> MOSSO, John Alexander: Simulación de vehículo guiado automáticamente empleando sistemas neuro difusos. Popayán, 1999, 112p. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica. Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.



**Arquitectura de la red** En el capítulo uno se revisó la arquitectura general de una red RBF. Con base en esta teoría se explica a continuación la construcción de la red RBF para el reconocimiento del ambiente.

La entrada a la red la constituye un vector de dos componentes, el par ordenado  $(x, y)$  que representa un punto cualquiera en el ambiente ; la salida es un valor escalar que significa la probabilidad de ocupación en el ambiente muestreado. Puede entonces definirse una arquitectura como lo muestra la figura 3.5.

Puede observarse que cada componente del vector de entrada se alimenta hacia adelante ( característica feed forward ) a las  $m$  funciones base cuyas salidas son linealmente combinadas con los pesos  $\{w_j\}_{j=1}^m$  para obtener la salida de la red  $f(x, y)$ .

Esta red posee una sola capa oculta y las funciones base son fijas en posición y tamaño mientras la red actúa; esto la convierte en una red lineal haciendo su análisis simple y el costo de computación menor.

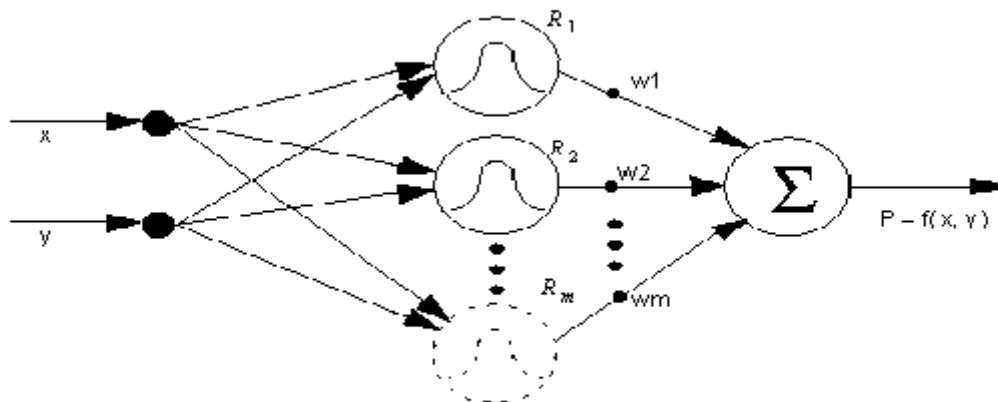


Figura 3.5. Arquitectura de la red RBF para el reconocimiento del ambiente.

Con base en el análisis realizado en el capítulo anterior, existen tres clases de parámetros a estimar en la red, a saber :

- Los centros  $c_i$  de las funciones base y con ello el número de neuronas  $m$ .
- El radio de influencia  $r$  de las  $m$  funciones base.
- El vector de pesos  $\mathbf{w}$ .

**Radio de influencia** En cuanto concierne a este trabajo, el radio de influencia de las funciones base es único y se ha obtenido empíricamente. Una vez la red ha sido construida, el radio de influencia es un parámetro libre que se optima con base en los resultados experimentales. En general, la reducción del radio de influencia provocará una variación más drástica en la superficie de salida. Si es muy pequeño, se pierde la *calidad de la generalización*, en contraste, si el radio es muy grande la superficie varía suavemente hasta el caso extremo de perder la propiedad de localidad provocando una respuesta significativa en puntos alejados de los centros de la función.

**Funciones base y centros** Los centros  $c_i$  son encontrados a partir de los datos de entrenamiento. Como se mencionó, puede emplearse un algoritmo de agrupamiento para encontrar la distribución aproximada de los datos de entrenamiento, sin embargo existe una ventaja en relación con dichos datos en este trabajo : El vector de salida en los parámetros de entrenamiento está compuesto por valores escalares de probabilidad 1 ó 0. Lo que esto representa es que los vectores de entrada asociados a la probabilidad 1 son candidatos óptimos para convertirse en los centros de las funciones base ya que es ahí mismo donde la función toma el valor de 1. Teniendo en cuenta esta justificación, la capa oculta de la red consistirá de  $m$  neuronas, con  $m$  igual al número de "unos" en el vector de salida de los datos de entrenamiento. Este es un criterio simple y efectivo, sin

embargo, si el número de unos es alto, la red es sobre parametrizada y aunque el resultado sea bueno, se hace deseable un algoritmo de agrupamiento para reducir el número de neuronas en la red con el fin de bajar el costo computacional.

Existe un compromiso marcado entre el número de neuronas en la capa oculta de la red y el radio de influencia de las funciones básicas. La generalización es la característica principal por la cual se ha seleccionado las redes neuronales para el reconocimiento del ambiente y reducir demasiado el radio de influencia es perder esta característica. En contraste, un número grande de neuronas en la red puede incrementar la generalización siendo el radio de influencia bajo ; sin embargo, esto no es práctico ya que el número de conexiones aumenta incrementando el costo de cómputo y más importante aún, se está subutilizando la red. Es necesario pues, un compromiso entre el radio de influencia seleccionado y el número de neuronas de la capa oculta el cual guarda estrecha relación con el número de patrones de entrenamiento deseados u obtenidos.

**El vector Óptimo de Pesos** La salida de la red es la combinación lineal de las salidas pesadas de cada neurona. El modelo lineal obtenido puede ser descrito como :

$$f(\hat{x}) = \sum_{i=1}^m w_i h_i(\hat{x})$$

donde  $\hat{x}$  representa el vector de entrada ( x, y ),  $w_i$  y  $h_i(\hat{x})$  representan el peso de la conexión y la función base asociada a la neurona i - ésima respectivamente. Además, los parámetros de entrenamiento son  $\left\{ \left( \tilde{x}_i, \tilde{y}_i \right) \right\}_{i=1}^P$ , donde  $\tilde{x}_i$  representa el vector de entrada

y  $\tilde{y}_i$  el vector de salida. En forma más explícita para este trabajo :  $\left\{ \left( (x, y)_i, P_i \right) \right\}_{i=1}^P$ .

Un método de estimación de parámetros ampliamente difundido en modelos lineales es el de los Mínimos cuadrados ( MSE ). El concepto fundamental de los mínimos cuadrados en este trabajo, es minimizar la suma del error al cuadrado

$$S = \sum_{i=1}^p (y_i - f(x_i))^2$$

Siguiendo un proceso matemático acorde al problema, se obtiene :

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y}$$

La ecuación anterior se emplea para estimar los pesos óptimos de la red. Construyendo  $\mathbf{H}$  para cada conjunto de patrones de entrenamiento ( lo cual implica seleccionar los centros de las funciones ) y resolviendo para cada ciclo de muestreo se obtiene la red que ha de reconocer el ambiente.

En la siguiente sección se exponen los resultados de la red en la medida que ésta es empleada.

**Los datos de entrenamiento** Anteriormente se mencionó el compromiso existente entre el radio de las funciones básicas y el número de neuronas de la capa oculta. Usar muchos parámetros de entrenamiento para la red es subutilizarla o en términos estadísticos para qué interpolar si se conocen muchos datos. Por otro lado, los datos de entrenamiento son obtenidos mediante muestreo ultrasónico en diferentes direcciones ; en un sistema real, podría emplearse un sistema de rotación para obtenerlos o bien un anillo de sensores en las direcciones de muestreo deseadas. En el primer caso, a mayor número de patrones el tiempo de rotación se incrementa substancialmente, disminuyendo el tiempo en el cual están disponibles los datos y como consecuencia la máxima velocidad de desplazamiento

que el robot pueda lograr ; en el segundo se eleva el recurso hardware, el peso del robot móvil, el costo, etc.

Cuando se emplea muestreo ultrasónico el número de muestras oscila entre 12 y 24. Nótese que con el campo de vista cónico típico de  $30^\circ$  para los sensores ultrasónicos, 12 sensores proporcionan  $360^\circ$  de vista, pero, con pobre direccionalidad.

Se ha seleccionado para este trabajo un número de ocho muestra reales y seis adicionales para compatibilidad con simulación, entonces en total son 12 muestras ultrasónicas dando como resultado un número máximo de neuronas igual en la capa oculta de la red. El radio de influencia de las funciones básicas queda como parámetro a optimizar empíricamente.

**Región de actualización** El concepto de región de actualización se intuye al considerar aspectos como el alcance confiable del sensor ultrasónico, las zonas de sombra producto de obstáculos cercanos al móvil y el tiempo de cómputo de la red neuronal. Anteriormente se mencionaron las principales limitaciones de los sensores ultrasónicos, por otro lado, una zona de sombra es simplemente la región detrás de un obstáculo la cual no es muestreada y por lo tanto es inoficioso pretender reconocer, de la misma forma en que al observar una pared se pretenda abstraer que hay detrás de ésta. Por último, una gran cantidad de tiempo empleado en cálculos se da cuando sistemáticamente se presentan a la red los centros de las celdas para obtener un valor de probabilidad basado en el previo entrenamiento. Es de esperar que a mayor cantidad de celdas a computar la velocidad de respuesta del sistema disminuya . Aunque la capacidad de cómputo deja de ser cada vez menos una limitación, reconocer el ambiente total en base al muestreo de una pequeña región resulta improductivo.

La región de actualización es una región parcial del ambiente total la cual delimita la zona que la red neuronal reconoce en cada ciclo de muestreo. La técnica empleada para usar la región de actualización es la siguiente: El sistema toma muestreos ultrasónicos que tienen como origen el móvil. El barrido se realiza cada 30 grados obteniendo 12 puntos de choque ya sea con un obstáculo o con los límites de la región de actualización, la cual es una ventana de 21 celdas por 21 celdas cuyo centro es el móvil.

A los puntos de choque con obstáculos se les asigna la probabilidad  $P= 1$  y a los puntos de “choque” con los límites de la región de actualización se les asigna  $P= 0$ . Además existe un punto de muestreo extra equivalente a la posición del móvil al cual obviamente se le asigna  $P= 0$ .

Estos datos son empleados como patrones de entrenamiento para la red neuronal. El punto extra proporciona a la red un valioso dato para el entrenamiento ya que obstáculos cercanos al móvil pueden provocar que la red generalice este punto como ocupado. La figura 3.6 muestra una configuración de obstáculos para ejemplificar el método.

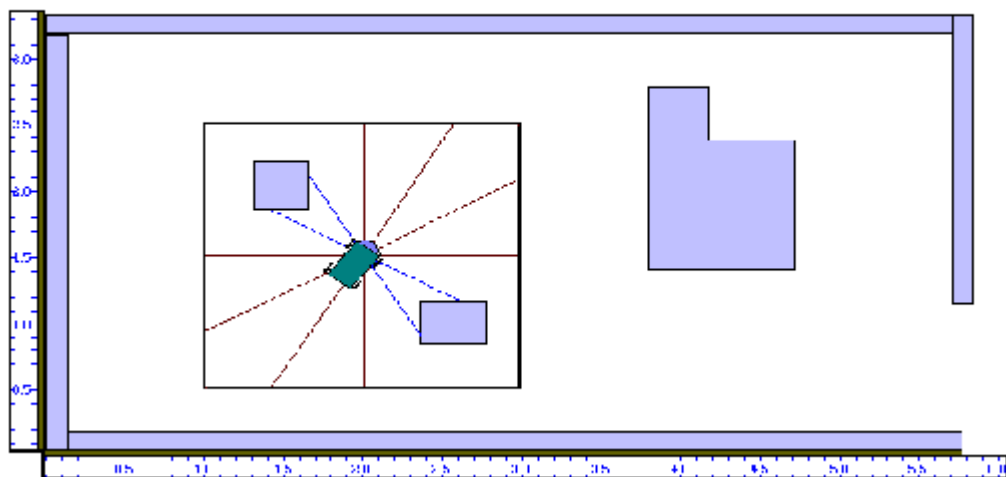


Figura 3.6 Configuración típica de obstáculos. El recuadro en negro representa la *región de actualización*.

**La Matriz Ambiente** Una vez entrenada la red con los patrones obtenidos, el resultado que se obtiene como salida es una superficie de probabilidad que brinda información sobre la certeza de ocupación de la región de actualización en ese instante de muestreo. En el caso ideal no existen fallas en la obtención de los patrones de entrenamiento pero en la realidad, estos datos son muy sensibles a fallas debido a las limitaciones en la exactitud del muestreo ultrasónico. Supóngase por ejemplo, que existe una lectura errada en los patrones muestra. La red se entrenará con estos datos provocando un reconocimiento errado. En el peor de los casos el móvil "verá" obstáculos donde no los hay provocando trayectorias no deseadas.

El ambiente que ha de emplear el controlador difuso debe carecer de estas debilidades para evitar malas decisiones. La Matriz Ambiente es quien contiene esta información. El principio de esta matriz es utilizar muestreos sucesivos para lograr exactitud y evadir los posibles errores en el reconocimiento.

En un sistema real, no se puede confiar en un solo muestreo y en un único reconocimiento, es por ello que se emplea la matriz ambiente. En adición, el acumulamiento de la información con base en muestreos sucesivos brindará un mapa resultante del ambiente más confiable.

Para obtener la matriz ambiente se promedia el contenido de las celdas de esta matriz delimitadas por la región de actualización con los resultados del nuevo muestreo, es decir, el contenido de cada celda de la matriz ambiente es igual al promedio de su valor actual con el valor del nuevo reconocimiento. Nótese que de esta forma las medidas recurrentes provocarán que obstáculos fijos mantengan alto este valor, mientras obstáculos móviles o en el peor de los casos ruido, aunque incrementen el valor la primera vez, caerán a un valor bajo en muestreos sucesivos. El contenido de las celdas de la matriz ambiente será denominado de ahora en adelante **valor de certeza VC**.



Métodos primitivos para el reconocimiento de ambientes solo informan de la presencia de un obstáculo mas no brindan una medida cuantitativa del mismo, es decir, qué tan grande es y qué tan cerca está. Esta información es valiosa cuando el comportamiento del móvil no es simplemente reactivo sino que está orientado a alcanzar una meta. Decidir si se vira a la derecha o a la izquierda *debe* depender además del objetivo, de que sector está más libre que el otro.

