

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRONICA,  
COMPUTACION, INFORMACION  
Y COMUNICACIONES



INCLUSION DE RESPUESTAS REFLEJAS EN EL  
SEGUIMIENTO DE UNA TRAYECTORIA POR UN  
VEHICULO AUTONOMO

TESIS

MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
SISTEMAS INTELIGENTES

PRESENTA

LUIS FERNANDO HERNANDEZ CAMACHO

MONTERREY, NUEVO LEON; DICIEMBRE DE 2002

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN ELECTRÓNICA,  
COMPUTACIÓN, INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES



**INCLUSIÓN DE RESPUESTAS REFLEJAS EN EL SEGUIMIENTO  
DE UNA TRAYECTORIA POR UN VEHÍCULO AUTÓNOMO**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
SISTEMAS INTELIGENTES

Presenta

Luis Fernando Hernández Camacho

Monterrey, N.L., 16 de diciembre de 2002

# **INCLUSIÓN DE RESPUESTAS REFLEJAS EN EL SEGUIMIENTO DE UNA TRAYECTORIA POR UN VEHÍCULO AUTÓNOMO**

por

Luis Fernando Hernández Camacho

Tesis

Presentada al Programa de Graduados en Electrónica, Computación, Información y  
Comunicaciones

como requisito parcial para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias con Especialidad  
en Sistemas Inteligentes

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey**  
**Campus Monterrey**

Monterrey, N.L., 16 de diciembre de 2002



## Resumen

Esta tesis describe el desarrollo de un método confiable para la navegación de un Vehículo Autónomo basado en la planeación de trayectorias y respuestas reflejas. La planeación de trayectorias parte de un mapa del ambiente de trabajo para generar una trayectoria que conecte un punto inicial a uno final considerando las características no-holónicas del vehículo autónomo. La navegación reflexiva propone identificar la presencia de obstáculos por medio de sonares al momento de seguir una trayectoria, para posteriormente realizar una acción refleja, con el fin de evadir dichos obstáculos y alcanzar el punto final.

El módulo de respuestas reflejas está basado en un modelo de percepción-acción, de tal forma que, ante la detección de un evento, se dispara alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia. Las reglas de inferencia están jerarquizadas en capas y se basan en la información proporcionada por los sonares, así como por el control de trayectoria del vehículo. Las acciones que se ejecutan como respuesta refleja son la evasión y frenado. Por otro lado, la recuperación de la trayectoria planeada después de la evasión de un obstáculo está basada en la distribución de los puntos de la trayectoria planeada.

Para validar el método propuesto se desarrolló un arreglo de tres sonares al frente de un vehículo autónomo para la detección de obstáculos y un módulo de respuestas reflejas dentro de su arquitectura de control. Se implementaron, además, como acciones reflejas la evasión y frenado. Asimismo se desarrolló una interfaz gráfica en una computadora para la planeación de trayectorias.

Con este sistema se realizaron varios experimentos de cálculo de trayectorias de diferentes puntos en el ambiente, así como varias pruebas de obstáculos no previstos para evaluar las respuestas reflejas. Los obstáculos son detectados correctamente en el 90% de los casos intentados.



## Agradecimientos

En primer lugar, a ti, mi Padre Celestial. Siempre has estado a mi lado y tus palabras de paz y amor han hecho aún más bellos los días de alegría y han reconfortando mi corazón en los momentos difíciles.

A mi familia, Diana y Gustavo, por su tiempo, sacrificios y amor. Diana, tu apoyo ha sido una razón más para continuar con las metas propuestas. Juntos hemos logrado hacer realidad un sueño.

A mis Padres, mis hermanas y mi hermano por todo lo que me han brindado. Ustedes forman el cimiento de mi vida.

A mis suegros, Dr. Jaime y Ana Ma., por el apoyo que nos han brindado a mi y a mi familia para alcanzar este objetivo tan anhelado.

A todos y cada uno de mis amigos y compañeros de maestría. En especial a Elizabeth, Hugo R., José Manuel, Joaquín, Carlos Albores, Brain, Rodolfo, Hugo O., Jorge Humberto y Arján, por que juntos vivimos la experiencia de ser asistentes y parte del CSI.

A mis profesores del Centro de Sistemas Inteligentes por la formación académica que me brindaron todos estos años. En especial al Dr. José Luis Gordillo por su apoyo en la realización de esta tesis y la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo.

A todas las personas que me han brindado su apoyo, y no están mencionadas, mis más sinceros agradecimientos y mi amistad incondicional.

A todos ustedes, muchas gracias.



# Contenido

|   |    |
|---|----|
| Capítulo 1 .....                                      | 1  |
| Introducción.....                                     | 1  |
| Capítulo 2 .....                                      | 6  |
| Planeación de Trayectorias .....                      | 6  |
| 2.1 Definición del Ambiente .....                     | 7  |
| 2.2 Función de Navegación.....                        | 9  |
| 2.3 Caminos de Dubin.....                             | 11 |
| 2.3.1 Determinación de Radios de Giro .....           | 13 |
| 2.3.2 Determinación de la Solución por Segmento ..... | 14 |
| 2.3.3 Solución del caso cruzado .....                 | 16 |
| 2.3.4 Solución del caso externo.....                  | 17 |
| 2.4 Ajuste Spline.....                                | 18 |
| 2.5 Validación de Trayectorias .....                  | 20 |
| Capítulo 3 .....                                      | 25 |
| Respuestas Reflejas .....                             | 25 |
| 3.1 Arquitectura de Control .....                     | 26 |
| 3.1.1 Módulos de la Arquitectura.....                 | 27 |

---

|  |    |
|--|----|
| 3.2 Inclusión de Respuestas Reflejas .....               | 29 |
| 3.3 Caracterización de Sonares .....                     | 31 |
| 3.3.1 Patrón de la Amplitud del Eco .....                | 32 |
| 3.3.2 Configuración del Arreglo de Sonares .....         | 34 |
| 3.3.3 Sistema de Conmutación de Sonares.....             | 36 |
| 3.4 Reglas de Inferencia.....                            | 37 |
| 3.5 Respuesta Refleja de Evasión .....                   | 40 |
| 3.6 Respuesta Refleja de Frenado .....                   | 42 |
| 3.7 Recuperación de Trayectoria.....                     | 43 |
| Capítulo 4 .....   | 47 |
| Implementación y Resultados .....                        | 47 |
| 4.1 Especificaciones Mecánicas y Eléctricas del VA ..... | 48 |
| 4.2 Implementación de Control en el VA.....              | 49 |
| 4.2.1 Detección de Obstáculos .....                      | 52 |
| 4.2.2 Evasión de Obstáculos .....                        | 53 |
| 4.2.3 Frenado Regenerativo .....                         | 54 |
| 4.6 Planeación.....                                      | 56 |
| 4.7 Experimentos y Resultados .....                      | 58 |
| Capítulo 5 .....   | 65 |
| Conclusiones.....  | 65 |
| Apéndice A .....   | 69 |
| Modelo Cinemático del VA .....                           | 69 |
| Apéndice B .....   | 73 |

---

|  |    |
|--|----|
| Diagramas Eléctricos del VA.....               | 73 |
| Apéndice C .....                               | 81 |
| Interfaz Gráfica para Planeación.....          | 81 |
| C.1 Ejemplo de Planeación de Trayectoria ..... | 84 |
| Referencias .....                              | 87 |



# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Diagrama general del método propuesto basado en la planeación de trayectorias y una navegación reflexiva para un VA.....   | 3  |
| Figura 1.2: Diagrama a bloques de la arquitectura de control del vehículo autónomo que incluye la planeación y el módulo de respuestas reflejas.....   | 4  |
| Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso de planeación de trayectorias.....   | 6  |
| Figura 2.2: Configuración de un VA con tres grados de libertad.....  | 7  |
| Figura 2.3: Cálculo de obstáculos de configuración dado un VA modelado en forma circular.....  | 8  |
| Figura 2.4: Expansión del punto $p_c$ utilizando distancia Manhattan.....  | 9  |
| Figura 2.5: Calculo de una trayectoria usando NF1.....   | 11 |
| Figura 2.6: Diferencias en el seguimiento de trayectorias: en (a) se muestra el seguimiento por el VA de la trayectoria descrita únicamente por <i>los puntos de control</i> , en (b) se muestra el seguimiento de la trayectoria descrita empleando los caminos de Dubin..... | 12 |
| Figura 2.7: Determinación de los radios de giro. Para el $i$ -ésimo punto en la trayectoria, su radio de giro $r_i$ es la bisectriz de los vectores $v_i$ y $v_{i+1}$ .....  | 13 |
| Figura 2.8: Casos posibles al ajustar la trayectoria entre <i>dos puntos de control</i> .....  | 15 |
| Figura 2.9: Solución para trayectoria entre dos puntos de control para el caso cruzado.  | 16 |
| Figura 2.10: Solución para trayectoria entre <i>dos puntos de control</i> para el caso externo   | 17 |
| Figura 2.11: Función vectorial cúbica $S(d)$ .....   | 19 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.12: Ejemplo de trayectoria ajustada que ocupa espacio de configuración prohibido marcado por los círculos.....   | 21 |
| Figura 2.13: Proyección de los puntos en colisión a lo largo de las rectas $pipj$ correspondientes hacia el $C\text{-Spacefree}$ .....  | 21 |
| Figura 2.14: Cálculo del segmento de recta Normal.....  | 22 |
| Figura 2.15: Casos de ubicación del punto $p2$ en los cuatro cuadrantes, $a$ y $b$ representan las componentes en $x,y$ , respectivamente, de la normal a la recta $ab$ .....                                 | 23 |
| Figura 3.1 Módulo de respuestas reflejas en el seguimiento de una trayectoria planeada.....   | 26 |
| Figura 3.2: Diagrama de bloques de los módulos que componen la arquitectura de control de VA.....   | 28 |
| Figura 3.3: Estimación de posición y orientación del VA utilizando un vector con inclinación $0+A0$ .....   | 29 |
| Figura 3.4: Composición del módulo de respuestas reflejas.....  | 30 |
| Figura 3.5: Inclusión del módulo de respuestas reflejas en la arquitectura de control del VA. Al detectar un obstáculo con los sonares, toma el control de la dirección y velocidad para evadir o frenar..... | 30 |
| Figura 3.6: Calculo de distancia utilizando tiempo de vuelo.....  | 31 |
| Figura 3.7 Sonar integrado por transductor y tarjeta controladora del sistema Polaroid 6500.....  | 32 |
| Figura 3.8: Patrón de la amplitud mostrado por un sonar.....  | 33 |
| Figura 3.9: Patrón típico de un haz ultrasónico de 50 Khz. La gráfica presenta amplitud normalizada en dB contra el ángulo de orientación.....  | 33 |
| Figura 3.10: Diagrama para calcular la inclinación de los sonares laterales.....  | 34 |
| Figura 3.11: Gráfica del comportamiento de la distancia de intercepción $B$ con respecto al ángulo de inclinación & de los sonares laterales.....   | 35 |
| Figura 3.12: Vista superior del arreglo de los tres sonares al frente del VA y primera capa de evaluación de las reglas de inferencia por zona.....   | 36 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.13: Diagrama de bloques del sistema de conmutación de sonares.....   | 37 |
| Figura 3.14: Segunda capa de evaluación de las reglas de inferencia por dirección. Al detectar un obstáculo, las trayectorias dentro del campo de percepción del sonar disparará una respuesta refleja.....                                   | 38 |
| Figura 3.15: Tercera capa de evaluación de reglas de inferencia por espacios libres.....  | 39 |
| Figura 3.16: Diagrama de estados del sistema de respuestas reflejas.....  | 40 |
| Figura 3.17: Datos utilizados para el cálculo del ángulo de giro necesario para evadir un obstáculo.....  | 41 |
| Figura 3.18: Frenado regenerativo de un motor DC y su operación en cuatro cuadrantes.....   | 42 |
| Figura 3.19: Circuito de control de 4 cuadrantes para un motor de.....  | 43 |
| Figura 3.20: Pérdida en el seguimiento de la trayectoria planeada después de una evasión. En (a) el vehículo permanece girando alrededor del punto p1. En (b) el seguimiento no corresponde con la planeación.....                            | 44 |
| Figura 3.21: Evasión de un obstáculo cercano a un <i>punto de control</i> y recuperación de la trayectoria. El punto p3 se elimina de la pila y se continua con p4.....   | 45 |
| Figura 4.1: Comparación entre el vehículo original (izquierda) y el vehículo acondicionado (derecha).....   | 48 |
| Figura 4.2: Esquema del vehículo con sus dimensiones.....   | 49 |
| Figura 4.3: Diagrama del microcontrolador con la descripción de funciones asignadas en cada terminal.....   | 50 |
| Figura 4.4: Diagrama de flujo del programa principal implementado en el microcontrolador incluyendo los módulos de respuestas reflejas.....   | 51 |
| Figura 4.5: Ciclo de señales para la selección y activación de sonares. En primer lugar se selecciona el sonar; después se activa INIT, la cual habilita la transmisión de 16 pulsos ultrasónicos; finalmente se recibe la señal de ECHO..... | 53 |
| Figura 4.6: Valor de los umbrales de dirección para la evaluación de la segunda capa de las reglas de inferencia.....   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.7: Circuito de velocidad del VA. El sentido de avance se controla con los relevadores A y B. La señal en PWM aplicada en C regula la velocidad. . . .  | 54 |
| Figura 4.8: Circuito de velocidad con modificaciones para frenado regenerativo. . . . .   | 55 |
| Figura 4.9: Comparación de desempeño con frenado convencional y regenerativo. . . . .   | 56 |
| Figura 4.10: Comparación de datos filtrados de frenado convencional y regenerativo. El frenado regenerativo muestra una mayor desaceleración. . . . .   | 56 |
| Figura 4.11: Interfaz gráfica para la planeación de trayectorias. . . . .   | 57 |
| Figura 4.12: Diferencia en el suavizado de la trayectoria utilizando únicamente splines (a) y, además, caminos de Dubin (b). La diferencia más importante se encuentra al inicio de la trayectoria. . . . .   | 58 |
| Figura 4.13: Ambientes de trabajo del VA dentro del ITESM. En (a) se observa el laboratorio de manufactura con un espacio de trabajo de 9x9m. En (b) se presenta un espacio al aire libre enfrente a Aulas 4 con un área libre de aproximadamente 15x15m. . . . .   | 59 |
| Figura 4.14: Etapas en la realización de los experimentos. Primero, se planea la trayectoria en la computadora; posteriormente se asigna al VA a través de un módem RF; finalmente, el VA sigue la trayectoria incluyendo el módulo de respuestas reflejas. . . . . | 59 |
| Figura 4.15: Diferencia entre la trayectoria planeada y la ejecutada por el VA. . . . .   | 60 |
| Figura 4.16 Ejecución de trayectoria con evasión de obstáculo en el cruce de las trayectorias. . . . .  | 61 |
| Figura 4.17 Ejecución de trayectoria con evasión de obstáculo en el cruce de las trayectorias. . . . .  | 61 |
| Figura 4.18: Error en la posición real del VA con respecto al desplazamiento. . . . .   | 62 |
| Figura A. 1: (a) Modelo cinemático de un vehículo móvil con restricción no holonómica. (b) Desplazamiento entre dos puntos muy cercanos. . . . .  | 70 |
| Figura B.1: Tarjeta del Microcontrolador AT90S8515. . . . .   | 75 |
| Figura B.2: Tarjeta de Potencia del VA. . . . .   | 76 |
| Figura B.3: Acoplamiento de los motores de dirección y velocidad. . . . .   | 77 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura B.4: Diagrama del módem de RF.....                               | 78 |
| Figura B.5: Circuito de Conmutación de Sonares.....                     | 79 |
| Figura B.6: Llave de Multiplexión de Sonares.....                       | 80 |
| Figura C.1: Ventana principal de la interfaz gráfica de planeación..... | 81 |
| Figura C.2: Ejemplo de la planeación de una trayectoria.....            | 85 |

# Capítulo 1

## Introducción

Los *Vehículos Autónomos (VA)* son vehículos diseñados originalmente para la conducción humana, a los cuales se les ha agregado capacidad de autonomía y de operación en tareas especializadas. Dichos vehículos han causado gran expectación por la idea de contar con un transporte que se conduzca solo o con la mínima intervención. Uno de los propósitos de su desarrollo es proporcionar seguridad de traslado hasta un lugar deseado, evitando los obstáculos que se interpongan en el recorrido. Cuando el ambiente es totalmente conocido, se generan trayectorias libres a partir del mapa que se tiene del ambiente. Pero estos métodos no son confiables cuando las incertidumbres del mapeo crecen o si la información acerca del espacio de trabajo es insuficiente. Más aún, si el ambiente es dinámico, la trayectoria inicial se modifica a menudo y la planeación realizada ya no es aceptable [Bourdon 95].

Para desempeñarse en ambientes dinámicos, los VA requieren de un sistema de navegación confiable que les permita conocer su posición dentro del ambiente en todo momento, con la finalidad de planear una trayectoria para llegar a su objetivo y evadir los obstáculos que se presenten en su camino. Así, un VA debe poseer un sistema sensorial que le permita percibir y representar el mundo que lo rodea. Los sensores externos más utilizados en los sistemas de percepción son los sensores infrarrojos, los sonares, los sistemas de navegación por satélite y los sistemas de visión. Por lo tanto, la navegación de un VA se puede definir como la técnica que guía a un vehículo a su objetivo teniendo en cuenta el medio que lo rodea.

La navegación de aquellos VA que son capaces de ejecutar planes para alcanzar las metas propuestas y que tienen la habilidad de reaccionar ante cambios en el ambiente en tiempo real, ha sido el foco de interés de la Robótica. Se han propuesto arquitecturas híbridas [Alwan 96] que incluyen la construcción de un mapa, planeación y navegación reflexiva. Generalmente, los robots que realizan estas tareas son equipados con sonares para determinar si el recorrido actual hacia la meta está libre de obstáculos. En este mismo contexto de arquitecturas, [Bautista 98] plantea un esquema de planeación y

seguimiento de trayectorias para un ambiente de trabajo virtual de manufactura utilizando el modelo de un robot Nomad 200. En este robot también se utilizan sonares para la detección de obstáculos dinámicos y eventualmente realizar una respuesta refleja ante tal evento. No obstante, la implementación se realiza únicamente para un robot móvil sin restricciones holonómicas.

En los casos descritos anteriormente, el problema de garantizar una navegación confiable se divide en dos subproblemas [Vandorpe 94]: el primero consiste en la planeación de una ruta, generalmente la más corta, para llegar a la meta usando la información del ambiente; el segundo consiste en el seguimiento de la ruta mientras la evasión de obstáculos es comúnmente resuelta usando sensores locales.

La planeación de trayectorias tiene como objetivo la generación automática de las acciones necesarias para que el vehículo se desplace en su entorno de trabajo sin contratiempos tales como la colisión con obstáculos estáticos. La planeación de trayectorias se aborda de manera diferente dependiendo de que el ambiente de trabajo sea conocido o desconocido. Esta tesis considera que el ambiente de trabajo es conocido. Sin embargo, debido a que el VA evoluciona en un ambiente dinámico, es probable que después de haber planeado la trayectoria de acuerdo al modelo disponible del ambiente, se presenten obstáculos no considerados [Valdorpe 94].

El objetivo de esta tesis es desarrollar un método confiable para la navegación de un VA basado en la planeación de trayectorias y la inclusión de respuestas reflejas. Para navegar en ambientes dinámicos se propone un módulo de planeación, el cual considera las características no-holonómicas del VA, y un sistema de respuestas reflejas de bajo nivel, que permita alcanzar la meta sin colisionar. Se considera que un sistema de percepción basado en sonares, junto con un modelo de detección-acción, permite la implementación de una navegación reflexiva en el seguimiento de una trayectoria planeada.

En la Figura 1.1 se muestra una vista general del método propuesto compuesto por sus módulos de la planeación de la trayectoria y la navegación reflexiva. A continuación se describe cada uno de ellos:

**Planeación de Trayectorias.** La planeación de trayectorias parte de un mapa del ambiente que establece el espacio de trabajo y dentro del cual se definen los obstáculos [Latombe 91, Ponce 02]. Posteriormente, sobre el espacio obtenido se busca la trayectoria que conecte el punto inicial y la meta. La trayectoria poligonal obtenida originalmente es suavizada [Hernández 95] y se consideran las restricciones no-holonómicas del vehículo [Dubin 53, Vazquez 02].

**Navegación Reflexiva.** La trayectoria planeada por la interfaz gráfica es transferida al VA a través de un radiotransmisor. Durante el seguimiento de la trayectoria, el

sistema de respuestas reflejas es incluido de tal forma que, cuando no hay obstáculos el vehículo tiene la prioridad de dirigirse hacia la meta. No obstante, cuando aparece un obstáculo en el camino, se inhibe el seguimiento para en primer lugar evadir el objeto y posteriormente continuar. Si el obstáculo es muy grande o aparece en una zona muy próxima, entonces el VA tomará la acción de frenarse ante un bloqueo total.

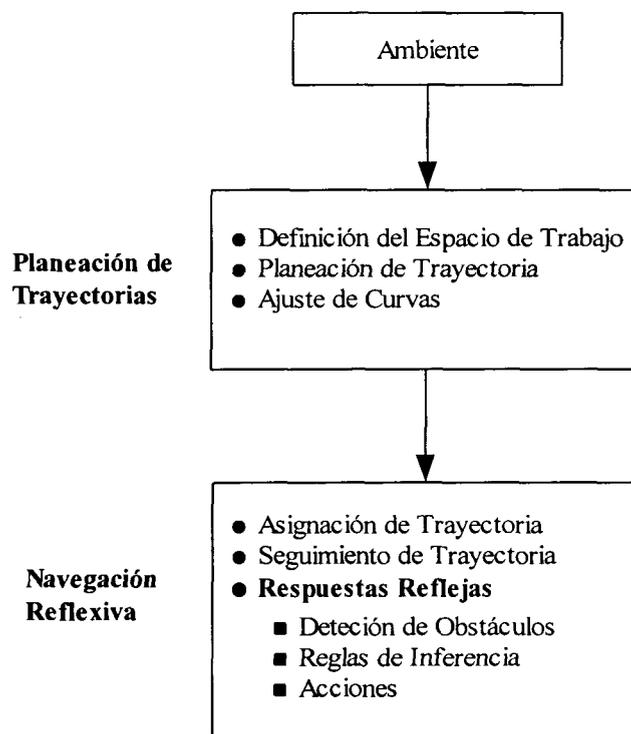


Figura 1.1: Diagrama general del método propuesto basado en la planeación de trayectorias y una navegación reflexiva para un VA

El módulo de respuestas reflejas está basado en un modelo de percepción-acción, de tal forma que ante la detección de un evento se dispara alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia. Para la detección de obstáculos se utiliza un arreglo de tres sonares al frente del VA. Las reglas de inferencia están jerarquizadas en capas y se basan en la información proporcionada por los sonares, así como por el control de trayectoria del vehículo. Las acciones que se ejecutan como respuesta refleja son la evasión y el frenado. Por otro lado, la recuperación de la trayectoria planeada después de la evasión de un obstáculo se basa en la distribución de los puntos de la trayectoria planeada.

La planeación de trayectorias utiliza los resultados de [Ponce 02], quien realiza la planeación de trayectorias para un vehículo holonómico, y de [Vazquez 02], quien ajusta y suaviza trayectorias generadas manualmente en un sistema de visión. La aportación de

esta investigación consiste en la integración de ambos trabajos y su adecuación considerando las restricciones cinemáticas de un VA no-holonómico, que tiene como principal característica no rotar sobre su propio eje. Por otro lado, la aportación del módulo de respuestas reflejas consiste en la caracterización de un sistema de percepción basado en sonares, así como el diseño e implementación de respuestas reflejas basadas en un modelo de percepción-acción; de forma que, ante la detección de un evento se dispara alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia.

La arquitectura de control del VA se basa en [Palacios 00], quien propone un modelo genérico, jerárquico y modular para implementar el seguimiento de una trayectoria. En la Figura 1.2 se muestra un diagrama a bloques con esta jerarquía, comenzado con la especificación de la trayectoria por el usuario hasta llegar a los motores y sensores del vehículo. A esta arquitectura se le agregó los módulos de planeación de trayectoria y el de respuestas reflejas descritos anteriormente.

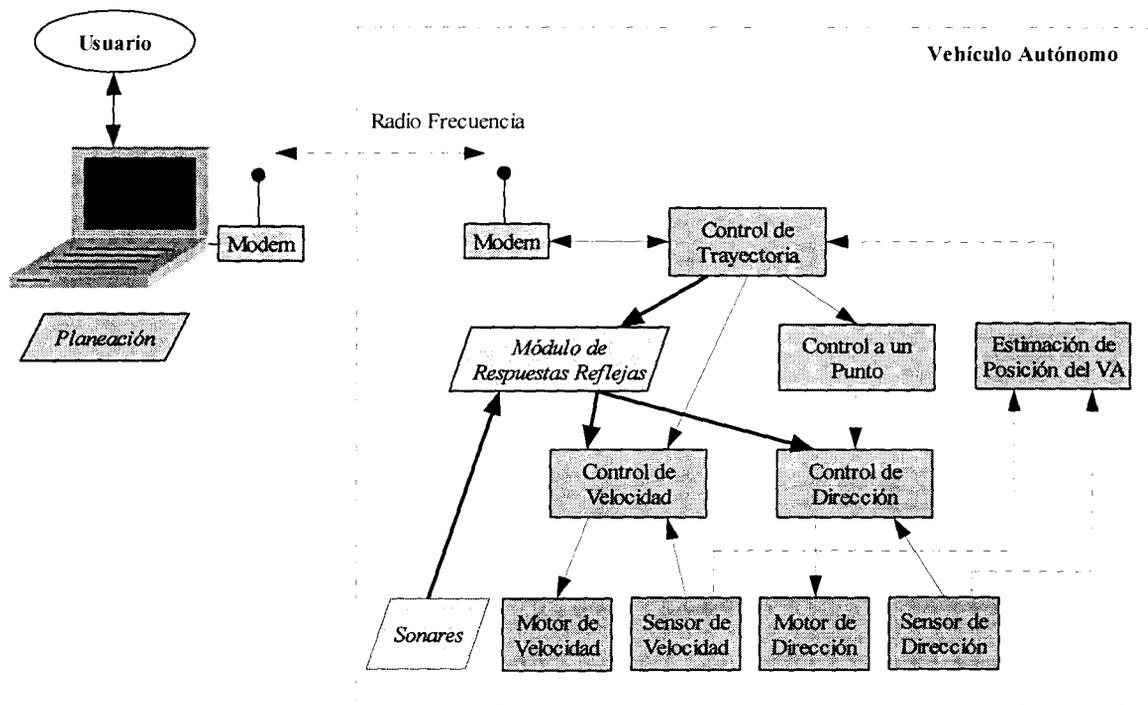


Figura 1.2: Diagrama a bloques de la arquitectura de control del vehículo autónomo que incluye la planeación y el módulo de respuestas reflejas

Los algoritmos de control permiten que el vehículo autónomo navegue en el espacio de trabajo. El lazo de control del vehículo autónomo para el seguimiento de trayectoria se compone de varios controladores en cascada. Primero, el usuario, a través de la interfaz gráfica, *planea* una trayectoria y se la envía al VA. Posteriormente, el VA recibe los puntos de control que definen la trayectoria y el *control de trayectoria*, que es el

controlador principal, se encarga de verificar la posición del vehículo para que ejecute la trayectoria asignada. Conforme el vehículo se desplaza y alcanza cada uno de los puntos, se asigna el siguiente punto en la trayectoria. El *control a un punto* recibe las coordenadas del siguiente punto y calcula la inclinación de las llantas, para orientar el vehículo en dirección a dicho punto. El *control de dirección*, recibe el ángulo de direccionamiento de las llantas, calculada por el *control a un punto* o por el módulo de respuestas reflejas, y manipula el motor de dirección para que alcance la orientación deseada. El *control de velocidad* procura que el vehículo se desplace con velocidad uniforme.

De manera paralela al *control a un punto* se agrega el *módulo de respuestas reflejas* que recibe como entradas, el estado actual de del seguimiento de la trayectoria y la información de los sonares para en caso necesario tomar el control del VA y evitar colisiones.

Para describir el sistema y el método propuestos en esta tesis, en el Capítulo 2 se presentan las técnicas utilizadas en la planeación de trayectorias. Asimismo, se presentan las consideraciones no-holonómicas para generar curvas suaves y alcanzables por el VA.

El Capítulo 3 describe las características cinemáticas del VA, el funcionamiento y configuración de los sonares, el módulo de respuestas reflejas y su inclusión dentro de la arquitectura de control. Por último, se muestra la estructura de las reglas de inferencia.

El Capítulo 4 presenta la implementación del sistema propuesto incluyendo la interfaz gráfica para la planeación de trayectorias y los componentes electrónicos para el control de los sonares. De igual manera, se describe la implementación física de las respuestas de evasión y frenado. Se termina este capítulo mencionando los experimentos realizados para validar el funcionamiento y se analizan los resultados.

El Capítulo 5 establece las conclusiones sobre el desarrollo y desempeño del sistema, así como recomendaciones y propuestas de mejora al trabajo para su continuidad.

Finalmente, en el apéndice A se describe la obtención del modelo cinemático del VA, en el apéndice B, se muestran los diagramas esquemáticos de los componentes electrónicos y el apéndice C presenta una guía sobre el funcionamiento de la interfaz gráfica de planeación.

# Capítulo 2

## Planeación de Trayectorias

El propósito de la planeación de trayectorias es obtener una trayectoria que pueda ser seguida por un VA sin colisionar con los obstáculos contenidos en el ambiente, partiendo de una posición inicial hasta una meta deseada.

