

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE MECATRÓNICA**

**CONTROL DESCENTRALIZADO BASADO EN
COMPORTAMIENTO HUMANO PARA NAVEGACIÓN
AUTÓNOMA DE SISTEMAS MULTIAGENTE**

T E S I S

**QUE PRESENTA EL
ING. LUIS FERNANDO VÁZQUEZ CHÁVEZ**

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

**EN LA ESPECIALIDAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ALEJANDRO RODRÍGUEZ ÁNGELES**

A todos ustedes que se saben mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Por su apoyo incondicional, comprensión y confianza. No hay manera de agradecer el esfuerzo que han hecho para que tuviera la oportunidad de alcanzar este punto de mi vida. Gracias a ambos por enseñarme a trabajar duro, con dedicación y constancia; esta satisfacción también les pertenece.

A mi Asesor, Dr. Alejandro Rodríguez Angeles: Por su confianza, apoyo y guía durante la realización de este trabajo, agradezco la oportunidad de colaborar y aprender de una persona tan capaz.

Al Dr. Eduardo Aranda y al Dr. Martín Velasco: Por aceptar formar parte de mi jurado, por sus comentarios y aportaciones, que sin duda enriquecen mi trabajo de tesis.

A los Doctores de la Sección de Mecatrónica: Por aceptarme dentro del programa de maestría, por compartir sus conocimientos y por esos momentos, buenos y malos que se transforman en experiencias invaluableles.

El presente trabajo fue parcialmente auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT-México, bajo el proyecto 254329.

RESUMEN

El presente trabajo está enfocado en el diseño e implementación de un esquema de control de navegación autónomo descentralizado para sistemas multiagente, compuestos por una serie de robots móviles de configuración diferencial.

Para el diseño de la estrategia de control se consideran algunas características generales observadas en el comportamiento dinámico de diversos agentes biológicos, particularmente de seres humanos, destacando aquellas mostradas durante concentraciones o aglomeraciones de individuos, a partir de dichas observaciones se identifican diversas condiciones que producen desplazamientos, concretamente los necesarios para alcanzar una posición determinada, o bien evitar el contacto y/o colisión con los demás individuos u obstáculos inmersos en el entorno.

La caracterización del comportamiento mencionado anteriormente se logra mediante la integración de fuerzas atractivas, que provocan que el individuo se dirija hacia una posición objetivo y repulsivas que le permiten evitar colisiones. Éste modelo de fuerzas se implementa en un robot de tracción diferencial que es comandado mediante una combinación de velocidades traslacional y rotacional, las cuales son moduladas por el controlador propuesto.

El sistema de control se conforma por un *lazo externo de control*, que incorpora las propiedades de navegación y evasión de obstáculos y por un *lazo interno de control*, el cual se encarga de procesar las señales de fuerza y entregar las instrucciones necesarias para dirigir al robot, esta etapa de control se encarga además de asegurar que se alcance una orientación deseada.

Una serie de sensores incorporados a cada robot y una tarjeta de desarrollo abordo hacen posible que el sistema sea completamente descentralizado, de tal manera que la programación y procesamiento de información se realizan de forma individual.

Mediante el método de Lyapunov se demuestra la estabilidad del controlador para el caso libre de colisiones, con lo que se puede asegurar convergencia asintótica a la posición y orientación deseadas. Diversas pruebas en simulación y experimentales corroboran los resultados teóricos de estabilidad y convergencia.

ABSTRACT

This work is focused on the design of a decentralized autonomous navigation control scheme for multiagent systems, which are composed of several differential mobile robots.

For the design of the control strategy we consider some general characteristics observed in the dynamic behavior of diverse biological agents, particularly those shown during concentrations of individuals, from these observations different conditions that cause displacement are identified, particularly the necessary ones to reach the desired position or to avoid contact and/or collision with other individuals immersed in the environment.

The characterization of the previously mentioned behavior is achieved by the integration of attractive forces, that cause the individual to be directed towards a determined position, and repulsive forces that allow him to avoid collisions. The force model is implemented on a differential mobile robot which is commanded by a combination of translational and rotational velocities generated by the proposed controller.

The control system is formed by an *external control loop* which incorporates the navigation and obstacle avoidance properties; on the other hand, an *internal control loop* is responsible for processing the force signals and delivering the necessary instructions to drive the robot, this control level also ensures that the desired orientation is obtained when the robot has reached the target position.

Several sensors and a development board that are incorporated to each robot make it possible for the system to be completely decentralized, so programming and information processing is done individually.

The stability of the controller for the collision-free case is demonstrated by the Lyapunov method, whereby asymptotic convergence at desired position and orientation can be ensured. Several simulation and experimental tests support the theoretical results of stability and convergence.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Robots Móviles	2
1.1.2. Sistemas multiagente	3
1.1.3. Sistemas basados en comportamiento	6
1.2. Estado del arte	8
1.3. Planteamiento del problema	11
1.4. Objetivos	11
1.5. Organización general del documento	12
2. Preliminares teóricos	15
2.1. Modelo de fuerza conductual	15
2.2. Modelo cinemático del robot móvil diferencial	19
3. Desarrollo del controlador de navegación autónoma	23
3.1. Lazo de control externo	24
3.2. Lazo de control interno	28
3.3. Análisis de estabilidad para el caso libre de colisiones	30
4. Desarrollo de la plataforma experimental	35
4.1. Componentes	36

4.1.1.	Sistema de potencia	36
4.1.2.	Sistema de percepción	39
4.1.3.	Unidad de control	42
4.2.	Características programadas	44
4.2.1.	Control de bajo nivel	44
4.2.2.	Odometría	47
4.2.3.	Control de velocidad	52
4.2.4.	Percepción	53
5.	Resultados en simulación	59
5.1.	Simulación numérica para un sólo agente.	60
5.1.1.	Caso libre de colisiones.	60
5.1.2.	Caso con posibilidad de colisión para un sólo agente.	62
5.2.	Simulación numérica para dos agentes.	64
5.2.1.	Caso con posibilidad de colisión, obstáculo estático.	64
5.2.2.	Caso con posibilidad de colisión debido a la interacción directa entre agentes.	66
5.3.	Simulación numérica para múltiples agentes.	68
5.3.1.	Caso libre de colisiones y sin interacción entre agentes	68
5.3.2.	Caso libre de obstáculos con interacción directa entre agentes . . .	70
5.3.3.	Caso con posibilidad de colisión por interacción directa entre agen- tes y con obstáculos estáticos en el entorno	73
6.	Resultados experimentales	77
6.1.	Implementación experimental para un agente.	78
6.1.1.	Caso libre de colisiones.	78
6.1.2.	Caso con posibilidad de colisión para un agente.	80
6.2.	Implementación experimental para dos agentes.	82
6.2.1.	Caso con posibilidad de colisión, obstáculo estático.	82
6.2.2.	Casos con posibilidad de colisión debido a la interacción directa entre agentes.	84
6.2.3.	Caso con interacción directa entre agentes y con obstáculos estáti- cos en el entorno	88
7.	Conclusiones y perspectivas	91
7.1.	Conclusiones	92
7.2.	Perspectivas	93
	Bibliografía	99
	Artículos publicados	101