El controlador difuso posee un Universo llamado OCUPACION que debe poseer la información mencionada anteriormente. Este Universo es fundamental para el comportamiento reactivo del móvil en presencia de una configuración de obstáculos cualquiera. El punto es ahora cómo integrar la información entregada por la red al interior del controlador o en palabras ambiciosas, hibridar las dos técnicas.

**Densidad Polar de Obstáculos** Dado este hecho, en este punto es necesario un nuevo nivel de tratamiento de la información. Se introduce entonces el concepto de *densidad polar de obstáculos* cuyo fin es proporcionar valiosa información de qué tan grande son y qué tan cerca están los obstáculos del móvil.

La zona de actualización delimita una ventana en la matriz ambiente, esta ventana se emplea tanto para introducir como para extraer datos de dicha matriz. Una vez ha sido actualizada la matriz ambiente, se procede a convertir sus datos en información angular de ocupación. La información angular producirá "vista periférica" que el móvil empleará en la toma de decisiones. El procedimiento es como sigue :

Las celdas de la matriz ambiente que pertenecen a la ventana delimitada por la región de actualización son denominadas *celdas activas*. Los valores de certeza de cada celda

activa son tratados como *vectores obstáculo*, cuya dirección  $\beta$  está determinada por el ángulo entre la celda y el punto central del vehículo<sup>7</sup>:

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \frac{y_j - y_0}{x_i - x_0} \quad (1)$$

y cuya magnitud está dada por:

$$m_{i,j} = VC_{i,j}^* (a - bd_{i,j}) \quad (2)$$

donde:

$a, b$  Constantes positivas.

$VC_{i,j}^*$  Valor de certeza de la celda activa (i, j).

$d_{i,j}$  Distancia entre la celda activa (i, j) y el punto central del vehículo.

$m_{i,j}$  Magnitud del vector obstáculo a la celda activa (i, j).

$x_0, y_0$  Representan las coordenadas del punto central del vehículo.

$x_i, y_j$  Representan las coordenadas de la celda activa (i, j).

$\beta_{i,j}$  Dirección desde la celda activa hasta el punto central del vehículo.

Nótese que  $m_{i,j}$  es proporcional a  $-d$ , esto expresa que las celdas ocupadas producirán grandes magnitudes cuando se encuentren en la vecindad inmediata del robot y pequeñas cuando se encuentren alejadas. Los valores de a y b son seleccionados de tal forma que  $a - bd_{max} = 0$  donde  $d_{max}$  será la distancia entre la celda activa más lejana y el

---

<sup>7</sup> En vehículos simétricos, el punto central se define fácilmente como el centro geométrico del mismo, para vehículos rectangulares es posible elegir 2 puntos centrales, por ejemplo uno al frente y otro atrás del eje longitudinal.

punto central del vehículo. De esta forma  $m_{i,j} = 0$  para la celda activa más alejada y se incrementa linealmente para las celdas más cercanas.

El histograma que se construye tiene una resolución angular arbitraria  $\alpha$  tal que  $n = 360 / \alpha$  es un entero ; en este caso  $\alpha = 5^\circ$  y  $n = 72$ . Cada sector  $K$  corresponde a un sector angular  $\rho$  c

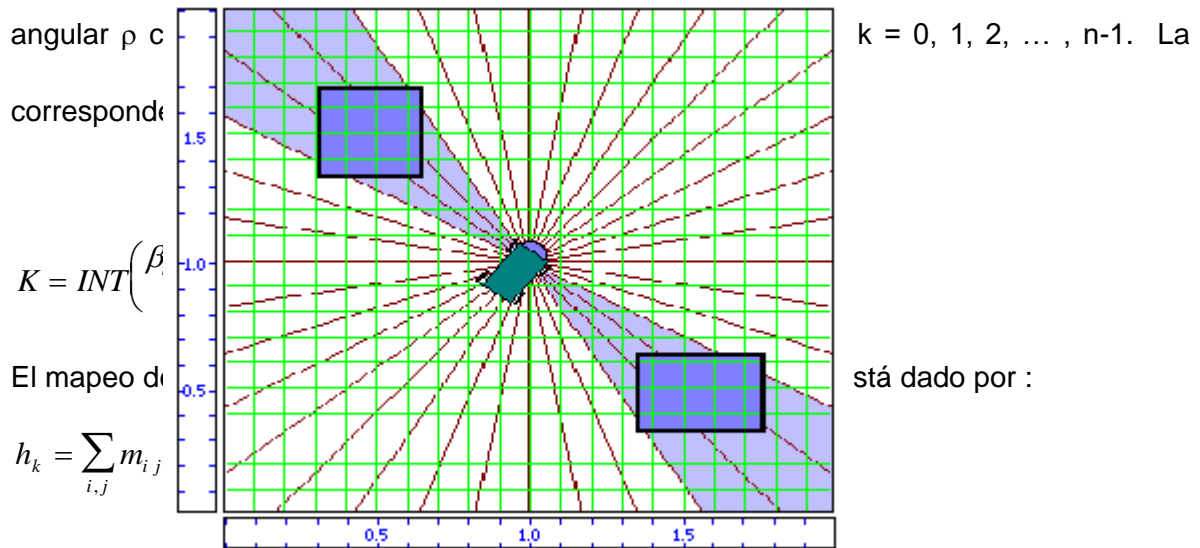


Figura 3.8. División de la rejilla de certeza en sectores k. Cada celda activa es relacionada con un sector en particular mediante las ecuaciones (1) y (3).

La figura 3.8 representa una configuración de obstáculos ejemplificando el mapeo de la región de actualización. Para efectos de aclaración, los sectores k de la figura tienen un valor de  $10^\circ$ , la zona sombreada representa el sector donde se espera concentración de obstáculos.

Debido a la naturaleza discreta del histograma, la variación de un sector  $k$  a otro puede ser drástica, haciendo necesaria una función de filtrado para suavizar la forma del histograma. Esto se realiza empleando un filtro pasabajo implementado mediante el método de ventana. La función que realiza dicho filtrado es :

$$h'_k = \frac{h(k-l) + 2h(k-l+1) + \dots + (l+1)h(k) + \dots + 2h(k+l-1) + h(k+l)}{2l+1}$$

donde  $h'_k$  es la densidad polar de obstáculos suavizada. El valor  $l = 5$  satisface las necesidades de suavidad en la función obtenida. La figura 3.9 representa el histograma instantáneo obtenido para la posición del móvil en la configuración de obstáculos de la figura 3.8.

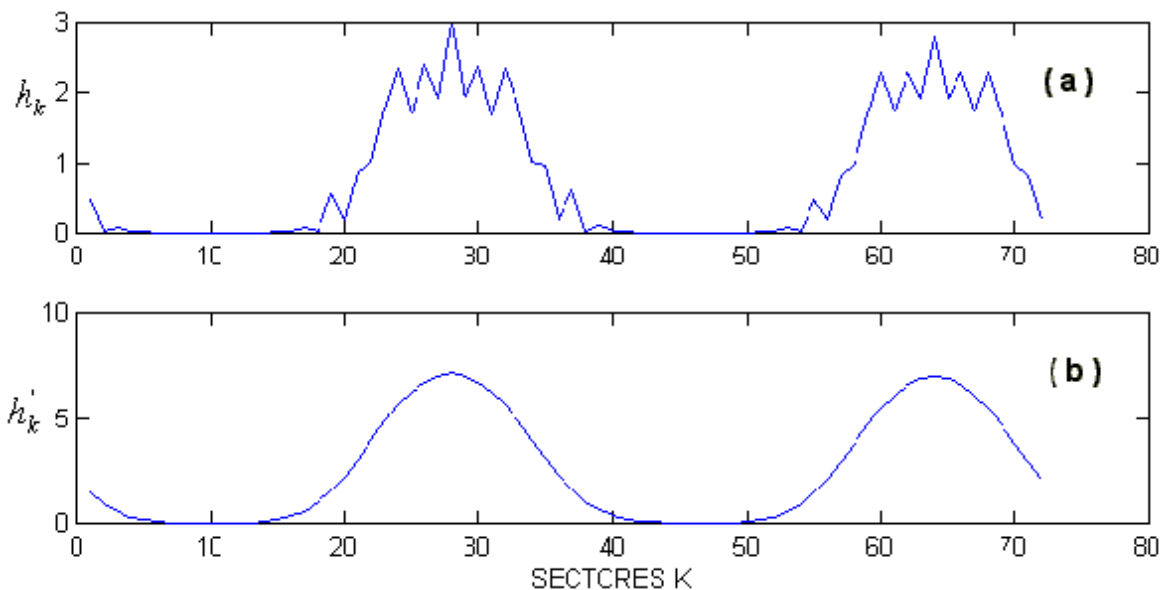


Figura 3.9 Histograma instantáneo de obstáculos y su suavizado por el método de ventana de la figura 3.8

Las direcciones en grados del histograma polar corresponden a direcciones medidas desde el eje positivo de las  $x$  en contra de las manecillas del reloj, tomando como origen el móvil. Para mayor aclaración se presenta en la figura 3.10 el histograma polar propiamente dicho obtenido para un solo ciclo de reconocimiento.

Nótese la similitud entre el ambiente del cual se partió y el histograma polar. Esto sugiere la calidad de la información que se puede extraer de la *matriz ambiente* obtenida a partir del reconocimiento realizado por la red neuronal.

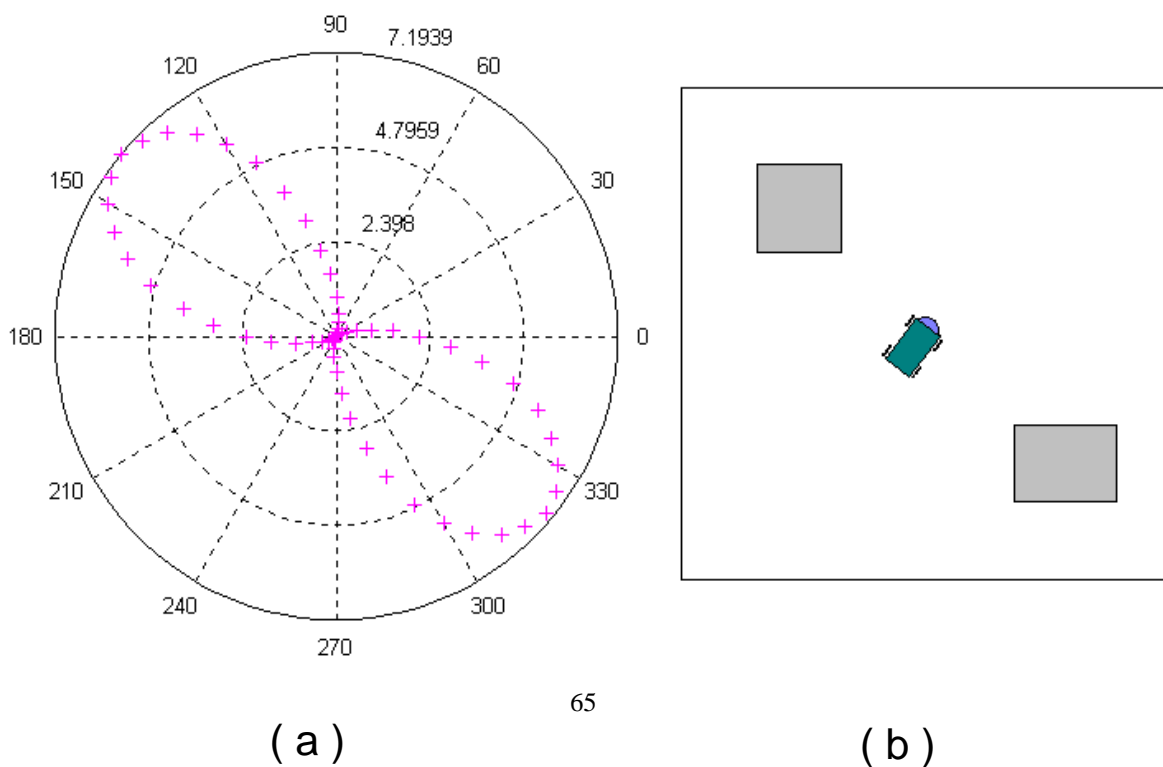


Figura 3.10 La figura (a) representa el histograma polar producto del tratamiento de la información

Una vez obtenido el histograma será empleado como medida del grado de ocupación en los ángulos que se requiera. El histograma acotado debidamente es integrado directamente al controlador difuso. Este nuevo histograma conforma el Universo Difuso OCUPACION. Es de notar la similitud entre los picos obtenidos en el histograma y las funciones radiales . La variable difusa Ocupación puede verse como un Universo Difuso cuyos subconjuntos son producto de funciones radiales cuyo centro (picos del histograma) y radio de influencia varía dependiendo de la ocupación del ambiente.

### **3.4 MODULO CONTROLADOR DIFUSO REAL**

El controlador difuso se ha construido con base en maniobras exhibidas por un conductor para sortear situaciones encontradas en la conducción de un vehículo. El controlador difuso toma acciones específicas para una situación en particular, estas son alcanzar meta o evadir obstáculo. ( Véase la Figura 3.11).

Si el móvil se encuentra en un sitio libre de obstáculos, o estos están muy alejados; su función primordial será entonces alcanzar la meta dada, sin realizar en ningún momento un comportamiento de evasión. De otra forma si encuentra obstáculos, las acciones deberán estar orientadas a evadirlos y en un segundo plano quedará el comportamiento de alcanzar la meta.