El proceso de planeación de trayectoria completo se ilustra en la Figura 2.1 y en este capítulo se describen las técnicas utilizadas en cada una de las etapas de dicho proceso. Su implementación está basado en los trabajos de [Ponce 02], en el cual se realiza la planeación de trayectorias para un vehículo holonómico, y de [Vazquez 02], en el cual se ajustan y suavizan trayectorias generadas manualmente en un sistema de visión. La aportación principal de esta investigación, en su módulo de planeación, consiste en la integración de ambos trabajos y su adecuación considerando las restricciones cinemáticas de un VA no-holonómico, que tiene como principal característica no poder rotar sobre su propio eje sin cambiar su posición en el plano.

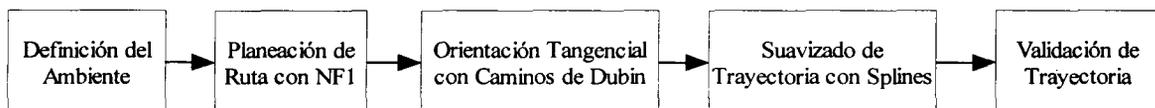


Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso de planeación de trayectorias

En primer lugar, para simplificar el problema de planeación de trayectorias, se expanden los elementos contenidos en el ambiente, según las dimensiones y forma del vehículo. El propósito de esta expansión es representar al VA con un solo punto o una línea. El espacio generado con los obstáculos expandidos se conoce como Espacio de Configuración (*C-Space*) y permite determinar si alguna parte del VA se encuentra en colisión con algún elemento del ambiente. Por lo tanto, el problema se reduce al movimiento del punto o línea a través del espacio libre.

A partir del espacio de configuración se busca una trayectoria. En este aspecto se han propuesto diversos algoritmos entre los cuales destaca la *Función de Navegación NF1*

[Latombe, 91] por ser una técnica óptima y sencilla de implementar. Este algoritmo consiste en generar una matriz a cuyos elementos se les asocia valores de distancia al punto meta. Posteriormente, sobre el espacio generado por NF1 se aplica un algoritmo de descenso en gradiente para encontrar la trayectoria que conecte el punto inicial del VA con el punto destino.

La trayectoria encontrada sirve de soporte para definir los puntos de control que pretenden describir el comportamiento del VA. Las trayectorias generadas tienen como objetivo que, al pasar sobre cada uno de los puntos de control, la orientación del VA sea tangencial al radio de giro de cada uno de dichos puntos. A las trayectorias que tienen esta característica se le conoce como *camino de Dubin* [Dubín 57, Redes & Shepp 90].

Posteriormente, los puntos característicos de la trayectoria se utilizan para generar una curva suave por interpolación basada en *Splines*. La curva resultante es luego validada para evitar que la trayectoria pase sobre algún obstáculo y de estar forma, asegurar que el VA pueda seguirla.

## 2.1 Definición del Ambiente

Sea  $A$  un robot (polígono simple) moviéndose en un ambiente bidimensional o espacio de trabajo, que consiste en un conjunto  $S = \{O_1, \dots, O_l\}$  de obstáculos.

La configuración de un robot es especificada en un espacio, cuyo número de parámetros corresponde al número de grados de libertad del robot. Así, una configuración del robot está determinada por  $A(x, y, \varphi)$ , donde el vector  $(x, y)$  establece la traslación, mientras que  $\varphi$  define su rotación (ver Figura 2.2).

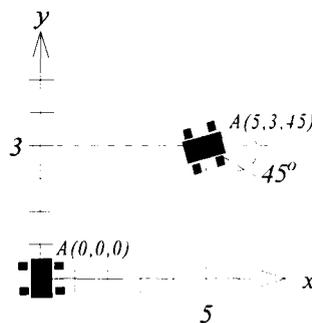


Figura 2.2: Configuración de un VA con tres grados de libertad

El espacio paramétrico de un robot  $A$  se conoce como su Espacio de Configuración (*C-Space*), denotado por  $C(A)$ . Un punto  $p$  en este espacio de configuración corresponde a una configuración  $A(p)$  del robot en el espacio de trabajo

Los obstáculos, así como las configuraciones del robot se proyectan al *C-Space* para genera los *Obstáculos del Espacio de Configuración (OC)*. Matemáticamente, esta proyección es equivalente a la resta de Minkowski [Lozano 83] entre los obstáculos  $O$  y el robot  $A(OC=O\ominus A)$ . Así suponiendo que el robot  $A$  es convexo y que también lo son los obstáculos, el obstáculo del espacio de configuración  $OC$  se define como el conjunto de puntos en el espacio de configuración tales que la configuración de  $A$  correspondiente intercepta a la proyección negativa de  $O$ . El *C-Space* generado por la expansión, describe, por lo tanto, aquellas configuraciones donde el robot colisiona con los obstáculos, denotadas por  $C\text{-Space}_{proh}(A,S)$ , así como las posiciones libres de colisión, denotadas por  $C\text{-Space}_{free}(A,S)$ . Por lo tanto, el *C-Space* es la suma total entre el  $C\text{-Space}_{free}(A,S)$  y  $C\text{-Space}_{proh}(A,S)$ .

Una trayectoria para el robot se proyecta como una curva en el *C-Space*, y viceversa; cada configuración del robot a lo largo de la trayectoria simplemente se proyecta como un punto correspondiente en el *C-Space*. Una trayectoria libre de colisiones se proyecta a una curva en el espacio libre.

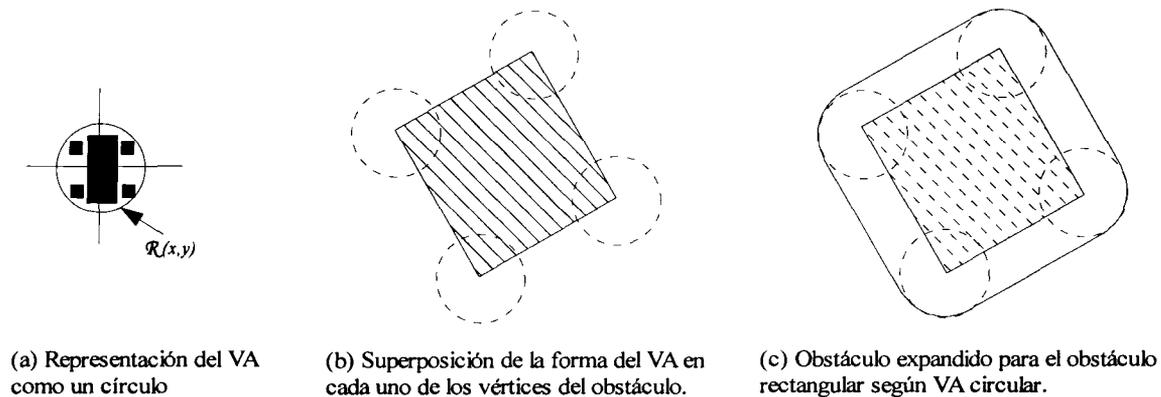


Figura 2.3: Cálculo de obstáculos de configuración dado un VA modelado en forma circular

Ahora bien, el obstáculo expandido  $OC$  se obtiene, para cada orientación  $\phi$  del robot  $A$  mediante una discretización de las formas de  $A$  y  $O$ . Sin embargo, debido a que el VA utilizado en este trabajo no puede girar sobre si mismo (restricciones no holonómicas), la obtención del *C-Space* se resume al cálculo para una sola configuración angular modelando al VA por el menor círculo circunscrito que lo abarque completamente. En este caso, la expansión de los obstáculos dados aparece en la Figura 2.3.

## 2.2 Función de Navegación

El cálculo de trayectoria consiste en determinar el camino más corto que lleve al VA de un punto inicial a uno destino. Para determinar la trayectoria se utilizan funciones de navegación, las cuales son procedimientos de descenso rápido con un mínimo localizado en el punto meta. Un algoritmo sencillo de implementar es el NF1 [Latombe, 91]. Este algoritmo consiste en generar una matriz a cuyos elementos se les asocia valores de distancia al punto meta, para luego recorrer dicha matriz mediante un algoritmo de descenso en gradiente que describe la sucesión de puntos que conforman el camino desde el punto de inicia hasta la meta. Como resultado se obtiene una ruta poligonal cuyos vértices definen los *puntos de control* para su procesamiento posterior.

El algoritmo NF1 propaga la distancia Manhattan desde la meta en *C-Spacefree*. La distancia a Manhattan  $d_4(p,q)$  entre un par de puntos  $p=(x_p,y_p)$  y  $q=(x_q,y_q)$  se define por la siguiente relación:

$$d_4(p,q) = |x_q - x_p| + |y_q - y_p| \tag{2.1}$$

La Figura 2.4 ilustra un ejemplo de los valores de distancia Manhattan expandida desde  $p_c$  dentro del *C-Space* cuadrículado y rodeando un obstáculo contenido en este espacio. La asignación de valores a los elementos de la rejilla son fácilmente calculados haciendo uso de un algoritmo de “expansión en ola”.

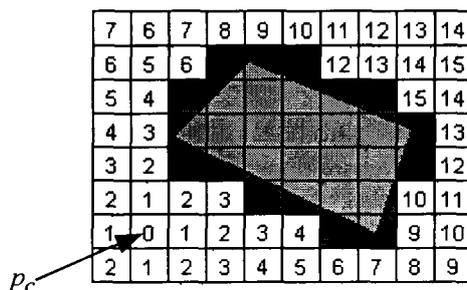


Figura 2.4: Expansión del punto  $p_c$  utilizando distancia Manhattan

Este algoritmo funciona de la siguiente manera: el elemento inicial colocado en la estructura de datos es el nodo meta con una longitud de trayectoria de cero. El algoritmo saca ese nodo de la estructura de datos, llena su posición en el ambiente cuadrículado con cero, coloca en la estructura a sus nodos vecinos y les asigna una longitud de trayectoria de uno. Así sucesivamente, el algoritmo va quitando un elemento de la estructura de datos, llena su posición en el ambiente cuadrículado con la longitud actual y todos los vecinos que no han sido llenados y que no pertenecen a un obstáculo se ponen al final de la estructura de datos con un incremento de uno en la distancia. De esta manera, la ola continua expandiéndose alrededor del espacio de configuración de los obstáculos.

El algoritmo mantiene una lista de elementos de frontera (la ola), con base a los cuales se realiza el siguiente ciclo de expansión. El procedimiento que se muestra a continuación va otorgando valores de distancia a los nodos no visitados para obtener lo que se muestra en la Figura 2.4.

Pseudocódigo 2.1:

**Procedimiento:** *expansión*(destino)

1. agregarPendientes(destino)
2. distancia[destino]=0
3. dist=0
4. **Mientras** pendientes != null
5. puntoPendiente=obtenerSigPend(pendientes)
6. **Para** cada vecinoPuntoPend de puntoPendiente
7.     **Si** vecinoPuntoPend != obstáculo **Entonces**
8.         distancia[vecinoPuntoPend]=dist+1
9.         *agregaPendientes*(vecinoPuntoPend)
10.        Fin {Si}
11.     Fin {Para}
12.     *eliminaPendientes*(puntoPendiente)
13.     dist=dist+1
14. Fin {Mientras}

donde

*pendientes*: es la lista de puntos pendientes a expandir.

*distancia[punto]*: es el arreglo de distancias resultante de la aplicación de la expansión por ola.

*vecinoPuntoPend*: se refiere a los vecinos del punto pendiente.

*agregaPendientes*(punto): agrega un punto a la lista de puntos pendientes a expandir.

*obtenSigPen*(lista): obtiene el siguiente punto a expandir de la lista.

*eliminaPendiente*(punto): elimina punto de la lista de pendientes.

El algoritmo termina cuando la lista de elementos a expandir está vacía, lo cual significa que todo el subconjunto de *C-Spacefree* accesible desde meta ha sido completamente explorado. Por construcción, cada elemento que puede ser alcanzado desde la meta tiene un vecino con menor valor que el suyo. Por lo tanto, no hay mínimos locales en la función de navegación.

Una vez asignados los valores de distancia a cada elemento en *C-Spacefree*, se procede a encontrar el camino que una los puntos  $q_{inicio}$  y  $q_{meta}$  elegidos. El camino se obtiene al recorrer los elementos en *C-Spacefree* de tal forma que, el valor asociado vaya en decremento con cada movimiento hasta llegar a  $q_{meta}$ . Cada elemento visitado en el recorrido se agrega a la sucesión de puntos que conforma el camino. En caso de situarse en un elemento que tiene a varios vecinos con el mismo valor se puede escoger

cualquiera de ellos, ya que cada uno correspondería a un camino con el mismo número de movimientos requeridos para llegar a la meta. Esta técnica de generación de trayectoria corresponde al descenso por gradiente. Un ejemplo del cálculo de una trayectoria mediante el uso de este algoritmo se muestra en la Figura 2.5.

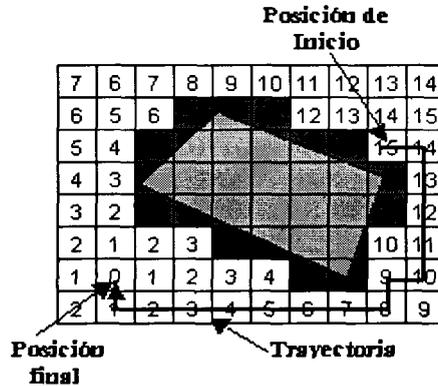


Figura 2.5: Calculo de una trayectoria usando NF1

### 2.3 Caminos de Dubin

Dada la naturaleza del algoritmo NF1, la trayectoria obtenida está compuesta, en su mayoría, por segmentos de recta y curvas que siguen el contorno de los obstáculos. Siendo así, este camino no permite realizar evoluciones que lleven al VA a seguir dicha trayectoria de forma eficiente [Scheuer 99]. Para generar una trayectoria válida, los puntos que la conforman deben ser alcanzables por el VA y por lo tanto, se deben considerar las restricciones no-holonómicas en la asignación de puntos en la trayectoria.

El ajuste de trayectoria se realiza con base en los *puntos de quiebre*, también llamados *puntos de control*, encontrados por NF1; tal ajuste pretende describir el comportamiento del vehículo. Las trayectorias generadas tienen como objetivo que, al pasar el vehículo sobre cada uno de los *puntos de control*, la orientación del mismo sea tangencial al radio de giro de cada *punto de control*. A las trayectorias que tienen esta características se les conoce como caminos de Dubin [Dubin 57, Reeds & Shepp 90].

Las trayectorias generadas permiten controlar la orientación con la que el vehículo alcanza los puntos de control, logrando que el vehículo no sólo se dirija a un punto, sino que, de acuerdo a la trayectoria lo alcance con la orientación que le permita enfilarse al siguiente punto en la trayectoria.

La Figura 2.6 muestra un ejemplo de una trayectoria del vehículo que es generada según dos estrategias, en el primer caso (a) se observa la trayectoria descrita por el vehículo debido al control implementado en el mismo, el vehículo sólo trata de aproximarse al punto; mientras que en el segundo caso (b) se muestra una trayectoria en la que el vehículo se encuentra con una orientación tangencial respecto a los puntos que describen la trayectoria. La distancia es menor en el segundo caso y la orientación del vehículo es tangencial a los *puntos de control*.

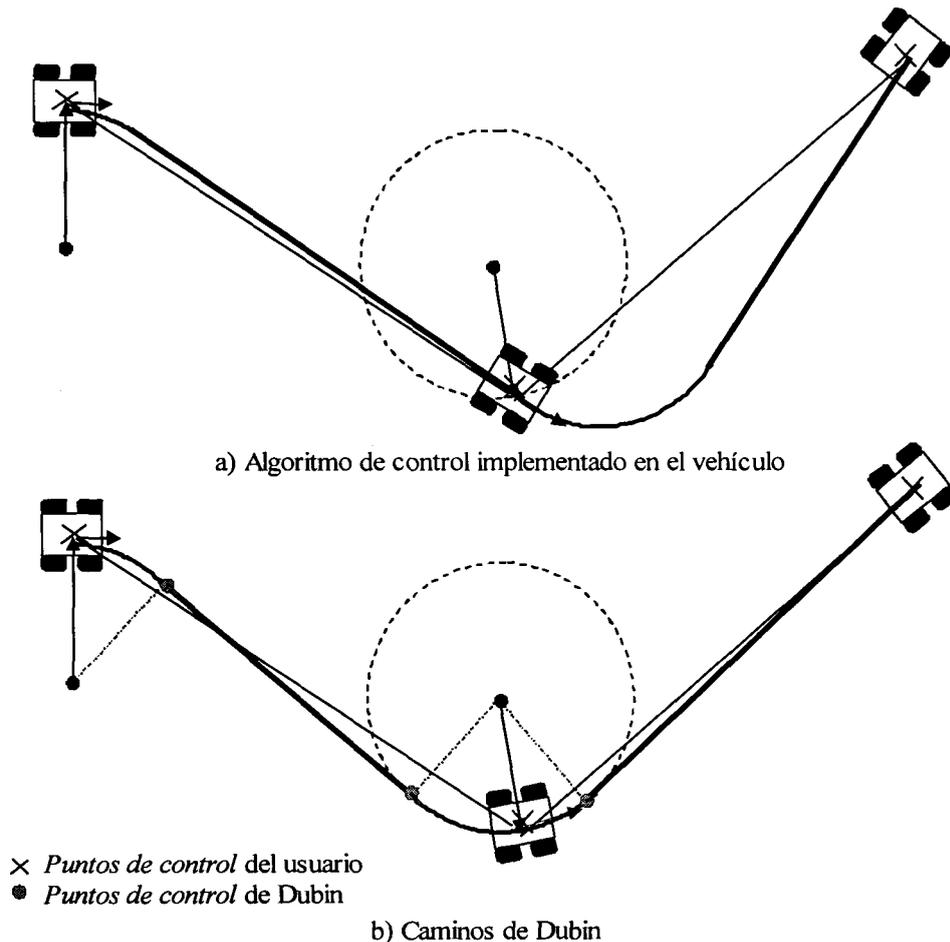


Figura 2.6: Diferencias en el seguimiento de trayectorias: en (a) se muestra el seguimiento por el VA de la trayectoria descrita únicamente por los *puntos de control*, en (b) se muestra el seguimiento de la trayectoria descrita empleando los caminos de Dubin.

Los caminos de Dubin se forman de arcos de radio mínimo y líneas rectas, siendo óptimos en cuanto a la distancia recorrida y tomando en cuenta las restricciones no holonómicas del VA. Debido a la constitución de los caminos de Dubin el método de solución es geométrico.

Para generar los caminos de Dubin, primeramente se determinan los radios de giro en cada *punto de control*; posteriormente se toman todos segmentos y se determina el tipo de solución para cada segmento; a su vez, un segmento se forma por dos *puntos de control* consecutivos y su solución depende del tipo de unión entre tales puntos. Existen dos tipos de soluciones: cruzada y externa. El tipo de solución para cada segmento se determina en función de la ubicación de los radios de giro y los *puntos de control*. La solución se compone del conjunto de coordenadas de los puntos de unión de las líneas rectas y los arcos de las circunferencias del segmento.

Una vez que se procesan los puntos, empleando los caminos de Dubin, se suaviza la trayectoria para obtener curvas continuas y realizables por el VA. Para suavizar la trayectoria se utilizan funciones *Spline cúbicas*.

A continuación se describen los pasos para calcular los caminos de Dubin de acuerdo con la implementación realizada por [Vazquez 02].

### 2.3.1 Determinación de Radios de Giro

Para el ajuste de la trayectoria primero se determina la ubicación de los radios de giro correspondientes a cada punto. Para determinar el radio de giro de un punto en particular, se deben conocer las coordenadas del punto previo y el subsecuente; por ende, para el primer punto y el último no es posible determinar el radio de giro. Para el primer punto se tiene una solución particular, en la cuál se restringe la ubicación del radio de giro, mientras que para el último punto no es necesario determinar el radio de giro.

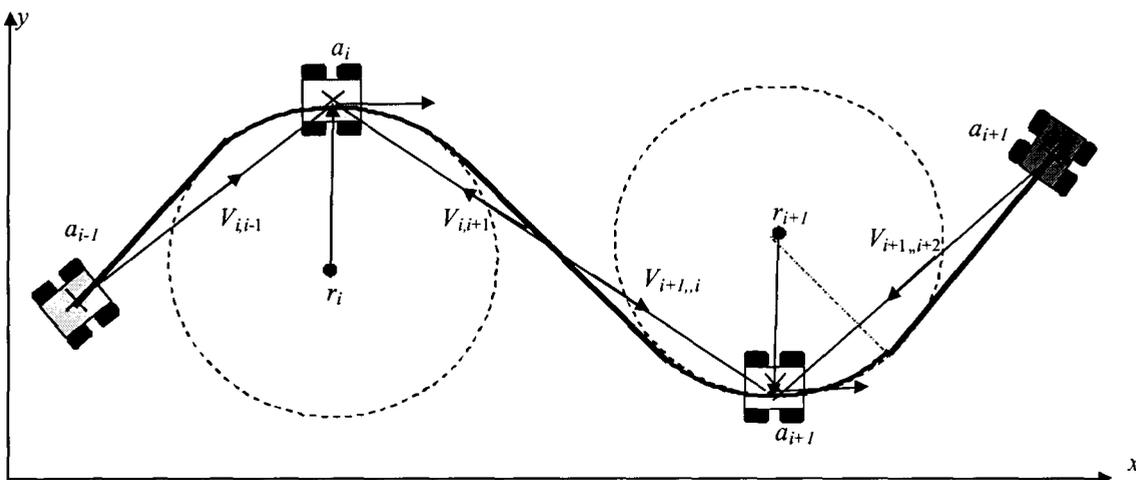


Figura 2.7: Determinación de los radios de giro. Para el  $i$ -ésimo punto en la trayectoria, su radio de giro  $r_i$  es la bisectriz de los vectores  $v_{i,i-1}$  y  $v_{i,i+1}$ .

Entonces, para determinar el radio de giro del  $i$ -ésimo punto en la trayectoria, se definen los vectores unitarios  $\mathbf{v}_{i,i-1}$  de  $a_{i-1}$  hacia  $a_i$  y  $\mathbf{v}_{i,i+1}$  de  $a_{i+1}$  hacia  $a_i$  (Figura 2.7). Entonces, debido a que el  $i$ -ésimo radio de giro es la bisectriz de los vectores  $\mathbf{v}_{i,i-1}$  y  $\mathbf{v}_{i,i+1}$ , empleando la suma de vectores se obtiene el vector unitario del radio de giro,

$$\mathbf{r}_i = \left( \frac{x_{i-1,i} + x_{i,i+1}}{\sqrt{(x_{i-1,i} + x_{i,i+1})^2 + (y_{i-1,i} + y_{i,i+1})^2}}, \frac{y_i + y_{i+1}}{\sqrt{(x_{i-1,i} + x_{i,i+1})^2 + (y_{i-1,i} + y_{i,i+1})^2}} \right) \quad (2.2)$$

cuya orientación sobre el plano  $x,y$  es

$$\theta_i = \arctan \left( \frac{y_{i-1,i} + y_{i,i+1}}{x_{i-1,i} + x_{i,i+1}} \right) \quad (2.3)$$

Las coordenadas del  $i$ -ésimo radio de giro son

$$r_i = (x_i + r_{\min} \cos \theta_i, y_i + r_{\min} \sin \theta_i) \quad (2.4)$$

para cada  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ . Donde  $r_{\min}$  es el radio de giro mínimo del vehículo de acuerdo con sus restricciones no-holonómicas. De este modo se conocen los radios de giro para cada *punto de control* y la orientación de las rectas que los conforman. Posteriormente, se determina el tipo de unión para los segmentos de arco y líneas rectas que forman la trayectoria.

### 2.3.2 Determinación de la Solución por Segmento

El tipo de solución para cada segmento se determina en función de la ubicación de los radios de giro y los *puntos de control* correspondientes al segmento. En la Figura 2.8 se muestran los dos posibles casos al generar un segmento de trayectoria entre dos *puntos de control*. Se observa que los *puntos de control*  $a_1, a_2, a_3, a_4$  definen la ubicación de los centros de giro  $r_2$  y  $r_3$ . En el primer caso (a) la diferencia de ángulo entre la recta  $\overline{a_1 a_2}$  y la recta  $\overline{a_3 a_4}$  es mayor a  $\pi/2$  y menor que  $3\pi/2$ ; mientras que en el segundo caso (b) la diferencia de ángulo es menor a  $\pi/2$ .

En general, para determinar el caso correspondiente al par de puntos  $(i, i+1)$  se determina la orientación de la recta  $\overline{a_{i-1} a_i}$ ,

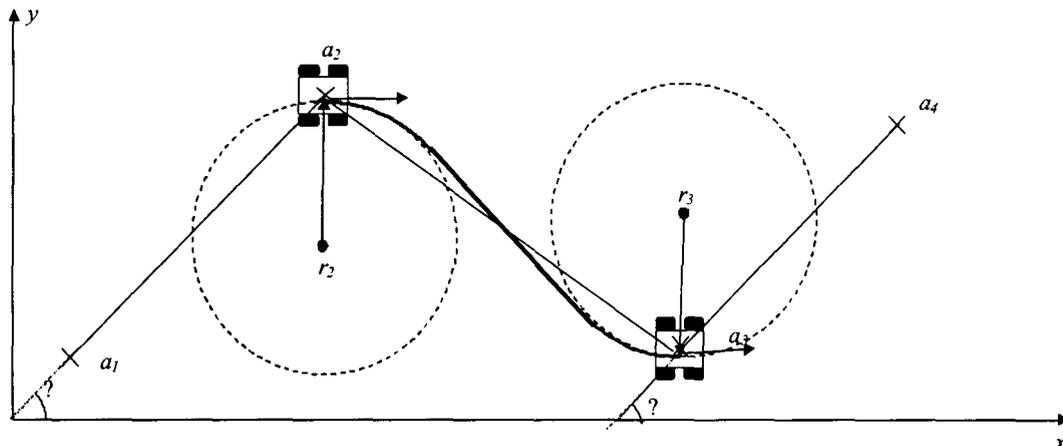
$$\alpha_i = \arctan 2(y_i - y_{i-1}, x_i - x_{i-1}) \quad (2.5)$$

y de la recta  $\overline{a_{i+1} a_{i+2}}$ ,

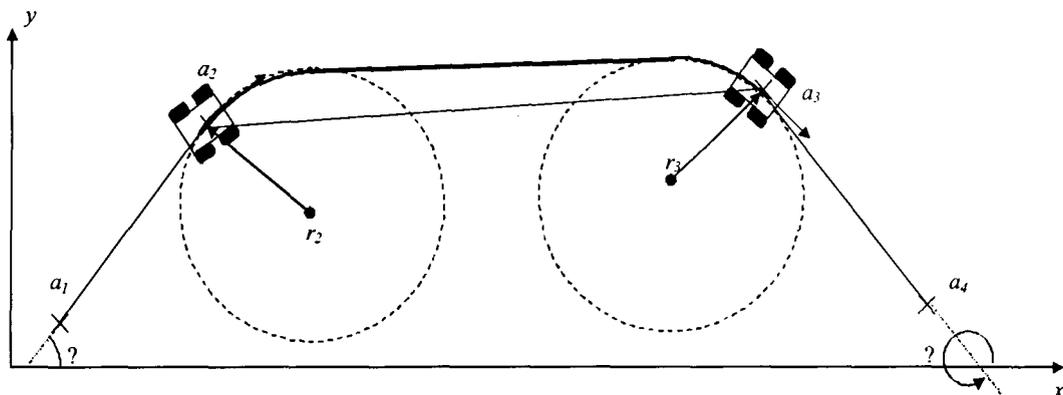
$$\beta_i = \arctan 2(y_{i+2} - y_{i+1}, x_{i+2} - x_{i+1}) \quad (2.6)$$

Con estos datos se selecciona el caso de solución:

$$\text{Caso}_i = \begin{cases} \text{cruzado} & \pi/2 < |\beta_i - \alpha_i| < 3\pi/2 \\ \text{externo} & \text{sino} \end{cases} \quad (2.7)$$



a) La diferencia en orientación entre las rectas  $\overline{a_1 a_2} = \beta$  y  $\overline{a_3 a_4} = \alpha$  es menor a  $\pi/2$  y mayor a  $3\pi/2$



b) La diferencia en orientación entre las rectas  $\overline{a_1 a_2} = \beta$  y  $\overline{a_3 a_4} = \alpha$  es mayor a  $\pi/2$  y menor a  $3\pi/2$

Figura 2.8: Casos posibles al ajustar la trayectoria entre dos *puntos de control*

Cabe mencionar que para generar una solución válida en cualquiera de los casos se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\overline{a_2 a_3} \geq 2r_{\min} \quad (2.8)$$

que establece que la distancia entre los dos *puntos de control* debe ser mayor al doble del radio de giro mínimo del VA.

### 2.3.3 Solución del caso cruzado

Teniendo como *puntos de control*  $a=(x_a,y_a)$  y  $b=(x_b,y_b)$  y centros de giro  $r_a=(x_{ra},y_{ra})$  y  $r_b=(x_{rb},y_{rb})$  se determina la posición de los puntos  $a_t=(x_{at},y_{bt})$  y  $b_t=(x_{bt},y_{bt})$  como se muestra en la Figura 2.9.