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Capacidad de movimiento de un robot móvil de configuración diferencial.	19
2.2.	Robot diferencial dentro de un marco de referencia inercial X-Y.	20
2.3.	Restricción no-holonómica.	21
3.1.	Estructura del controlador de navegación autónoma.	24
3.2.	Trayectoria del agente hacia la posición deseada.	25
3.3.	Variables involucradas en condiciones de interacción entra agentes.	26
3.4.	Variables involucradas en condiciones de evasión de obstáculos.	27
3.5.	Valores máximos y mínimos de las funciones trigonométricas evaluadas para la prueba de estabilidad.	33
4.1.	Chasis del robot.	36
4.2.	Técnica de modulación de ancho de pulso (PWM).	37
4.3.	Diagrama de circuito puente H.	37
4.4.	Condiciones de accionamiento, circuito puente H.	38
4.5.	Módulo puente H (L298N).	39
4.6.	Principio de funcionamiento de un sensor de proximidad infrarrojo.	40
4.7.	Sensor de proximidad SHARP GP2Y0A02.	40
4.8.	Soporte para el montaje de sensores.	41
4.9.	Distribución física de los sensores sobre el chasis.	42
4.10.	Tarjeta de desarrollo Arduino DUE.	42
4.11.	Diagrama de bloques del mecanismo.	43
4.12.	Trayectoria recta.	45
4.13.	Trayectoria curva.	45
4.14.	Localización del centro de rotación instantáneo (CRI).	46
4.15.	Encoder acoplado al eje del motor.	48

4.16. Señales obtenidas mediante encoders.	48
4.17. Comparación y conteo de pulsos.	48
4.18. Actualización de distancias recorridas en un periodo de muestreo.	49
4.19. Propagación de la incertidumbre debido a errores odométricos.	50
4.20. Diferencia de trayectorias debido a errores no sistemáticos.	51
4.21. Diagrama a bloques del controlador PI.	52
4.22. Emulación del área de confort con sensores puntuales.	54
4.23. Problema de no-detección debido a percepción discontinua.	54
4.24. Ángulos de percepción respecto a la dirección de avance del móvil.	55
4.25. Percepción de obstáculos por un sólo sensor.	55
4.26. Percepción de obstáculos por múltiples sensores.	56
4.27. Percepción de obstáculos múltiples.	56
4.28. Percepción de obstáculos dinámicos u otros agentes.	57
5.1. Trayectoria libre de colisiones; un agente. (Resultado en simulación) . . .	60
5.2. Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; un agente. (Resultado en simulación)	61
5.3. Variables de control, caso libre de colisiones; un agente. (Resultado en simulación)	61
5.4. Trayectoria con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado en simulación)	62
5.5. Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado en simulación)	63
5.6. Variables de control, caso con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado en simulación)	63
5.7. Trayectoria con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado en simulación)	64
5.8. Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado en simulación)	65
5.9. Variables de control, caso con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado en simulación)	65
5.10. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; dos agentes. (Resultado en simulación)	66
5.11. Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; dos agentes. (Resultado en simulación)	67
5.12. Variables de control, caso con interacción directa; dos agentes. (Resultado en simulación)	67
5.13. Trayectorias libres de colisiones; cinco agentes. (Resultado en simulación)	69
5.14. Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; cinco agentes. (Resultado en simulación)	69
5.15. Variables de control, caso libre de colisiones; cinco agentes. (Resultado en simulación)	70

5.16. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; cinco agentes. (Resultado en simulación)	71
5.17. Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; cinco agentes. (Resultado en simulación)	72
5.18. Variables de control, caso con interacción directa; cinco agentes. (Resultado en simulación)	72
5.19. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa entre agentes y con el entorno; cinco agentes. (Resultado en simulación)	73
5.20. Errores de posición y orientación, caso con interacción de agentes y entorno; cinco agentes. (Resultado en simulación)	74
5.21. Variables de control, caso con interacción de agentes y entorno; cinco agentes. (Resultado en simulación)	74
6.1. Trayectoria libre de colisiones; un agente. (Resultado experimental)	78
6.2. Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; un agente. (Resultado experimental)	79
6.3. Variables de control, caso libre de colisiones; un agente. (Resultado experimental)	79
6.4. Trayectoria con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado experimental)	80
6.5. Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado experimental)	81
6.6. Variables de control, caso con posibilidad de colisión; un agente. (Resultado experimental)	81
6.7. Trayectoria con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado experimental)	82
6.8. Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado experimental)	83
6.9. Variables de control, caso con posibilidad de colisión; dos agentes. (Resultado experimental)	83
6.10. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; dos agentes. (Resultado experimental)	84
6.11. Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; dos agentes. (Resultado experimental)	85
6.12. Variables de control, caso con interacción directa; dos agentes. (Resultado experimental)	85
6.13. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción lateral; dos agentes. (Resultado experimental)	86
6.14. Errores de posición y orientación, caso con interacción lateral; dos agentes. (Resultado experimental)	87
6.15. Variables de control, caso con interacción lateral; dos agentes. (Resultado experimental)	87

6.16. Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa entre agentes y con el entorno; dos agentes. (Resultado experimental) 88

6.17. Errores de posición y orientación, caso con interacción de agentes y entorno; dos agentes. (Resultado experimental) 89

6.18. Variables de control, caso con interacción de agentes y entorno; dos agentes. (Resultado experimental) 89

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Características de los motores	36
4.2. Estados útiles y su combinación de interruptores.	38
4.3. Características del módulo puente H L298N.	39
4.4. Características del sensor de proximidad SHARP GP2Y0A02.	41
4.5. Características de la tarjeta de desarrollo Arduino DUE.	43
5.1. Parámetros utilizados en simulaciones	59
5.2. Condiciones iniciales y deseadas. Caso libre de colisiones, un agente. (Resultado en simulación)	60
5.3. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión, un agente. (Resultado en simulación)	62
5.4. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión, dos agentes. (Resultado en simulación)	64
5.5. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con interacción directa, dos agentes. (Resultado en simulación)	66
5.6. Parámetros utilizados en simulaciones de agentes múltiples	68
5.7. Condiciones iniciales y deseadas. Caso libre de colisiones, cinco agentes. (Resultado en simulación)	68
5.8. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión por interacción directa, cinco agentes. (Resultado en simulación)	71
5.9. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con interacción de agentes y entorno, cinco agentes. (Resultado en simulación)	73
6.1. Parámetros utilizados en experimentos	77
6.2. Condiciones iniciales y deseadas. Caso libre de colisiones, un agente. (Resultado experimental)	78

- 6.3. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión, un agente. (Resultado experimental) 80
- 6.4. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión, dos agentes. (Resultado experimental) 82
- 6.5. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión por interacción directa, dos agentes. (Resultado experimental) 84
- 6.6. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con posibilidad de colisión por interacción lateral, dos agentes. (Resultado experimental) 86
- 6.7. Condiciones iniciales y deseadas. Caso con interacción de agentes y entorno, dos agentes. (Resultado experimental) 88

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

En las últimas décadas el área de la robótica ha experimentado un crecimiento acelerado, propulsado por múltiples avances en diversas áreas como la mecánica, electrónica, computación, comunicaciones, etc. Los robots han revolucionado los procesos industriales de forma significativa e incluso han logrado introducirse en diferentes campos de aplicación donde antes era difícil imaginar su presencia.