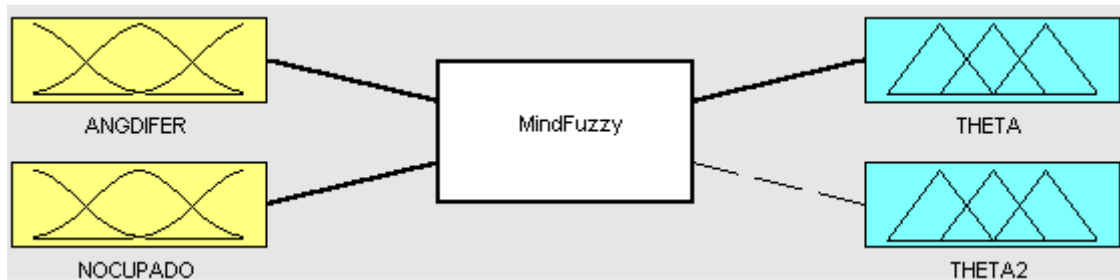


Figura 3.11. Diagrama del Controlador difuso

**Entradas:**

- 1- ANGDIFER es el ángulo encontrado a partir de diferencia entre la posición del robot y la posición de la meta.
- 2- NOOCUPADO Es una distribución de probabilidad que representa la densidad polar de obstáculos. Es entregada por la red Neuronal.

**Salidas:**

- 1- THETA Angulo de control para comportamiento Alcanzar meta.
- 2- THETA2 Angulo de control para comportamiento evadir obstáculo.

**3.4.1 Comportamiento alcanzar meta** Se refiere a: Dada una ubicación y orientación cualquiera del móvil, alcanzar una vecindad sin obstáculos de la meta en el ambiente. Una vecindad de la meta se define como una circunferencia de radio  $r$  con centro en el punto de destino. Es considerado un éxito que el móvil llegue al área delimitada por esta vecindad. Para ejecutar estas acciones se usan las entradas ANGDIFER y NOOCUPADO, la salida correspondiente es THETA.

Se define el conjunto difuso **AngDifer** el correspondiente al ángulo diferencia entre la posición del robot y la meta. Los universos difusos de esta variable se muestran en la figura 3.12.

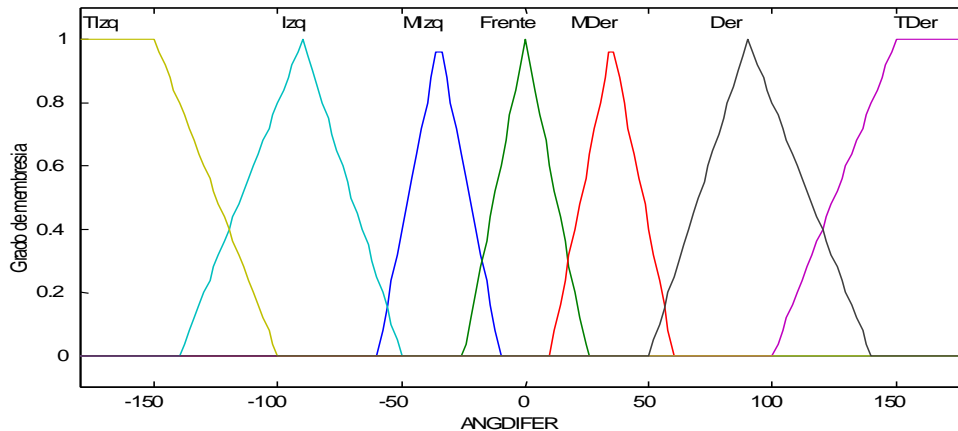


Figura 3.12. Universos de la variable difusa de entrada ANGDIFFER

Convenciones:

- Tlzq = Girar Todo a la Izquierda
- lzq = Girar a la Izquierda
- Mizq = Girar un poco a la Izquierda
- Frente = Seguir al frente
- Mder = Girar un poco a la Derecha
- Der = Girar a la Derecha
- TDer = Girar Todo a la Derecha

THETA es el ángulo de control para este comportamiento, puede realizar giros mas pronunciados comparados con THETA2, ante la inexistencia de obstáculos el hecho de poder rotar con ángulos mayores le permite al móvil ubicarse rápidamente en dirección de la meta. El universo de la variable THETA se ilustra en la figura 3.13



La selección de los universos se ha realizado empíricamente orientado a mover el robot de una manera armónica y lo más eficaz posible.

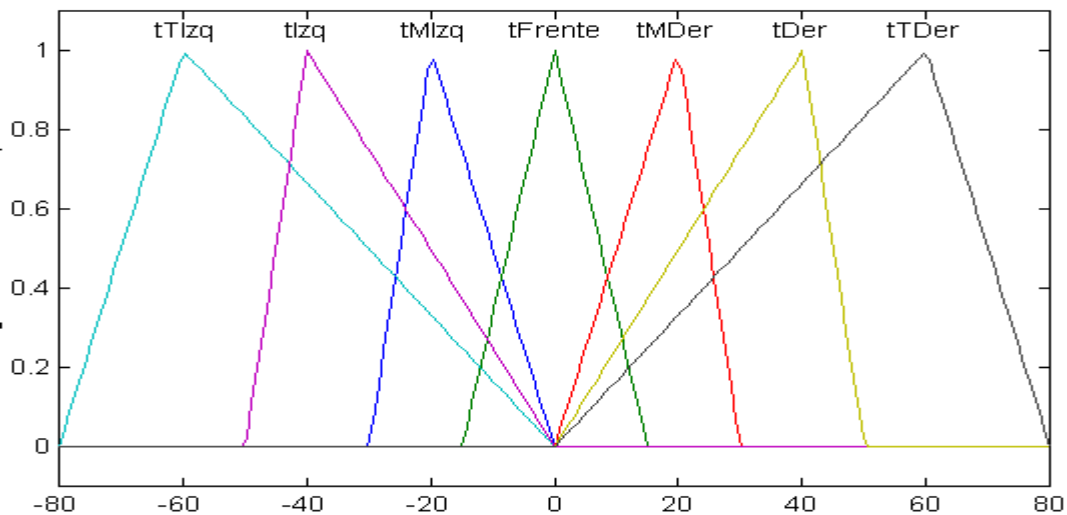


Figura 3.13. Universos de la variable de salida THETA. Aunque el robot es capaz de girar sobre su propio eje, se ha limitado el giro a +/-80° para el comportamiento alcanzar meta con el fin de suavizar un poco la ruta en ausencia de obstáculos.

En esencia se tienen 3 reglas básicas para este comportamiento las cuales son:

- SI** la meta está a la *derecha* **ENTONCES** gire a la derecha.
- SI** la meta está a la *izquierda* **ENTONCES** gire a la izquierda.
- SI** la meta está al *frente* **ENTONCES** siga de frente.

En forma mas detallada Se han implementado 7 reglas en total para un mejor control de ángulo, estas son:

- SI** ANGDIFFER **ES** kTlzq **ENTONCES** THETA **ES** tTlzq (1)
- SI** ANGDIFFER **ES** klzq **ENTONCES** THETA **ES** tlzq (2)
- SI** ANGDIFFER **ES** kMlzq **ENTONCES** THETA **ES** tMlzq (3)
- SI** ANGDIFFER **ES** kFrente **ENTONCES** THETA **ES** tFrente (4)

**3.4.2 Comportamiento Evasión** la capacidad del móvil para desenvolverse en ambientes no estructurados es el objetivo de la navegación autónoma. Este modo entra en funcionamiento cuando el móvil se encuentra cerca de obstáculos, el objetivo es no chocar; bordear los obstáculos encontrados, dirigirse hacia donde haya menor concentración de obstáculos y proseguir el camino hacia la meta. Los ángulos de giro son menores para realizar un movimiento suave o moderadamente grandes para apartarse de un obstáculo en su trayectoria. La variable de salida es THETA 2, su universo se ilustra en la figura 3.14.

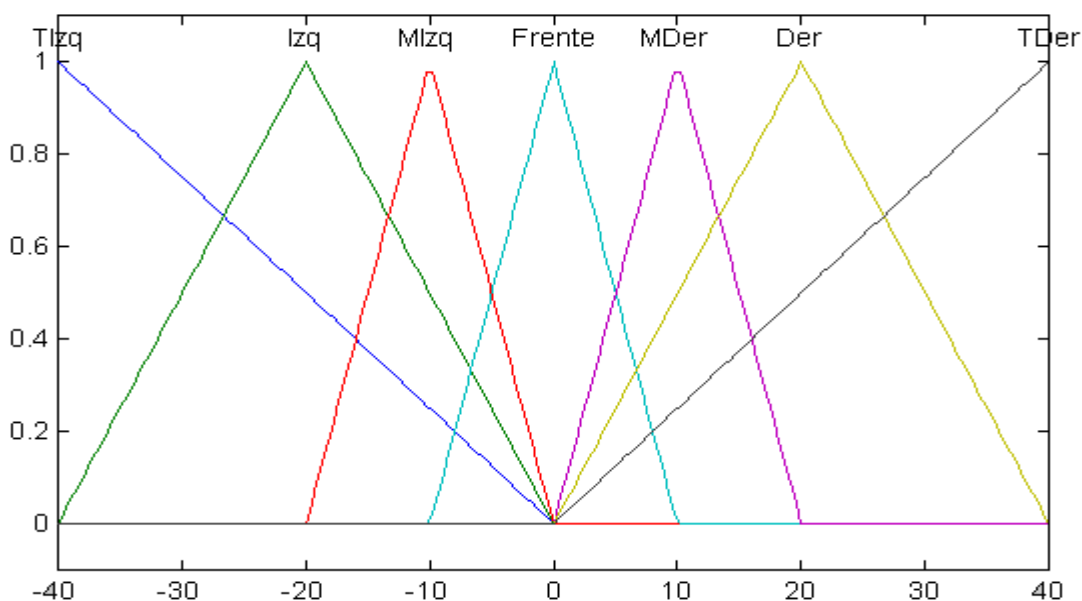


Figura 3.14. Conjunto de salida Theta 2

La premisa para la evasión es simple y se basa en qué sector está más libre si está ocupada la dirección de movimiento. Se formulan entonces las siguientes reglas difusas :

**SI *giroizquierda* es OCUPADO Y *giroderecha* es NOOCUPADO ENTONCES GIRE A LA DERECHA ( 1 )**

**SI *giroizquierda* es NOOCUPADO Y *giroderecha* es OCUPADO ENTONCES GIRE A LA IZQUIERDA ( 2 )**

Existen además dos reglas necesarias que proporcionan reactividad inmediata cuando se encuentra un obstáculo lateral a la dirección de movimiento. Estas reglas provocan que el robot se aleje de un obstáculo a sus lados manteniéndolo a distancia segura. Estas reglas son :

**SI *corredorizq* es OCUPADO Y *frente* es NOOCUPADO ENTONCES GIRE A LA DERECHA ( 3 )**

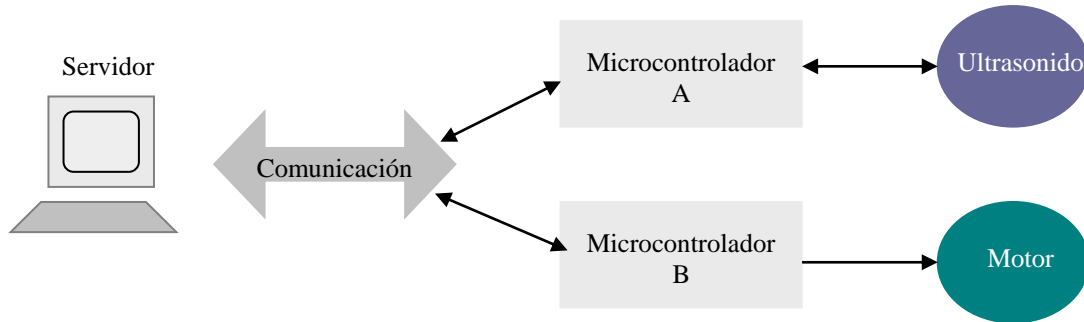
**SI *corredorder* es OCUPADO Y *frente* es NOOCUPADO ENTONCES GIRE A LA IZQUIERDA ( 4 )**

Estas reglas tienen mayor peso *si el frente esta libre* evitando así conflicto con las reglas ( 1 ) y ( 2 ).

Para un mejor desempeño del móvil las reglas se empiezan a evaluar partiendo del conjunto difuso Frente y se continua verificando en forma consecutiva uno a uno siguiendo con los mas próximos hacia la izquierda y luego de la misma forma a la derecha hasta encontrar una regla o reglas que cumplan las condiciones planteadas para que se disparen.

### **3.5 MÓDULOS SOFTWARE IMPLEMENTADOS EN EL ROBOT**

El software embebido en el robot esta basado en un par de microcontroladores PIC16F873 de Microchip.



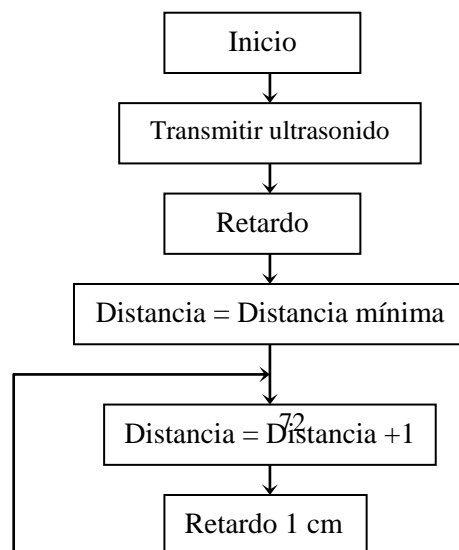
Cada PIC se comunica en forma independiente con el servidor, aunque pueden hacerlo simultáneamente. Cada PIC posee funciones de comunicación.

Figura 3.15. Estructura del sistema móvil, basados en PIC16F873

El PIC-A cumple funciones de control de ultrasonido las cuales son las siguientes:

- 1 Activar el Tx de ultrasonido que el servidor solicite.
- 2 Activar el Rx de ultrasonido complemento del Tx activado.
- 3 Medir el tiempo que tarda en llegar el eco y traducirlo a centímetros.
- 4 Enviar el resultado de la última medición cuando el servidor se lo solicite.
- 5 Informar con señales audibles y visibles el estado de las comunicaciones y las tareas que esta realizando.