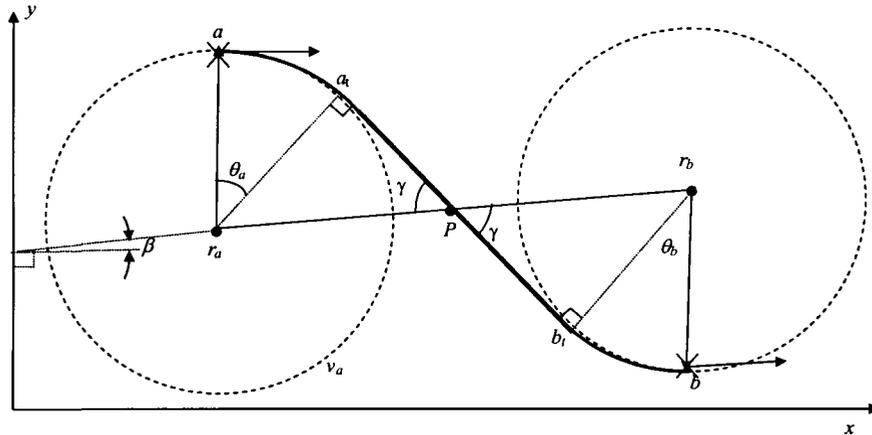


Figura 2.9: Solución para trayectoria entre dos puntos de control para el caso cruzado

Debido a que la orientación del vehículo en los puntos  $a$ ,  $a_t$ ,  $b$ ,  $b_t$  es tangencial respecto al radio de giro entonces,  $P$  es el punto medio de la recta que une los puntos  $a_t$  y  $b_t$ , y es también el punto medio de la recta  $\overline{r_a r_b}$ . Por lo tanto,

$$P = \left( \frac{x_{ra} + x_{rb}}{2}, \frac{y_{ra} + y_{rb}}{2} \right) \quad (2.9)$$

Por otro lado, si  $\gamma$  es la orientación de la línea tangente respecto a la línea que une los dos centros de los radios de giro y  $\beta$  es el ángulo de orientación de la recta entre  $r_a$  y  $r_b$ , entonces el ángulo de rotación  $\delta$  está definido por:

$$\delta = \beta \pm \gamma \quad (2.10)$$

dependiendo si el VA gira en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario.

Además, del triángulo  $r_a a_t P$  se calcula la hipotenusa  $h$  como

$$h = \sqrt{(x_p - x_{ra})^2 + (y_p - y_{ra})^2} \quad (2.11)$$

Finalmente, las coordenadas del punto  $a_t$  son, entonces:

$$a_t = (x_p + h \cos \delta, y_p + h \operatorname{sen} \delta) \quad (2.12)$$

Asimismo, las coordenadas del punto  $b_t$  son similares a las de  $a_t$ , pero se encuentran rotadas  $180^\circ$  respecto al punto  $P$ :

$$a_t = (x_p + h \cos(\delta + \pi), y_p + h \operatorname{sen}(\delta + \pi)) \quad (2.13)$$

### 2.3.4 Solución del caso externo

Teniendo como *puntos de control*  $a=(x_a, y_a)$  y  $b=(x_b, y_b)$ , centros de giro  $r_a=(x_{ra}, y_{ra})$  y  $r_b=(x_{rb}, y_{rb})$  se determina la posición de los puntos  $a_t=(x_{at}, y_{bt})$  y  $b_t=(x_{bt}, y_{bt})$  como se muestra en la Figura 2.10.

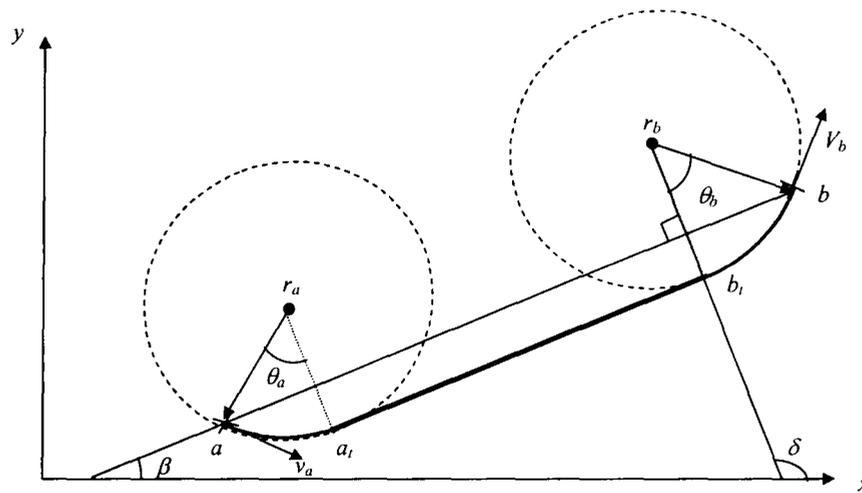


Figura 2.10: Solución para trayectoria entre dos *puntos de control* para el caso externo

De las coordenadas de los puntos  $r_a$  y  $r_b$  se determina la orientación de los puntos en el plano:

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_{ra} - y_{rb}}{x_{ra} - x_{rb}}\right) \quad (2.14)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de orientación de la recta que une los centros de los radios de giro. La recta  $\overline{r_a a_t}$  es perpendicular a la recta  $\overline{r_b b_t}$ , por lo que su ángulo es

$$\delta = \beta + \pi/2 \quad (2.15)$$

las coordenadas del punto  $a_t$  son:

$$a_t = (x_{ra} + r \cos \delta, y_{ra} + r \sin \delta) \quad (2.16)$$

y las coordenadas del punto  $b_t$  son:

$$b_t = (x_{rb} + r \cos \delta, y_{rb} + r \sin \delta) \quad (2.17)$$

## 2.4 Ajuste Spline

Las trayectorias generadas por los caminos de Dubin son óptimas en cuanto a la distancia que recorre el vehículo. Sin embargo, son difíciles de realizar para el VA puesto que al salir el vehículo de una curva de radio de giro mínimo, toma cierto tiempo ajustar la dirección de modo que se dirija en línea recta. Seguir estas curvas obliga a efectuar cambios bruscos en la dirección y dificulta la conducción del vehículo. Por lo tanto, es necesario generar trayectorias que sean continuas y suaves para el VA.

En el presente trabajo se usaron curvas *Spline* que son funciones polinomiales de tercer grado para ajustar las trayectorias. Las curvas *Splines* se definen con base en los *puntos de control*, realizando el ajuste por interpolación. Un ajuste por interpolación es un ajuste en el cuál la curva generada pasa sobre los *puntos de control*.

La característica esencial de la función polinomial cúbica es que forzosamente requiere que los puntos estén en orden creciente sobre un eje. Debido al factor cúbico la función polinomial, que describiría la forma de la curva, se volvería inestable oscilando entre valores positivos y negativos incluyendo discontinuidades en la función que provocan que la curva no pase por los *puntos de control*. Estas discontinuidades representan un problema, ya que las trayectorias se componen de puntos que no están necesariamente ordenados.

Para obligar el orden creciente se segmenta cada curva de acuerdo a subintervalos en los que se garantice el comportamiento monótono creciente de los puntos. Empleando los valores coordenados de los *puntos de control*, es posible generar una secuencia ordenada con comportamiento monótono creciente [Hernandez 95].

Para evitar el inconveniente de la segmentación de la curva se emplea un ajuste de la curva, independiente de la secuencia de puntos, mediante la formulación vectorial de la curva utilizando la cuerda del polinomio de soporte como variable de cálculo.

La longitud del polinomio de soporte siempre es creciente desde el primero hasta el último *punto de control* (Figura 2.11). Mediante las distancias acumuladas en cada punto,

se obtiene una secuencia creciente de valores que se puede utilizar como conjunto de valores independientes, para interpolar las coordenadas de los *puntos de control*.

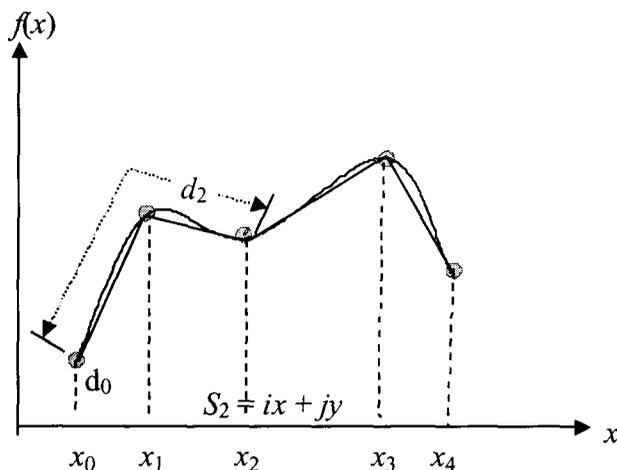


Figura 2.11: Función vectorial cúbica  $S(d)$

La formulación con base en la distancia euclidiana es independiente de la secuencia y el espaciamento de los *puntos de control*, por lo cual permite aplicarse a las curvas generadas para la trayectoria del vehículo.

La formulación para curvas de interpolación *spline*, aparece en el texto [Burden-Faires-Reynolds 81]. Para construir la interpolación cúbica *spline* para una función  $f(x)$  dada, las condiciones de la definición se aplican al polinomio cúbico:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (2.18)$$

para cada  $i = 0, 1, \dots, n-1$  La solución de la interpolación para el  $i$ -ésimo punto es el sistema de ecuaciones lineales de la forma

$$Ax = B, \quad (2.19)$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ h_0 & 2(h_0 + h_1) & h_1 & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & h_1 & 2(h_1 + h_2) & \dots & h_2 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Asimismo,  $\mathbf{b}$  y  $\mathbf{x}$  son los vectores,

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3}{h_i}(a_2 - a_1) - \frac{3}{h_0}(a_1 - a_0) \\ \vdots \\ \frac{3}{h_{n-1}}(a_n - a_{n-1}) - \frac{3}{h_{n-2}}(a_{n-1} - a_{n-2}) \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

de donde se tiene la solución única para  $c_0, c_1, \dots, c_n$ . Los valores de  $a_i$  y  $h_i$  son

$$h_i = (x_{i+1} - x_i) \quad (2.23)$$

y

$$S_i(x_i) = a_i = f(x_i) \quad (2.24)$$

La solución para los coeficientes  $b_i$  y  $c_i$  es

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i^2 \quad (2.25)$$

$$c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i \quad (2.26)$$

Al resolver, el sistema lineal, se logran obtener los valores de los coeficientes  $a_i, b_i, c_i$  y  $d_i$ , que sustituidos en el polinomio cúbico, junto con los valores de  $x$  desde el punto  $(x_0, f(x_0))$  hasta el punto  $(x_{n-1}, f(x_{n-1}))$  generan la curva interpolada.

## 2.5 Validación de Trayectorias

Al calcular las curvas de Dubin y suavizar la trayectoria pueden darse casos en los cuales la trayectoria generada se introduzca en alguna región del  $C\text{-Space}_{proh}$ , como se indica en la Figura 2.12.

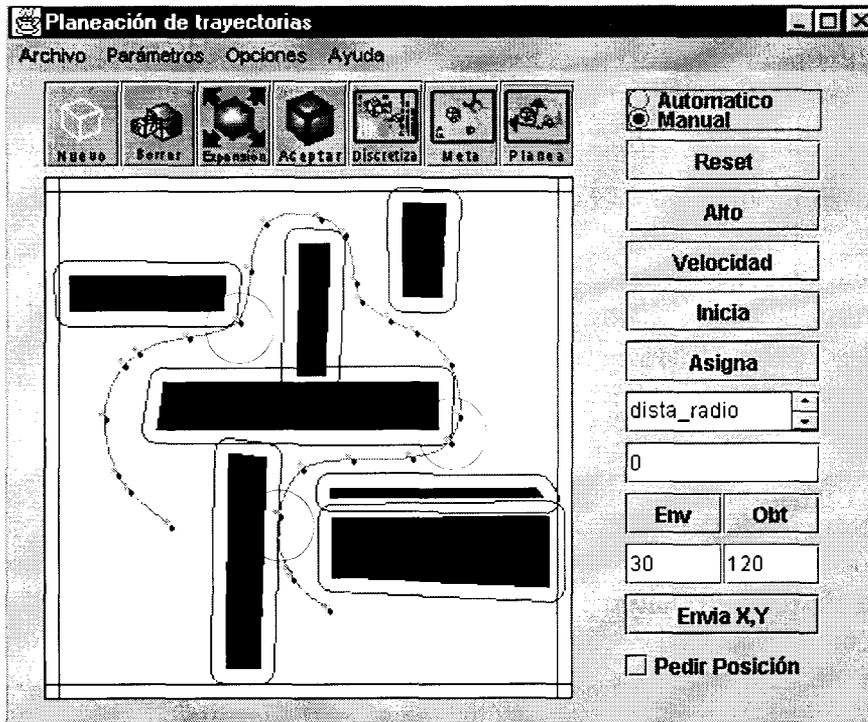


Figura 2.12: Ejemplo de trayectoria ajustada que ocupa espacio de configuración prohibido marcado por los círculos

En la mayoría de los casos se puede solucionar el problema disminuyendo la distancia entre los puntos de la curva y aumentando el área de expansión de los obstáculos. Sin embargo, para evitar de forma definitiva el trazo de la curva sobre área del  $C\text{-Space}_{proh}$ , se desplazan los puntos de la trayectoria que se encuentran en colisión hacia el espacio libre  $C\text{-Space}_{free}$ . La validación utilizada fue propuesta por [Ponce 02] y se ejecuta al dibujar la trayectoria determinando si existe colisión en alguno de los pixeles trazados, los cuales se encuentran directamente mapeados a un elemento en  $C\text{-Space}$ .

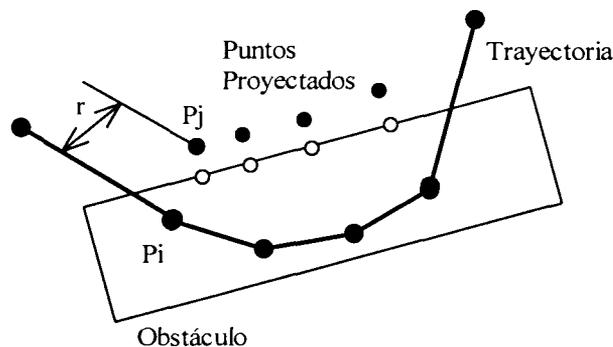


Figura 2.13: Proyección de los puntos en colisión a lo largo de las rectas  $p_i p_j$  correspondientes hacia el  $C\text{-Space}_{free}$

La colisión se evita al proyectar la recta, que tiene algún punto extremo en colisión, a lo largo de su normal, hasta que los puntos extremos que definen la recta se encuentren en *C-Spacefree*. La Figura 2.13 se muestra el comportamiento del algoritmo cuando un segmento de la trayectoria se interna en un obstáculo del ambiente.

Dado que se busca encontrar el punto  $p_j$ , para cada punto en colisión que permita desplazar al punto  $p_i$  correspondiente a lo largo de la recta  $p_i p_j$  hacia el *C-Spacefree*, se utiliza el cálculo del determinante mostrado a continuación para identificar hacia donde gira la trayectoria y, con ello, determinar el lado hacia el cual proyectar el punto.

$$\det(p_{i-1}p_i p_{i+1}) = \begin{vmatrix} x_{i-1} & y_{i-1} & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} \quad (2.27)$$

Los puntos usados en el cálculo del determinante son los puntos extremos de la recta  $ab$  y el siguiente punto en turno  $p_c$  sobre la trayectoria (Figura 2.14). Dada una colisión en un segmento de curva, se considera que la trayectoria sigue el contorno de algún obstáculo, por lo cual primero se proyecta el punto hacia el lado exterior de la curva. Si después de desplazar el punto, cierta distancia predeterminada, continúa la colisión, entonces se proyecta el punto hacia el lado contrario.

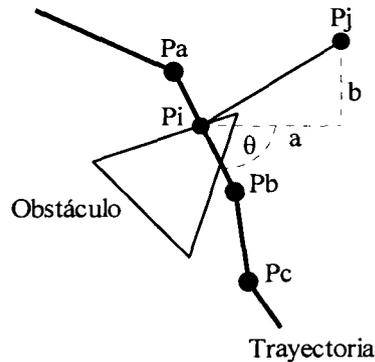


Figura 2.14: Cálculo del segmento de recta Normal

Entre cada par de puntos consecutivos de la trayectoria ( $p_a$  y  $p_b$ ), donde sucede una colisión, el caso a resolver es similar al que se muestra en la Figura 2.14. Aquí se busca la coordenada del punto  $p_j$ , dado el punto  $p_i$  (punto en colisión), para generar un segmento de recta normal sobre el cual se deslice el punto  $p_i$  hacia el *C-Spacefree*. Para tal propósito se tiene las siguientes relaciones:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}\right) \quad (2.28)$$

$$a = r \sin \theta \tag{2.29}$$

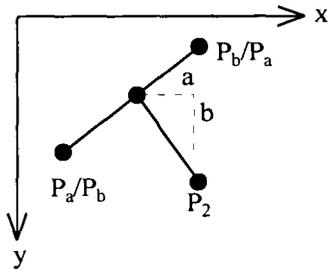
$$b = r \cos \theta \tag{2.30}$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre la recta  $ab$  y el eje  $x$ ,  $r$  es la distancia entre los puntos  $p_i$  y  $p_j$ , mientras que  $a$  y  $b$  son las componentes de la normal de la recta  $ab$  sobre los ejes  $x$ ,  $y$ , respectivamente. Luego se calcula la coordenada del punto  $p_j$ ,

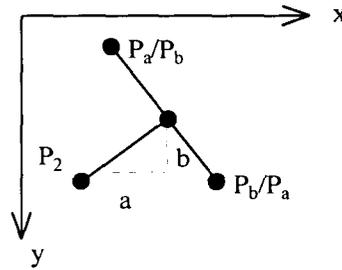
$$x_2 = x_1 \otimes_1 a \tag{2.31}$$

$$y_2 = y_2 \otimes_2 b \tag{2.32}$$

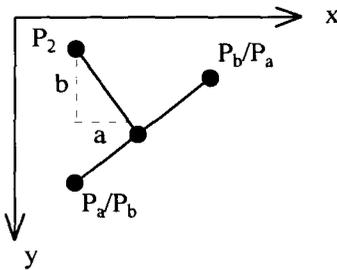
En estas relaciones, los símbolos  $\otimes_1$  y  $\otimes_2$  son reemplazados por signos de suma y resta según se muestra en la Tabla 2.1 Dicha tabla se basa en los casos ilustrados en la Figura 2.15.



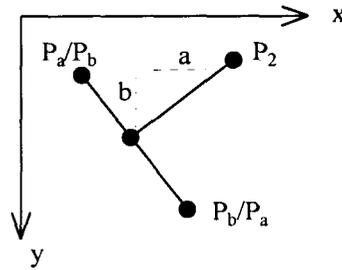
(a) Primer Cuadrante



(b) Segundo Cuadrante



(c) Tercer Cuadrante



(d) Cuarto Cuadrante

Figura 2.15: Casos de ubicación del punto  $p_2$  en los cuatro cuadrantes.  $a$  y  $b$  representan las componentes en  $x,y$ , respectivamente, de la normal a la recta  $ab$

Con el fin de no agregar más puntos al arreglo de puntos de la trayectoria, en lugar de proyectar el punto de colisión se proyecta uno de los puntos extremos de la recta que contiene a dicho punto en colisión (siempre el primero o siempre el segundo) y una vez

proyectado, el punto actualiza su coordenada. La modificación de la trayectoria se aplica a toda la trayectoria y no sólo a los puntos del polígono de soporte, ya que toma en cuenta los puntos generados después del ajuste de trayectoria.

Tabla 2.1 Signos correspondientes al cálculo del sentido de proyecto del punto en colisión

| Signo       | $P_a P_b$ |    |    |    | $P_b P_a$ |    |    |    |
|-------------|-----------|----|----|----|-----------|----|----|----|
|             | 1°        | 2° | 3° | 4° | 1°        | 2° | 3° | 4° |
| $\otimes_1$ | +         | -  | +  | -  | -         | +  | -  | +  |
| $\otimes_2$ | +         | +  | +  | +  | -         | -  | -  | -  |

# Capítulo 3

## Respuestas Reflejas

Una navegación confiable requiere, además de la planeación de trayectorias, de un módulo de respuestas reflejas. Este módulo permite al VA detectar la presencia de obstáculos que no se encontraban en el ambiente al momento de la planeación, evadirlos y posteriormente, continuar con la trayectoria planeada para alcanzar el punto final.

La aportación principal de esta investigación, en su módulo de respuestas reflejas, consiste en la caracterización de un sistema de percepción basado en sonares, así como el diseño e implementación de respuestas reflejas basadas en un modelo de percepción-acción. De forma que, ante la detección de un evento se dispara alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia.

El módulo de respuestas reflejas es incluido en la arquitectura de control del VA desarrollada por [Palacios 00]. La implementación permite que, cuando no hay obstáculos el vehículo tiene la prioridad de dirigirse hacia la meta. Sin embargo, cuando aparece un obstáculo en su camino, se inhibe el seguimiento para, en primer lugar, evadir el objeto y posteriormente continuar.

La percepción del ambiente se realiza con sonares, los cuales son sensores acústicos utilizados ampliamente para la medición de distancias. Se utilizan tres sonares al frente del VA en un arreglo cuya configuración permite un campo de percepción completo sin puntos ciegos; el cual facilita la localización de objetos con respecto al VA.

En la Figura 3.1 se representa el comportamiento global del VA. En primer lugar, en (a) se planea una trayectoria considerando la configuración actual del ambiente y se asigna la trayectoria al VA para su seguimiento. Posteriormente, en (b) durante la navegación aparece un obstáculo que impide continuar con la trayectoria planeada. El VA percibe el estado actual del ambiente a través de los sonares y con base en un conjunto de reglas de inferencia activa la ejecución de una posible acción refleja como se ve en (c). Finalmente el VA evade el obstáculo y continúa con la trayectoria (d).

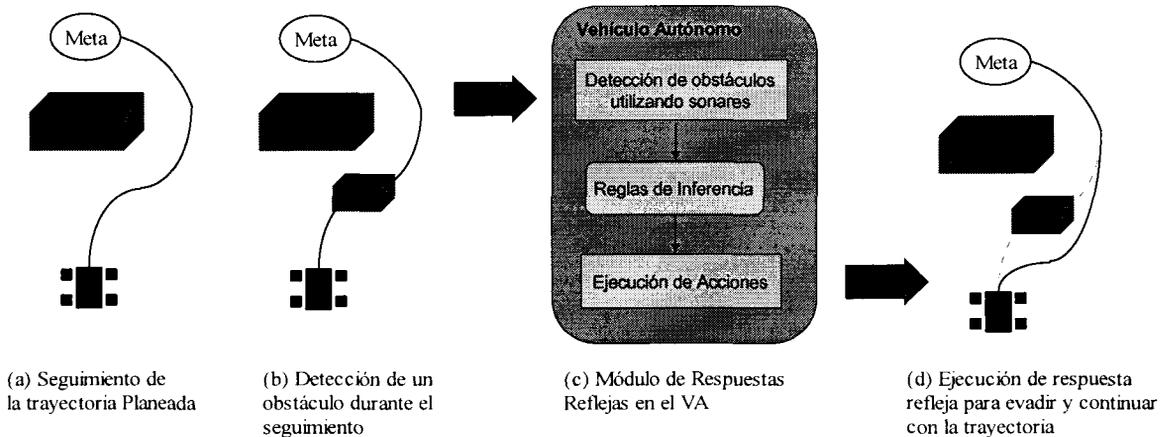


Figura 3.1 Módulo de respuestas reflejas en el seguimiento de una trayectoria planeada

Por lo tanto, este capítulo describe la arquitectura de control implementada en el VA y como se incluye el módulo de respuestas reflejas, el cual a su vez está comprendido por tres partes: la detección de eventos mediante sonares, un conjunto de reglas de inferencia y la ejecución de acciones.

Posteriormente, se realiza una descripción detallada de los sonares. Esta descripción incluye un análisis de los principios físicos, así como del comportamiento de los sonares y sus limitaciones. También se describe la configuración del arreglo de sonares implementado en el VA así como el funcionamiento de un módulo de medición de distancia basado en el sistema Polaroid 6500.

Se presenta la estructura de las reglas de inferencia, las cuales están jerarquizadas en capas y se basan en la información proporcionada por los sonares, así como por los controladores de dirección y velocidad del vehículo. Las acciones que se ejecutan como respuestas reflejas son la evasión y frenado aunque la descripción detallada de su implementación se muestra en el Capítulo 4.

Finalmente, se describe el método para recuperar la trayectoria planeada después de la evasión de un obstáculo.

### 3.1 Arquitectura de Control

Un VA no es capaz de seguir cualquier trayectoria que se le indique debido a las características de construcción del vehículo, las cuales restringen las regiones del espacio de configuraciones que pueda alcanzar desde una posición dada. Para trayectorias

definida dentro de su espacio de trabajo que pueda seguir el VA, primeramente hay que definir su comportamiento cinemático. De ahí la importancia de contar con un modelo que permita determinar las posiciones a las que puede llegar el vehículo desde una posición y orientación particular, de tal manera que las trayectorias planeadas consideren las restricciones *no-holonómicas*. Se dice que un VA es *no-holonómico* cuando los grados de libertad no son independientes y, por lo tanto, no pueden rotar sobre su propio eje.

Tomando en consideración las características cinemáticas del VA, [Palacios 00] desarrolló una arquitectura de control jerárquica, genérica y modular que permite la integración de funciones específicas a través de módulos para brindar al vehículo un cierto grado de autonomía. A continuación se describirá de manera general los módulos principales con los cuales cuenta el VA y posteriormente se mencionará como se integra el módulo de respuestas reflejas dentro de esta arquitectura.

### 3.1.1 Módulos de la Arquitectura

La arquitectura del control del vehículo autónomo permite separar el control del vehículo en diferentes niveles jerárquicos en cascada. En la Figura 3.2 se muestra un diagrama a bloques con esta jerarquía de mayor a menor nivel, comenzando con el usuario hasta llegar a los actuadores y sensores del vehículo.

En primer lugar, el usuario, a través de una interfaz gráfica en una computadora, planea una trayectoria y se la asigna en forma de un arreglo de puntos al VA para su seguimiento. La comunicación entre la computadora y el VA se realiza a través de un módem de comunicación en RF desarrollado por [Cantú 01] para la teleoperación y ejecución autónoma de tareas.

El *control de trayectoria* tiene como objetivo supervisar el seguimiento de una trayectoria previamente planeada. En cada ciclo del proceso, el *control de trayectoria* verifica la posición actual del vehículo para determinar cual es el siguiente punto a seguir en la trayectoria y lo envía como referencia al *control a un punto*. Cuando el VA alcanza el último punto se detiene.

El *módulo de velocidad* mantiene la velocidad determinada por el usuario. Este módulo envía señales de potencia a los motores de avance y recibe una retroalimentación por medio de un codificador óptico.

El *control a un punto* dirige el movimiento del vehículo hacia una meta en particular, manipulando el ángulo de giro de las llantas para minimizar el ángulo de error entre el vehículo y el punto que se desea alcanzar.

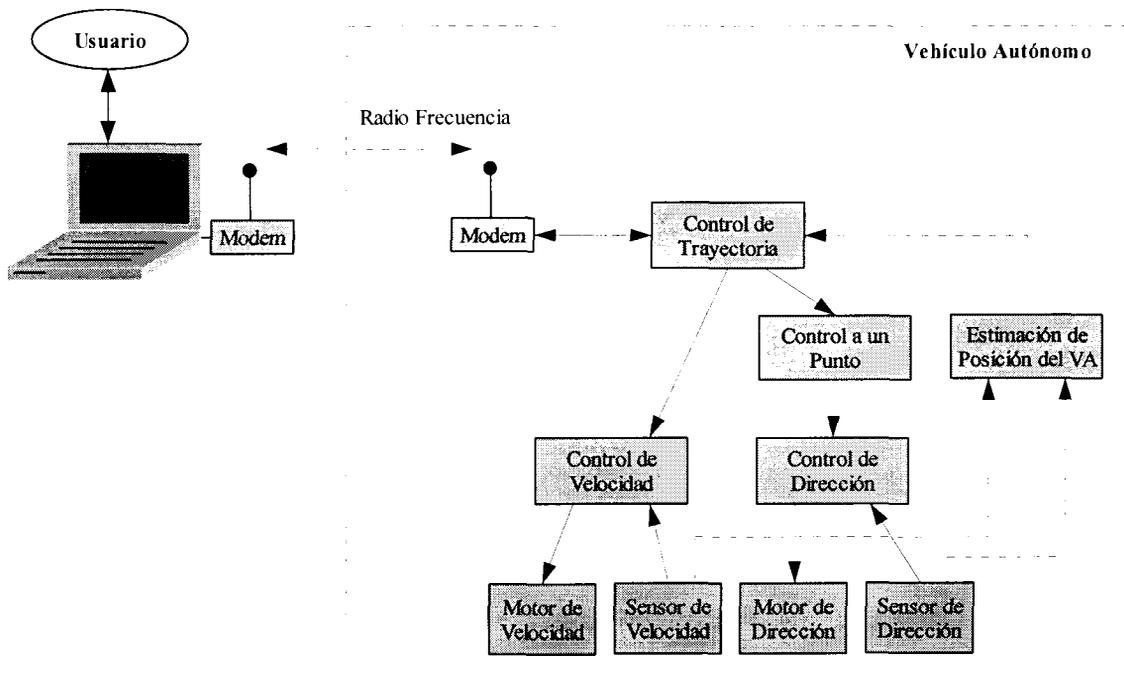


Figura 3.2: Diagrama de bloques de los módulos que componen la arquitectura de control de VA

El *control de dirección* determina la dirección de avance enviando señales de potencia a los motores de dirección y se recibe una retroalimentación por medio de un potenciómetro que mide el ángulo de giro de las llantas delanteras.

Finalmente, el *cálculo de la posición y orientación* del vehículo se realiza con las señales de los sensores de dirección y velocidad. Esta estimación es muy importante para el sistema de control puesto que el desempeño general del VA depende de ella. En la Figura 3.3 se muestra el modelo utilizado para la estimación, el cual se basa en la aproximación del arco generado por el giro del vehículo a la recta definida por  $\theta + \Delta\theta$ .

Para determinar la orientación del vehículo se utiliza el modelo cinemático del vehículo (Ver apéndice A), determinando así el cambio en orientación del vehículo ( $\Delta\theta$ ), con base en la dirección de las llantas  $\phi$  y la distancia que recorrió el vehículo ( $d$ ).

Para determinar la posición del vehículo se determina el avance en el eje  $x$  ( $\Delta x$ ) y el avance en  $y$  ( $\Delta y$ ) con base en la orientación del vehículo ( $\theta$ ) y la distancia recorrida ( $d$ ). Si estos cambios se acumulan, se obtiene la posición y orientación del vehículo en todo momento. A este método de estimación se le conoce como conteo interno o conteo por odometría (dead-reckoning).