Dentro de la robótica se destacan dos grandes áreas, la primera y más estudiada involucra a los robots manipuladores, que han permitido la automatización de un sinnúmero de tareas y el desarrollo a gran escala de diversas industrias, por otro lado se encuentra la robótica móvil que ha ganado importancia debido a que, a diferencia de la mayoría de los robots industriales que se limitan a un espacio de trabajo acotado por sus propias dimensiones, cuentan con la característica de poder moverse libremente dentro de un área mucho más grande, además de poder ser dotados de autonomía, cualidad que expande sus posibilidades de aplicación.

1.1.1. Robots Móviles

Un robot móvil puede definirse como *un sistema electromecánico capaz de desplazarse dentro de un espacio de trabajo sin estar sujeto a un punto fijo*, en términos del entorno en que se mueven, se clasifican como aéreos, acuáticos, subacuáticos y terrestres, [31].

Específicamente, los robots móviles terrestres pueden clasificarse por el tipo de locomoción implementada, pudiendo ser orugas, patas o ruedas, donde cada tipo presenta características propias y ventajas particulares. La locomoción mediante ruedas se considera la más sencilla y eficiente, debido a que su implementación mecánica es simple y porque no existen problemas de balance, ya que idealmente se mantiene en contacto constante con una superficie.

A su vez, los robots propulsados por ruedas se clasifican de acuerdo al número y tipo de grados de libertad que exhiben, pudiendo ser de movilidad δ_m , que se asocia con la capacidad del robot para desplazarse y es determinado por la cantidad de ruedas motrices con que cuente el móvil, o de direccionabilidad δ_s , que se refiere al número de ruedas que pueden ser orientadas de forma independiente para modificar la orientación del robot, para fines prácticos se han identificado cinco combinaciones de estos grados de libertad (δ_m, δ_s) , que permiten un desplazamiento satisfactorio del robot móvil dentro de un área de trabajo, [46], los cuales se describen brevemente a continuación.

- *Robots tipo (3,0)*. No cuentan con ruedas fijas y tampoco de dirección, en su lugar presenta tres ruedas motrices omnidireccionales, por lo cual ostentan una movilidad completa dentro del plano, lo que significa que son capaces de moverse hacia cualquier dirección sin tener que reorientarse.
- *Robots tipo (2,0)*. No cuentan con ruedas de dirección, pero si con una o más ruedas fijas sobre un eje común, de las cuales dos son motrices, la movilidad se encuentra restringida en el sentido que, dada una *postura* (posición y orientación en el plano), la velocidad está restringida a cierto tipo de trayectorias que no incluyen movimientos laterales.
- *Robots tipo (2,1)*. Cuentan con dos ruedas motoras que no son fijas y al menos una de dirección, en caso de ser más, estas deben estar sincronizadas y permitir la misma orientación del robot, la velocidad es restringida a pertenecer a trayectorias que no incluyen traslación de forma lateral.
- *Robots tipo (1,1)*. Cuentan con una o varias ruedas fijas sobre un eje común, así como una o más ruedas de dirección, estas no pueden encontrarse sobre el mismo eje que las ruedas fijas y en caso de ser más de una, su orientación debe ser coordi-

nada, la velocidad de este tipo de móvil está restringida a pertenecer a trayectorias parametrizadas por el ángulo de dirección, lo que impide movimiento lateral.

- *Robots tipo (1,2)*. Presentan al menos dos ruedas de dirección independiente y no tienen ruedas fijas, su velocidad se restringe a pertenecer a trayectorias parametrizadas simultáneamente por ambos ángulos de orientación.

Un robot móvil puede considerarse autónomo cuando se le confiere la capacidad de moverse dentro de su entorno sin asistencia de un operador externo, esto debe garantizarse en dos sentidos, desde el punto de vista energético donde el robot debe incluir una fuente de energía propia y desde el punto de vista decisional, donde debe ser capaz de realizar acciones en función de la información que perciba del entorno, [57].

El nivel de autonomía se determina por la cantidad de instrucciones que se requieran de un operador para que el robot realice correctamente la tarea para la cual es programado, según [8], se dividen en los siguientes.

- *Teleoperación*. El operador tiene el control completo del móvil, el cual no toma iniciativa alguna, excepto quizás, el detenerse cuando la comunicación falla.
- *Modo seguro*. El operador dirige el movimiento, pero el robot toma iniciativas para protegerse a sí mismo, por ejemplo, realizar paros de emergencia para evitar colisiones o no moverse si se excede su límite de carga.
- *Control compartido*. El robot elige su propia ruta y responde de manera autónoma al entorno, lo que le permite realizar maniobras de evasión por sí mismo; el operador sólo debe introducir comandos de manera intermitente.
- *Navegación dirigida*. El operador programa una ruta o una posición objetivo, la cual debe ser alcanzada por el robot utilizando sus propios medios en cuanto a evasión de obstáculos se refiere.
- *Completamente autónomo*. El robot realiza la planificación, selección de rutas y evasión de obstáculos, además es capaz de reconocer el entorno sin mayor intervención que una instrucción de alto nivel.

1.1.2. Sistemas multiagente

Se puede definir a un agente como *un sistema que es capaz de realizar una acción de forma autónoma dentro del entorno en que se encuentra situado con la finalidad de alcanzar un objetivo predefinido*, [55], dependiendo del contexto, un agente puede ser una

persona, un programa computacional, un proceso, un robot, etc.

Un sistema multiagente se define como *un conjunto de agentes inmersos en un entorno común que interactúan entre sí con posibilidad de comunicarse unos con otros*, generalmente este tipo de sistemas presentan comportamientos complejos a partir del desempeño individual de cada agente, logrando incluso realizar acciones cooperativas y/o coordinadas que van más allá de las capacidades de cada individuo [57].

Este tipo de sistemas presentan una infraestructura que sirve como base sobre la cual se implementa y desarrolla el comportamiento colectivo, dicha infraestructura muestra diversas características que determinan las capacidades y limitaciones del sistema, [10], las cuales se describen a continuación.