El algoritmo para medir la distancia es el siguiente:



El PIC-B se encarga de transferir las secuencias de movimiento para los motores paso a paso cuando el servidor le envía las señales de control correspondientes. Igual que el PIC-A posee señales audibles y visibles para informar del estado de las tareas y las comunicaciones.

El hecho de que el sistema posea dos procesadores permite enfocarse en el desarrollo de la aplicación en el servidor de una manera flexible. Para más detalle sobre las funciones de los PICs Véase Anexo B.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

Las partes constitutivas del robot AMI se probaron por separado y finalmente se evalúa el desempeño global del sistema.

### 4.1 SISTEMA MECÁNICO

La implementación de las partes mecánicas es muy exigente para un óptimo funcionamiento. En el proceso de construcción del móvil el balance de las ruedas, la alineación, el nivel de piñones y ejes que los soportan; así como la estructura fueron construidas con la mejor precisión posible dentro de las limitaciones técnicas.

Una vez construido, se probó el desplazamiento del robot utilizando un programa en Visual C++ que permite guiarlo a voluntad del usuario, teniendo las opciones de: Girar a la izquierda, Girar a la Derecha, avanzar y Retroceder.

El sistema de tracción tipo oruga hace que el robot pueda maniobrar mejor frente a situaciones difíciles; posee destrezas como:

- Buen comportamiento frente a pequeños obstáculos. Fácilmente pasa sobre ellos.
- Buena estabilidad.
- Disminuye el error en los giros y en el desplazamiento. Esto se evidencia comparando el efecto cuando el móvil utiliza la banda y cuando no. (Véase las Figuras 4.1a y 4.1b).
- Capacidad de giro sobre su eje geométrico.

- El robot con pequeños cambios tiene la posibilidad para moverse con tracción trasera o con tracción delantera.
- Se puede quitar las bandas de la oruga y el robot pasa a la configuración clásica, queda con cuatro llantas, lo cual implica mayor flexibilidad para experimentar.
- Buen desempeño del eje delantero, del eje trasero y del sistema de reducción.

El móvil al desplazarse emite un ruido característico debido a los motores paso a paso y al golpe propio de los piñones lineales.

Las figuras 4.1a y 4.1b muestran las configuraciones de un robot con tracción clásica y uno tipo oruga.

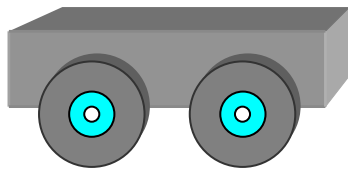


Figura 4.1a Robot simple

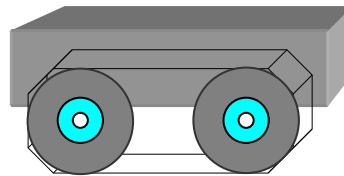


Figura 4.1b Robot oruga

Figuras 4.1a y 4.1b Configuraciones de un robot con tracción clásica y tipo oruga

Se observaron también algunas condiciones para un buen funcionamiento de la tracción tipo oruga, entre ellos:

- Se necesita mayor potencia en el motor , la razón es que la superficie de rozamiento con el piso es superior.
- Es muy exigente en cuanto a la planitud de la superficie de contacto; al instante de efectuar un giro la superficie de contacto debe ser completamente lisa, cualquier elevación en el material del piso le ocasiona dificultad para rotar.

- El sistema mecánico tiene buen desempeño, esto se hace visible, en los giros, en el desplazamiento hacia delante y en las maniobras de reversa.

**4.1.2 Limitaciones** El sistema de reducción solo permite el incremento del torque en un factor de cuatro; esto hace que exista un limite para transportar pesos moderados; al exceder el peso se incrementa el error en la posición debido a patinazos al girar. Reorganizando los piñones y agregando uno sencillo a cada lado se puede incrementar aún mas. Permite transportar hasta 350grs, con mas peso se dificultan los giros.

En la construcción del móvil el principal problema es centrar sobre las partes mecánicas que lo requieran, alinear adecuadamente ejes y piñones, y conseguir algunos de los elementos necesarios.

## **4.2 SISTEMA DE ULTRASONIDO**

Es uno de los elementos esenciales del robot, este sistema se encarga de hacer el barrido del espacio que rodea al robot. De la precisión de este sistema depende el desempeño del robot, algo así como el sistema de visión para el ser humano.

Utiliza sensores de diferentes tipos. Por lo tanto, para seleccionar parejas Transmisor-Receptor se sometieron a pruebas para determinar inicialmente los mejores transmisores y los mejores receptores en forma separada ; finalmente se evaluaron y seleccionaron las mejores parejas, teniendo como parámetro de selección el buen desempeño en cuanto a: la calidad de señal transmitida, el nivel de señal detectada en el receptor, nivel y tiempo de zona muerta, distancia mínima y máxima capaz de medir.

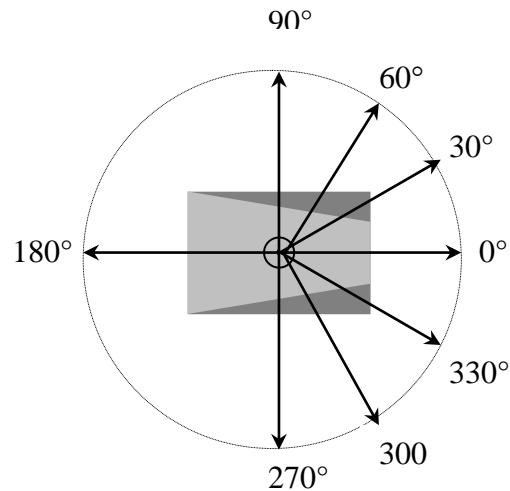


Durante el desarrollo del sistema de ultrasonido se observaron algunos fenómenos interesantes, entre ellos:

- La precisión del sistema depende en gran parte de la calidad del sensor.
- Es muy sensible a el ángulo de incidencia. Lo máximo permitido a cortas distancias es aproximadamente  $10^\circ$ .
- No detecta los bordes, especialmente las esquinas que forman ángulos agudos.
- Los sensores que funcionan a 40 kHz. permiten hacer observaciones mas detalladas del ambiente pero requieren mas potencia puesto que se atenúan mas en el aire.
- Debido a las características físicas del ultrasonido, este se difunde en pequeñas cantidades por el contorno del sensor las cuales llegan al receptor causando que vibre, estas vibraciones en el receptor son causadas en el instante mismo de la transmisión, ese espacio de tiempo se conoce como zona muerta. Para disminuir su efecto se buscó una separación óptima entre cada pareja de transmisor y receptor; También se ubicó el transmisor un poco adelantado respecto al receptor; y se conectó una resistencia de bajo valor en serie con el transmisor.
- La Zona Muerta define la mínima distancia capaz de medir el sistema. Esta depende de la calidad del sensor. Para nuestro caso la Zona Muerta en modo largas distancias es de 1.5 milisegundos. Trabajando en modo cortas distancias no tuvo relevancia; permite medir distancias mínimas de dos centímetros.
- Tienen un ancho de banda bastante estrecho ( 0.5Khz) y pueden responder a una frecuencia de 13.3 Khz, aunque con un nivel mínimo.

Para un buen proceso de medición en el receptor se diseñaron dos etapas amplificadoras la primera mide distancias cortas y la segunda mide distancias largas.

**4.2.1 Anillo de sensores** Las parejas de sensores están ubicadas alrededor del móvil, se encuentran separadas  $30^\circ$  al frente y  $90^\circ$  atrás. (Véase las Figuras 4.2a , 4.2b y Tabla 4.1).

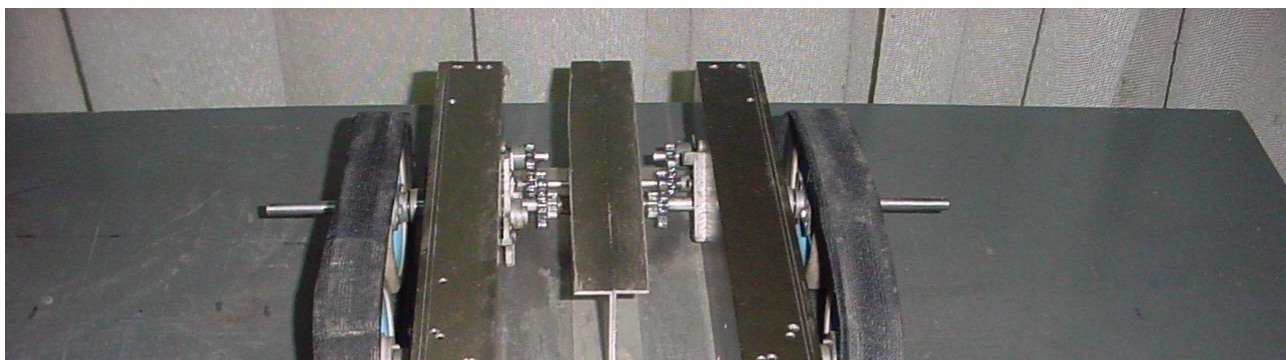


*Figura 4.2a* Orientación de los sensores en el robot con respecto a su centro geométrico. Frente del robot esta a  $0^\circ$ .

Tabla 4.1 Nombre de las parejas de sensores de acuerdo a su ubicación

Nombre y ubicación de las parejas de ultrasonido			
Nombre	Ubicación En Grados	Nombre	Ubicación En Grados
Pareja 1*	$0^\circ$	Pareja 5*	$270^\circ$
Pareja 2*	$30^\circ$	Pareja 6*	$330^\circ$
Pareja 3*	$90^\circ$	Pareja 7*	$60^\circ$
Pareja 4*	$180^\circ$	Pareja 8*	$300^\circ$

\*Véase la Figura 4.2a



Inicialmente se probó el sistema de ultrasonido en forma independiente con la intención de establecer su precisión y efectividad, para esto se tomaron varias medidas ubicando obstáculos de diferentes tamaños frente a cada pareja de sensores, se midió el tiempo que demora en retornar el eco, con este tiempo se calcula la distancia y se compara con la distancia medida directamente con una cinta métrica; En cada caso se tomaron muestras variando la distancia del obstáculo. Los resultados obtenidos fueron muy cercanos a los valores reales.

Para una de las pruebas se utilizó una caja de cartón rectangular de 10cm x 10cm x 25cm (Largo x Ancho x Alto) como obstáculo; en todo momento se trabajó con un ángulo de

incidencia aproximadamente de cero grados; Los datos encontrados se muestran en las tablas 4.2 , 4.3, 4.4, 4.5 , 4.6 y 4.7.

Tabla 4.2. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido uno.

Pareja de Sensores # 1	
Distancia Real. En Cm	Distancia con Ultrasonido1. En Cm
2	2
4	4
6	6
8	8
10	9
12	12
14	14
16	16
18	18
20	20
22	22
24	24
26	26
28	28
30	29
32	32
34	34
36	36
38	38
40	39
42	41
44	44
46	45
48	47
50	50
55	55
60	60
65	64
70	70
75	75

Tabla 4.3. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido dos.

Pareja de Sensores # 2	
Distancia Real. En Cm	Distancia con Ultrasonido2. En Cm
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
8	8
10	10
12	12
14	14
16	16
18	18
20	21
25	25
30	30
35	35
40	40
45	45
50	51
55	56
58	61

Tabla 4.4. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido tres.

Pareja de Sensores # 3	
Distancia Real. En Cm	Distancia con Ultrasonido3. En Cm
2	2
4	4
6	6
8	8
10	10
12	11
14	14
16	16
18	18
20	19
22	21
24	23
26	27
28	28
30	31
32	32
34	34
36	36
38	38
40	40
45	47
50	53
55	55

Tabla 4.5. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido cuatro.

Pareja de Sensores # 4	
Distancia Real En Cm	Distancia con Ultrasonido4 En Cm
2	3
4	4
6	6
8	7
10	9
12	12
14	14
16	17
18	19
20	21
22	22
24	25
26	26
28	28
30	30
32	32
34	35
36	36
38	38
40	41

Tabla 4.6. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido cinco.

Pareja de Sensores # 5	
Distancia Real En Cm	Distancia con Ultrasonido5 En Cm
2	2
4	4
6	6
7	7
8	7
10	10
12	11
14	14
16	17
18	18
20	20
22	22
24	23
26	26
28	28
30	29
32	32
34	34
36	36
38	37
40	39
42	41
44	44
46	47
50	50
55	55

Tabla 4.7. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido seis.

Pareja de Sensores # 6	
Distancia Real En Cm	Distancia con Ultrasonido6 En Cm
2	2
4	4
6	7
8	7
10	9
12	13
14	14
16	15
18	17
20	21
22	22
24	23
26	26
28	27
30	29
32	31
34	33
36	35
38	37
40	39
42	42
44	43
46	45
48	48
50	49
55	55
60	58
65	64
70	69
75	74

Tabla 4.8. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido siete.

Pareja de Sensores #7	
Distancia Real En Cm	Distancia con Ultrasonido6 En Cm
2	2
4	4
6	7
8	7
10	9
12	12
14	15
16	15
18	17
20	21
22	22
24	23
26	26
28	27
30	29
32	31
34	33
36	35
38	37
40	40
42	42
44	43
46	44
48	48
50	49
55	55
60	59
65	64
70	68
75	74

Tabla 4.9. Distancia real y distancia medida con la pareja de ultrasonido ocho.

Pareja de Sensores # 8	
Distancia Real En Cm	Distancia con Ultrasonido6 En Cm
2	2
4	4
6	6
8	7
10	9
12	11
14	14
16	16
18	19
20	21
22	22
24	23
26	27
28	28
30	29
32	31
34	32
36	35
38	37
40	39
42	41
44	43
46	45
48	48
50	49
55	55
60	58
65	66
70	71
75	76



Con los datos de las tablas anteriores se construyen las gráficas correspondientes a las figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, 4.9, 4.10; en ellas se contrastan los valores medidos con las distancias reales.