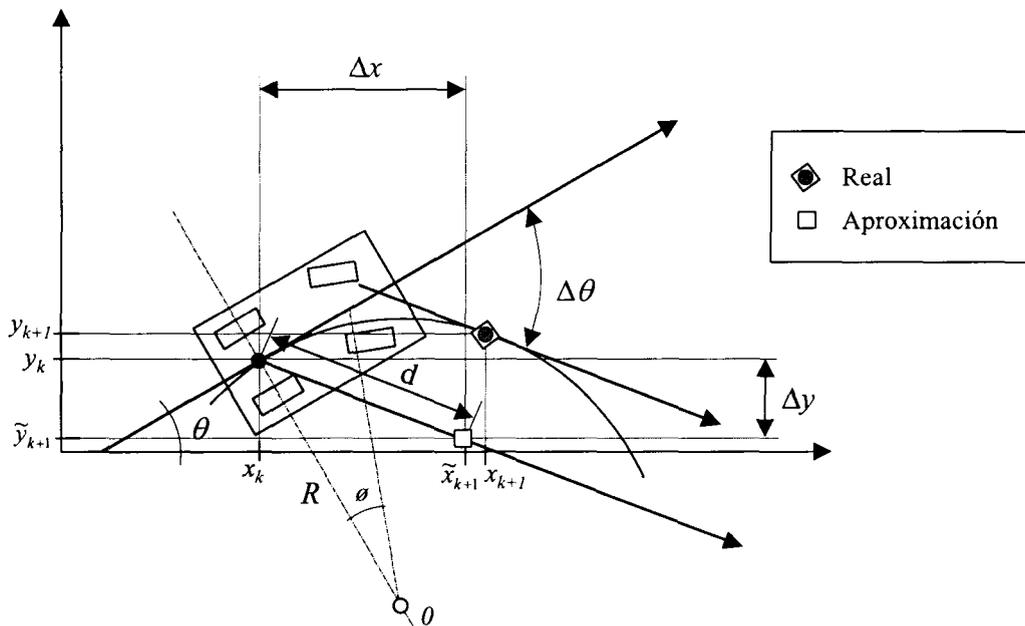


Figura 3.3: Estimación de posición y orientación del VA utilizando un vector con inclinación  $\theta + \Delta\theta$

Por lo tanto, la posición y orientación del vehículo se calcula iterativamente con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{d}{R} = \frac{d \tan \phi}{L} \\ \Delta x &= d \cos(\theta + \Delta\theta) \\ \Delta y &= d \text{sen}(\theta + \Delta\theta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} x &= x + \Delta x \\ y &= y + \Delta y \\ \theta &= \theta + \Delta\theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde  $R$  es el radio de giro del VA y  $L$  es la longitud entre las llantas delanteras y traseras del vehículo.

## 3.2 Inclusión de Respuestas Reflejas

El módulo de respuestas reflejas está comprendido por tres partes: la detección de eventos mediante sonares, un conjunto de reglas de inferencia sobre el comportamiento del VA al encuentro de los obstáculos y la ejecución de acciones, como se muestra en la Figura 3.4.

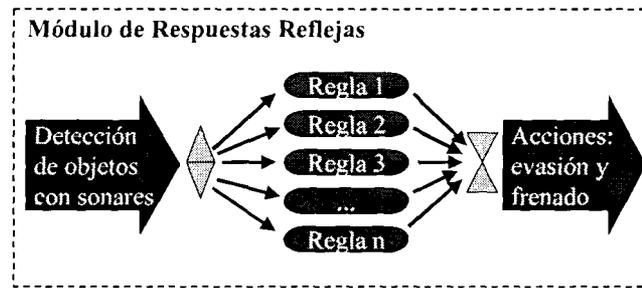


Figura 3.4: Composición del módulo de respuestas reflejas

Siguiendo el modelo de la arquitectura de control del VA se agrega un módulo de respuestas reflejas que permita la detección de obstáculos por medio de sonares. Con esta información se decide una acción a ejecutar entre evasión o frenado. En la Figura 3.5 se muestra la ubicación de este módulo en la arquitectura de control del VA.

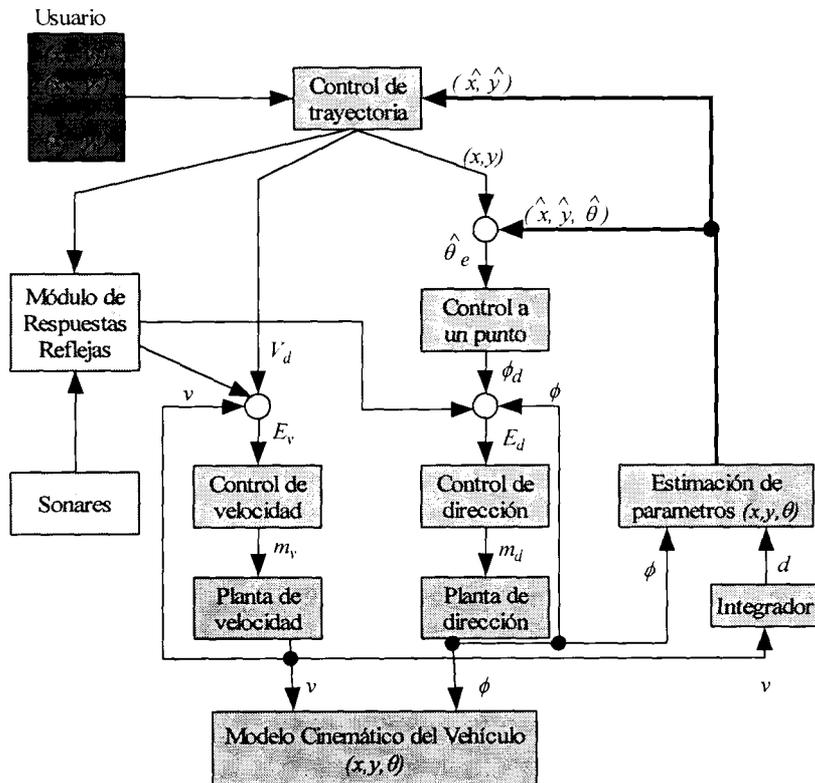


Figura 3.5: Inclusión del módulo de respuestas reflejas en la arquitectura de control del VA. Al detectar un obstáculo con los sonares, toma el control de la dirección y velocidad para evadir o frenar.

La detección de eventos brinda información, a través de los sonares, acerca de la distancia y dirección a la cual se encuentran los obstáculos. Ahora bien, las reglas de inferencia que disparan la ejecución de una acción no sólo se basan en esta información,

sino también utilizan el *control de trayectoria* para conocer la velocidad y dirección de avance actual del VA.

El módulo de respuestas reflejas se incluye durante el seguimiento de una trayectoria, de forma que cuando no hay obstáculos, la prioridad del vehículo es dirigirse hacia la meta. No obstante, cuando aparece un obstáculo en su camino, se inhibe el control a un punto para, en primer lugar, evadir el objeto y posteriormente continuar con el seguimiento. Si el objeto es muy grande o aparece en una zona muy próxima, entonces el VA tomará el control de velocidad para frenar.

### 3.3 Caracterización de Sonares

El sistema sensorial utilizado en el VA para percibir el mundo que lo rodea está basado en sonares. A continuación se presenta un análisis de los principios físicos, así como del comportamiento de los sonares y sus limitaciones. También se describe la configuración del arreglo de sonares implementado en el VA.

Los sonares son sensores acústicos que se basan en los principios del eco para medir distancias principalmente. La operación del sonar usando la estrategia de tiempo de vuelo consiste en transmitir un pulso y en la espera de recibir el eco de ese pulso. El tiempo transcurrido entre la transmisión inicial y el eco de detección puede ser convertida en distancia con respecto a la velocidad del sonido de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$d_0 = \frac{vt_0}{2} \quad (3.3)$$

donde  $v$  es la velocidad del sonido (345 m/s aproximadamente),  $t_0$  el tiempo transcurrido entre el inicio de la señal del sonar y el momento en que se recibe la señal de eco. La división obedece a que la señal viaja de ida y de vuelta, como se muestra en la Figura 3.6.

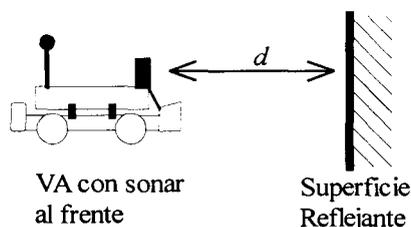


Figura 3.6: Cálculo de distancia utilizando tiempo de vuelo

Un sonar generalmente consta de dos partes principales: un transductor acústico y una tarjeta de control. En la Figura 3.7 se muestra el sistema Polaroid 6500 utilizado en esta investigación. La forma en que funciona físicamente el sonar es la siguiente: la tarjeta de control del sonar manda un tren de pulsos de voltaje que excita al transductor,

provocando la emisión de un pulso ultrasónico que viaja por el aire; inmediatamente después de que se lanza el pulso el transductor cambia su función de transmisor a receptor y espera a recibir la señal reflejada o eco de algún objeto cercano, si el transductor recibe un eco, mandará una señal de recepción.

El principio básico de operación para la detección de proximidad usando sonares es el mismo, no importando el sistema utilizado. La medición se inicia creando un sonido ultrasónico a una frecuencia específica. En el caso del módulo Polaroid, el sonido lo producen 16 transiciones entre +200V y -200V. Estas transiciones son alimentadas al transductor a 50Khz. aproximadamente. Como referencia, el ser humano promedio puede oír sonidos que oscilan entre 20 Hz y 20,000 Hz.

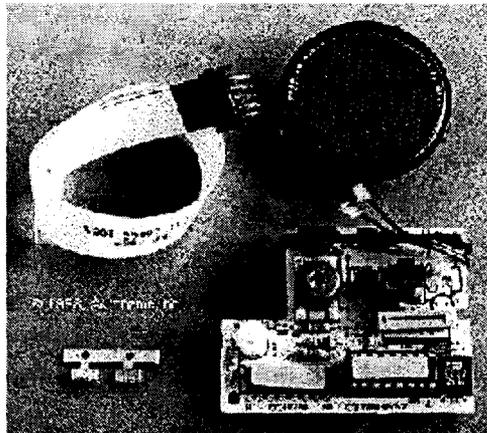


Figura 3.7 Sonar integrado por transductor y tarjeta controladora del sistema Polaroid 6500

La transmisión del tren de pulsos se desplaza radialmente en el aire a una velocidad de aproximadamente 345 m/s. Esta velocidad varía ligeramente con la humedad del entorno y prácticamente no es afectada por la presión atmosférica; por lo tanto, es independiente de la altitud. Puesto que la transmisión se esparce radialmente, la fuerza de la señal disminuye con la distancia en una relación inversamente proporcional a  $d^2$ . No obstante, la recepción en el sistema Polaroid 6500 tiene un amplificador de ganancia incremental en el tiempo para compensar la pérdida de fuerza.

La producción del eco o reflexión de cuerpos sólidos de los sonares depende de la magnitud de la señal y del ángulo de inclinación entre otros factores como la forma, orientación y propiedades de la superficie del área que refleja la señal.

### 3.3.1 Patrón de la Amplitud del Eco

Para desarrollar una estrategia de barrido o cobertura por múltiples sonares se requiere la relación analítica de la amplitud del eco como función del ángulo de orientación  $\theta$

(ángulo entre la normal del sonar y la normal de la superficie que cruza por el centro del sonar) de acuerdo con el esquema de la Figura 3.8.

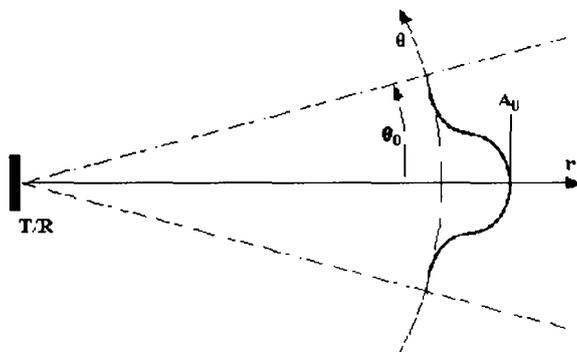


Figura 3.8: Patrón de la amplitud mostrado por un sonar

La relación proviene del patrón de radiación generado por un transductor cuando actúa como transmisor:

$$A(\theta) = A_0 e^{\frac{-4\theta^2}{\theta_0^2}} \tag{3.4}$$

donde  $A_0$  es la magnitud de la señal obtenida con un ángulo de  $0^\circ$ ,  $\theta$  es el ángulo de orientación previamente descrito y  $\theta_0$  es una variable que representa el ángulo de apertura del sonar, el cual es aproximadamente  $10^\circ$  para los sonares utilizados en esta investigación.

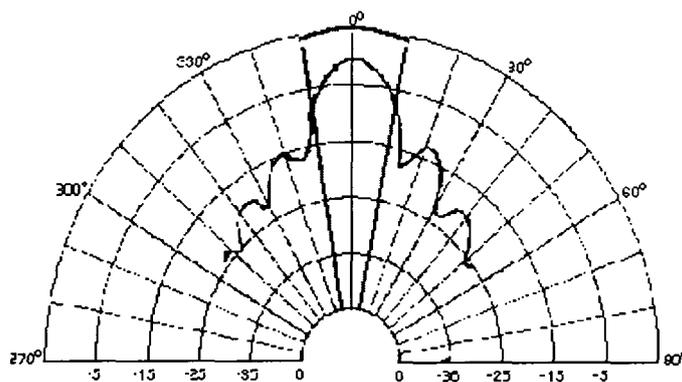


Figura 3.9: Patrón típico de un haz ultrasónico de 50 KHz. La gráfica presenta amplitud normalizada en dB contra el ángulo de orientación.

En el caso el sistema Polaroid 6500, el comportamiento real del sonar está formado por un lóbulo principal y varios laterales como se muestra en la Figura 3.9. En las técnicas de tiempo de vuelo sólo se considera el lóbulo central generalmente, debido a que es el único que sobrepasa el umbral impuesto por la tarjeta de control. Partiendo de

este hecho y de que el lóbulo central muestra una disminución de  $-5$  dB en  $\pm 10^\circ$  con respecto a la normal del sonar se determinó que el cono de percepción efectivo para cada sonar es de  $20^\circ$  en total. Este dato fue comprobado experimental para cada uno de los sonares utilizados en el sistema.

### 3.3.2 Configuración del Arreglo de Sonares

Utilizando la apertura de percepción de  $20^\circ$  se buscó desarrollar un arreglo de tres sonares al frente, cuya configuración permitiera un campo de percepción máximo sin puntos ciegos y que facilitará la localización de objetos con respecto al VA. Si suponemos que la normal del sonar central está alineada con la dirección de avance del vehículo y que los sonares laterales están inclinados un ángulo  $\delta$  con respecto al sonar central, entonces se forma un diagrama como el que aparece en la Figura 3.10. En el diagrama  $\theta$  corresponde al ángulo de apertura de percepción del sonar con respecto a la normal,  $\delta$  es el ángulo de inclinación de los sonares laterales con respecto al sonar central,  $L$  es la separación entre sonares de centro a centro cuando se encuentran alineados y  $B$  es la distancia al punto de intersección de los conos de percepción de ambos sonares. Finalmente  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $L'$  son variables auxiliares para los cálculos.

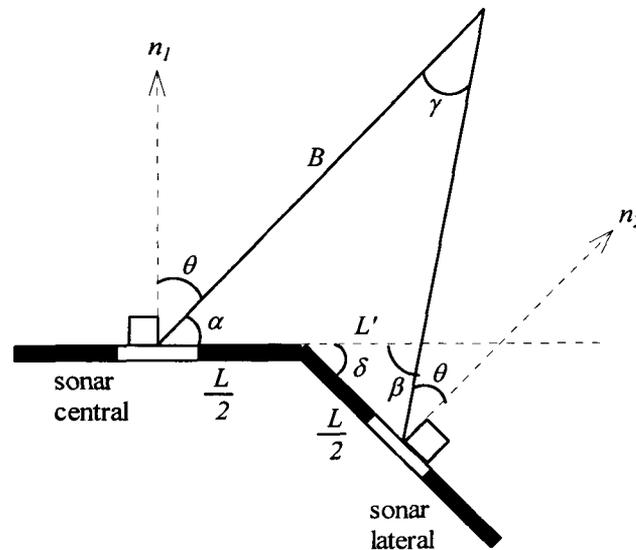


Figura 3.10: Diagrama para calcular la inclinación de los sonares laterales

Si  $\alpha + \theta = \pi/2$  y  $\beta + \alpha + \delta = \pi$ , entonces se obtiene que

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \theta - \delta \quad (3.5)$$

además si restamos  $\alpha$  en ambos lados de la ecuación anterior,

$$\beta - \alpha = \frac{\pi}{2} + \theta - \delta - \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = 2\theta - \delta \quad (3.6)$$

Por otro lado, aplicando ley de senos

$$L' = \frac{L \operatorname{sen} \alpha}{2 \operatorname{sen} \beta} \quad (3.7)$$

si aplicamos nuevamente ley de senos y utilizamos el valor de  $L'$  encontrado en la ecuación anterior

$$B = \left( \frac{L}{2} + \frac{L \operatorname{sen} \alpha}{2 \operatorname{sen} \beta} \right) \left( \frac{\operatorname{sen}(180 - \beta)}{\operatorname{sen}(\beta - \alpha)} \right) \quad (3.8)$$

Finalmente, utilizando denominador común y los valores de  $\beta$  y  $\beta - \alpha$  encontrados anteriormente, se determina que la distancia  $B$  depende de los ángulos  $\delta$  y  $\theta$ , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$B = \frac{L(\cos(\theta - \delta) + \cos \theta)}{2 \operatorname{sen}(2\theta - \delta)} \quad (3.9)$$

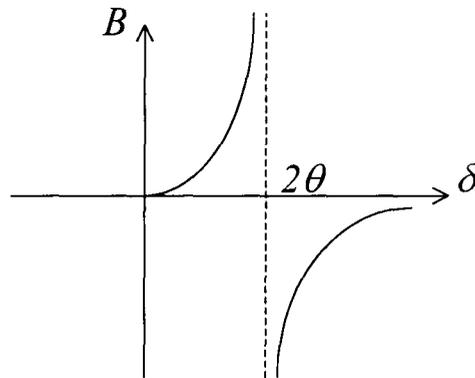


Figura 3.11: Gráfica del comportamiento de la distancia de intercepción  $B$  con respecto al ángulo de inclinación  $\delta$  de los sonares laterales

El comportamiento gráfico de esta relación se muestra en la Figura 3.11. En un principio, cuando el sonar lateral está alineado con el sonar central ( $\delta=0$ ), el punto de cruce es  $B=0$  puesto que prácticamente ambos sonares tiene el mismo campo de percepción. Conforme el sonar lateral se va inclinando, la distancia  $B$  aumenta hasta que en  $\delta=2\theta$  se presenta una asíntota que corresponde al ángulo de inclinación del sonar lateral para el cual los límites laterales de los conos de percepción de ambos sonares

crecen paralelamente; por tanto, nunca se cruzan. Después de este punto los conos comienzan a separarse.

Considerando que el vehículo tiene un radio mínimo de giro de aproximadamente 1.32m y que, para una velocidad promedio de 1 m/s, se requieren aproximadamente 0.50m para frenar completamente (la zona de seguridad se ha fijado en 0.75m), se determinó que la distancia a la cual se deben interceptar los conos de percepción de los sonares fuera de 2 m. A partir de esta distancia se detectan los obstáculos para una posible evasión. Si  $B=2\text{m}$ ,  $\theta=10^\circ$  y  $L=0.06\text{m}$ , entonces el ángulo al que deben colocarse los sonares laterales es de aproximadamente  $\delta=18.3^\circ$ . En la Figura 3.12 se muestra una vista superior del arreglo de sonares implementado para el sistema de respuestas reflejas.

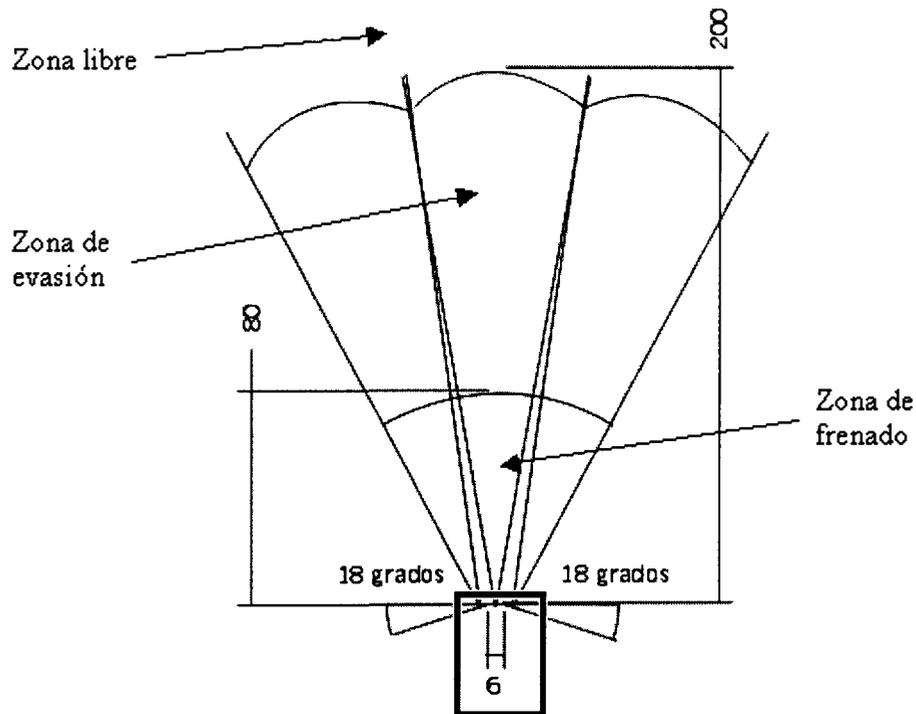


Figura 3.12: Vista superior del arreglo de los tres sonares al frente del VA y primera capa de evaluación de las reglas de inferencia por zona

### 3.3.3 Sistema de Conmutación de Sonares

El sistema para conmutación de sonares está basado en el trabajo desarrollado por [Aguirre 99]. Este sistema tiene las ventajas de ser modular, contar con capacidad de variar el número de transductores conectados al sistema y de utilizar sólo una tarjeta controladora de sonar. Un diagrama de bloques del sistema se muestra en la Figura 3.13

El sistema consta de un microcontrolador, una tarjeta Polaroid, un selector 4x16 y varios módulos de relevadores. Los transductores están agrupados en los cuatro módulos, cada uno de los cuales cuenta con capacidad de conectar hasta cuatro transductores. Los módulos son agregados al sistema dependiendo de las necesidades de la aplicación.

Para establecer el transductor que será activado se emplea el microcontrolador Atmel AT90S8515, el cual genera la señal correspondiente para seleccionar el sonar. Un relevador conecta al transductor indicado con la tarjeta Polaroid. Además el microcontrolador maneja las señales de INIT y ECHO de la tarjeta Polaroid, que indican el inicio de la transmisión del tren de pulsos y la detección del eco reflejado, respectivamente. Esta última señal sirve para detener un contador interno del microcontrolador cuyo valor se emplea para calcular la distancia a la cual el sonido fue reflejado aplicando la fórmula de tiempo de vuelo.

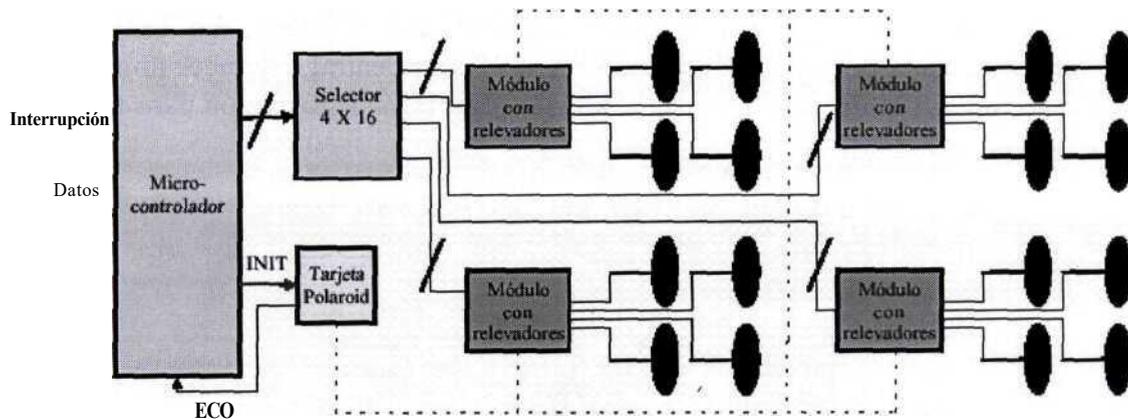


Figura 3.13: Diagrama de bloques del sistema de conmutación de sonares

### 3.4 Reglas de Inferencia

El sistema de respuestas reflejas está basado en un modelo de percepción-acción, de tal forma que ante la detección de un evento se dispara la ejecución de alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia.

En cada ciclo de detección, la información obtenida por los sonares se evalúa siguiendo las reglas de inferencia, las cuales están jerarquizadas en capas. En la primera capa se determina la zona en la cual se ha detectado un objeto. Para los fines prácticos de esta investigación se han definido tres zonas: libre, evasión y frenado. La primera de ellas corresponde al espacio libre que se encuentra a más de 2m del vehículo. Cuando se detecta un objeto en esta zona no se dispara ninguna acción porque se considera que no representa ningún obstáculo para el vehículo. La zona de evasión esta comprendida entre

los 0.8m y los 2m y los objetos detectados en ella representan posibles obstáculos para ser evadidos. Por último, la zona de frenado está definida por debajo de los 0.8m y cualquier objeto sensado en esta zona activará la respuesta refleja de frenado. Jerárquicamente, la zona de frenado corresponde a la de mayor prioridad por razones de seguridad. En la Figura 3.12 se muestra un diagrama con la ubicación de las tres zonas.

En la segunda capa de las reglas de inferencia se enmascara la zona de detección de acuerdo con la dirección de avance del vehículo. Si se avanza hacia el frente, sólo el sonar central puede disparar una respuesta refleja; en cambio si está girando a la derecha o a la izquierda, entonces sólo se activan los sonares de la derecha o la izquierda, respectivamente. Los umbrales que determinan la activación de uno u otro sonar están definidos por la dirección de avance del VA al momento de detectar un obstáculo. Por ejemplo, si consideramos que el sonar central detecta un obstáculo, y la trayectoria descrita por la dirección de avance actual se encuentre dentro del rango de percepción de dicho sonar, entonces se disparará una posible respuesta refleja. En cambio, si la trayectoria está fuera del campo de percepción del sonar central, entonces no se activará ninguna acción. En la Figura 3.14 se muestran los umbrales de dirección para el rango de percepción del sonar central.

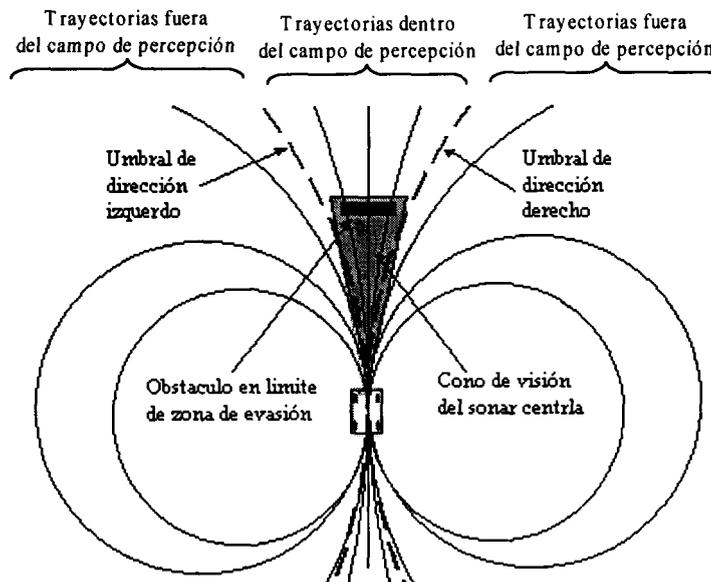


Figura 3.14: Segunda capa de evaluación de las reglas de inferencia por dirección. Al detectar un obstáculo, las trayectorias dentro del campo de percepción del sonar disparará una respuesta refleja.

Para determinar los umbrales de dirección se utiliza la ecuación (3.14) que determina el ángulo de giro  $\phi$  necesario para evadir un obstáculo detectado a una distancia  $d$ . En este caso, se determina del valor de  $\phi$  en los límites de los campos de percepción de los tres sonares. Los valores utilizados en la implementación se describe en el Capítulo 4.

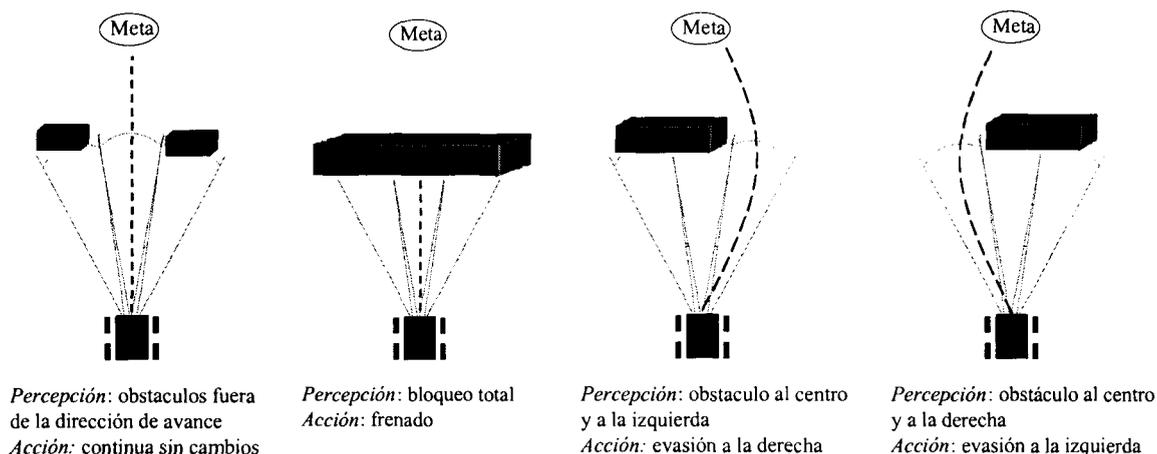


Figura 3.15: Tercera capa de evaluación de reglas de inferencia por espacios libres

En la tercera capa de evaluación de las reglas de inferencia se utiliza la información de los tres sonares, para determinar si existen espacios libres por los cuales se pueda realizar una evasión o si existe un bloqueo total; en cuyo caso se debe frenar al vehículo. En esta última capa se decide la respuesta refleja que se ejecutará como acción ante la detección de un obstáculo en la zona de evasión y en la dirección de avance, según se muestra en la Figura 3.15.