Centralización. Un sistema *centralizado* se caracteriza por la existencia de una estrategia de control general que gobierna el comportamiento de todos los agentes de forma simultánea, mientras que un sistema *descentralizado* permite que cada agente adopte un control local, por lo cual la evolución del sistema no será fácil de predecir. Los sistemas centralizados se subdividen en dos tipos, por un lado los distribuidos, donde todos los agentes son iguales con respecto al control y por otro lado los jerárquicos, en donde el control de ciertos agentes será prioritario sobre el de otros, resultando en la existencia de líderes y controles localmente centralizados.

Diferenciación. Un sistema multiagente se dice *homogéneo* si las capacidades de cada agente son idénticas a las del resto, de lo contrario será *heterogéneo*, el segundo caso generalmente presenta mayor complejidad debido a que se dificulta la asignación de tareas y en ocasiones es necesario de modelar al resto de los individuos para obtener los resultados esperados.

Estructuras de comunicación. Estas estructuras determinan como se llevan a cabo las interacciones entre los agentes del sistema, en [10] son caracterizadas como sigue.

- *Interacción vía ambiente.* Se refiere a que el ambiente por sí mismo es el medio de comunicación, es limitada pues no existe un intercambio de información explícito.
- *Interacción vía sensores.* Se lleva a cabo por medio de la percepción del ambiente a través de sensores incorporados a cada agente, aún no existe comunicación explícita, pero se requiere la capacidad de distinguir a un agente del resto del entorno.
- *Interacción vía comunicaciones.* involucra intercambio de información de forma explícita entre los diferentes agentes, suelen usarse diversas topologías de redes y protocolos de comunicación.

Modelado de otros agentes. Esta característica requiere el desarrollo de una representación de las capacidades, acciones o intenciones del resto de los agentes, generalmente se utiliza en casos donde es necesaria una localización o manipulación precisa de un objeto.

El control en sistemas multiagente, según [1], se clasifica por medio de dos enfoques distintos con respecto al tipo de proceso decisional empleado, pudiendo ser *deliberativo* o *reactivo*.

Deliberativo. Por lo general requiere asumir o conocer la estructura del entorno en que el sistema evoluciona con la finalidad de generar representaciones compatibles con la estrategia de control, la información en que se basa el proceso decisional debe ser consistente y confiable para que las acciones a seguir sean correctas, de lo contrario pueden tomarse alternativas que no reflejen el comportamiento deseado, aquí la información captada por sensores en los agentes apoya el proceso decisional preestablecido, algunas características comunes en estos sistemas son las siguientes.

- Se basa en modelos matemáticos o físicos para generar las interacciones y comportamientos individuales.
- Comúnmente se basan en estructuras jerárquicas con subdivisión de funciones claramente identificable.
- La comunicación ocurre de forma predecible o predeterminada, fluyendo hacia abajo o lateralmente en la estructura jerárquica.
- Los niveles superiores proveen de metas a los inferiores.
- El alcance de la planificación, tanto espacial como temporal, cambia dependiendo el nivel jerárquico, los requerimientos son menores y las consideraciones espaciales se tornan locales en niveles inferiores.
- Dependen fuertemente de representaciones simbólicas y modelos del entorno.

Reactivo. Se basa en un acoplamiento estrecho entre la percepción y la acción (estímulo-respuesta), lo que típicamente deja de lado la capacidad de razonamiento, la información del medio que es recibida por el agente se procesa y genera una reacción rápida en respuesta, por lo que no se requiere un conocimiento preciso del entorno o una representación del mismo, esto hace que el control reactivo sea adecuado para su inmersión en ambientes dinámicos y no estructurados, entre sus características se pueden enumerar las siguientes.

- Cada agente muestra comportamiento individual, la condición estímulo/respuesta está dada por la configuración del entorno, se modula por *atención* y se determina por *intención*.
- La atención prioriza las tareas enfocándose en los recursos sensoriales, está determinada por el entorno.
- La intención determina que tipo de comportamiento debe ser activado con base en el objetivo programado.
- El sistema exhibe comportamientos emergentes, esto es, un desempeño global como consecuencia directa de la adición de comportamientos individuales.
- Los resultados pueden no ser iguales, aún en situaciones similares.

Híbrido. Trata de combinar las características de los controles reactivo y deliberativo para obtener una respuesta rápida, basada en la percepción del entorno, la cual debe ser procesada con la finalidad de tomar la mejor decisión posible en función del objetivo planteado, esto involucra dificultades ya que el componente reactivo trata con las necesidades inmediatas del mecanismo, trazadas por la información sensorial recopilada del entorno, en contraste, el componente deliberativo usa representaciones simbólicas del entorno y opera en un tiempo generalmente mayor que su contraparte. La interacción de ambas partes requiere de un elemento intermedio que reconcilie y coordine las respuestas de ambas partes para evitar conflictos de información, [46].

1.1.3. Sistemas basados en comportamiento

Este tipo de sistemas, en su mayoría reactivos, considera el comportamiento de organismos biológicos como modelo, aprovechando la capacidad que tienen para percibir el entorno y actuar en consecuencia ante una situación determinada con un propósito o de forma significativa, incluso con poca información del ambiente o teniendo limitaciones inherentes a su naturaleza, aún así, se han identificado especies que poseen la habilidad de realizar tareas de forma metódica y con objetivos específicos.

Las interacciones grupales y sociales juegan un papel fundamental para la reproducción del comportamiento individual, como se ha mostrado mediante el estudio de diversos sistemas con comportamientos particulares observados en la naturaleza, por ejemplo, enjambres, parvadas de aves, bancos de peces, colonias de insectos e incluso las interacciones humanas, además se identifican comportamientos grupales donde un conjunto de individuos desarrolla tareas organizadas y estructuradas como búsqueda, pastoreo, agregación, contención, etc. [1]

La dinámica observada dentro de un grupo generalmente dista de la mostrada por un sólo individuo, por lo cual, la caracterización de este tipo de sistemas puede realizarse desde el punto de vista individual o grupal, siendo éste último el que genera mayor interés, debido al tipo de comportamientos que emergen de las interacciones del grupo y los efectos que el entorno produce, aunado a esto, es complicado conocer las acciones que un individuo aislado realizará, pues esto requiere la definición de conductas particulares y metas específicas e implica considerar múltiples situaciones, lo que dificulta acotar las propiedades deseadas, sin embargo si se define un objetivo grupal, las condiciones requeridas se comparten y conocen de antemano, permitiendo que las tareas individuales se enfoquen al cumplimiento de dicho objetivo.

Particularmente, los sistemas robóticos basados en comportamiento son programados con un grupo básico de características interrelacionadas, es decir, un repertorio de comportamientos y los instrumentos necesarios para elegir cuando usar cada uno y con esto generar movimientos, [2].

Para un observador externo, los comportamientos son patrones identificados durante la actividad de cada individuo que conforma al sistema, dichos comportamientos emergen de las interacciones con el entorno, en esencia, cada integrante recibe información sensorial, la cual al ser procesada, produce señales que controlan los actuadores o bien alimentan otros comportamientos.