Figura 4.3. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 1



Figura 4.4. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 2

Figura 4.5. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 3

Figura 4.6. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 4

Figura 4.7. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 5

Figura 4.8. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 6



Figura 4.9. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido

# 7

Figura 4.10. Medida Real comparada con la distancia obtenida con la pareja de ultrasonido # 8

En todas las gráficas la línea azul representa la Distancia Real y la línea roja la Distancia medida usando ultrasonido, las marcas corresponden a las lecturas tomadas. Se observa que la distancia medida con los sensores está muy cercana al valor real obtenido con una cinta métrica. Se encuentra un error máximo de dos centímetros lo cual es muy aceptable tomando como referencia el tamaño del móvil. Las parejas de mayor alcance son la seis y la uno; las parejas dos, tres y cinco tienen un alcance intermedio; la pareja cuatro es la de menor alcance.

En el circuito de recepción se ajustó la ganancia de las dos etapas de tal forma que la primera etapa puede medir distancias de 2 a 50 cm y la segunda mide de 30cm hasta 2mts. Para este caso solo se mide distancias máximas de 127 cm (7 bits de resolución). Las pruebas anteriores se hicieron usando las dos etapas combinadas.

**4.2.2 Restricciones** Los sensores de ultrasonido no detectan obstáculos en los que el ultrasonido llegue con un ángulo de incidencia mayor de  $10^\circ$ ; ni las esquinas de los obstáculos que forman ángulos. Por lo tanto los sensores no detectarán la presencia de un objeto cuando al acercarse o al girar cerca de el quede ubicado de tal forma que el ángulo de incidencia para el sensor que debe detectarlo sea mayor de  $10^\circ$ . (Véase la Figura 4.11).

Objetos pequeños, comparados con la longitud de onda del ultrasonido, no son detectados. Obstáculos delgados y alargados en posición vertical solo pueden ser detectados cuando están muy cerca del móvil.

Otro caso en el que no se detecta un obstáculo rectangular es cuando el móvil se le acerca de tal forma que una de sus esquinas queda ubicada entre dos sensores laterales

como muestra la figura 4.12, esto se presenta por: la ubicación de los sensores, el ángulo de incidencia, la geometría del objeto y las características de la superficie de reflexión.

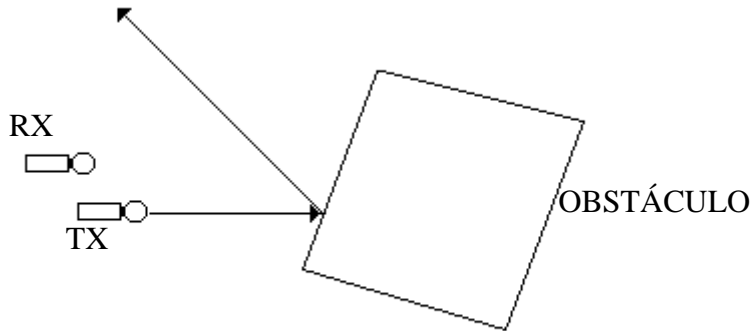


Figura 4.11. Objeto no detectado. Angulo de incidencia grande

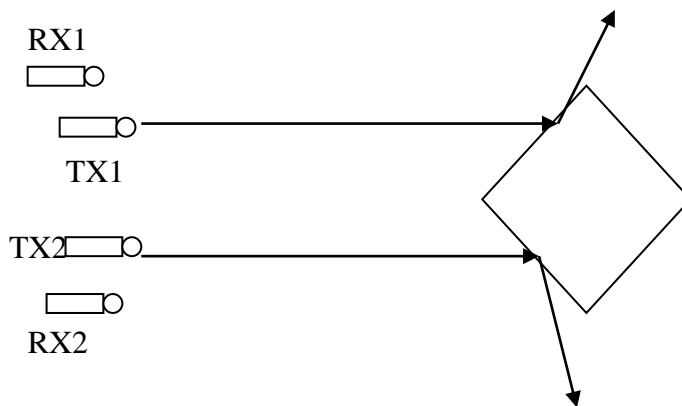


Figura 4.12. Objeto no detectado. Angulo entre los sensores

### 4.3 PRUEBAS CON OBSTÁCULOS

Para probar el desempeño del móvil, se crea un ambiente con obstáculos, ubicando objetos en diferentes partes del piso, formando en cada ocasión configuraciones al azar.

El piso utilizado tiene cuadros de baldosas de 25cm x 25cm, estos son equivalentes para el programa de control a un cuadro de la rejilla en la pantalla del monitor. En el piso se

define una ubicación inicial para el móvil (Punto de partida), luego se ubican obstáculos en diferentes partes; posteriormente se define un punto de llegada (Meta); finalmente se ejecuta la acción "alcanzar meta" para que el móvil inicie su recorrido. Se considera un éxito que el móvil llegue en una vecindad ( 20 Cm) de la meta .

Se parte de configuraciones sencillas, se evaluó el comportamiento y se adecuaron las reglas y los conjuntos difusos. La primera configuración usada es la correspondiente a la figura 4.13.

**4.3.1 Configuración uno** Solamente hay un obstáculo y está ubicado entre el origen y meta. (Véase la Figura 4.13)

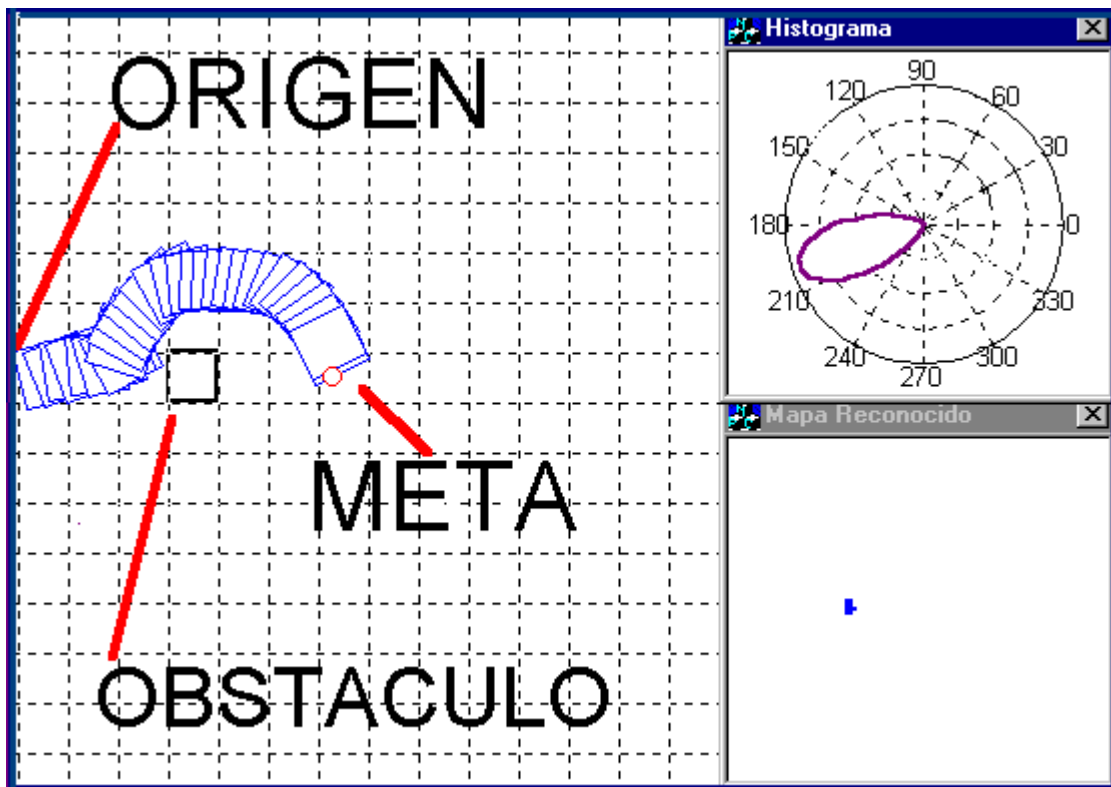


Figura 4.13. Configuración Básica

Origen define el punto de partida, Meta indica el punto de llegada, el cuadro negro representa la ubicación de un obstáculo. Los cuadros azules indican la trayectoria calculada por el controlador para que la recorra el móvil. Mapa reconocido dibuja los puntos dónde se detectó obstáculo, tiene una escala de 1 a 4 comparada con la rejilla. Histograma representa la densidad polar de obstáculos, es una distribución polar de probabilidad . Las pruebas fueron exitosas.

Puede presentarse una situación como la mencionada en la sección 4.2.2 en cuyo caso el móvil chocaría con el obstáculo.

**4.3.2 Configuración dos** Se ubican dos obstáculos separados por dos cuadros y uno un poco mas adelante del otro. (Véase la Figura 4.14).

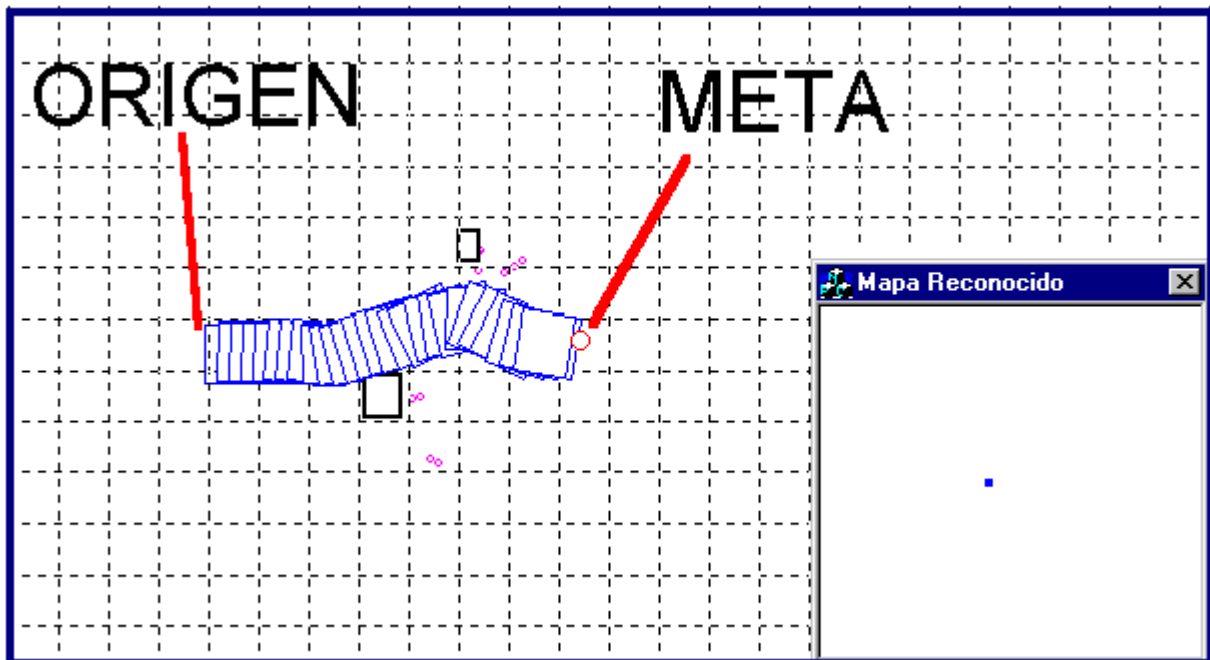


Figura 4.14 Configuración con dos obstáculos

En la trayectoria seguida, como muestran los cuadros azules, el vehículo recorre una distancia en línea recta, posteriormente detecta un objeto en su camino, como lo indican los puntos color fucsia, después de detectarlo lo evade, en su nuevo camino encuentra otro obstáculo, también lo esquiva y al hacerlo toma la ruta para finalmente alcanzar la meta.

Otra configuración es la ilustrada en la figura 4.15, el origen se ubica detrás del obstáculo de mayor tamaño. El móvil gira al lado derecho para realizar la maniobra de evasión y posteriormente a la izquierda para alcanzar la meta. Los puntos color fucsia representan la detección de un obstáculo por el ultrasonido.

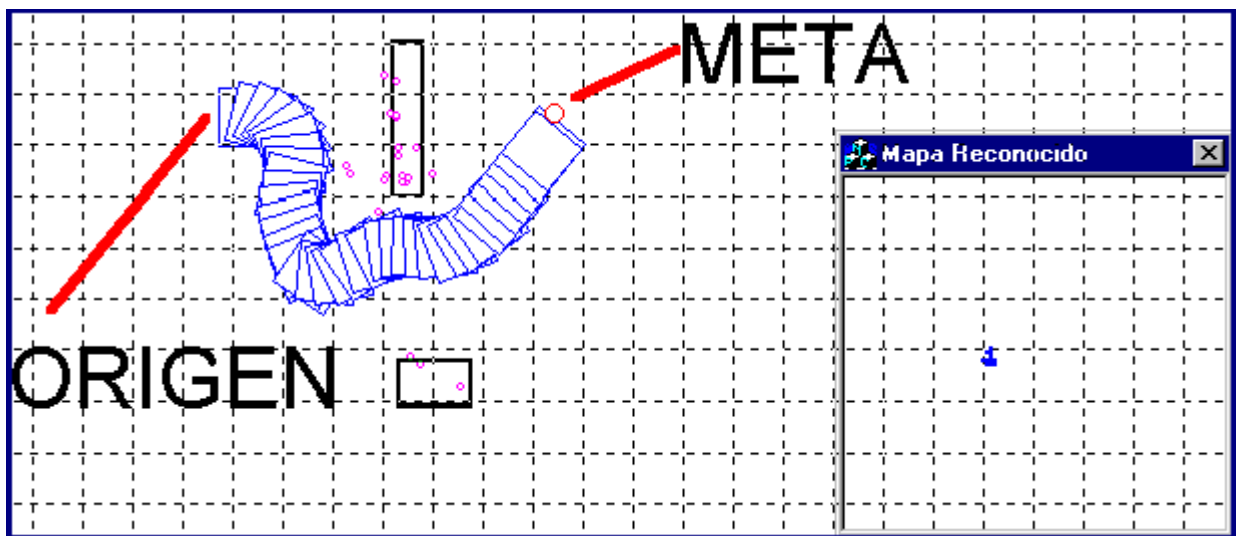


Figura 4.15 Configuración con dos obstáculos

**4.3.3 Configuración tres** En el arreglo se utilizan tres obstáculos como muestra la figura 4.16. El móvil se desplaza hacia su izquierda y sigue una trayectoria pasando entre dos obstáculos.