Tabla 3.1 Ejemplo de codificación de eventos para el sonar central con sus posibles acciones

| Zona detectada |               |                 | Dirección de avance | Acción ejecutada  |
|----------------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Sonar Central  | Sonar Derecho | Sonar Izquierdo |                     |                   |
| Libre          | No importa    | No importa      | Centro              | Sin cambios       |
| Evasión        | Libre         | Evasión         | Centro              | Evasión derecha   |
| Evasión        | Evasión       | Libre           | Centro              | Evasión izquierda |
| Evasión        | Evasión       | Evasión         | Centro              | Frenado           |
| Frenado        | No importa    | No importa      | Centro              | Frenado           |

Con este modelo de percepción-acción quedan codificados  $3^4=81$  posibles eventos puesto que se tienen 4 entradas al sistema (3 sonares y dirección) con 3 posibles valores cada uno para disparar una de las tres posibles acciones (evasión por la derecha, por la izquierda o frenado) o bien continuar sin cambios. Como ejemplo en la Tabla 3.1 se muestra la codificación de eventos para el sonar central con sus posibles acciones.

En la Figura 3.16 se muestra el árbol de decisión que representa al sistema de respuestas reflejas implementado en el VA.

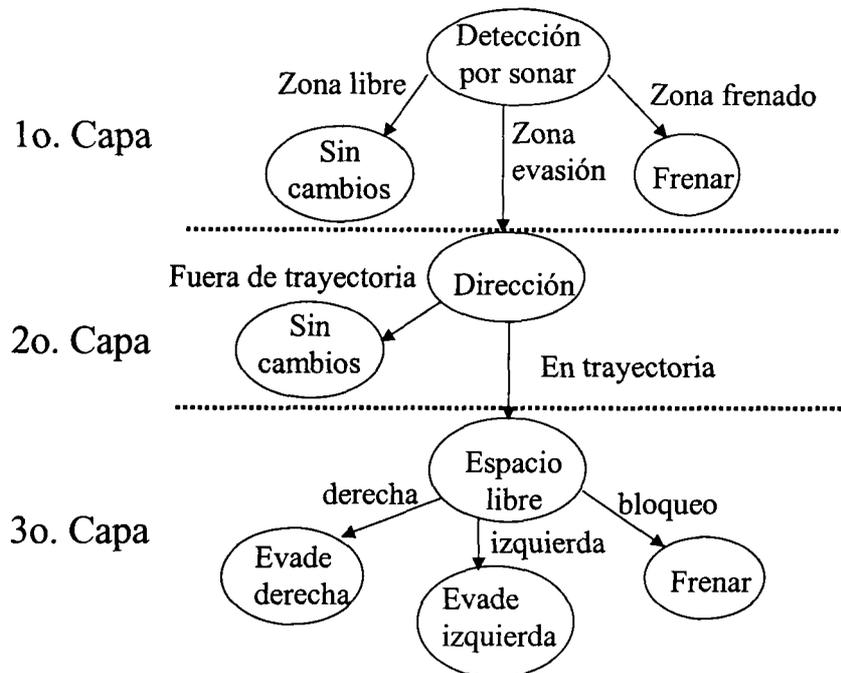


Figura 3.16: Diagrama de estados del sistema de respuestas reflejas

### 3.5 Respuesta Refleja de Evasión

La respuesta refleja más común durante la ejecución de una tarea por el VA es la evasión de obstáculos. Como se mencionó, ante la presencia de un obstáculo se puede tomar la acción de evadir por la derecha o por la izquierda y, en ambos casos, se manipula directamente el punto de referencia del control de dirección del vehículo. Esta acción inhibe temporalmente el *control a punto* hasta que el obstáculo queda fuera de la trayectoria actual.

El valor asignado en el punto de referencia del *control de dirección* corresponde al ángulo de giro que tendrán las llantas del vehículo durante la evasión y está determinado en función de la distancia al obstáculo y el ángulo de percepción del sonar que disparó la acción de evasión. Siguiendo los datos de la Figura 3.17, se deduce la relación entre estas variables.

Si  $d$  es la distancia al obstáculo y  $\alpha$  es el ángulo apertura de percepción del sonar con respecto a la normal,

$$E = \frac{d}{\cos \alpha} \quad (3.10)$$

donde  $E$  es la distancia al obstáculo sobre el límite del cono de percepción del sonar. Asimismo,

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (3.11)$$

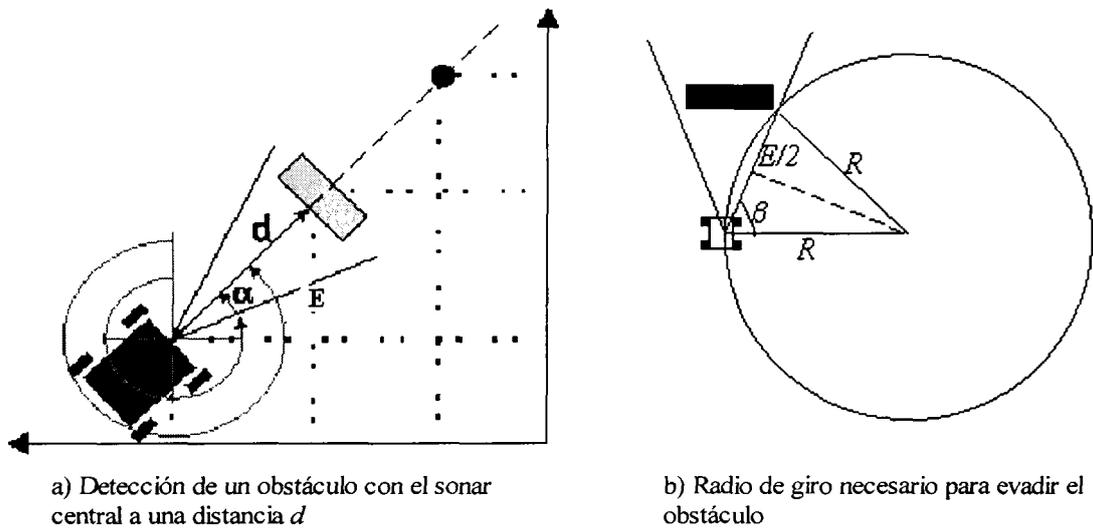


Figura 3.17: Datos utilizados para el cálculo del ángulo de giro necesario para evadir un obstáculo

y si  $R$  es el radio de giro máximo necesario para evadir el obstáculo, entonces

$$\cos \beta = \frac{E}{2R} \quad (3.12)$$

Además, al considerar las restricciones no-holónicas del vehículo, el radio de giro está relacionado con el ángulo de giro de las llantas,

$$\tan \phi = \frac{L}{R} \quad (3.13)$$

donde  $L$  es la distancia entre las llantas delanteras y las traseras. Finalmente, sustituyendo en (3.13), las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12), obtenemos una ecuación que determina el ángulo de giro  $\phi$  necesario para evadir un obstáculo detectado a una distancia  $d$ ,

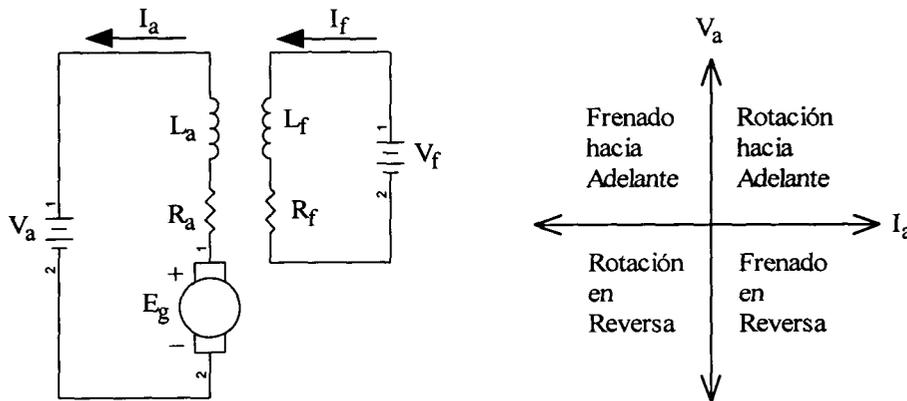
$$\phi = \arctan\left(\frac{L\text{sen}(2\alpha)}{d}\right) \quad (3.14)$$

donde  $L$  y  $\alpha$  tiene valores conocidos.

### 3.6 Respuesta Refleja de Frenado

Como parte de las respuestas reflejas se implementa de un sistema de frenado para el VA utilizando la teoría del frenado regenerativo para motores DC, basado en la conmutación de cuatro cuadrantes

El método de frenado regenerativo reduce la velocidad de un motor DC cuando el voltaje generado  $E_g$  es mayor que el voltaje de alimentación  $V_a$  (Ver Figura 4.8). La corriente de armadura  $I_a$  es negativa, pero la corriente de armadura suministrada para generar el campo magnético  $I_f$  es positiva. En estas condiciones la energía cinética del motor regresa al sistema y crea un par de torsión en sentido contrario al movimiento, produciendo así la acción de un frenado rápido. Este método genera un comportamiento en cuatro cuadrantes como se muestra en la Figura 3.18.



a) Frenado Regenerativo de un motor de DC

b) Operación de 4 cuadrantes

Figura 3.18: Frenado regenerativo de un motor DC y su operación en cuatro cuadrantes

La operación en cuatro cuadrantes para un motor DC consta de dos modos de operación: rotación y frenado. La rotación hacia delante y en reversa son operados en los cuadrantes I y III respectivamente. El frenado funciona en los cuadrantes II y IV mientras el motor está en movimiento. A continuación se describe el funcionamiento en cada cuadrante de acuerdo con los elementos de la Figura 3.19.

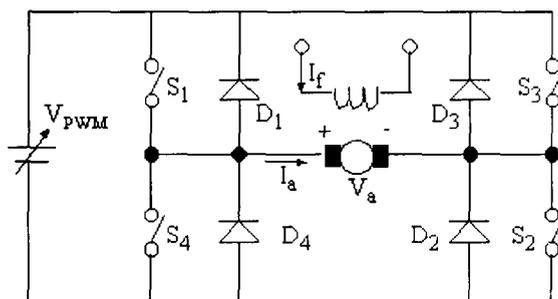


Figura 3.19: Circuito de control de 4 cuadrantes para un motor dc.

#### Modo de Control de Potencia hacia adelante

El motor rota en el sentido de las manecillas del reloj mientras es alimentado por  $V_{PWM}$  cuando  $S_1$  y  $S_2$  esta cerrados y  $S_3$ ,  $S_4$  están apagados. El voltaje generado y la corriente están en dirección positiva resultando que tanto el torque como la rotación actúen en la misma dirección.

#### Modo Regenerativo hacia adelante

En este modo se presentan condiciones de frenado mientras la rotación es en sentido de las manecillas del reloj con  $S_4$  cerrado y  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  en estado abierto. El torque y la corriente están en dirección negativa, la corriente fluye a través de  $S_4$ ,  $D_2$ , la dirección de la energía fluye de regreso hacia la fuente de alimentación por  $D_1$ ,  $D_2$ .

#### Modo de Control de Potencia en Reversa

Cuando es aplicado el voltaje  $V_{PWM}$  con  $S_3$ ,  $S_4$  en estado cerrado y  $S_1$ ,  $S_2$  abiertos, el motor gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Tanto el voltaje generado y la corriente de armadura como el torque están en dirección negativa.

#### Modo Regenerativo en Reversa

En este modo existen condiciones de frenado mientras el motor gira en sentido contrario a las manecillas del reloj con  $S_2$  cerrado y  $S_1$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  abiertos. El torque y la corriente están en dirección positiva, la corriente fluye a través de  $S_2$ ,  $D_4$  y la dirección de la energía fluye de regreso hacia la fuente por  $D_3$ ,  $D_4$ .

## 3.7 Recuperación de Trayectoria

La evasión de obstáculos en trayectorias complejas puede ocasionar evoluciones que no correspondan con el seguimiento de la trayectoria planeada originalmente. Por lo tanto, se

deben desarrollar métodos que ayuden a recuperar el seguimiento de la trayectoria planeada.

Dos de los casos más comunes de pérdida de la trayectoria planeada se muestran en la Figura 3.20. En (a) el obstáculo está colocado encima de uno de los *puntos de control* de la trayectoria planeada. Durante el seguimiento el VA detecta el obstáculo y lo evade. Cuando termina la evasión, se recupera el seguimiento de la trayectoria y el VA intenta alcanzar el punto  $p_1$  al cual se dirigía antes de la evasión. Sin embargo, el VA permanece girando alrededor sin poder llegar a él debido a las restricciones no-holónicas.

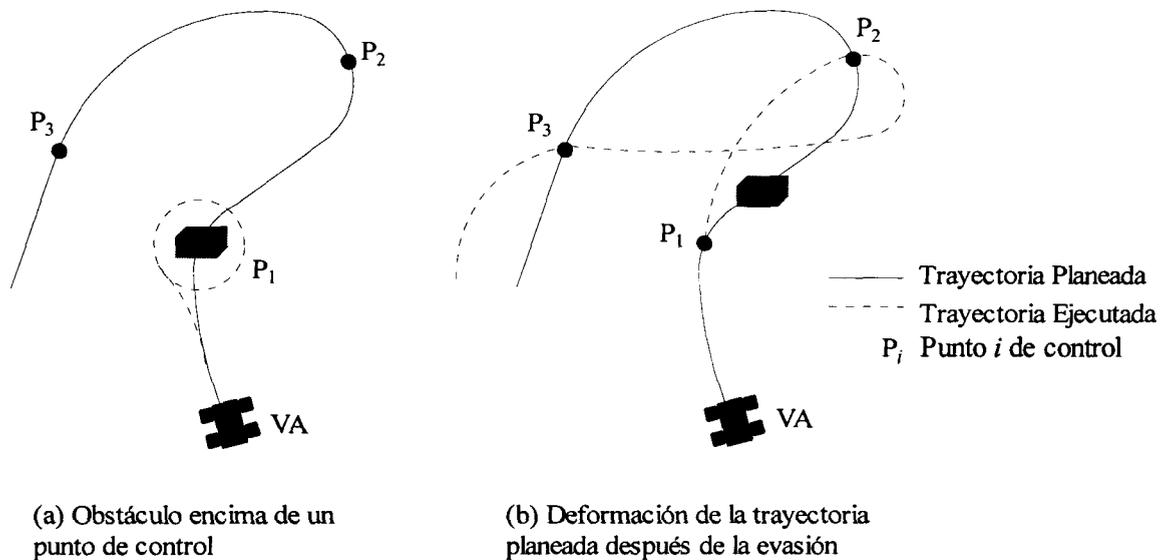


Figura 3.20: Pérdida en el seguimiento de la trayectoria planeada después de una evasión. En (a) el vehículo permanece girando alrededor del punto  $p_1$ . En (b) el seguimiento no corresponde con la planeación.

En (b) de la Figura 3.20 se observa que después de pasar por el punto  $p_1$ , el VA detecta el obstáculo y lo evade por la izquierda. Al terminar la evasión se recupera el seguimiento de la trayectoria y el vehículo se dirige hacia el siguiente punto  $p_2$ . No obstante, debido a la evasión, la orientación con la cual se aproxima no corresponde con la que se planeó originalmente. Esto ocasiona que después de pasar por  $p_2$ , el VA gire hacia su derecha para avanzar hacia  $p_3$ , en vez de hacerlo hacia la izquierda como estaba planeado originalmente. Como consecuencia, la evolución del vehículo no corresponde con la trayectoria planeada.

El método propuesto para solucionar las situaciones descritas anteriormente consiste en dos partes: en primer lugar, para evitar que el VA permanezca girando cuando se coloca un obstáculo cerca o encima de un *punto de control*  $p_i$ , antes de concluir la evasión se elimina el punto  $p_i$  de la pila de puntos para continuar el seguimiento con el

punto  $p_{i+1}$ . Para determinar cuando eliminar algún *punto de control*, se evalúa la distancia al punto  $p_i$  y se compara con la distancia al obstáculo detectado. Si el VA se encuentra en la posición  $(x,y)$  y el siguiente *punto de control* a alcanzar es  $p_i=(x_i,y_i)$ , entonces la distancia al punto  $p_i$  es

$$d(p_i) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (3.15)$$

Si la distancia al obstáculo detectado es  $d(obst)$ , entonces el punto de control  $p_i$  se elimina de la pila de puntos si

$$|d(p_i) - d(obst)| \leq r \quad (3.16)$$

donde  $r$  corresponde al radio de giro mínimo del VA.

En segundo lugar, para evitar que la evolución del VA no corresponda con la trayectoria planeada después de una evasión, se interpolan *puntos de control* sobre los puntos originales, de forma que el espaciamiento entre ellos sea 2 veces el radio de giro mínimo del VA. Para incorporar los *puntos de control* adicionales se utiliza la función de Splines descrita en la sección 2.4.

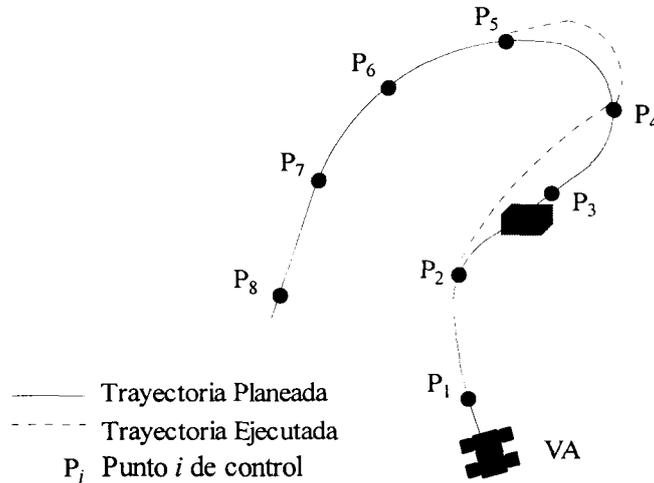


Figura 3.21: Evasión de un obstáculo cercano a un *punto de control* y recuperación de la trayectoria. El punto  $p_3$  se elimina de la pila y se continúa con  $p_4$ .

En la Figura 3.21 se muestra la evasión de un obstáculo y la recuperación de la trayectoria. El VA después de pasar por  $p_2$ , detecta un obstáculo y comienza su evasión. Al evaluar la distancia al punto  $p_3$ , determina que el obstáculo está muy próximo al punto y lo elimina de la pila. Al terminar la evasión, el VA continúa con el seguimiento de la trayectoria dirigiéndose hacia  $p_4$ . Posteriormente, debido al espaciamiento que existe

entre los puntos, el VA puede alcanzar el punto  $p_5$  con una deformación mínima sobre la trayectoria planeada.

## Capítulo 4

# Implementación y Resultados

Esta tesis propone un método para la navegación de un VA basado en la planeación de trayectorias y respuestas reflejas con un modelo de percepción-acción. Para validar este método se desarrolló un arreglo de tres sonares al frente de un VA para la detección de obstáculos y un módulo de respuestas reflejas dentro de su arquitectura de control. Además, se implementaron como acciones reflejas la evasión y frenado. Asimismo se desarrolló una interfaz gráfica en una computadora para la planeación de trayectorias.

Durante el desarrollo de esta investigación se trabajó con un VA no-holonómico a escala que ha sido desarrollado por el Grupo Visión del Centro de Sistemas Inteligentes del ITESM, al cual se integraron las respuestas reflejas. La implementación de las respuestas reflejas comprende, en primer lugar, la realización de la tarjeta conmutadora de sonares y su acoplamiento con los demás dispositivos electrónicos del VA. En segundo lugar, se programó la rutina de detección de obstáculos en el microcontrolador del VA. Posteriormente, se incorporaron las rutinas para las reglas de inferencia y disparo de las respuestas reflejas de evasión y frenado. En particular, el frenado requirió del desarrollo un circuito basado en la teoría del frenado regenerativo, el cual aprovecha la energía almacenada en los motores durante el avance del VA.

Finalmente, una vez concluida la integración de las respuestas reflejas en el VA y la interfaz gráfica para planeación de trayectorias, se llevaron a cabo diversos experimentos, tanto en ambientes controlados (dentro del laboratorio) como en ambientes exteriores, en los cuales se obtuvieron medidas para evaluar el desempeño del sistema.

En este capítulo se describen las especificaciones mecánicas y eléctricas del vehículo utilizado, la implementación del control para automatizarlo y la integración de las respuestas reflejas dentro de su arquitectura. Asimismo, se muestra la interfaz gráfica desarrollada para la planeación de trayectorias. Posteriormente se exponen los resultados obtenidos en los experimentos y el Capítulo termina con un análisis de dichos resultados.

## 4.1 Especificaciones Mecánicas y Eléctricas del VA

El vehículo utilizado se adquirió ya construido; originalmente, se trata de un vehículo de control remoto de la marca Radio Shack modelo Tempest con características mecánicas similares a las de un vehículo común. Su mecanismo de dirección cumple con la geometría de Ackerman [Palacios 00] y su tamaño es suficiente para colocar todos los instrumentos electrónicos para el control. La Figura 4.1 se muestra del lado izquierdo al vehículo original y del lado derecho al vehículo ya acondicionado.

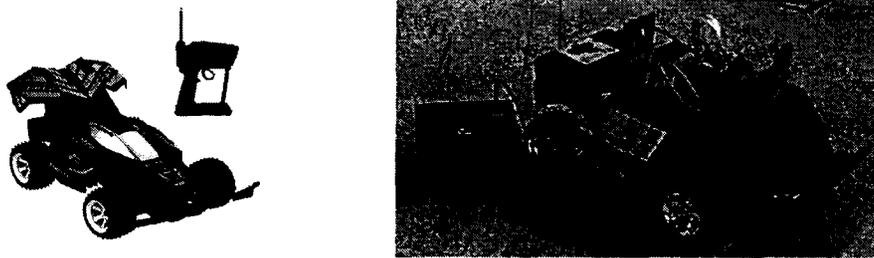


Figura 4.1: Comparación entre el vehículo original (izquierda) y el vehículo acondicionado (derecha)

Utilizando el modelo cinemático<sup>1</sup> del vehículo y sus dimensiones según aparece en la Figura 4.2, se caracterizó el radio de giro mínimo que puede describir el vehículo tanto a la derecha como a la izquierda. Con este valor, junto con la distancia entre las llantas traseras y delanteras de  $L=27\text{cm}$ , se calculó el ángulo máximo de giro de las llantas  $\phi^2$ . Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Caracterización mecánica del VA en cuanto al radio de giro mínimo y ángulo máximo de giro

|                          | Derecha | Izquierda |
|--------------------------|---------|-----------|
| Radio de Giro Mínimo (m) | 1.15    | 1.33      |
| Ángulo Máximo de Giro    | 13.2°   | 11.5°     |

Este vehículo cuenta con tres motores de corriente directa: dos para el avance y uno para la dirección. La caracterización de estos motores, en cuanto a voltaje de alimentación y consumo de corriente, se muestra en la Tabla 4.2.

<sup>1</sup> El desarrollo del modelo cinemático del VA se presenta en el apéndice A.

<sup>2</sup> Ecuación (A.8) del apéndice A.

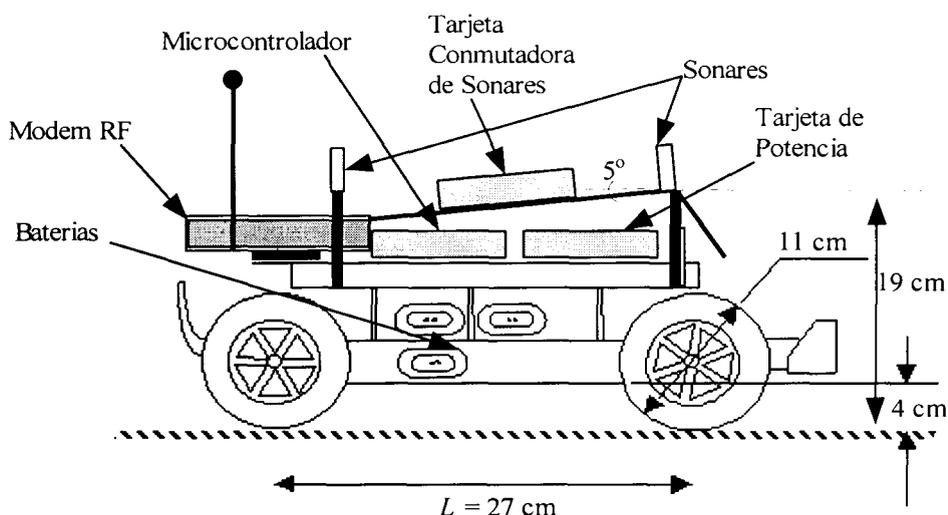


Figura 4.2: Esquema del vehículo con sus dimensiones

Tabla 4.2: Características eléctricas de los motores DC del VA

|           | Motor de Dirección | Motor de Avance |
|-----------|--------------------|-----------------|
| Corriente | 30 mA max.         | 5 A cada uno    |
| Voltaje   | 5 V Nom.           | 7.2 V Nom.      |

## 4.2 Implementación de Control en el VA

En la implementación de la arquitectura de control del VA, se utilizó el microcontrolador AT90S8515 de la familia AVR RISC de Atmel. Entre las características más importantes que lo hacen el más adecuado para esta aplicación se encuentran el contar con dos salidas independientes de PWM, un puerto serial UART, dos interrupciones externas, un contador interno y 4 puertos de entrada/salida. En la Figura 4.3 se describen las funciones asignadas a cada una de las terminales del microcontrolador.

Una vez disponibles todos los elementos de actuación y sensado, se procedió a la implementación de los algoritmos de control siguiendo la arquitectura de [Palacios 00]. Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran el diagrama de flujo del programa principal, en el cual se incluyen las subrutinas implementadas en el seguimiento de la trayectoria y las subrutinas que se agregaron para las respuestas reflejas. También se observa que la detección de obstáculos con sonares se activa por interrupción. Así, cuando no hay obstáculos, el VA

sigue la trayectoria al estar ejecutando el lazo cerrado del programa principal en modo automático. Sin embargo, cuando se detecta un obstáculo y las reglas de inferencia disparan una respuesta refleja, se inhibe el seguimiento a un punto, para evadir el objeto. Este comportamiento continúa hasta que los sonares indican que ha desaparecido el obstáculo y posteriormente se vuelve a habilitar el seguimiento de trayectoria.

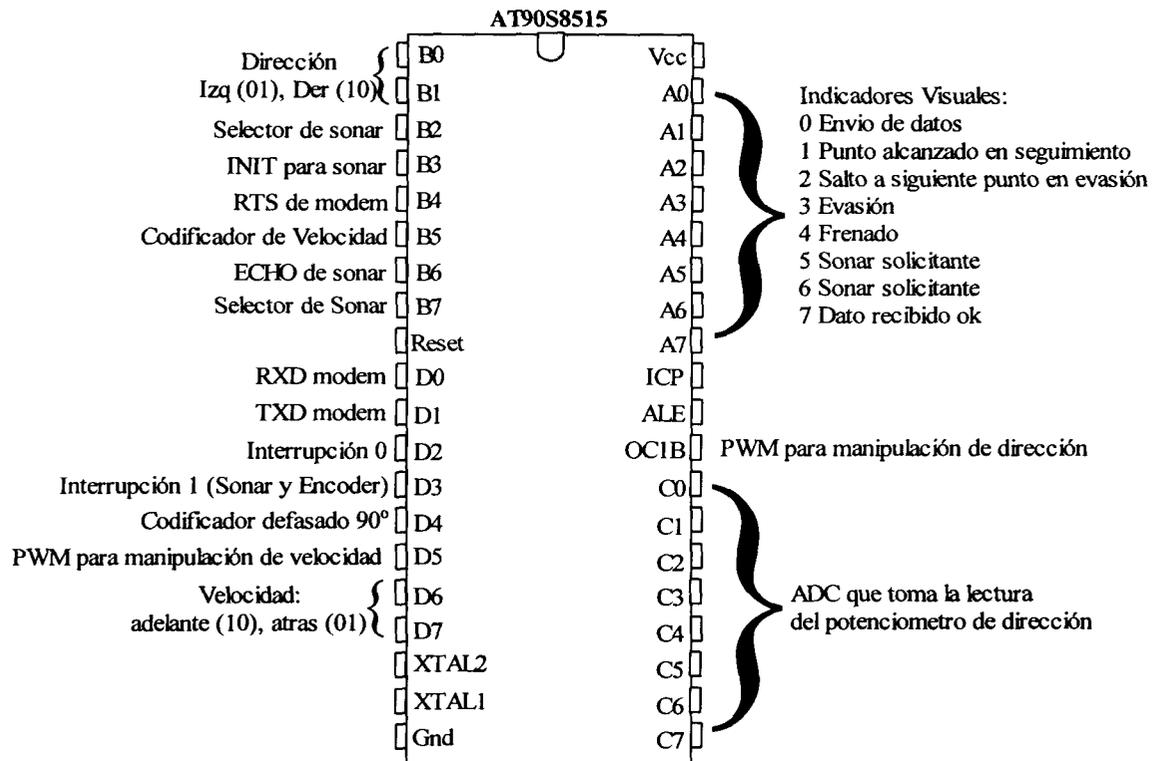


Figura 4.3: Diagrama del microcontrolador con la descripción de funciones asignadas en cada terminal

En la interrupción 1 se encuentran las rutinas de servicio para el codificador óptico y el eco de los sonares. El codificador óptico indica el sentido de avance y la cantidad de vueltas que gira la llanta trasera del VA. Cada 1/3 de vuelta se actualiza la posición y orientación del vehículo. Por otro lado, al recibirse el eco de un sonar se actualiza la distancia a la cual se detectó un objeto y se verifica si es necesario realizar una evasión o frenado de acuerdo con las reglas de inferencia.