Así, este tipo de sistemas pueden ser vistos como una red de comportamientos interconectados y correctamente relacionados, lo que les permite adaptarse a la dinámica de los ambientes del mundo real, sin tener que operar sobre una representación o modelo abstracto del entorno, en su lugar, se reacciona respecto a la información percibida, tomando ventaja de las interacciones con el medio; finalmente mediante la combinación de estímulos y tareas predefinidas, se deben conseguir los objetivos planteados; algunas características observadas por [1], son las siguientes.

- *El comportamiento es la base para construir las acciones del robot.* Entendiendo comportamiento como una respuesta a estímulos sensoriales desencadenados por el entorno, dichos estímulos proveen la información necesaria para producir cambios internos en el robot que se transforman en acciones.
- *No es necesario el uso de representaciones del entorno para la generación de respuestas.* Al ser sistemas reactivos, actúan en consecuencia de lo percibido en su entorno, evitando la necesidad de una representación completa del mismo.
- *Modelos de insectos, animales e incluso humanos pueden usarse como base para estos sistemas.* Diferentes estudios en el campo de ciencias biológicas han logrado

desarrollar mecanismos y modelos que pueden ser útiles desde el punto de vista de la robótica móvil.

- *Son sistemas inherentemente modulares desde la perspectiva de diseño de software y programación.* Esto permite agregar competencias al incluir comportamientos o descartando los que no son útiles, permitiendo incrementar la complejidad de los sistemas robóticos.

La interacción e integración de los efectos dinámicos que el entorno induce al sistema son la clave para desarrollar correctamente sistemas basados en comportamiento; es la combinación de procesos concurrentes en el tiempo, impulsados por la percepción del medio y su interacción con los procesos decisionales, lo que enriquece a este tipo de sistemas.

Los efectos combinados de diversos individuos que comparten, al menos parcialmente, ciertos comportamientos y se encuentran inmersos en un entorno común, suelen resultar en dinámicas distintas a las que se observan de forma individual. Estas dinámicas suelen llamarse *comportamientos emergentes* debido a que surgen a través de las interacciones y los robots no son programados explícitamente para desarrollarlas, por lo tanto el comportamiento programado no necesariamente refleja el observado externamente, [46].

1.2. Estado del arte

Cuando se desarrollan vehículos autónomos se deben considerar dos cuestiones principales, por un lado, encontrar la mejor forma de determinar su posición, por otra parte se encuentra la estrategia a desarrollar para evitar colisiones y evadir obstáculos.

Particularmente para el segundo caso, se han desarrollado diferentes métodos, algunos de ellos basados en campos potenciales artificiales, otros buscan generar relaciones geométricas entre el vehículo y su entorno o incluso generarlo virtualmente con técnicas de visión artificial. Cada uno de estos enfoques tiene sus ventajas y particularidades.

Los campos potenciales en general se basan en sensores externos, lo que implica que el ambiente en que se desarrolla el control sea estructurado o cuando menos conocido, en caso de procesarse información proveniente de los sensores incorporados en el agente, servirá como complemento para determinar cuando debe realizarse una acción.

La construcción de dichos campos requiere que el ambiente sea conocido de antemano, además si se introducen obstáculos ya sean estáticos o dinámicos se deberán conocer sus dimensiones, posición y velocidad en todo momento [19]. Lo anterior se debe a que el

campo potencial debe ser generado alrededor del objeto en cuestión, de manera que la distancia hacia él determine la fuerza del efecto repulsivo [30].

En [53] por ejemplo, se consideran campos potenciales en combinación con obstáculos virtuales que se generan para evitar que se tomen caminos más largos o complejos hacia las coordenadas de destino y así obtener una planificación dinámica de la trayectoria para un robot móvil autónomo, los resultados son validados por medio de simulaciones y experimentos, sin embargo se requiere que el robot posea ciertas características además de que carece de un análisis formal de estabilidad.

En ocasiones, los campos potenciales no ofrecen las mejores soluciones con respecto a la planeación de trayectoria, debido al tema de los mínimos locales provocados por ejemplo cuando el móvil interactúa con superficies cóncavas, pasajes estrechos que no tengan salida o la interacción de diferentes campos potenciales [32].

Para tratar de evitar soluciones locales, en [39] se propone un algoritmo genético *pseudo-bacteriano* que garantiza la generación de trayectorias óptimas y seguras para la navegación autónoma logrando evitar obstáculos estáticos en el entorno, su desempeño es comparado con la técnica de campos potenciales artificiales, mostrando que se puede evitar el problema de mínimos locales en situaciones en que el algoritmo convencional no brinda resultados satisfactorios.

En un trabajo más reciente [37], se realiza una comparación del método anterior contra el llamado *campo potencial bacteriano*, que combina los beneficios de los campos potenciales artificiales con un algoritmo evolutivo bacteriano, al final este trabajo muestra algunas ventajas respecto al anterior, pues se reduce de manera notoria el tiempo de ejecución, además de permitir la evasión de obstáculos dinámicos.

Por otra parte en [40], se combinan los enfoques de campos potenciales con algoritmos de lógica difusa para generar las estrategias de evasión, en este caso la planeación de trayectoria se realiza de forma independiente y el control conmuta cuando se detectan obstáculos, lo que permite evitar colisiones.

Incluso se han adaptado atributos inspirados en animales en combinación con algoritmos basados en campos potenciales, como en [33], permitiendo que la planeación de trayectoria obedezca a comportamientos de ciertos mamíferos, situación que modifica el camino inicial trazado por el campo potencial, los resultados obtenidos son respaldados mediante simulaciones y experimentos. Sin embargo en estos trabajos aún se requiere el conocimiento del entorno y la localización de los obstáculos

Otros enfoques utilizan sensores a bordo de los robots móviles, mismos que permiten detectar obstáculos y evitar colisiones mientras se dirige el móvil hacia la posición objetivo, en [5] y [6] se presenta el método llamado *histograma de campo vectorial*, el cual utiliza un modelo del entorno basado en una cuadrícula sobre un plano cartesiano, en ella se registra la densidad de obstáculos captada por los sensores, con esto se calcula una trayectoria segura que se actualiza constantemente en conjunto con la información del mapa, lo cual significa un costo alto de procesamiento; es por ello que generalmente se realiza de manera centralizada.

También es posible dotar de autonomía a un robot móvil mediante controladores basados en visión artificial, en donde se auto-generan mapas del entorno y se clasifican los diferentes tipos de obstáculos que se encuentran en él; es el caso del *Mapeo y Localización Simultánea*, mejor conocido como SLAM por sus siglas en inglés, por ejemplo en [12], se presenta una técnica que, mediante sensores abordo, identifica el ambiente, al mismo tiempo que el móvil se autolocaliza para desplazarse sin tener contacto con ninguna superficie u obstáculo.