Lo primero que encuentra el móvil es un obstáculo rectangular; detecta la cara mas angosta y lo evade, luego recorre un trayecto paralelo a la cara mayor, después se aleja de esta cara, detecta el objeto de la izquierda y gira a la derecha buscando la meta.

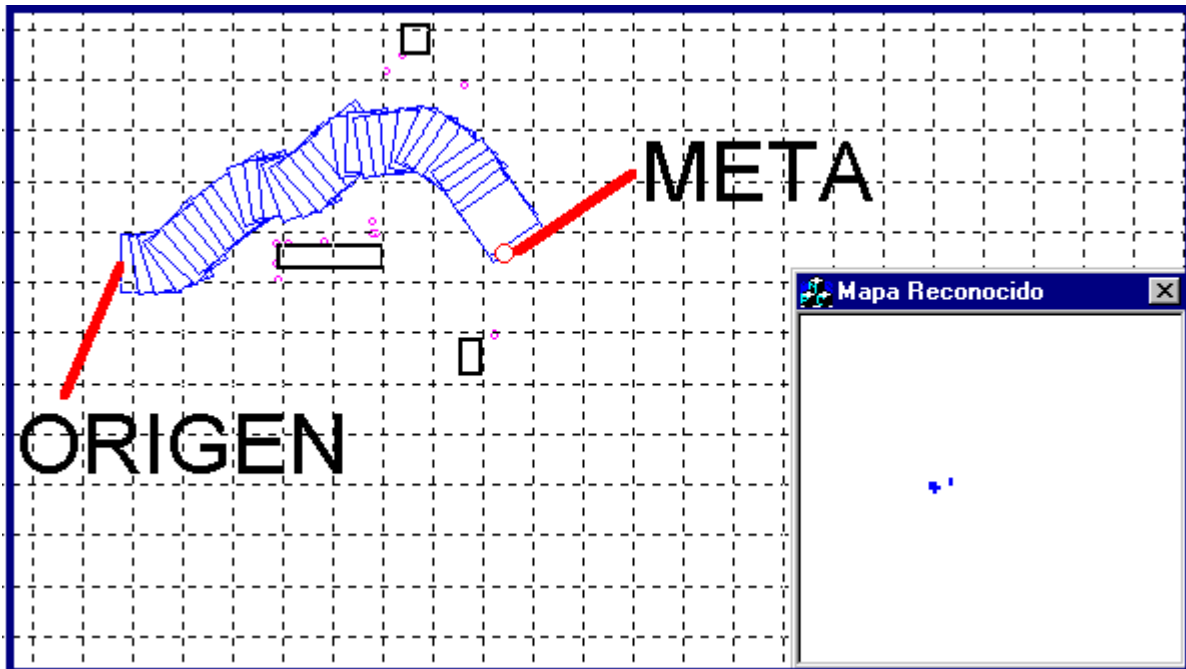


Figura 4.16 Configuración con tres obstáculos

La figura 4.17 muestra una configuración similar, con tres objetos de igual tamaño. El móvil puede tomar cualquier camino para llegar a la meta, en esta trayectoria se recorre una distancia que no corresponde a la mínima, solo se elige el camino libre o hacia dónde hay menos obstáculos.



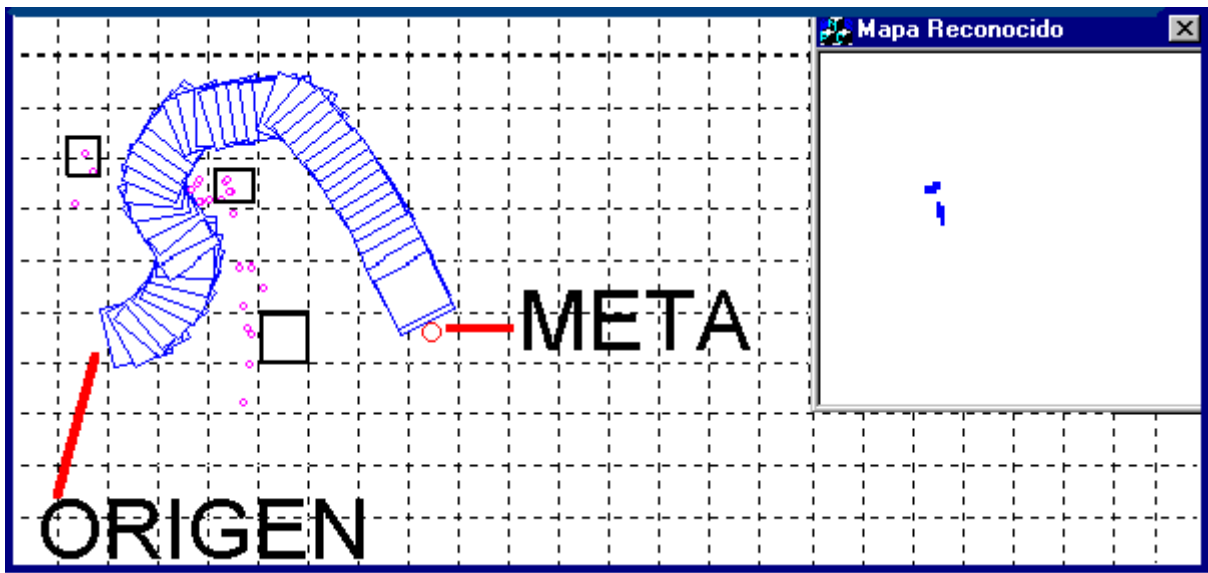


Figura 4.17. Configuración con tres obstáculos

**4.3.4 Configuración cuatro** Se emplean cuatro obstáculos dispersos para crear el ambiente. (Véase la Figura 4.18).

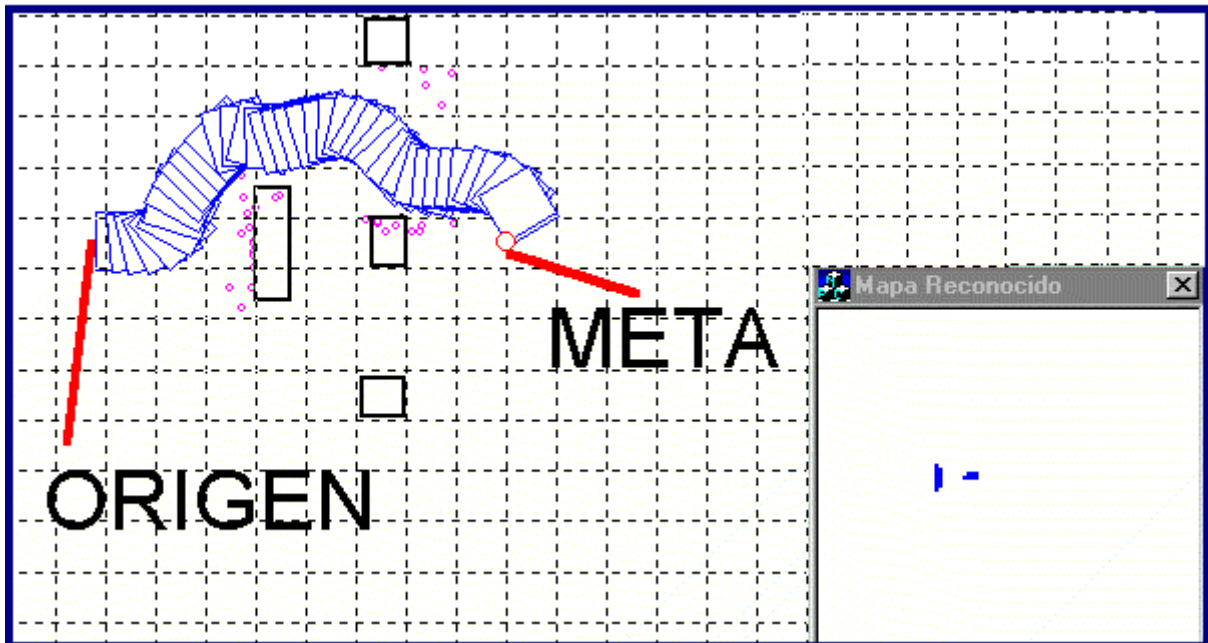


Figura 4.18. Configuración con cuatro obstáculos

El móvil parte hacia el frente, detecta el primer obstáculo, como lo indican los puntos color fucsia sobre la imagen. Evade el primer objeto cruzando por el lado izquierdo, corrige su posición, pasa entre los dos obstáculos ubicados en la parte superior de la imagen y alcanza la meta.

La figura 4.19 muestra otra configuración con cuatro obstáculos. El móvil está ubicado frente al obstáculo de mayor tamaño, lo evade girando a la derecha, luego gira a la izquierda y pasa entre dos objetos para alcanzar la meta.

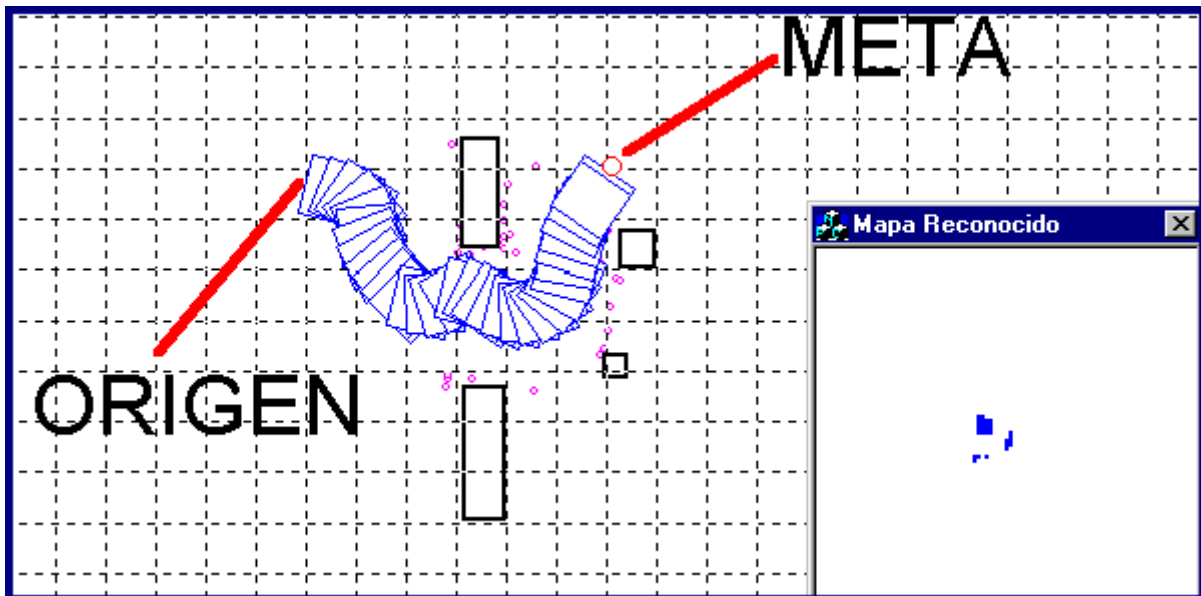


Figura 4.19. Configuración con cuatro obstáculos

**4.3.5 Configuración difícil** Después de realizar varias pruebas se organizaron los obstáculos para formar configuraciones de mayor nivel en complejidad. (Véase la Figura 4.20).

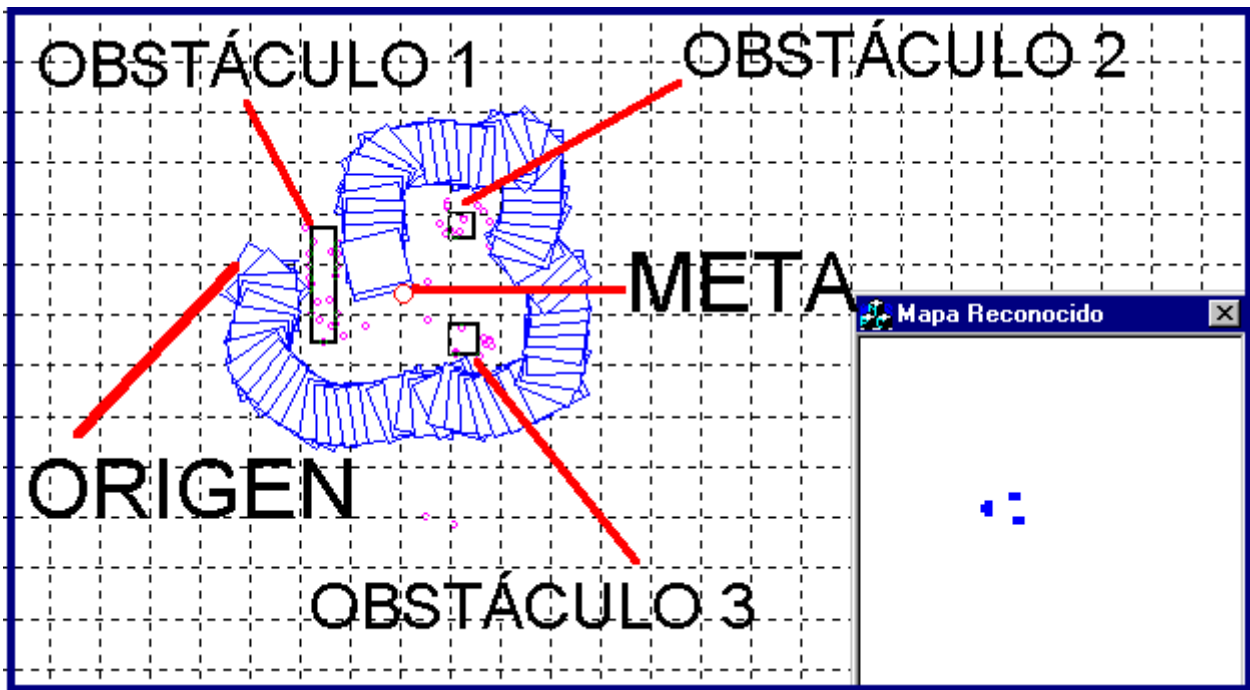


Figura 4.20. Configuración Difícil

Frente al móvil se ubica el objeto de mayor tamaño, este lo evade por la derecha, luego empieza a girar hacia la meta pero se encuentra con Obstáculo 3 el cual también es evadido por la derecha. Después de evadirlo trata de girar hacia la meta y detecta en su camino a Obstáculo 2, lo evade y por último llega a la meta pasando entre Obstáculo 1 y Obstáculo 2.