En la interrupción *overflow* del temporizador 0 se controla la selección y activación cíclica de los sonares al frente del vehículo, o bien, la activación sonar trasero en caso de avanzar en reversa. Cada 327 ms se actualiza la velocidad del VA contando el número de interrupciones del codificador óptico en este período de tiempo, y se transmiten datos en caso de haberse solicitado

En las siguientes subsecciones se detalla como se implementó la detección de obstáculos y la ejecución de las respuestas reflejas para evasión y frenado.

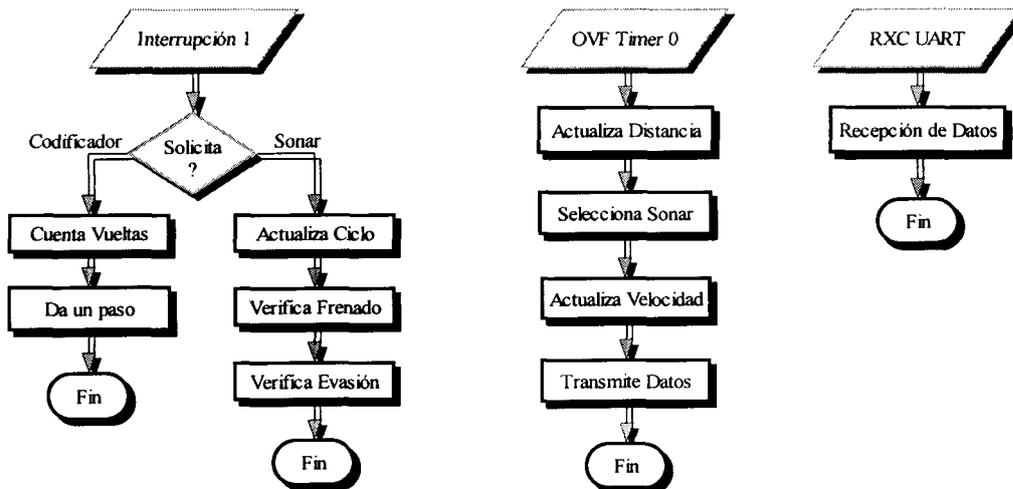
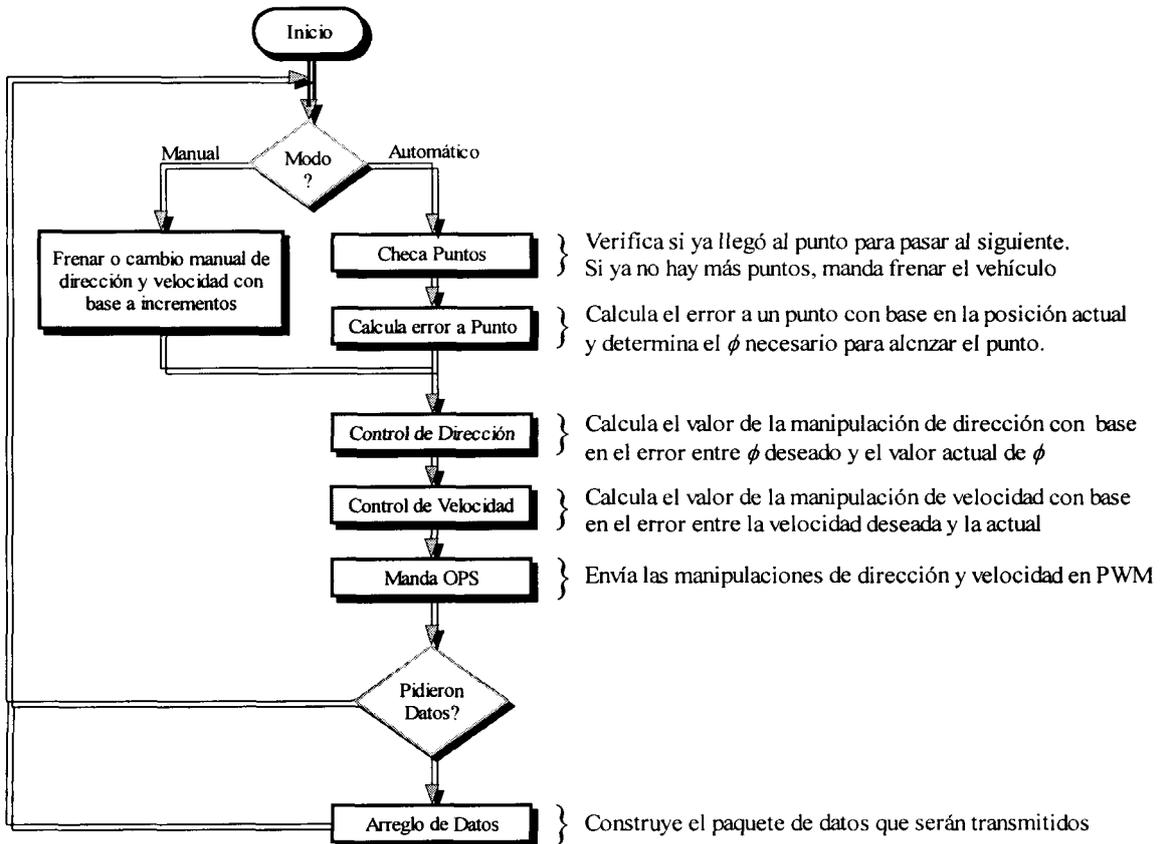


Figura 4.4: Diagrama de flujo del programa principal implementado en el microcontrolador incluyendo los módulos de respuestas reflejas

### 4.2.1 Detección de Obstáculos

Para la detección de obstáculos en el VA, se montaron cuatro sonares: tres al frente y uno atrás; se implementó un circuito de conmutación de sonares y se programaron las rutinas para la detección de obstáculos y la selección de sonares.

El sonar colocado en la parte de atrás se utiliza cuando se avanza en reversa y únicamente frena al VA cuando se detecta un objeto a menos de 80cm por razones de seguridad. En el caso de los sonares del frente, se colocaron de acuerdo con los resultados del arreglo mencionado el capítulo 3 y a una altura de 19 cm del nivel del piso. Además, la plataforma sobre la cual se colocaron fue inclinada 5° como se muestra en la Figura 4.2. Esta inclinación se realizó con el fin de evitar problemas de ruido en el eco de los sonares por la detección del piso.

Una vez terminado el montaje de los sonares, se construyó una tarjeta conmutadora basada en el diseño de [Aguirre 99], cuyo manejo queda a cargo del microcontrolador que se encarga de las demás funciones del VA. Esta tarjeta selecciona la activación de alguno de los cuatro sonares del vehículo, aunque tiene capacidad de controlar hasta 16 transductores. Por lo tanto, se utilizaron únicamente dos señales de salida del microcontrolador para la codificación de los sonares como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Codificación de las salidas B7 y B2 del microcontrolador para la selección de sonares

| Sonar     | B7 | B2 |
|-----------|----|----|
| Atrás     | 0  | 0  |
| Centro    | 0  | 1  |
| Derecha   | 1  | 0  |
| Izquierda | 1  | 1  |

La selección del sonar que se activa se realiza de manera cíclica entre los tres sonares del frente, de tal forma que se genera un barrido completo al frente del vehículo de izquierda a derecha pasando por el sonar de en medio de manera constante e independiente del resto de las funciones. De acuerdo con las especificaciones de la serie 6500 de Polaroid se recomienda que el periodo de reactivación para los transductores sea mínimo de 80 ms. Por lo tanto, en la implementación, cada 84.48 ms se selecciona un sonar, se inicia su activación con la señal de INIT y se pone en marcha un contador. La tarjeta Polaroid se encarga de generar el tren de pulsos para excitar al transductor.

La señal es detectada al reflejarse en algún objeto y se recibe en el transductor (dentro de un intervalo de tiempo determinado). Inmediatamente después, la tarjeta Polaroid genera una señal de salida (ECHO) que entra al microcontrolador por interrupción y detiene al contador. Se lee el valor del contador y utilizando la fórmula de tiempo de

vuelo del Capítulo 3, se determina la distancia al objeto que reflejo la señal. En la Figura 4.5 se muestra el ciclo de las señales del sonar.

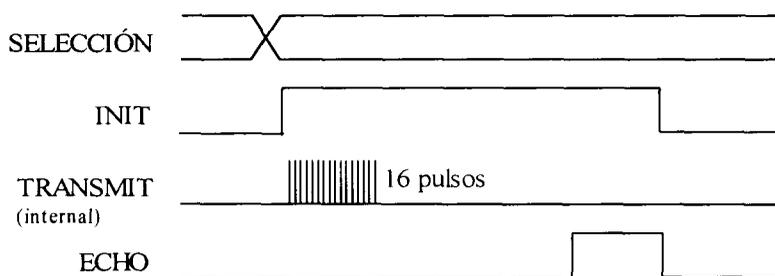


Figura 4.5: Ciclo de señales para la selección y activación de sonares. En primer lugar se selecciona el sonar; después se activa INIT, la cual habilita la transmisión de 16 pulsos ultrasónicos; finalmente se recibe la señal de ECHO.

### 4.2.2 Evasión de Obstáculos

La implementación de la respuesta refleja de evasión utiliza una aproximación lineal de la ecuación (3.14). Además, se consideró que, por restricciones cinemáticas, si la distancia al obstáculo es menor o igual a 1.5m, el VA debe girar completamente la dirección a la derecha o izquierda, según sea el caso.

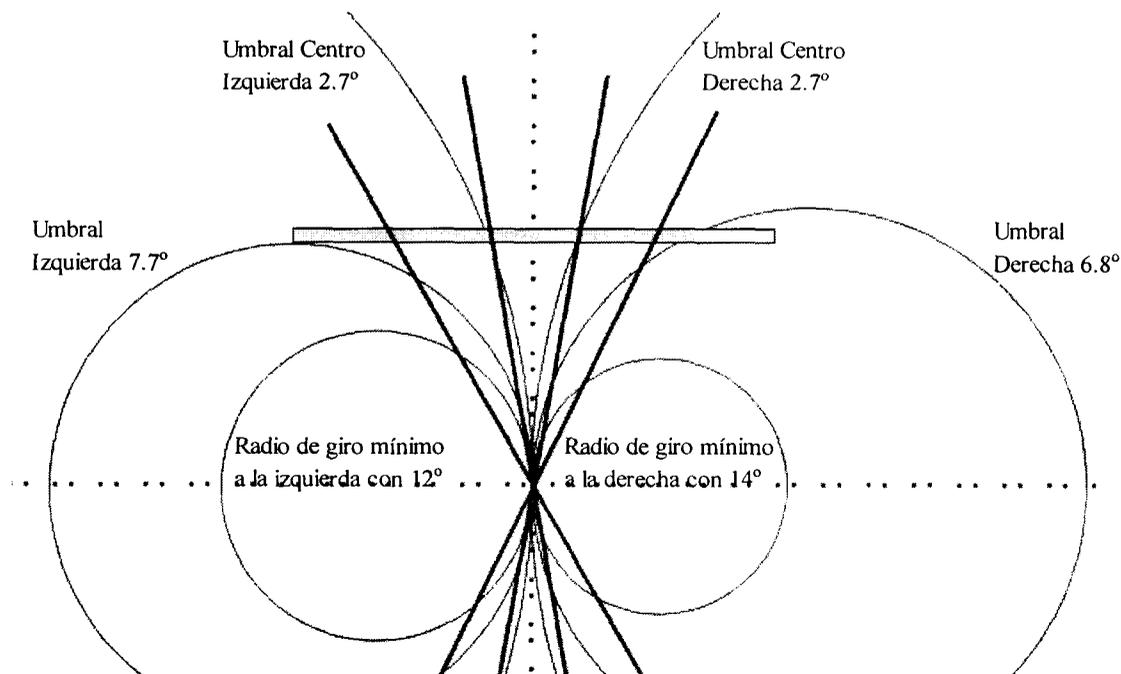


Figura 4.6: Valor de los umbrales de dirección para la evaluación de la segunda capa de las reglas de inferencia

Por otro lado, la ecuación (3.14) también se utilizó para determinar los umbrales de dirección para la evaluación de la segunda capa de las reglas de inferencia. En este caso se determinó el valor de  $\phi$  en los límites de los conos de percepción de los tres sonares a una distancia de 2m y se les agregó un margen de tolerancia. Los valores utilizados en la implementación del programa se muestran en la Figura 4.6.

### 4.2.3 Frenado Regenerativo

Como parte de las respuestas reflejas se implementó de un sistema de frenado para el VA utilizando la teoría del frenado regenerativo para motores DC, el cual esta basado en la operación de un circuito de conmutación de cuatro cuadrantes, como se mencionó en el Capítulo 3.

En el sistema de velocidad del VA se tienen dos motores de corriente directa conectados en paralelo, uno para las llantas delanteras y otro para las traseras. Para el control de sentido de giro de los motores se utiliza una configuración de puente H con relevadores y la velocidad de avance es regulada por un controlador PID que manipula en PWM el voltaje de alimentación a los motores. La Figura 4.7 muestra un diagrama del circuito de velocidad. Con las señales aplicadas a los puntos A y B se controla el sentido de giro de los motores y con la señal modulada en PWM aplicada en C se regula la velocidad de avance.

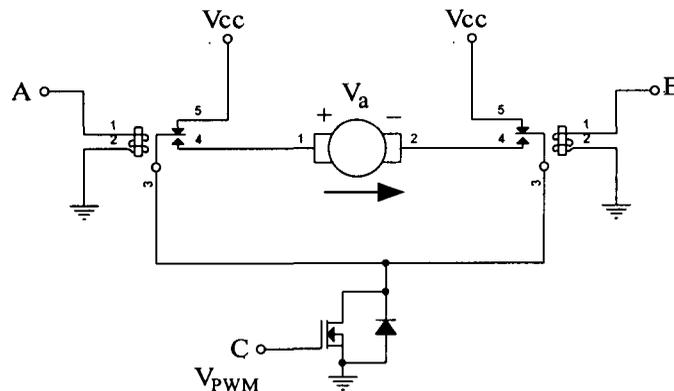


Figura 4.7: Circuito de velocidad del VA. El sentido de avance se controla con los relevadores A y B. La señal en PWM aplicada en C regula la velocidad.

El frenado regenerativo agrega al sistema de velocidad rutas por las cuales el voltaje generado por los motores sea consumido. Para implementarlo se colocan unos diodos que controlen el sentido en el cual fluye la corriente de acuerdo con el estado que mantengan las señales en A, B y C, como se muestra en la Figura 4.8.

Si se aplica una señal de PWM en C y se mantiene A en cero y B en uno, ambas como señales digitales, entonces el motor gira en sentido de las manecillas del reloj. En caso contrario, si B esta en cero y A en uno, entonces el giro es en sentido contrario a las manecillas del reloj. Sin embargo, si el motor gira en cualquiera de los dos sentidos y las señales A, B se ponen en uno, entonces se deja de alimentar al motor y se crea un circuito de descarga. Si el motor giraba en sentido de las manecillas del reloj, entonces el circuito se cierra a través de D3, R2 y D6. Por el otro lado, si el motor giraba en sentido contrario a las manecillas del reloj, entonces el circuito se cierra a través de D4, D5 y R1. Por último, en el caso de que A y B se pongan en cero al mismo tiempo, el motor dejara de ser alimentado y continuará girando por inercia hasta detenerse. D1 y D2 impiden que se forme algún circuito cerrado.

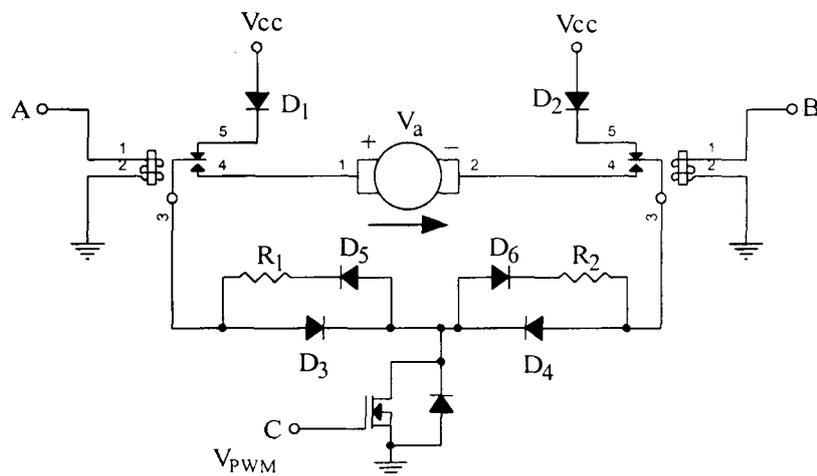


Figura 4.8: Circuito de velocidad con modificaciones para frenado regenerativo

Una vez implementado el circuito de frenado regenerativo se realizaron una serie de pruebas para medir el desempeño del sistema. Se utilizó la interfaz de adquisición de datos Science Workshop con una frecuencia de muestreo de 20 Hz. para medir el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del vehículo. Los ejercicios consistieron en acelerar el vehículo desde el reposo hasta una velocidad de 1.07 m/s, desplazarlo una distancia de 5 m y frenar al vehículo hasta detenerlo completamente.

En la Figura 4.9 se comparan las gráficas del promedio de velocidad del VA con frenado y sin frenado. En ella se puede observar que al detener el vehículo con frenado regenerativo se tiene una rapidez de cambio mayor que cuando únicamente se abre el circuito y se deja que la fricción lo detenga. Para medir cuantitativamente esta diferencia, los datos de velocidad fueron filtrados para obtener una señal con menos ruido y el resultado se muestra en la Figura 4.10, donde se aprecia que con el nuevo método se tiene una desaceleración de  $1.1 \text{ m/s}^2$  mientras que anteriormente se tenía un valor de  $0.6 \text{ m/s}^2$ .

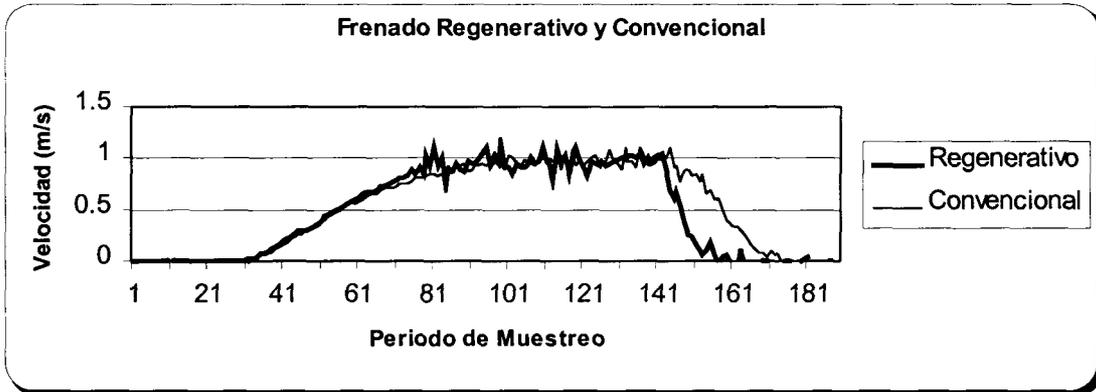


Figura 4.9: Comparación de desempeño con frenado convencional y regenerativo

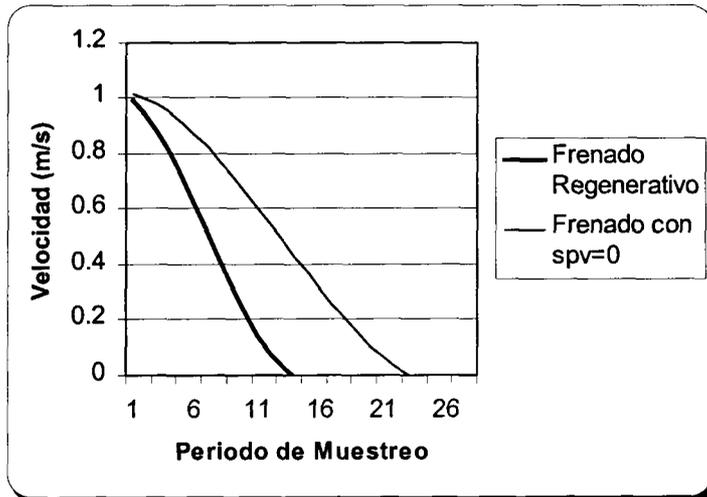


Figura 4.10: Comparación de datos filtrados de frenado convencional y regenerativo. El frenado regenerativo muestra una mayor desaceleración.

## 4.6 Planeación

El desarrollo de la interfaz gráfica para la planeación de trayectorias se realizó en JAVA y comprende esencialmente cuatro etapas: configuración del espacio de trabajo, búsqueda de trayectoria entre un punto inicial y otro destino utilizando la función de navegación NF1, el ajuste a una curva suave usando caminos de Dubin y Splines, y asignación de la secuencia de puntos al vehículo.

En la Figura 4.11 se muestra la interfaz gráfica. En la parte central se ve el mapa del ambiente de trabajo, donde se pueden definir obstáculos virtuales punto a punto. En la parte superior se observa el área de control, donde están los botones para expandir y aceptar obstáculos, discretizar el ambiente, asignar la meta y planear una trayectoria. Del lado izquierdo está el área de comunicación para la transferencia de información entre la computadora y el VA. Por último, en el menú se tienen las opciones de caminos de Dubín, Splines y validación para el ajuste de la trayectoria planeada. En el apéndice D se describe con detalle todas las opciones y funcionamiento de la interfaz gráfica.

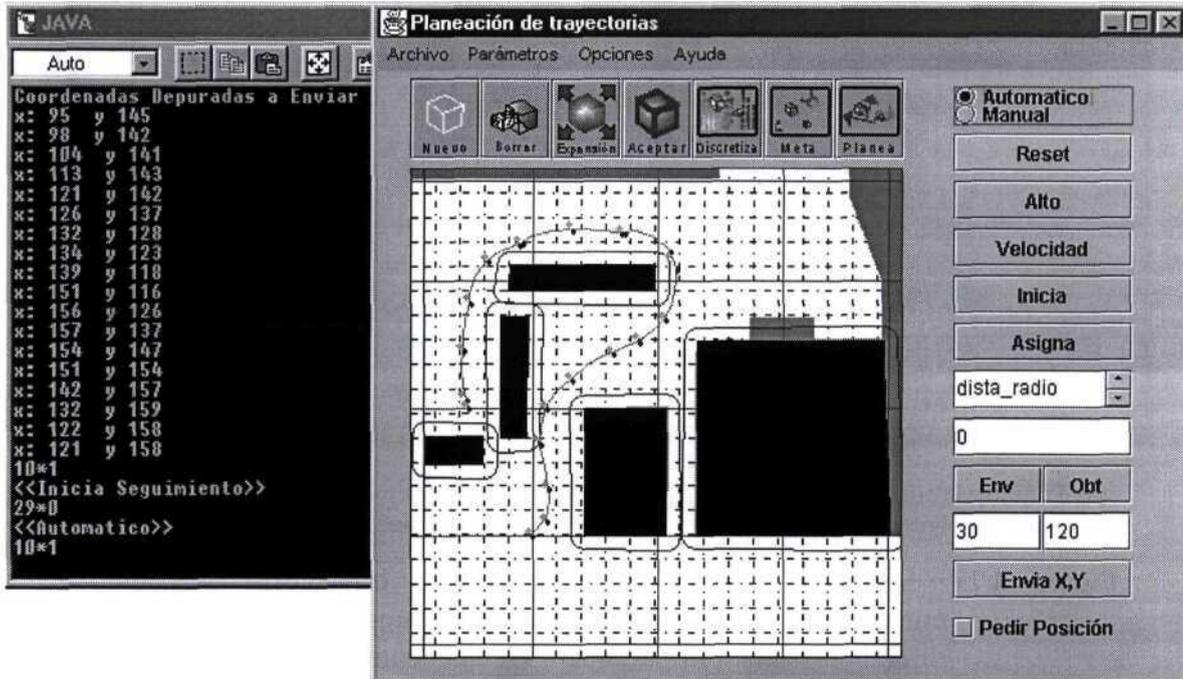
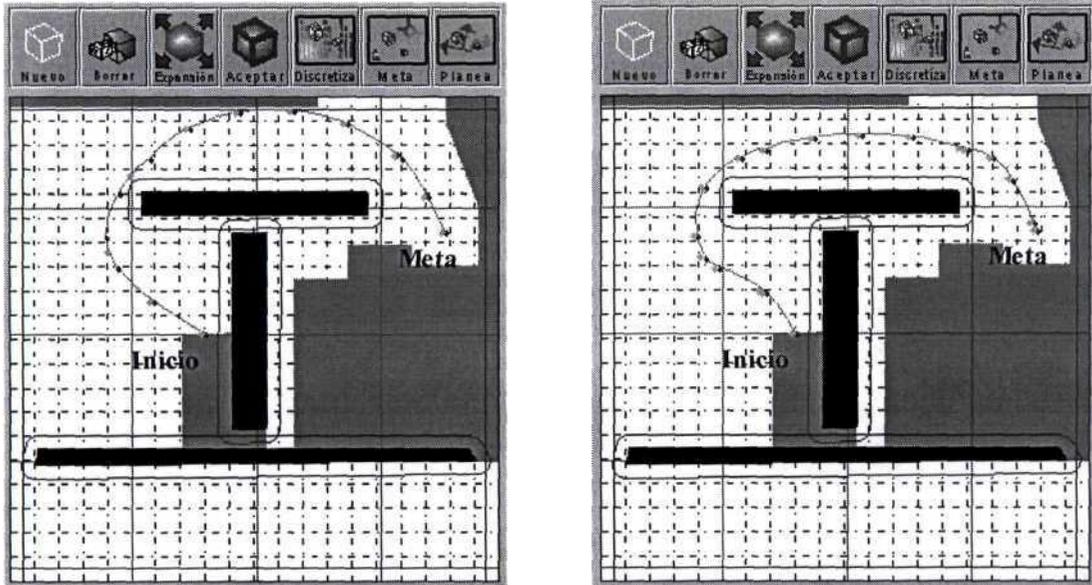


Figura 4.11: Interfaz gráfica para la planeación de trayectorias

En las pruebas de planeación que se hicieron se comprobó que el vehículo realiza el seguimiento de los *puntos de control* de acuerdo con lo planeado. Sin embargo, fue necesario realizar validaciones en la asignación de obstáculos y de la meta considerando las restricciones no holonómicas del VA. Para los obstáculos se consideró que no pueden ser colocados a menos de 2m de la posición inicial del vehículo. Con esto se garantiza que exista espacio suficiente para darle la vuelta a un obstáculo que esté justo enfrente de la posición inicial. También se consideró que la posición inicial y la meta no pueden estar en el mismo punto y no puede existir más de una meta en el plano. Por último, se validó que la posición de la meta quedara fuera de los círculos de radio de giro mínimo a partir de la posición inicial.

La interfaz gráfica de planeación puede suavizar la trayectoria encontrada utilizando únicamente Splines. No obstante, se comprobó experimentalmente que dicho suavizado no es suficiente para que el VA pueda seguir la trayectoria al no considerar las

restricciones cinemáticas del vehículo. Estas restricciones se consideran hasta que se calculan los caminos de Dubin. En la Figura 4.12 se observa la diferencia entre la trayectoria suavizada utilizando únicamente Splines y, la que además, utiliza caminos de Dubin.



(a) Trayectoria suavizada utilizando únicamente Splines

(b) Trayectoria suavizada utilizando caminos de Dubin y Splines

Figura 4.12: Diferencia en el suavizado de la trayectoria utilizando únicamente splines (a) y, además, caminos de Dubin (b). La diferencia más importante se encuentra al inicio de la trayectoria.

## 4.7 Experimentos y Resultados

Los experimentos se realizaron tanto en ambientes cerrados (laboratorio) como en exteriores con espacio libre suficiente para evaluar el desempeño del VA en trayectorias largas y complejas. En la Figura 4.13 se muestran estos ambientes. En promedio se buscaron espacios de 12mx12m. Como obstáculos se utilizaron objetos cilindricos de 30 y 50cm de diámetro con 1m de alto, cajas de cartón de 30x40x70cm, aunque también se utilizaron objetos del ambiente natural como botes de basura, macetas y personas quietas.

En forma general, el desarrollo de los experimentos consiste de tres etapas principales como se muestra en la Figura 4.14. En primer lugar, en una computadora se planea una trayectoria utilizando el mapa del ambiente. Posteriormente, los *puntos de control* de la trayectoria encontrada son enviados al vehículo a través de un módem inalámbrico. Por

último, el vehículo sigue la trayectoria planeada incluyendo el módulo de respuestas reflejas. El programa de planeación se ejecutó en un computadora HP modelo Vectra con procesador Pentium IV y Windows 98.



(a) Experimentos en el laboratorio de manufactura con dos obstáculos en el ambiente



(b) Experimentos en espacio exterior libre frente a Aulas 4. El espacio de trabajo es de 15x15m.

Figura 4.13: Ambientes de trabajo del VA dentro del ITESM. En (a) se observa el laboratorio de manufactura con un espacio de trabajo de 9x9m. En (b) se presenta un espacio al aire libre enfrente a Aulas 4 con un área libre de aproximadamente 15x15m.