Un método que requiere relativamente poca capacidad de procesamiento y ha sido utilizado en sistemas descentralizados es el llamado *Método de Control Geométrico para Evasión de Obstáculos*, GOACM por sus siglas en inglés, ver por ejemplo [14] o [13]. Esta técnica consiste en calcular la distancia y el ángulo relativo a un sensor para determinar un camino que permita evitar colisiones, generalmente localizado a una distancia específica sobre una línea perpendicular al obstáculo, dado que usa solamente la información percibida por los sensores, es un esquema puramente reactivo, por lo que no se requiere conocimiento previo del entorno. Sin embargo tiende a fallar en superficies cóncavas, corredores estrechos o cuando se presentan obstáculos con formas irregulares.

Es sabido que diferentes sistemas biológicos desarrollan estrategias eficientes para navegación y evasión de obstáculos; una forma común de modelar sus comportamientos es considerar a cada individuo como una partícula, como se detalla en [54], diversos trabajos recrean su comportamiento, por ejemplo en [24], [25] y [51], se estudia su dinámica en diferentes situaciones, lo que permite comprender mejor sus acciones y decisiones.

Algunas aplicaciones donde se emplean sistemas de control bio-inspirado se encuentran, por ejemplo en [36], donde se desarrolla un método de evasión de colisiones para un robot hexápodo, se basa en la percepción óptica del entorno, de donde se extrae información de diferentes componentes que disparan comportamientos particulares reconocidos en insectos. En [50], ciertas características de la marcha humana son consideradas para permitir a un robot autónomo realizar acciones evasivas, los resultados se validan mediante simulación y experimentación.

Por otro lado en [45], se desarrolla un método de navegación para un robot móvil basado en la observación de las tendencias de la marcha humana, a pesar de no considerar obstáculos móviles, se describen trayectorias de navegación que evitan contacto con obstáculos como paredes y personas, el sistema es centralizado y se utiliza una combinación de sensores externos e internos para mejorar el posicionamiento del robot en espacio de trabajo.

1.3. Planteamiento del problema

A pesar de que la robótica móvil se utiliza actualmente para desarrollar tareas en entornos industriales, su implementación no es difundida ampliamente, situación que puede tener origen en las dificultades que dichos medios presentan, pues resultan en incompatibilidades con ciertos tipos de sistemas robóticos particularmente en aquellos que integran controles de tipo deliberativo, ya que contar con información precisa del entorno en todo momento se dificulta en ese tipo de ambientes generalmente dinámicos y poco estructurados, más aún para sistemas robóticos multiagente.

Con lo anterior, para el desarrollo del presente trabajo se considera un sistema multiagente conformado por una serie de robots móviles inmersos en un entorno no estructurado con posibilidades de cambio, donde los agentes no poseen información de sus características o configuración y tampoco tienen la capacidad de controlarlo o predecirlo, lo que permite la inclusión de un control de tipo reactivo, particularmente uno basado en comportamiento. Una dificultad de este tipo de algoritmos es que al ser construidos generalmente con propósitos de simulación, evaluación de desempeño u observación de su evolución, no siempre son los mejores candidatos para su uso en sistemas robóticos, situación que demanda proponer adaptaciones o modificaciones para usarlo con este fin.

1.4. Objetivos

Como *objetivo general* se plantea diseñar una estrategia de control descentralizado basada en comportamiento humano, desarrollada a partir de la dinámica de multitudes, esta deberá permitir la navegación autónoma desde una posición inicial hasta una deseada evitando colisiones y podrá ser implementada en un sistema multiagente compuesto por una serie de robots móviles diferenciales inmersos en un entorno para ellos desconocido.

Para alcanzar dicho objetivo, se propone una serie de *metas particulares* que se enumeran a continuación.

- Analizar y comprender el modelo bio-inspirado de fuerza generalizada basado en la dinámica de multitudes.
- Realizar las adaptaciones y modificaciones necesarias para que sea factible su utilización como sistema de control para un robot móvil de configuración diferencial.
- Programar una interfaz de simulación para visualizar la respuesta del sistema integrando el control de navegación.
- Diseñar y construir la plataforma robótica para la implementación física del controlador.
- Validar la estrategia de control propuesta sobre la plataforma experimental.

1.5. Organización general del documento

El presente trabajo está dividido en siete capítulos y tres apéndices; su organización es la siguiente.

En el *Capítulo 2* se presentan los preliminares teóricos necesarios para la comprensión y desarrollo del trabajo de tesis, iniciando con el algoritmo conductual basado en la dinámica de multitudes, del cual se destacan las características que pueden ser inducidas a un sistema robótico. Por otro lado se presenta el desarrollo del modelo cinemático de un robot móvil de tracción diferencial, donde se observan las variables admitidas para su control.

El *Capítulo 3* muestra la estructura del sistema de control considerando los diferentes ajustes y modificaciones que se realizan al modelo conductual, mismos que son necesarios para asegurar su compatibilidad con la cinemática del robot diferencial. Asimismo se desarrolla una prueba de estabilidad mediante el método de Lyapunov con la cual se asegura convergencia asintótica del sistema para el caso libre de colisiones.

En el *Capítulo 4* se detalla el desarrollo de la plataforma móvil que será utilizada con la finalidad de validar la funcionalidad del controlador propuesto, se mencionan las partes principales que lo componen y la programación de bajo nivel necesaria para su correcto funcionamiento.

El *Capítulo 5* presenta las principales características del simulador desarrollado así como una serie de pruebas en diferentes entornos con la intención de mostrar el desempeño del controlador en casos con distintos tipos de interacción.

En el *Capítulo 6* se analizan los resultados obtenidos mediante experimentación al implementar el sistema de control propuesto sobre la plataforma robótica en diferentes situaciones y con diversos tipos de obstáculos.

En el *Capítulo 7* se presentan las conclusiones y perspectivas del trabajo presentado.

CAPÍTULO 2

PRELIMINARES TEÓRICOS

2.1. Modelo de fuerza conductual

Un pensamiento difundido acerca del comportamiento humano lo cataloga como desorganizado, caótico o cuando menos bastante irregular, lo que puede resultar cierto en situaciones complejas debido a que se tienen preferencias, objetivos y destinos propios, sin embargo en situaciones donde se generan aglomeraciones o se está inmerso en multitudes, su conducta es sorpresivamente predecible, en este tipo de condiciones un individuo no suele tomar decisiones complicadas entre varias alternativas de acción posibles, en su lugar muestra estrategias conductuales que han sido aprendidas a través del tiempo mediante prueba y error, de hecho su reacción ante obstáculos u otros individuos se presenta de forma casi automática, esto es comparable con el comportamiento de un conductor experimentado, quien reacciona automáticamente a las respectivas situaciones de tráfico sin pensar detalladamente en las acciones que debe realizar, [24, 28].

La investigación de los procesos decisionales humanos, en particular las características psicológicas y fisiológicas de la percepción, que describen la forma en que se adquiere e identifica información del entorno, [20, 41], han permitido comprender las causas que desencadenan comportamientos determinados en un individuo, particularmente el movimiento, en función de las características de dicho entorno.