**4.3.6 Trayectorias con retorno** En algunos casos, una vez el móvil alcanza la meta, se define como nuevo destino el punto de origen, las acciones realizadas se muestran en las figuras 4.21 y 4.22.

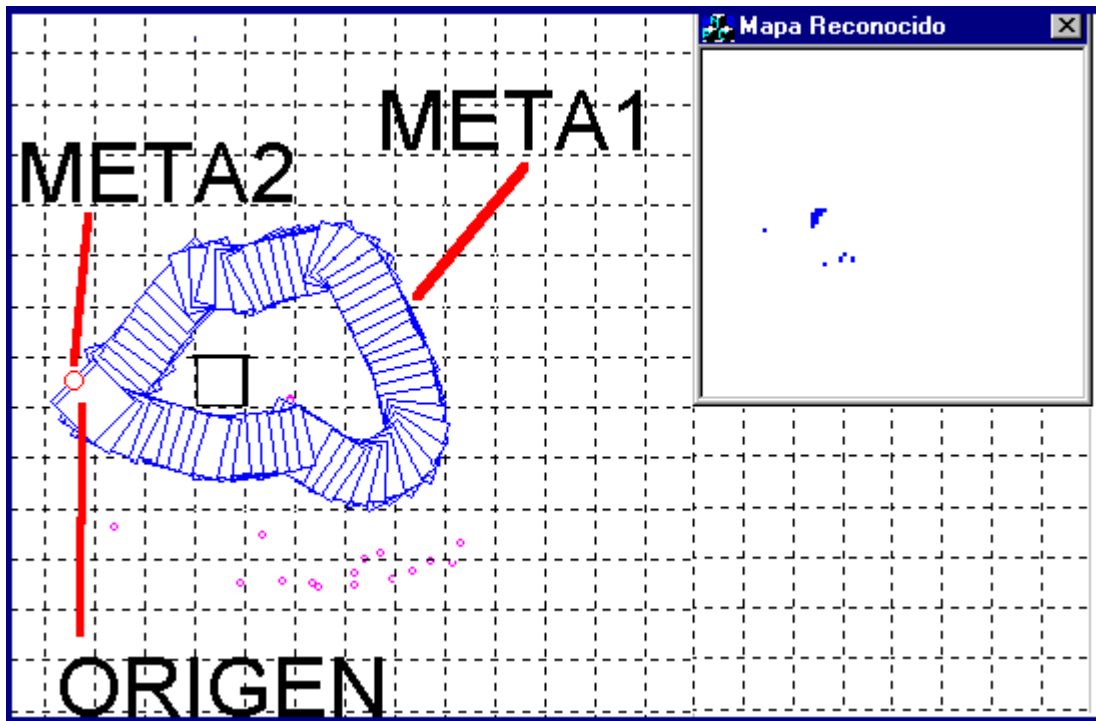


Figura 4.21. Trayectoria con retorno para un obstáculo

Esta prueba se realiza con un obstáculo; el móvil se ubica en el origen, se define como primer punto de llegada a Meta 1, el recorrido lo realiza de forma exitosa por el lado izquierdo; una vez el vehículo está ubicado en Meta 1, se define como nuevo destino a Meta 2, el cual corresponde al punto de partida inicial. El recorrido lo realiza exitosamente por la parte inferior como muestra la figura 4.21.

La figura 4.22 presenta una trayectoria con retorno, en la cual se utilizan dos obstáculos. El punto Meta 2 equivale al origen, Meta 1 es el primer destino; como indican los cuadros azules, el primer recorrido lo realiza exitosamente arrancando por el lado derecho (Trayectoria inferior de la figura). Una vez el móvil alcanza su destino se define un nuevo punto de llegada en Meta 2, el cual equivale a que el móvil regrese a la ubicación de dónde partió. El recorrido lo realiza correctamente por el tramo superior de la trayectoria.

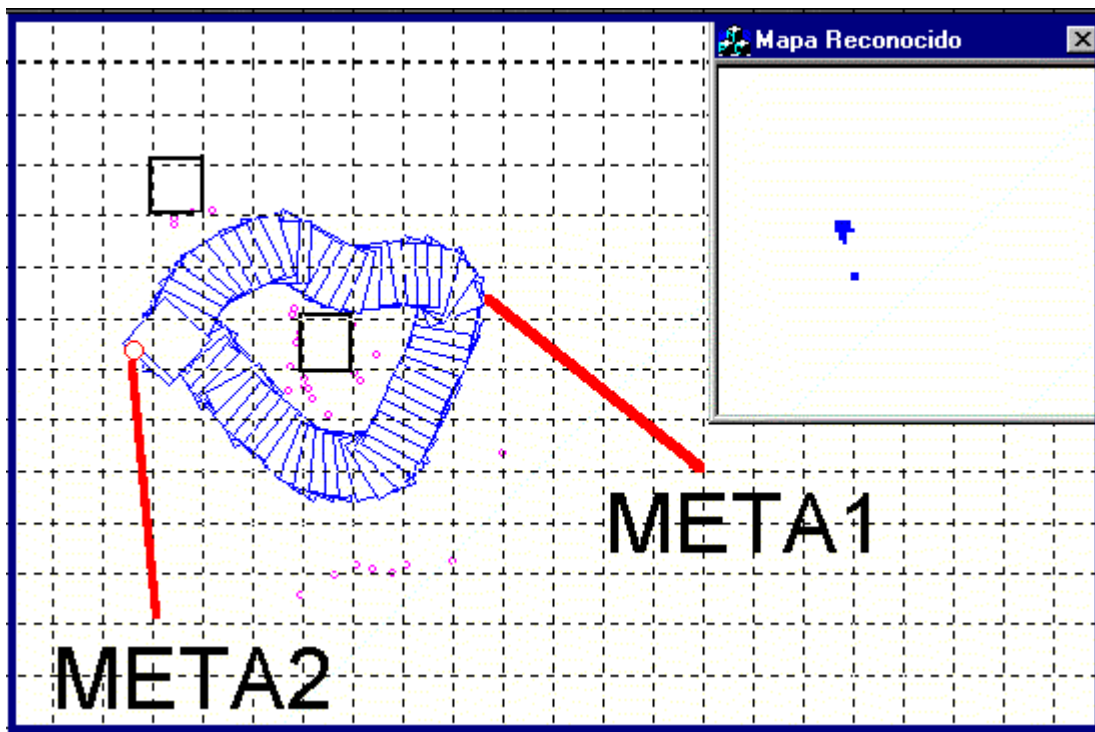


Figura 4.22. Configuración con retorno para dos obstáculos

**4.3.7 Trayectorias con retorno para varios obstáculos** Se crea un ambiente con varios obstáculos y una vez el móvil alcanza la meta se define como nueva meta el punto de partida. (Véase la Figuras 4.23 y 4.24).

Origen representa el punto de partida, Meta1 es el primer destino; una vez el móvil ha alcanzado Meta1 se define como nuevo destino el punto Meta2 que en este caso coincide con el origen.

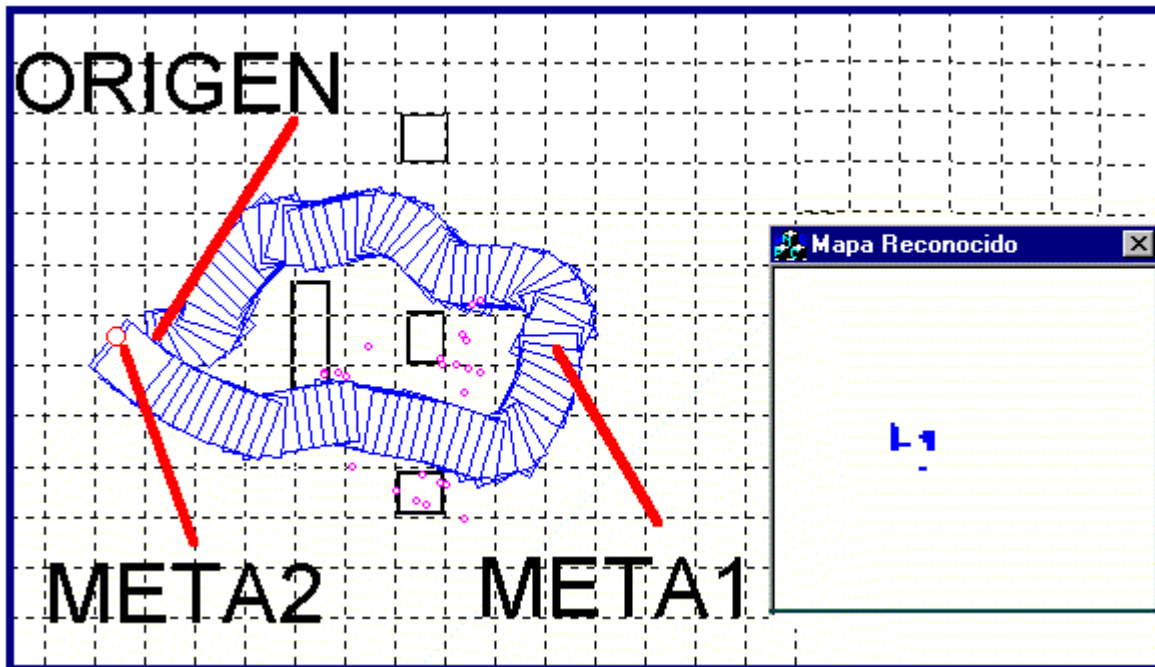


Figura 4.23 Trayectoria con retorno para cuatro obstáculos

El móvil cruza hacia su izquierda para evadir el primer obstáculo, pasa entre dos obstáculos y cruza a la derecha para alcanzar Meta1. Una vez la coordenada Meta1 es alcanzada, se define como nuevo destino el punto Meta2; el cual es alcanzado satisfactoriamente y la trayectoria seguida la indican los cuadros azules de la figura 4.23.

La figura 4.24 muestra un caso similar con cinco obstáculos. El móvil es ubicado en origen y se envía a Meta1. Lo primero que detecta y evade es Obstáculo1, en este proceso el móvil se aleja de este y se acerca a obstáculo2 que también es detectado y evadido, luego alcanza meta1. Ahora se define como nueva meta el punto de partida inicial, el móvil bordea Obstáculo3 y finalmente alcanza la meta. Los cuadros azules indican la trayectoria, los rectángulos negros representan los obstáculos y los puntos fucsia los objetos detectados.

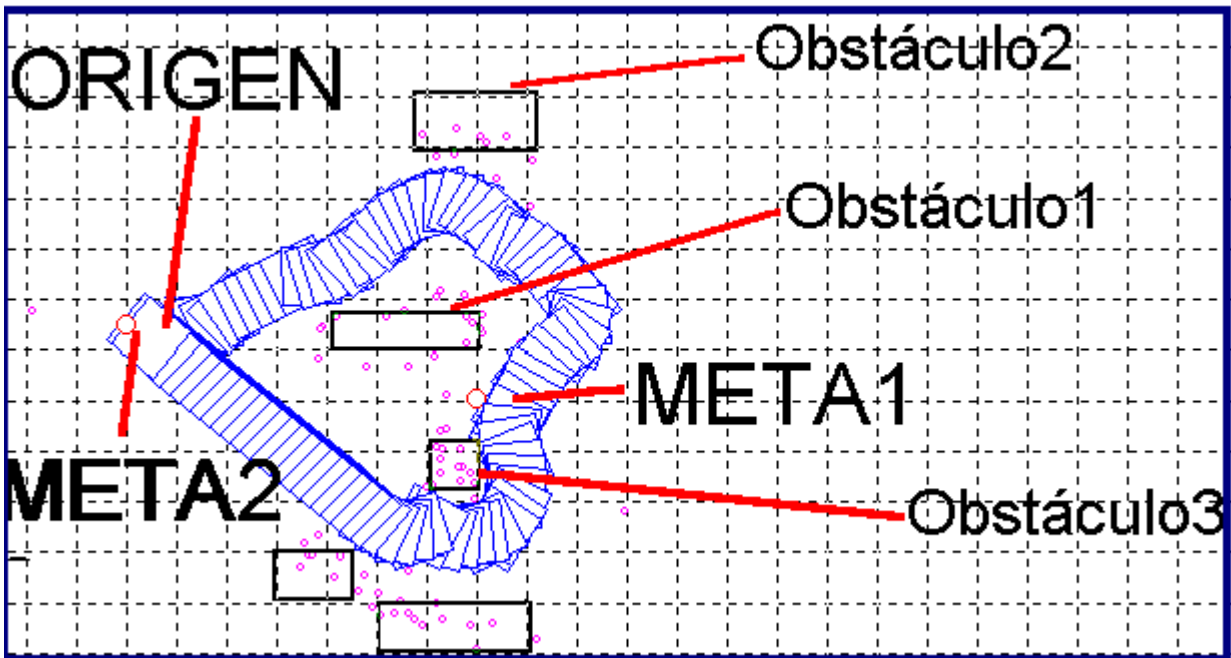


Figura 4.24 Trayectoria con retorno para cinco obstáculos

**4.3.8 Pasillo Corto** Se ubican los obstáculos formando un ambiente similar a un corredor corto entre el móvil y el destino. La trayectoria seguida se muestra en la figura 4.25.