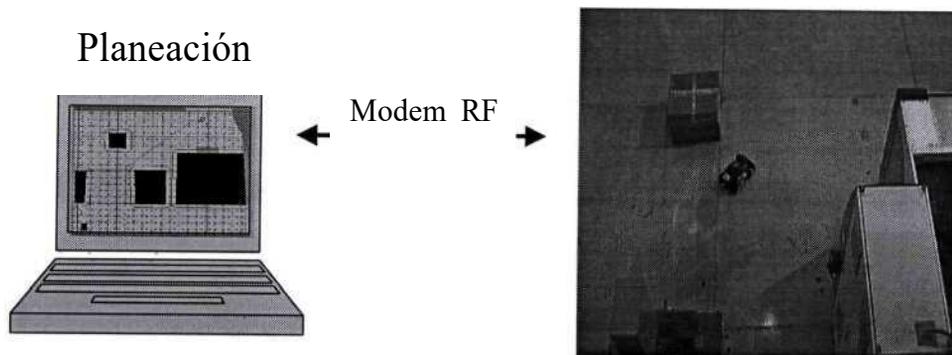


Figura 4.14: Etapas en la realización de los experimentos. Primero, se planea la trayectoria en la computadora; posteriormente se asigna al VA a través de un módem RF; finalmente, el VA sigue la trayectoria incluyendo el módulo de respuestas reflejas.

Debido a que los experimentos realizados pueden contar con diferentes longitudes de trayectoria y distinta cantidad de puntos de control, se utilizaron las siguientes medidas por ser representativas de los experimentos:

1. Error promedio entre la trayectoria planeada y la ejecutada por el VA
2. Variación entre el error en la posición final y la longitud de la trayectoria.

Para obtener valores representativos del comportamiento general del VA se evaluaron trayectorias en forma de 8 para incluir giros tanto a la derecha como a la izquierda, así como avance en línea recta, lo cual comprende todas las posibles evoluciones que puede realizar el VA.

En las Figuras 4.15 a 4.17 se muestran los resultados obtenidos con el seguimiento de la trayectoria en forma de 8. La primera muestra la trayectoria sin evasión de obstáculos mientras que en las otras dos se muestran trayectorias con evasión. El total de puntos generados por la interfaz de planeación fue de 29. Para graficar el seguimiento se tomaron las lecturas de posición cada 58.3 cm.

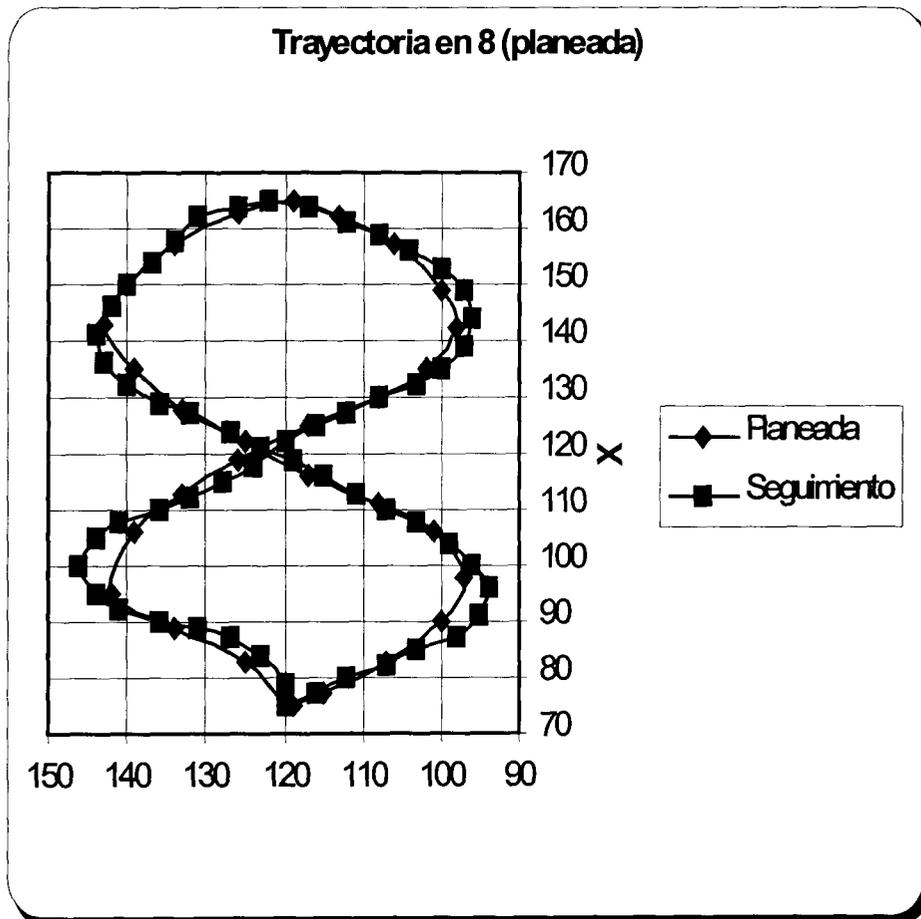


Figura 4.15: Diferencia entre la trayectoria planeada y la ejecutada por el VA

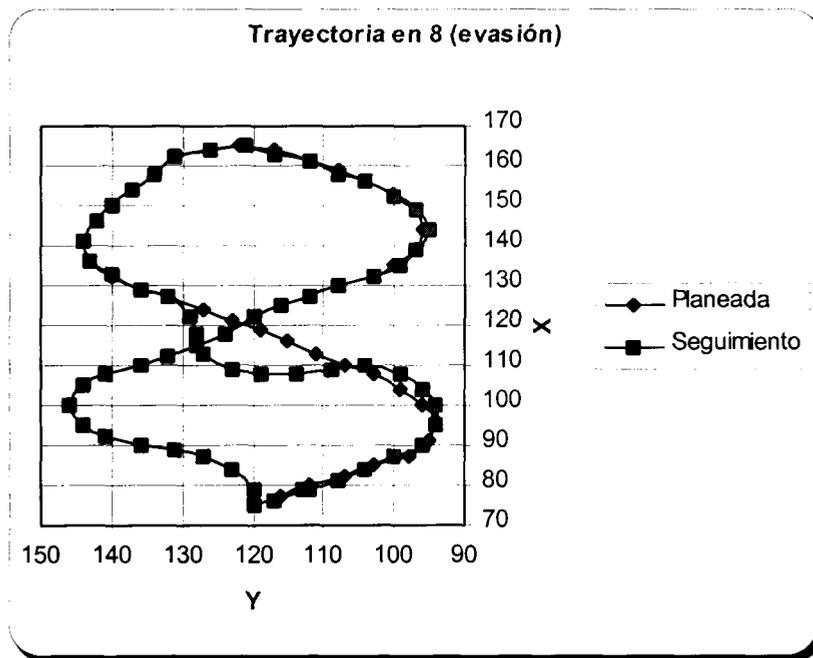


Figura 4.16 Ejecución de trayectoria con evasión de obstáculo en el cruce de las trayectorias

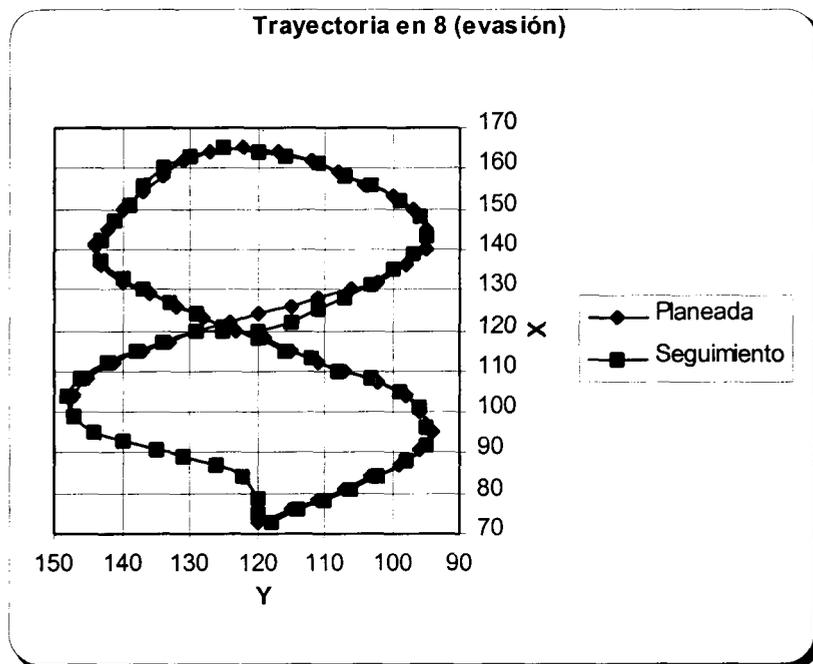


Figura 4.17 Ejecución de trayectoria con evasión de obstáculo en el cruce de las trayectorias

Cada una de las trayectorias se recorrió en cinco ocasiones y los resultados que se reportan corresponde al promedio. En el caso de las evasiones, se puede ver claramente en la Figura 4.16 como el VA sale de la trayectoria planeada para evadir un obstáculo y como la recupera nuevamente al concluir la evasión. Si se compara este comportamiento con la evasión mostrada en la Figura 4.17, se observa que la evasión es más notoria en el primer caso que en el segundo. Este resultado depende de la distancia a la cual se detecta el obstáculo. A 2m (límite más lejano de la zona de evasión) se tiene suficiente espacio para evadir el obstáculo con la mínima desviación de la trayectoria planeada, como es el caso de la Figura 4.17. En cambio, si la detección se realiza a menos de 1.5m, el VA tiene que girar al máximo la dirección para evadir el obstáculo, con la cual la desviación con respecto a la trayectoria planeada es mayor, como se ve en la Figura 4.16.

Tabla 4.4: Variaciones de ejecución con respecto a la planeación

| Variaciones de Ejecución<br>con respecto a la planeación |            |      |
|--|------------|------|
| Dubin  | Promedio   | 0.29 |
|  | Desv. Est. | 0.19 |
| Dubin con Splines  | Promedio   | 0.22 |
|  | Desv. Est. | 0.14 |

Por otro lado, en el caso del seguimiento sin evasión de obstáculos se presentan variaciones mínimas entre la trayectoria planeada y la ejecutada por el VA. La Tabla 4.4 muestra dichas variaciones en metros. Se hicieron pruebas con trayectorias ajustadas únicamente con caminos de Dubin y otras que incluía Dubin y Splines. Como se puede observar el error disminuye cuando se usa Dubin con Splines. Este resultado indica que la planeación de trayectorias incluyendo los caminos de Dubin facilita el seguimiento al considerar las características no holonómicas del VA.

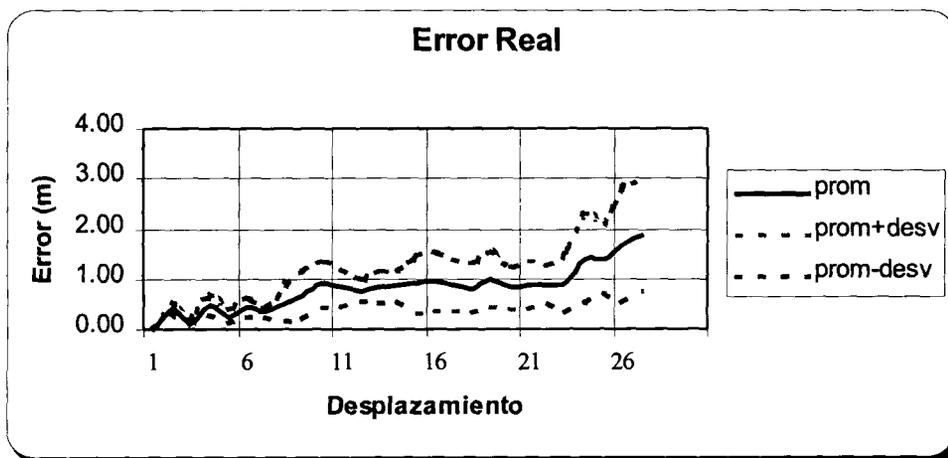


Figura 4.18: Error en la posición real del VA con respecto al desplazamiento

Estos resultados indican la capacidad del VA para seguir la trayectoria planeada respecto a su sistema de coordenadas interno. No obstante, existen variaciones en la posición final real debido a que, para la estimación de la posición y orientación del VA se utilizan métodos odométricos que generan un error acumulativo conforme se desplaza el vehículo. Por lo tanto, el error en la posición real también aumenta a medida que el VA se desplaza, como se ve en la Figura 4.18. Dicho error corresponde a la distancia euclidiana entre cada punto de control y la posición a la cual llega el VA en dicho punto. La trayectoria en forma de 8 tiene una longitud de 34.4m y el error promedio en la posición final es de 1.5m, lo cual da como resultado un error porcentual entre la posición final promedio y la longitud de la trayectoria de 4.36%.



# Capítulo 5

## Conclusiones

Esta tesis describe un método confiable para la navegación de un VA basado en la planeación de trayectorias y respuestas reflejas. La planeación de trayectorias parte de un mapa del ambiente que establece el espacio de trabajo, dentro del cual se definen los obstáculos. Posteriormente, sobre el espacio obtenido se busca la trayectoria que conecte el punto inicial y la meta. Por último, la trayectoria obtenida originalmente es suavizada y tiene como característica que el vehículo se orienta tangencialmente al círculo de giro al alcanzar cada punto de control.

Durante el seguimiento, el sistema de respuestas reflejas es incluido de tal forma que, cuando no hay obstáculos que obstruyan el seguimiento de la trayectoria, el vehículo tiene la prioridad de dirigirse hacia la meta. No obstante, cuando aparece un obstáculo en su camino, se inhibe el seguimiento para, en primer lugar, evadir el objeto y posteriormente continuar. Si el objeto es muy grande o aparece en una zona muy próxima, entonces el vehículo tomará la acción de frenarse ante un bloqueo total.

Para validar el método propuesto se desarrolló un arreglo de tres sonares al frente de un VA para la detección de obstáculos y un módulo de respuestas reflejas dentro de su arquitectura de control. El módulo de respuestas reflejas está basado en un modelo de percepción-acción, el cual ante la detección de un evento dispara alguna acción de acuerdo con un conjunto de reglas de inferencia. Las reglas de inferencia están jerarquizadas en capas y se basan en la información proporcionada por los sonares, así como del control de trayectoria del vehículo. Además, se implementaron como acciones reflejas la evasión y frenado. Asimismo se desarrolló una interfaz gráfica en una computadora para la planeación de trayectorias.

Con este sistema se realizaron varios experimentos de cálculo de trayectorias de diferentes puntos en el ambiente, así como varias pruebas de obstáculos no previstos para evaluar las respuestas reflejas. Los resultados obtenidos muestran que el sistema soluciona de forma correcta y rápida todos los casos presentados, salvo casos aislados en

los cuales la detección de obstáculos no se realiza con suficiente anticipación por problemas de ruido, reflexión o cuando se sigue una trayectoria con radio de giro mínimo.

Las pruebas se llevaron a cabo tanto en ambientes cerrados (laboratorio) como en exteriores con espacio libre suficiente para evaluar el desempeño del VA en trayectorias largas y complejas. Además, como obstáculos se utilizaron objetos del ambiente natural; aunque para garantizar un buen funcionamiento, los obstáculos deben estar fabricados de un material que refleje adecuadamente el sonido y la normal de la superficie reflejante debe tener un ángulo menor a  $10^\circ$  con respecto al vector de dirección de avance del VA.

Con los resultados obtenidos se concluye que el sistema propuesto tiene un buen desempeño y presenta robustez en ambientes que cumplan con las consideraciones enunciadas a lo largo de este trabajo.

El sistema trabajó correctamente a pesar de que se usaron tarjetas Polaroid, las cuales son poco confiables para mediciones precisas [Durrant 92]. Los obstáculos son detectados correctamente en el 90% de los casos intentados. No obstante, el sistema es perfectible, sobre todo para reducir ruido con los sonares y se recomienda probar con nuevos transductores y tarjetas controladoras para obtener una posible mejora en los resultados obtenidos por el sistema.

Además se recomienda la ampliación del arreglo de sonares. En el prototipo actual sólo se utilizaron tres sonares. Sin embargo, la configuración actual no se cubre el 100% de las posibles trayectorias de avance.

Por otro lado, el circuito de frenado regenerativo propuesto para el VA mejora la respuesta de frenado en un 45% respecto al sistema que se tenía anteriormente.

Los resultados también muestran que el error en la posición final aumenta conforme la longitud de la trayectoria aumenta. La acumulación del error proviene de la estimación de la posición y orientación del VA que utiliza métodos odométricos, los cuales generan un error acumulativo conforme al desplazamiento. No obstante, para la mayoría de los casos probados, la variación promedio no es mayor al 5% con respecto a la longitud de la trayectoria.

Se propone la utilización de sensores externos que disminuyan el error acumulativo en la estimación de la posición y orientación del VA. Actualmente los sensores más utilizados son GPS, acelerómetros, giroscopios y brújulas electrónicas.

Los resultados de esta investigación dejan una base sólida para trabajos futuros que requieran utilizar sonares para la detección de obstáculos y de respuestas reflejas para la evasión de los mismos, aunque existen deficiencias en el sistema que requieren mejoras.

---

Por último, en una etapa futura se podría extender el trabajo para considerar velocidad de avance variable, incluir la reversa como respuesta refleja y buscar soluciones para la evasión de obstáculos dinámicos.



# Apéndice A

## Modelo Cinemático del VA

Un vehículo móvil no es capaz de seguir cualquier trayectoria que se le indique debido a que las características de construcción del vehículo restringirán las regiones del espacio de configuraciones que pueda alcanzar desde una posición dada. Para que un vehículo móvil pueda seguir una trayectoria, definida dentro de su espacio de trabajo, primeramente hay que definir su comportamiento cinemático. De ahí la importancia de contar con un modelo que permita determinar las posiciones a las que puede llegar el vehículo desde una posición y orientación particular, de tal manera que las trayectorias planeadas consideren las restricciones de movimiento.

Cualquier vehículo móvil constituye un complejo sistema mecánico de difícil modelado matemático. Las restricciones en su movilidad pueden tener diferentes causas, como la configuración mecánica de la dirección y la transmisión, las limitaciones de los actuadores, las inercias provocadas por las cargas, etc. Por ejemplo, un vehículo al tomar una curva muy cerrada podría derrapar o volcar al intentarlo, debido a su masa e inercia. Las restricciones al movimiento pueden ser de tipo cinemático o dinámico.

Una restricción cinemática limita la velocidad del vehículo móvil no-holonómico, y se expresa como una ecuación diferencial de primer orden en la posición. La restricción cinemática más familiar es la causada por el mecanismo de dirección de los automóviles convencionales, que impide que el coche se mueva lateralmente.

Para la obtención del modelo cinemático con restricciones no-holonómicas se considera al vehículo de cuatro llantas, con dos llantas fijas en el eje trasero y dos en la parte frontal las cuales pueden girar para dar la dirección de movimiento, como se muestra en la figura A.1.a. El rasgo principal del modelo es la presencia de restricciones no-holonómicas, debidas a la condición que existe de rotación puramente rotacional sin que exista deslizamiento entre el piso y las llantas.

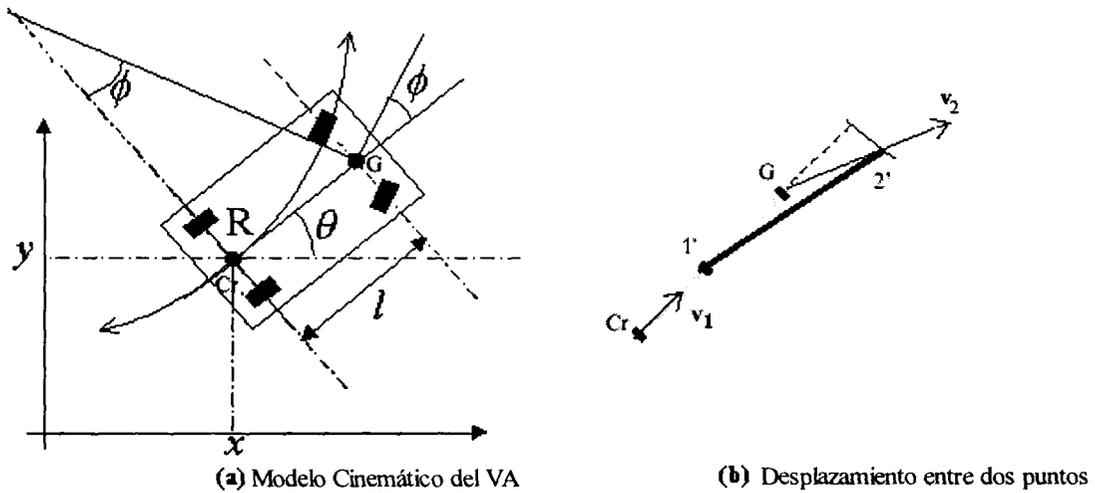


Figura A.1: (a) Modelo cinemático de un vehículo móvil con restricción no holonómica. (b) Desplazamiento entre dos puntos muy cercanos.

Por simplicidad, se supone que las dos llantas en cada eje se juntan en una sola llanta en el punto medio del eje, lo que corresponde a un sistema de tipo bicicleta, con una rueda tractora y una rueda directora delantera. Las coordenadas que determinan la configuración del espacio son  $q = (x, y, \theta, \phi)$  donde  $(x, y)$  son las coordenadas cartesianas de la llanta trasera,  $\theta$  mide la orientación del cuerpo del carro con respecto al eje  $x$ , y  $\phi$  es el ángulo de la dirección de la llanta delantera con respecto a  $\theta$ .

La figura A.1.b muestra el desplazamiento del vehículo entre dos posiciones muy cercanas, donde  $v$  representa la velocidad lineal del vehículo. De la figura se obtienen las componentes en  $x$  y  $y$  de la velocidad en el punto,

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \quad (\text{A.2})$$

El sistema contiene dos restricciones no-holonómicas, una para cada llanta. De (A.1) y (A.2) se obtiene que la restricción cinemática para la llanta trasera es:

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (\text{A.3})$$

De manera similar, se obtiene que la ecuación de diferencias que describe la restricción en la llanta delantera se expresa como

$$\dot{x}_f \text{Sen}(\theta + \phi) - \dot{y}_f \text{Cos}(\theta + \phi) = 0, \quad (\text{A.4})$$

donde  $x_f, y_f$  son las coordenadas de la llanta delantera.

Utilizando la restricción de cuerpo rígido,  $(x_f, y_f)$  se puede obtener mediante las ecuaciones anteriores lo siguiente:

$$\begin{aligned} x_f &= x + l \text{Cos} \theta \\ y_f &= y + l \text{Sen} \theta, \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

donde  $l$  es la distancia entre los ejes; de este modo, la primera restricción cinemática se obtiene derivando (A.5) y sustituyendo en (A.4),

$$\dot{x} \text{Sen}(\theta + \phi) - \dot{y} \text{Cos}(\theta + \phi) - \dot{\theta} l (\text{Sen} \theta \text{Sen}(\theta + \phi) + \text{Cos} \theta \text{Cos}(\theta + \phi)) = 0 \quad (\text{A.6})$$

y usando identidades trigonométricas,

$$\dot{x} \text{Sen}(\theta + \phi) - \dot{y} \text{Cos}(\theta + \phi) - \dot{\theta} l \text{Cos} \phi = 0. \quad (\text{A.7})$$

Se define a  $R$  como el radio de la curva que describe el vehículo

$$R = \frac{l}{\tan \phi}, \quad (\text{A.8})$$

Si además, como es común, el ángulo de giro  $\phi$  esta limitado mecánicamente, la trayectoria del robot tendrá una curvatura con límite superior  $\frac{\tan \phi}{l}$ .

Por otra parte, de acuerdo con la definición de velocidad angular tenemos que

$$v = \dot{\theta} R \quad (\text{A.9})$$

sustituyendo (A.8) en (A.9) y despejando  $\dot{\theta}$  se tiene que:

$$\dot{\theta} = v \frac{\tan \phi}{l} \quad (\text{A.10})$$

Por lo tanto, de acuerdo con (A.1), (A.2) y (A.10) el modelo cinemático para el vehículo,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \frac{l}{r} \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2, \quad (\text{A.11})$$

donde  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades del vehículo y de la dirección respectivamente. De esta manera se obtiene un modelo cinemático, en el cual se considera al vehículo como un sistema no lineal de tipo no-holonómico, representado por un punto con orientación respecto al sistema de referencia fijo en  $\mathcal{R}^2$  y con una ecuación de movimiento.

# Apéndice B

## Diagramas Eléctricos del VA

A continuación se muestran los diagramas esquemáticos del VA correspondientes la tarjeta del microcontrolador, la tarjeta de potencia, modem de RF y circuito de conmutación de sonares.

En la Figura B.1 se muestra el diagrama de la tarjeta del microcontrolador de Atmel AT90S8515, la cual incluye además un MAX232 para la comunicación serial con el módem de acuerdo con el estándar RS-232. También se utilizaron compuertas lógicas AND para compartir la interrupción INT1, la cual es utilizada por el codificador de velocidad y por el sonar.

En la Figura B.2 se observa el diagrama de la tarjeta de potencia para el acondicionamiento de las señales de control y para retroalimentación en el manejo de la velocidad, la dirección y los sonares. El ADC0803 es un convertidor análogo digital para la lectura de la dirección en función del valor del potenciómetro acoplado a la flecha de las llantas delanteras del VA. Por otro lado, el 74LS221 es un circuito monoestable que se utiliza para generar pulsos de  $10\mu\text{s}$  para las peticiones de interrupciones correspondientes al codificador de velocidad y a los sonares.

La Figura B.3 corresponde al diagrama del acoplamiento de los motores de dirección y velocidad. Para el control de la dirección se utiliza un puente H y optoacopladores PC817 para separar la etapa de potencia y de control. En el circuito de velocidad se utilizan los mismos optoacopladores y relevadores para conmutar el sentido de avance. En la parte de en medio también se puede observar los diodos y resistencias que facilitan el frenado regenerativo.

El diseño del módem (Figura B.4) esta basado en el circuito integrado 73M233, el cual implementa un canal de comunicación de datos serial asíncrono usando FSK (Frequency Shift Keying) [Cantu 01].

En la Figura B.5 se muestra el diagrama del circuito de conmutación de sonares [Aguirre 99]. Para el manejo de los 16 posibles sonares se utiliza el multiplexor MC14067. En esta misma tarjeta se reserva el espacio necesario para la colocación de la tarjeta Polaroid 6500. Es recomendable que la alimentación sea independiente de otras etapas de control y potencia debido a la demanda de corriente que se tiene al momento de emitir los pulsos de transmisión del sonar.

Finalmente, la Figura B.6 representa el diagrama de un módulo de acoplamiento de cuatro transductores. El elemento principal de esta etapa es el optoacoplador AQV214, cuya característica principal es que en su salida puede manejar los 200 V que se generan para la activación de los transductores.