El modelo físico presentado se desarrolla con base en el análisis de fuerzas socio-psicológicas y físicas que tienen influencia en la dinámica de multitudes, se enfoca especialmente en el rol que juega la percepción, evaluación y reacción del individuo a las condiciones del ambiente que lo rodea [11, 54] y se deduce a partir de diversos estudios y observaciones que generalizan el comportamiento, [9, 25, 35], de las cuales se destacan las siguientes.

- Cada individuo es un agente *activo* que tiende a dirigirse hacia un punto específico, evitando los obstáculos que se presenten y las zonas más concurridas, tratando de mantener libre su *espacio personal*, [17].
- Los individuos muestran aversiones importantes a tomar desviaciones o moverse en dirección opuesta a la deseada, incluso si dicha ruta está muy concurrida, en consecuencia tienden a elegir las rutas más rápidas y directas hacia su destino.
- Si hay rutas alternas que tengan la misma distancia que la principal, el individuo preferirá tomar aquella en la que pueda seguir de frente el mayor tiempo posible o cambiar de dirección en menor medida, este comportamiento suele causar efectos de histéresis, esto es, se tiende a tomar un camino para llegar a cierto punto, pero la ruta de regreso es diferente.
- Se prefiere avanzar a velocidades individuales que corresponden a las más cómodas o que representan menos gasto energético para cada individuo.
- Se prefiere mantener cierta distancia con otros individuos, con paredes u obstáculos que se encuentren en el camino, esta distancia tiende a descender cuando se tiene más prisa o se encuentra con una densidad mayor de individuos.
- Generalmente no se revelan las estrategias de comportamiento en cada situación, sino que actúan de forma más o menos automática, lo cual al conjuntarse varios individuos pueden ocasionar obstrucciones o retrasos.

En adelante se muestra el desarrollo del modelo conductual, que de acuerdo al planteamiento de [34], los cambios en el comportamiento son guiados por las llamadas *fuerzas sociales*, esto ha sido puesto en términos matemáticos por [21, 26] donde se plantea lo siguiente.

La posición de un individuo α puede ser representada sobre un plano por el vector de coordenadas $\mathbf{p}_\alpha(t)$, el cual cambia continuamente en el tiempo t , con lo que su velocidad $\mathbf{v}_\alpha(t)$ está gobernada por la siguiente *ecuación de movimiento*.

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{p}_\alpha(t)) = \mathbf{v}_\alpha(t) \quad (2.1)$$

Las funciones que delinear los cambios temporales en la velocidad actual del individuo $\mathbf{v}_\alpha(t)$ pueden interpretarse como las fuerzas que desencadenan sus movimientos, que son las llamadas *fuerzas sociales*. Para un desarrollo detallado ver [22, 23, 26].

Si la fuerza social resultante $\mathbf{f}_\alpha(t)$ representa las distintas influencias sistemáticas (causadas por el entorno y otros individuos) en el comportamiento del individuo α , es posible obtener una expresión que representa su aceleración, desaceleración y cambio direccional, es decir.

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{v}_\alpha(t)) = \mathbf{f}_\alpha(t) \quad (2.2)$$

Esta especificación de $\mathbf{f}_\alpha(t)$ se considera como la suma de diversos términos que corresponden a las influencias que simultáneamente afectan el comportamiento de α , el primero de ellos es una fuerza de aceleración $\mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha)$, además de efectos repulsivos debido a los límites del entorno u obstáculos fijos $\mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{p}_\alpha)$ e interacciones repulsivas con otros individuos $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{p}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{p}_\beta, \mathbf{v}_\beta)$, cuya combinación resulta en.

$$\mathbf{f}_\alpha(t) = \mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha) + \sum_B \mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{p}_\alpha) + \sum_{\beta(\neq\alpha)} \mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{p}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{p}_\beta, \mathbf{v}_\beta) \quad (2.3)$$

Donde cada uno de los términos representa diferentes características del comportamiento, los cuales se discuten a continuación.

Fuerza de aceleración. Cada individuo se mueve con una *velocidad personal* v_α^0 , que es la velocidad característica de cada sujeto, siempre es menor a la velocidad máxima que se puede alcanzar y se define por diferentes factores como altura, peso, compleción, etc. Se dirige hacia su destino mostrando preferencia por trayectorias rectas o en forma poligonal, lo cual se define por medio del vector \mathbf{e}_α que puede ser variante en el tiempo, las desviaciones de la *velocidad actual* \mathbf{v}_α respecto a la *velocidad personal* v_α^0 debidas a perturbaciones provocadas por obstáculos o maniobras evasivas, son corregidas mediante el llamado *tiempo de relajación* o *tiempo característico* τ_α .

$$\mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha}(v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha) \quad (2.4)$$

Efectos repulsivos. Los individuos mantienen cierta distancia con las paredes u obstáculos del entorno, denotada por $d_{\alpha B}$, con lo que evitan ser lastimados, entre más cerca se encuentren de ellos mayor es la sensación de incomodidad, este efecto es descrito por medio de una fuerza repulsiva $\mathbf{f}_{\alpha B}$ la cual se modifica dependiendo de la distancia $d_{\alpha B}$ en que se encuentren los obstáculos y el *espacio personal* que requiera el individuo para sentirse cómodo, en adelante el término *área de confort* se utilizará para referirse a dicho

espacio y se denota por una circunferencia de radio r_α ; se plantea un vector con dirección *normal* $\mathbf{n}_{\alpha B} = (n_{\alpha B,x}, n_{\alpha B,y}) = (\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{p}_B^0)/d_{\alpha B}$ que apunta desde donde se percibe el punto más cercano de la pared u obstáculo \mathbf{p}_B^0 , hacia la posición instantánea del individuo \mathbf{p}_α , así como un vector en dirección *tangencial* $\mathbf{t}_{\alpha B} = (-n_{\alpha B,y}, n_{\alpha B,x})$, la composición de estos vectores, modulados por la percepción de distancia, resultan en la dirección que se requiere seguir para evitar colisiones.

$$\mathbf{f}_{\alpha B} = \{A_\alpha \exp[(r_\alpha - d_{\alpha B})/C_\alpha] + kg(r_\alpha - d_{\alpha B})\} \mathbf{n}_{\alpha B} - \kappa g(r_\alpha - d_{\alpha B})(\mathbf{v}_\alpha \cdot \mathbf{t}_{\alpha B}) \mathbf{t}_{\alpha B} \quad (2.5)$$