El recorrido lo puede efectuar en línea recta o en movimientos alternados acercándose y alejándose de cada pared.

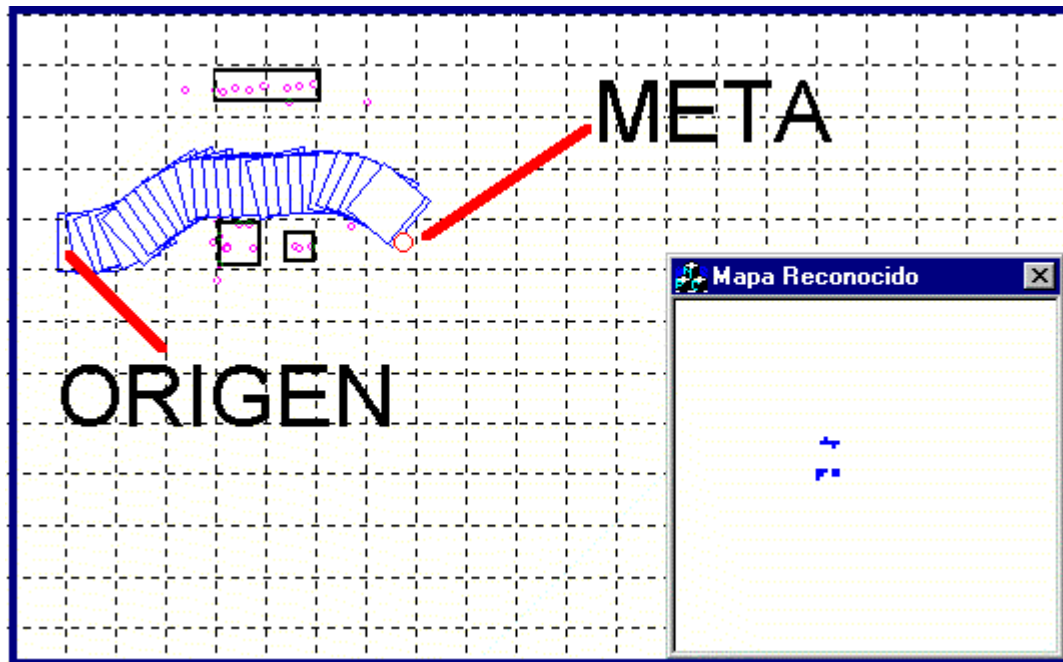


Figura 4.25. Trayectoria en forma de corredor corto

**4.3.9 Trayectoria con ubicación opuesta respecto a la meta** En este caso la ubicación del móvil es en sentido opuesto teniendo como referencia la meta, es decir los obstáculos y la meta están detrás del robot. (Véase la Figura 4.26).

Después de dar la orden para alcanzar la meta, el móvil gira hacia su izquierda para tomar posición en dirección a la meta, detecta y evade a Obstáculo1; Posteriormente detecta a Obstáculo2, lo evade girando hacia la derecha y finalmente rectifica su posición hasta llegar a la meta.



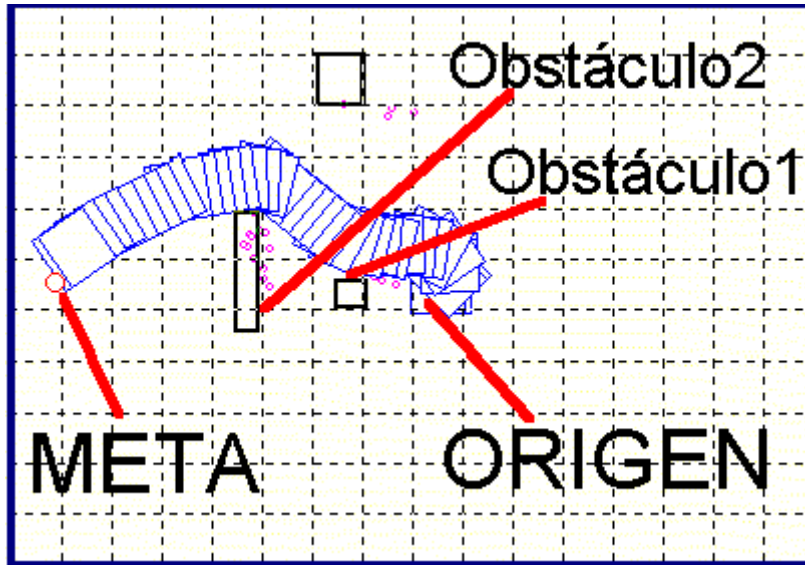


Figura 4.26. Trayectoria con ubicación opuesta a la meta

**4.3.10 Restricciones** En cualquier recorrido dónde los sensores de ultrasonido y un obstáculos exista un ángulo de incidencia mayor de  $10^\circ$ , si lo detecta, solo ocurrirá cuando el móvil esté bien cerca; lo mismo ocurre en las esquinas de los obstáculos que forman ángulos. Por lo tanto si los sensores no detectan la presencia de un objeto inevitablemente el vehículo lo enviste. Véase sección 4.2.2

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 ORIENTACION DEL MOVIL

Los interrogantes para un robot móvil cuando está localizado en un ambiente desconocido: ¿Posición actual?, ¿Destino?, ¿Trayectoria para alcanzar destino?. Estas preguntas aunque al parecer simples para un ser humano, se convierten en algo difícil de responder en el campo de la robótica móvil; particularmente la primera ¿Posición Actual?, en el presente trabajo este dilema se resolvió de la siguiente manera: El robot está donde el operador defina que está. Es decir que el punto de inicio de la marcha es responsabilidad de la persona que opera el móvil; esto ubica adecuadamente el robot.

En el trabajo de simulación precedente el tópico ¿Posición Actual? fue pasado por alto y la orientación se daba de una forma absoluta con respecto a la esquina superior izquierda del ambiente simulado, por supuesto que en la simulación los efectos causados por la mala orientación del móvil son inexistentes, pero en la realidad sus efectos se hacen visibles a medida que el móvil se mueve en el ambiente.

El móvil se orienta utilizando un método de posición relativa, llamado Odometria, que consiste en que el robot conozca su localización con respecto a la posición inicial contando los pasos y los giros efectuados. En posteriores desarrollos se puede adicionar un método de posicionamiento absoluto para mejorar el sentido de orientación del móvil.

Al ser el sistema de control en lazo abierto implica que el error en la posición se acumula con la distancia recorrida, y mas aun si se efectúan giros. En las pruebas realizadas se encontró que el robot en la realidad considera un éxito llegar en un círculo de 25 cm de radio con centro en la meta, en el software de control se considera un éxito que el móvil llegue en un círculo de 20 cm de radio con centro en la meta con lo cual se puede apreciar que el error es un anillo con radio interior de 20 cm y un radio exterior de 25 cm.(Véase la figura 5.1).

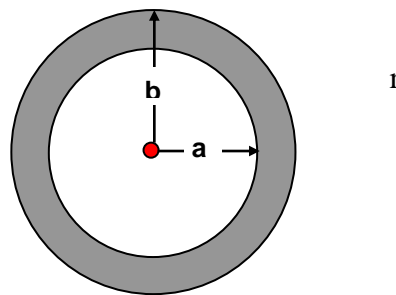


Figura 5.1 Representación del error cometido por el robot en alcanzar la meta, donde:  $a = 20\text{cm}$  y  $b = 25\text{cm}$ , el área gris corresponde al error.

Se considera un acierto que el móvil llegue en una vecindad de la meta; cuando las trayectorias son muy largas el móvil se acerca mas a la frontera externa de la vecindad.

El hardware del robot móvil controla los sensores de ultrasonido y los motores paso a paso. La administración de estos se efectúa desde el servidor o computador central donde se encuentran las redes neuronales y la lógica difusa, el móvil en si mismo no tiene "inteligencia", el es un buen peón que mueve los motores, y mide distancias con un sensor elegido por el computador.

El desempeño del sistema se puede mejorar en gran manera con un sensor de posición real, como puede ser un GPS (sistema de posicionamiento global), un giróscopo y un acelerómetro. La combinación de los tres sería lo ideal. En el presente trabajo se exceptúa el uso de estos dispositivos por diversas razones entre las cuales se encuentra los costos elevados. Esperamos que en un futuro se dote al robot móvil con estos dispositivos.

## **5.2 SENSORES DE ULTRASONIDO**

Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en la vida moderna, desde sistemas para diagnóstico médico hasta sistemas de limpieza industriales, en la naturaleza vemos como los temidos murciélagos hacen gala de una poderosa visión nocturna gracias a sus radares ultrasónicos. En el campo de la robótica móvil son muy populares los sistemas de exploración de ambientes con ultrasonido y desde el comienzo de este trabajo se tenía claro que el ultrasonido se debería usar para la exploración del ambiente que circunda al robot.

En el principio se pretendía usar un solo sensor giratorio como el utilizado en la tesis "SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE AMBIENTES UTILIZANDO REDES NEURONALES", pero se tenían diversos inconvenientes para montarlo sobre una plataforma de robot móvil entre las cuales están: Rango de medida (0.26m a 10.7 m) y Resolución de 3.048 cm; por lo tanto no está diseñado con las características que se requerían ni es posible su modificación. Por tal motivo se optó por diseñar y construir un sistema propio de medición de distancias con ultrasonido el cual tomó un buen tiempo en el proceso de investigación y desarrollo hasta obtener una versión funcional.

Durante el proceso de I+D se encontraron algunos obstáculos que retrasaron los progresos, entre ellos podemos citar: Disponibilidad de componentes de precisión como amplificadores de bajo ruido y controladores automáticos de ganancia, disponibilidad de sensores de ultrasonido. A pesar de los inconvenientes se logro construir con una gota de ingenio y muchas de paciencia un sistema realmente efectivo y de "bajo" costo para medir distancias con ultrasonido.

Los sensores de ultrasonido permiten efectuar medidas de distancias a un obstáculo que cumpla ciertas características que limitan la capacidad del robot de moverse en diferentes ambientes. Se puede mejorar la capacidad de visión del robot dotándolo de un arreglo de sensores infrarrojos o una cámara CCD, igual que en el caso de determinar la posición, la combinación de diferentes métodos, ultrasonido, infrarrojo y cámara CCD seria lo ideal.

El uso de un transmisor y un receptor de ultrasonido por separado permite reducir la distancia mínima capaz de medir; esta configuración fue escogida porque con ella se obtuvieron mejores resultados experimentales.

El efecto Cross Talk en los sensores de ultrasonido se reduce activando solamente el receptor que debe medir y desactivando los demás receptores. esto se logra con la utilización de un multiplexor en recepción.

### **5.3 SOFTWARE EMBEBIDO**

La existencia de dos procesadores en el robot, uno controlando los actuadores (motores) y otro los sensores (transductores de ultrasonido) posee diversas ventajas con respecto a la opción de utilizar un solo controlador para sensores y actuadores entre las cuales

tenemos: mayor velocidad de procesamiento, posibilidad de procesos en paralelo, reducción en la complejidad de los programas. Entre las desventajas podemos citar el aumento de los costos, mayor tamaño del hardware y mas consumo de energía; estas desventajas con el paso del tiempo son cada vez menores por que los costos de los procesadores se reducen, son cada vez mas pequeños y cada vez consumen menos energía.

En la actualidad el robot efectúa la exploración del ambiente solo cuando se encuentra quieto, el sistema con doble procesador permite que en futuro se implemente un sistema que permita hacer la exploración del ambiente mientras el robot se esta moviendo.

#### **5.4 SISTEMA DE COMUNICACIONES**

En el presente trabajo se tiene la limitación física del cable, por lo tanto en la práctica no podemos decir que es un robot móvil, para convertirlo en esto se requiere eliminar el cable. El sistema de comunicación es serial así que lo único que se requiere es cambiar el medio de transmisión, en el presente trabajo esta parte no se realizó, en el futuro sugerimos se compre o se construya el sistema inalámbrico dando con esto verdadera movilidad al robot.

#### **5.5 APLICACIONES**

Hace veinte años se decía que en el futuro se tendrían robots en muchas áreas de la vida cotidiana, en aquel entonces los autómatas se concentraban en la industria, hoy por hoy vemos como poco a poco los robots se están integrando a nuestra vida esperemos que para mejorarla; en ese orden de ideas podemos vislumbrar las aplicaciones del presente

robot como: vigilante, mensajero, barrendero, limpiador de cañerías, explorador de ambientes, y por supuesto como herramienta experimental en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

El protocolo de comunicaciones puede ser adaptado para controlar varios robots al tiempo. Proponemos que se construyan mas prototipos y se experimente simultáneamente con varios robots en trayectorias que se intercepten. Es decir que deban evadirse mutuamente si ese es el caso.

## BIBLIOGRAFIA

LING, Ching - Teng y LEE, C. S. George. Neural Fuzzy Systems. Prentice Hall, 1996.

KOSKO, Bart. NEURAL NETWORKS AND FUZZY SYSTEMS: A DYNAMICAL APPROACH TO MACHINE. Prentice Hall 1992.

RUSSELL, Stuart J. ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A MODERN APPROACH. Prentice Hall 1995.

BATES, Jon - TOMPKINS Tim. Microsoft Visual C++ 6. Prentice Hall 1999.

KRUGLINSKI, David. PROGRESE CON VISUAL C++. McGraw Hill 1994.

MANUALES DE TRABAJO DE MATLAB.

*Documentos de Internet*

[www.microchip.com](http://www.microchip.com), documentación Microcontroladores PIC.

[www.national.com](http://www.national.com), documentación Circuitos Integrados Análogos.

[www.fairchild.com](http://www.fairchild.com), documentación Circuitos Integrados Digitales.

[www.cadence.com](http://www.cadence.com), Software de diseño y simulación de Circuitos Electrónicos.