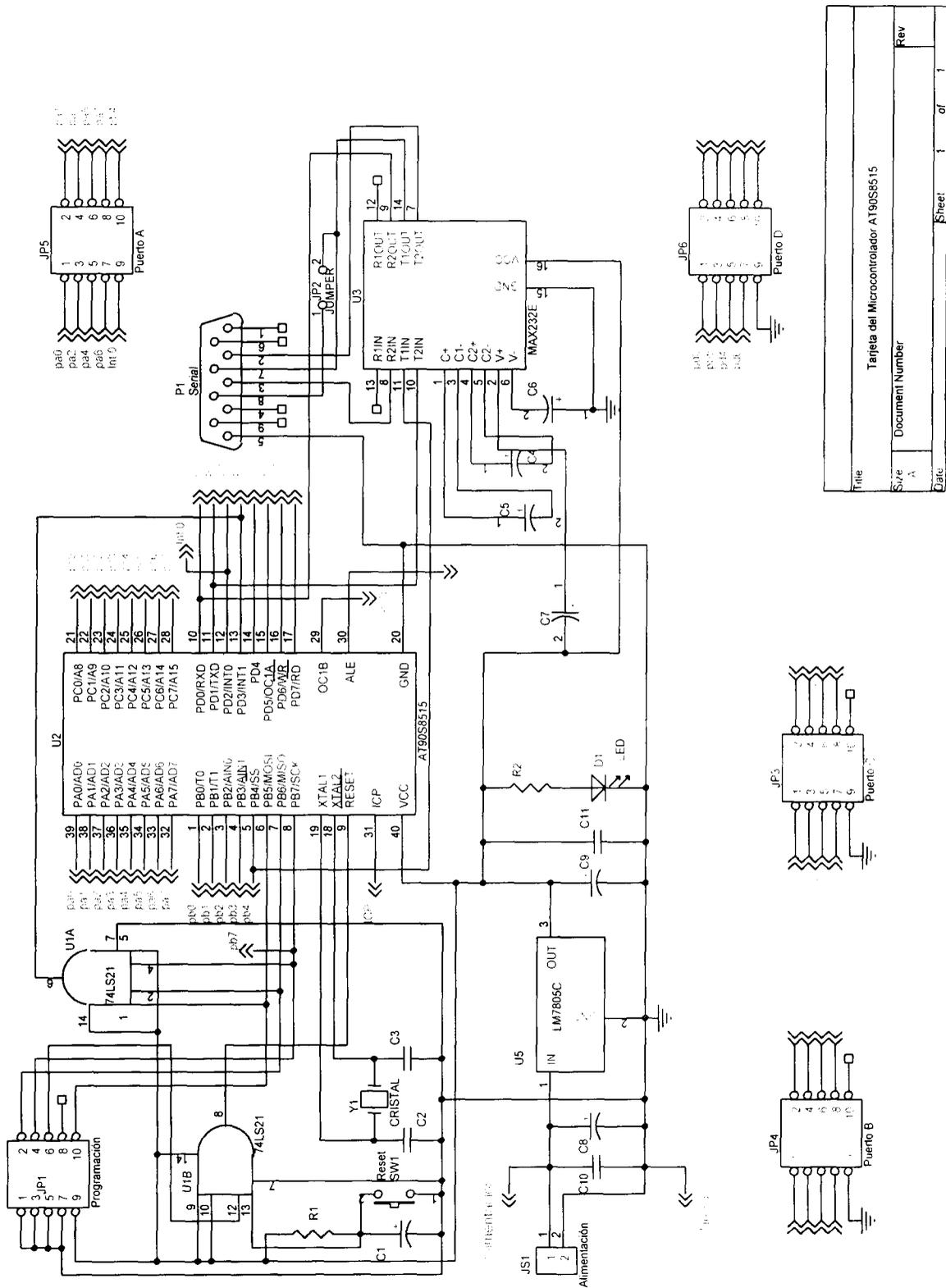


Figura B.1: Tarjeta del Microcontrolador AT90S8515

|       |   |  |    |
|-------|---|--|----|
| Title |   | Tarjeta del Microcontrolador AT90S8515 |    |
| Size  | A | Document Number                        |    |
| Date  |   | Sheet                                  | of |
| Rev   |   |  |    |

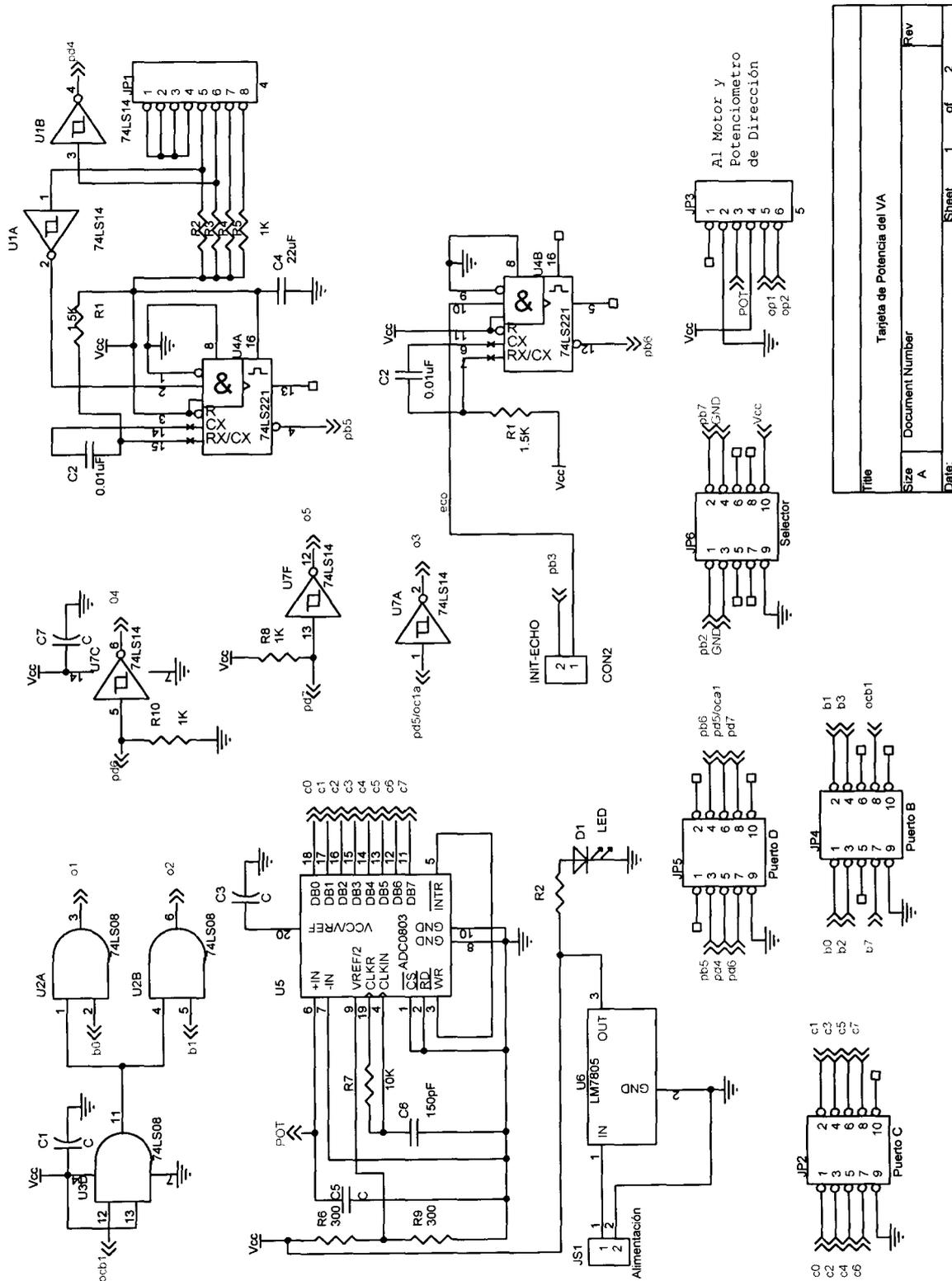
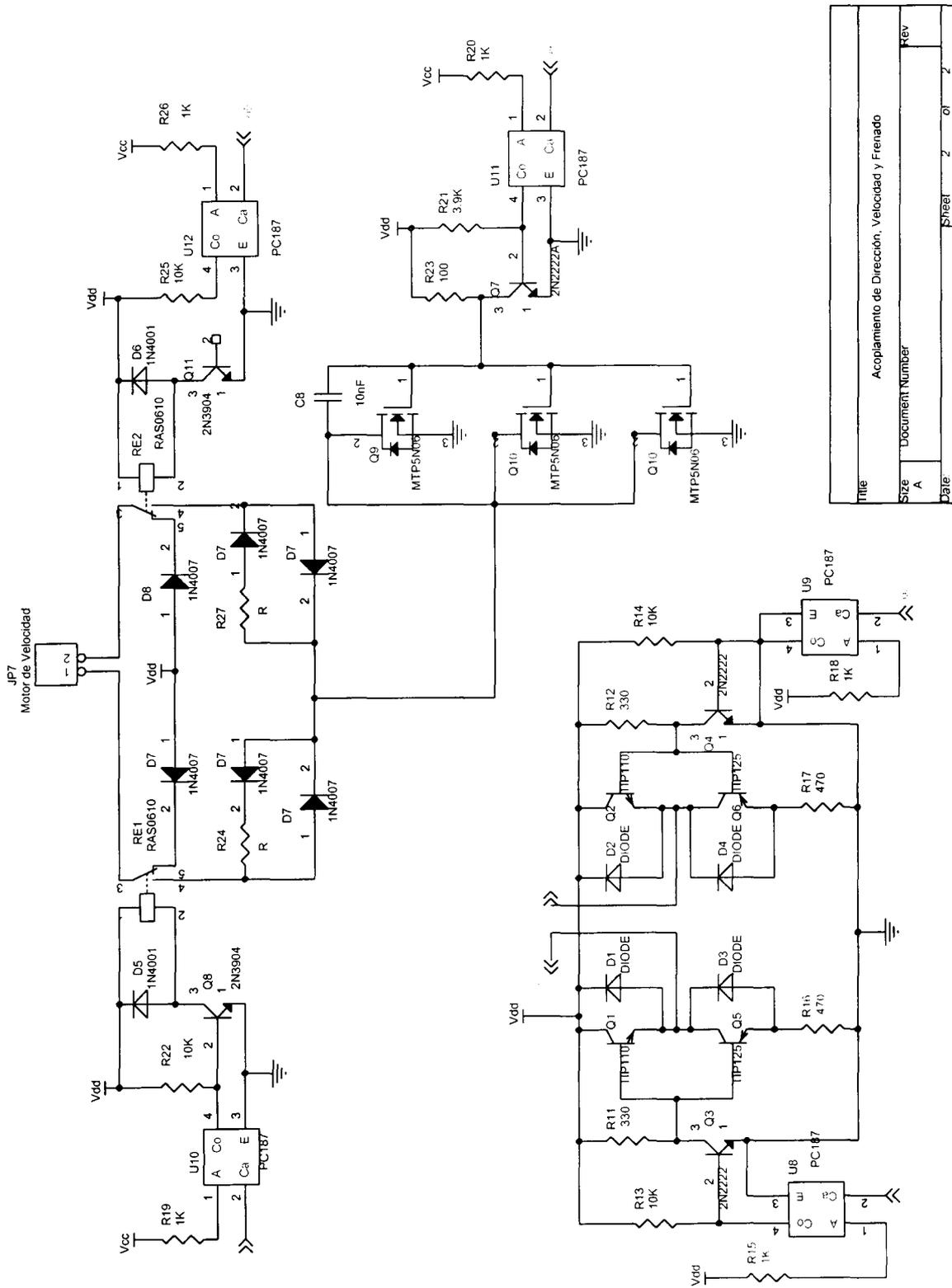


Figura B.2: Tarjeta de Potencia del VA

|       |   |                            |        |
|-------|---|----------------------------|--------|
| Title |   | Tarjeta de Potencia del VA |        |
| Size  | A | Document Number            |        |
| Date  |   | Sheet                      | 1 of 2 |
| Rev   |   |                            |        |



|       |                 |  |        |
|-------|-----------------|--|--------|
| Title |                 | Acoplamiento de Dirección, Velocidad y Frenado |        |
| Size  | Document Number | Sheet  | 2 of 2 |
| A     |                 | Date   | REV    |

Figura B.3: Acoplamiento de los motores de dirección y velocidad



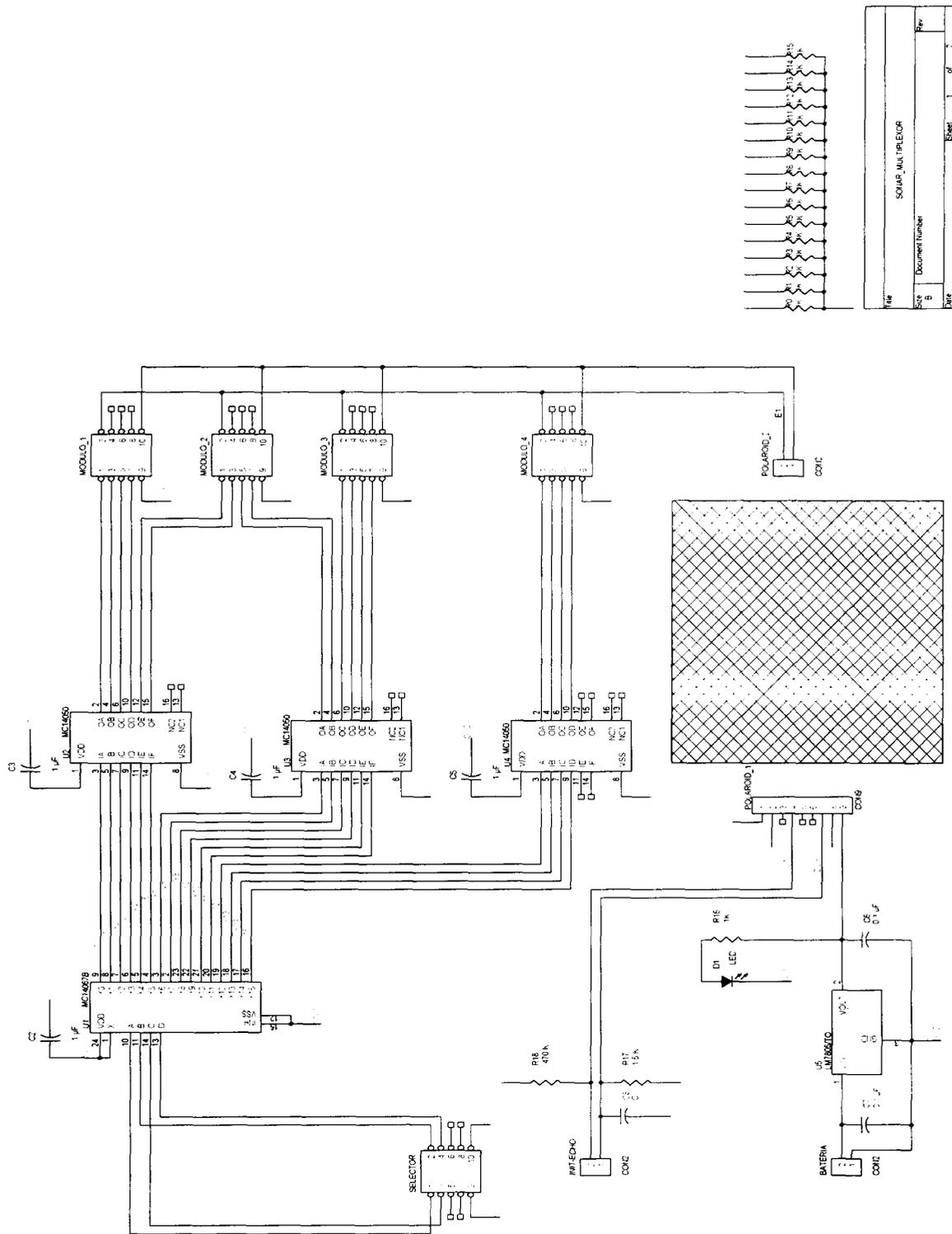
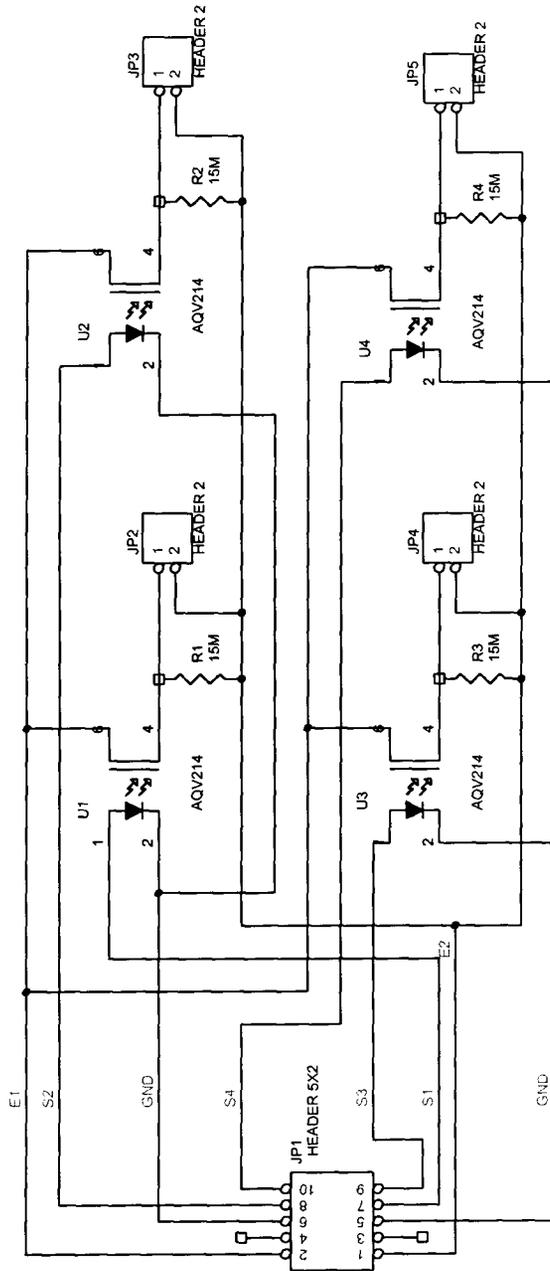


Figura B.5: Circuito de Conmutación de Sonares



|       |   |                               |        |
|-------|---|-------------------------------|--------|
| Title |   | Llave de Multiplexor de Sonar |        |
| Size  | A | Document Number               | REV    |
| Date  |   | Sheet                         | 2 of 2 |

Figura B.6: Llave de Multiplexión de Sonares

## Apéndice C

# Interfaz Gráfica para Planeación

Para la planeación de trayectorias se desarrolló una interfaz gráfica cuya ventana principal se muestra en la Figura C.1. Con el fin de mostrar las herramientas que el sistema proporciona al usuario, se expone a continuación la descripción de la interfaz así como su modo de operación.

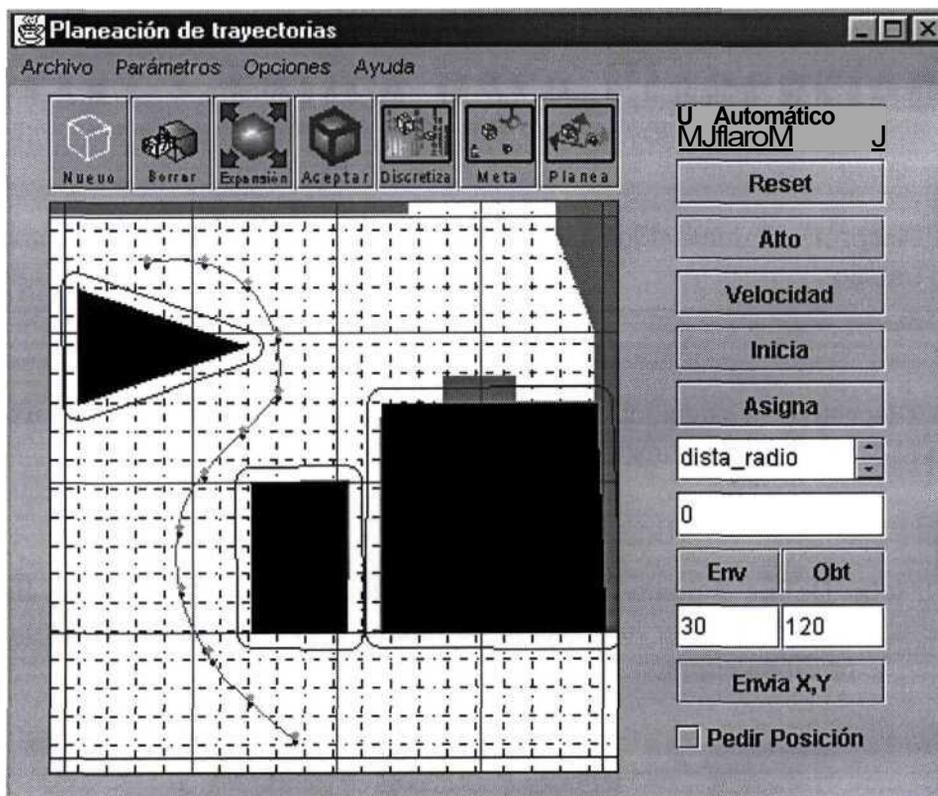


Figura C.1: Ventana principal de la interfaz gráfica de planeación

La interfaz está dividida en tres zonas principales: en la parte superior se ubican los botones de control para la configuración del espacio de trabajo y la búsqueda de la ruta que conecta el punto inicial con la meta; al lado derecho se ubica el panel de control que permite comunicarse a través del puerto serial con un radiotransmisor que envía comandos al receptor del VA; en la parte central, se ubica el área de dibujo que representa el espacio de trabajo y en la cual se definen los obstáculos virtuales. A continuación se describe la función de cada uno de los botones comenzado con los que definen el espacio de configuración y posteriormente los de comunicación con el VA.



**Nuevo:** Este comando borra la configuración del espacio de trabajo actual e inicializa uno nuevo.



**Borrar:** Borra el obstáculo actual que se está creando punto a punto en el área de dibujo. También reinicia la captura de un obstáculo en caso de haber iniciado una.



**Expansión:** Calcula la expansión del obstáculo actual que se está editando.



**Aceptar:** Agrega el obstáculo editado y expandido a la configuración del espacio de trabajo.



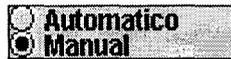
**Discretiza:** Genera el espacio de configuración indicando los pixeles que pertenecen al espacio prohibido y al espacio libre.



**Meta:** Define el punto destino previamente indicado con el mouse. Este botón también se utiliza para cambia la posición de inicio. Estas funciones se van alternando cada vez que se presiona el botón.



**Planea:** Genera la trayectoria partiendo de la posición actual del VA a la meta.



**Modo:** Permite cambiar el modo de operación del VA entre automático y manual. En automático se realiza el seguimiento de trayectoria. En modo manual, el usuario controla la velocidad y dirección de avance a través del teclado.



**Reset:** Inicializa la configuración del microcontrolador del VA realizando en el programa un salto a la rutina de reset.



**Alto:** Detiene el avance del vehículo.



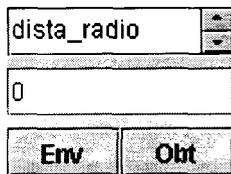
**Velocidad:** Envía un comando de velocidad para que el VA avance



**Inicia:** Inicia en automático el seguimiento de una trayectoria previamente asignada.

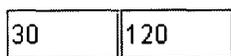


**Asigna:** Asigna la secuencia de puntos correspondientes a una trayectoria previamente planeada.



**Env:** permite actualizar el valor de la variable seleccionada.

**Obt:** manda pedir el valor actual de la variable seleccionada.



**Envia X,Y:** Envía las coordenadas  $(x,y)$  de un punto al VA. Este punto se almacena en la pila de puntos a seguir en la posición indicada por la variable *punto*.

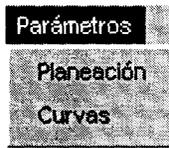


**Pedir Posición:** Manda pedir cada 1.5 seg. la posición actual del vehículo.

Adicionalmente, a los botones descritos anteriormente, también se tiene opciones de menú para el manejo de archivos, parámetros de planeación y ajuste de curvas. A continuación se describen las opciones en cada uno.



En menú **archivo** se tiene la opción de **guardar** en un archivo la configuración actual del espacio de trabajo. Asimismo se tiene la opción de **cargar** desde un archivo una configuración previamente guardado. Por último, la opción **salir** termina el programa.



En el menú de **Parámetros** se tiene la opción de cambiar los valores de **planeación** y ajuste de **curvas**.



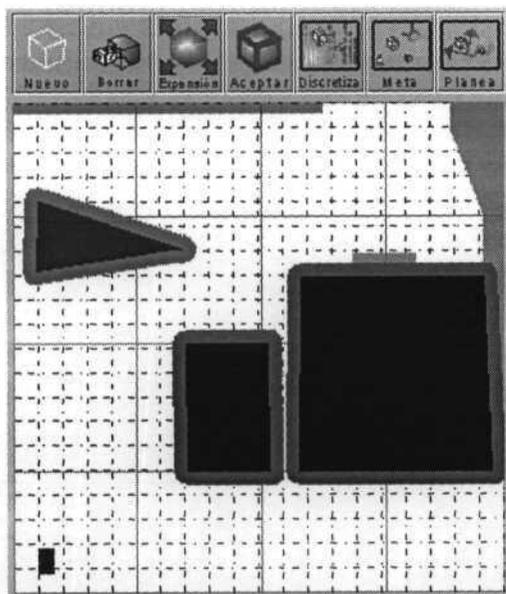
En el menú de **Opciones** se puede ajustar la trayectoria, originalmente encontrada con NF1, a curvas más suaves utilizando **Splines** y Caminos de **Dubin**. Además se tiene la opción de **validar** en espacio libre la trayectoria ajustada.

## C.1 Ejemplo de Planeación de Trayectoria

En la Figura C.2 se muestra un ejemplo de la planeación de una trayectoria. Inicialmente se definen los obstáculos punto a punto en el área de dibujo. Una vez que se han dado un conjunto de puntos se calcula el polígono convexo que se forma considerando los puntos más externos. Posteriormente, este polígono convexo es expandido de acuerdo con las dimensiones del vehículo con la opción de **expansión**. Si la definición de obstáculo está de acuerdo con lo que se quería se **acepta**, sino entonces se **borra** y se comienza con un nuevo obstáculo. Una vez que se han definido los obstáculos que se desean en el ambiente y que se ha realizado su expansión, se procede a calcular el espacio libre y el prohibido con la opción de **discretiza**.

Una vez que se ha discretizado el ambiente se escoge un punto como destino y se selecciona la opción de **meta**. Si se desea cambiar también la posición inicial del VA, entonces se escoge otro punto dentro del mapa y vuelve a oprimir la opción de meta. Estas dos funciones se alternaran cada vez que se escoja un punto y se active la opción de meta.

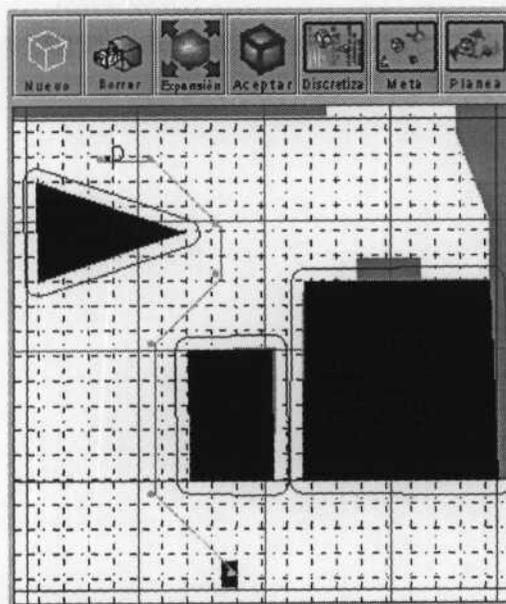
Al tener definida la meta y posición inicial, se calcula la trayectoria en espacio libre que conecte ambos puntos con el botón de **planea**. Después de lo anterior, es posible seleccionar alguna de las opciones de ajuste de curva: **Splines**, **Dubin** y **Validar**. Finalmente, los puntos de control de la trayectoria planeada son enviados al VA con la opción de **asigna** y el seguimiento comienza al seleccionar **inicia**.



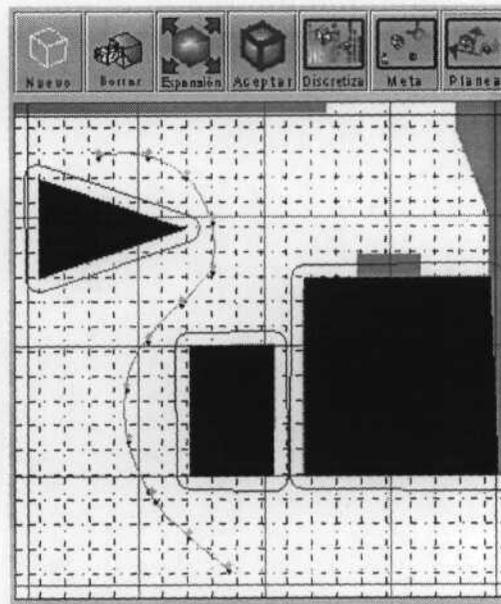
(a) Definir los obstáculos en el espacio de trabajo.



(b) Discretizar el ambiente para terminar el espacio libre y el espacio prohibido.



(c) Definir la meta, la posición inicial del VA y planear la trayectoria.



(d) Ajuste de la trayectoria con Dubin y Splines.

Figura C.2: Ejemplo de la planeación de una trayectoria



# Referencias

[Aguirre 99] Aguirre, S. *Circuito de Conmutación SONAR*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey. Mayo, 1999.

[Albores 01] Albores Borja, C. *Sistema de Sonares para la Localización y Caracterización de Superficies 2D usando Tiempo de Vuelo y Triangulación*. Tesis de Maestría MIT. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Diciembre, 2001

[Alwan 96] Alwan, P., Cheung, Y., Saleh, A., and Obeid, N. E. *Combining goal-directed, reactive and reflexive navigation in autonomous mobile robots*. Intelligent Information Systems. Australian and New Zealand Conference on. 1996.

[Bautista 98] Bautista, S. *Planeación y Seguimiento de Trayectorias para un Robot Móvil Autónomo con Evasión de Obstáculos Dinámicos*. Tesis de Maestría en Ciencias en Automatización. ITESM, campus Monterrey, 1998.

[Bourdon 95] Bourdon, G., Ruaux, P. and Delaplace S. *Instantaneous fuzzy modelling for obstacles avoidance*. Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21<sup>st</sup> Century., IEEE International Conference on, 3, 1995.

[Cantu 01] Cantú, A. *Modelo de Comunicación para la Teleoperación y Ejecución Autónoma de Tareas en un Vehículo*. Tesis de Maestría en Ciencias en Automatización con especialidad en Sistemas Inteligentes. ITESM, campus Monterrey. Dic. 2001.

[Dubin 57] Dubin, L. E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. American Journal of Mathematics, 79:497-516, 1957.

[Durrant 92] Durrant-Whyte H.F y Leonard J.J. *Directed sonar sensing for mobile robot navigation*. Kluwer Academic Publishers, 1992.

[Hernandez 95] Hernandez, E. *Reconstrucción tridimensional de la estructura craneofacial para el diagnóstico ortodóncico*. Tesis de Maestría MIT. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Diciembre, 1995.

[Latombe 91] Latombe, J. C. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991

[Lozano 83] Lozano Pérez, T. *Spatial Planning: A Configuration Space approach*. IEEE Transactions on Computers, pp. 108-120.

[Palacios 00] Palacios, G. *Control de dirección de un vehículo autónomo*. Tesis de Maestría MAT-I. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Diciembre, 2000.

[Ponce 02] Ponce Tavizón, B. *Planeación y Seguimiento Visual de Trayectorias para guiar un Vehículo Autónomo*. Tesis de Maestría MIT. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Mayo, 2002

[Reeds & Shepp 90] Reeds, J. A. and Shepp, L. A. *Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards*. Pacific Journal of Mathematics, 145(2):367-393, 1990.

[Romero 01] Romero Muñoz, L. *Construcción de Mapas y Localización r Robots Móviles: un Enfoque Probabilista*. Doctorado en Ciencias Computacionales. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Septiembre, 2001

[Scheuer 99] Scheuer, A., y Xie, M. *Continuos-curvature trajectory planning for manoeuvrable non-holonomic robots*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp 1675-1680.

[Skiena 90] Skiena, S. *Implementing discrete mathematics: Combinatorics and graph theory with matemática*. Massachusetts. Addison-Wesley.

[Vandorpe 94] Vandorpe, J and Van Brussel, H. *A reflexive navigation algorithm for an autonomous mobile robot*. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. IEEE International Conference on MFI'94, 1994.

[Vazquez 02] Vazquez Diosdado, J. *Control de Dirección de un Vehículo Autónomo con Retroalimentación Visual*. Tesis de Maestría MIT. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Mayo, 2002

[Zapata 99] Zapata, R. and Lepinay, P. *Flying among obstacles*. Advanced Mobile Robots. Third European Workshop on, 1999.

Centro de Información-Biblioteca



30002006243786