Interacciones repulsivas. Similar a las fuerzas repulsivas, el término $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{p}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{p}_\beta, \mathbf{v}_\beta)$ es usado para indicar que cada individuo α mantiene una relación dependiente de la distancia con otros individuos β , esto refleja una tendencia a respetar el *área de confort*, situación que ayuda a evitar colisiones, incluso con cambios repentinos de velocidad; en general se requiere más espacio en la dirección de desplazamiento que perpendicular a ella, en consecuencia las fuerzas de interacción repulsiva son dependientes de la velocidad y de la distancia entre los centros de masa $d_{\alpha\beta} = \|\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{p}_\beta\|$ de ambos individuos, para este caso también se considera un vector normalizado $\mathbf{n}_{\alpha\beta} = (n_{\alpha\beta,x}, n_{\alpha\beta,y}) = (\mathbf{p}_\alpha - \mathbf{p}_\beta)/d_{\alpha\beta}$ que apunta desde β hacia α , un vector tangencial $\mathbf{t}_{\alpha\beta} = (-n_{\alpha\beta,y}, n_{\alpha\beta,x})$ y la diferencia entre sus velocidades tangenciales $\Delta \mathbf{v}_{\beta\alpha}^t = (\mathbf{v}_\beta - \mathbf{v}_\alpha) \cdot \mathbf{t}_{\alpha\beta}$. Se considera que dos individuos interactúan entre sí con posibilidad de colisión cuando su distancia $d_{\alpha\beta}$ es menor a la suma de ambas áreas de confort $r_{\alpha\beta} = (r_\alpha + r_\beta)$, lo anterior se describe como.

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta} = \{A_\alpha \exp[(r_\alpha - d_{\alpha\beta})/C_\alpha] + kg(r_\alpha - d_{\alpha\beta})\} \mathbf{n}_{\alpha\beta} - \kappa g(r_\alpha - d_{\alpha\beta}) \Delta \mathbf{v}_{\beta\alpha}^t \mathbf{t}_{\alpha\beta} \quad (2.6)$$

En las ecuaciones (2.5) y (2.6) el término $A_\alpha \exp[(r_\alpha - d_{\alpha\beta})/C_\alpha]$ refleja un efecto territorial, es decir, la tendencia de mantenerse a cierta distancia de obstáculos y otros individuos, también es responsable del fenómeno de auto-organización, ver [27, 28], la constante A_α regula la fuerza de interacción mientras C_α controla el rango en que dicha fuerza actúa.

En ambas componentes, $\mathbf{f}_{\alpha B}$ y $\mathbf{f}_{\alpha\beta}$, se incluyen fuerzas inspiradas en *interacciones granulares* que son esenciales para describir los efectos emergentes a causa de aglomeraciones, [56], donde una *fuerza de cuerpo* $k(r - d_\alpha) \mathbf{n}_\alpha$ actúa en contra de la compresión mientras que una *fricción deslizante* $\kappa(r - d_\alpha) \mathbf{t}_\alpha$ impide el movimiento relativo tangencial cuando el individuo α se acerca a β .

Donde k y κ son constantes positivas, su combinación controla las componentes de fuerza normal y tangencial, mientras que la función $g(\cdot)$ es cero cuando no hay interacción con obstáculos ($d_{\alpha B} > r_\alpha$) u otros individuos ($d_{\alpha\beta} > r_{\alpha\beta}$) y su argumento en caso contrario.

2.2. Modelo cinemático del robot móvil diferencial

Bajo el contexto del presente trabajo, cinemática se refiere al estudio del movimiento de los cuerpos o partes que integran un mecanismo robótico, sin considerar las fuerzas o pares torsionales que lo provocan. Dado que estos mecanismos son en esencia construidos para ejecutar movimientos, la cinemática es un aspecto fundamental para su análisis, control y diseño.

La cinemática de un mecanismo describe su *postura* o *pose*, que es la denominación conjunta del posicionamiento espacial y la orientación de un cuerpo rígido, así como su velocidad, aceleración y derivadas de orden superior, con lo que un modelo cinemático puede ser visto como el estudio de la postura de dicho mecanismo, donde las traslaciones y rotaciones, referidas como una combinación de desplazamientos, también son representadas. [46]

Se considera un robot móvil de tipo (2,0) o de tracción diferencial que consta de dos ruedas motoras alineadas sobre un eje común, se incorporan una o más ruedas omnidireccionales como medio de soporte y con el fin de evitar problemas de balance. Su locomoción se logra mediante el control de velocidad de cada rueda de forma independiente. La rigidez del eje de las ruedas limita la maniobrabilidad, de hecho, los tipos de movimiento que pueden efectuarse se reducen a la rotación alrededor del punto central del eje de las ruedas, en adelante *centro de giro* y la traslación en dirección longitudinal del robot, sin embargo, la combinación de estos movimientos permite seguir trayectos definidos por arcos de cualquier magnitud, como se muestra en la figura 2.1.

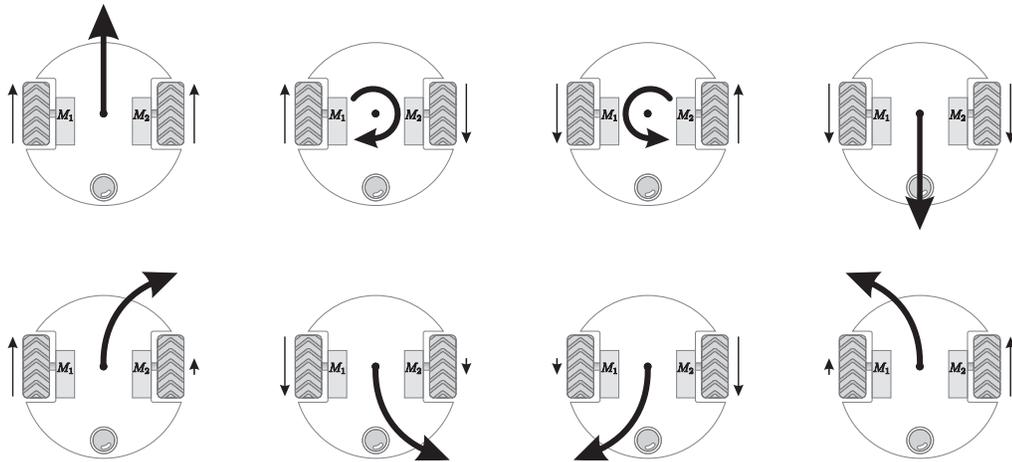


Figura 2.1: Capacidad de movimiento de un robot móvil de configuración diferencial.

Para la correcta caracterización de este tipo de robots, se asume el cumplimiento de las siguientes proposiciones.

- El cuerpo del móvil y los acoplamientos se consideran rígidos.
- Cada rueda tiene un único punto de contacto con la superficie para un instante de tiempo determinado y no sufren deformaciones.
- No existe deslizamiento de las ruedas durante el avance del móvil.
- La aceleración angular se considera cero para ambas ruedas, con lo que sus velocidades individuales aunque pueden ser distintas se consideran constantes.

El modelo cinemático se basa en la integración del móvil dentro de un *marco inercial*, es decir, ligándolo a una referencia espacial conocida, para este caso, el marco de referencia consiste en un origen, que es el punto donde se intersectan dos vectores base, ortogonales entre sí denotados como $X - Y$, permitiendo con esto caracterizar los desplazamientos del robot a partir de un punto conocido en el plano, como se observa en la figura 2.2.

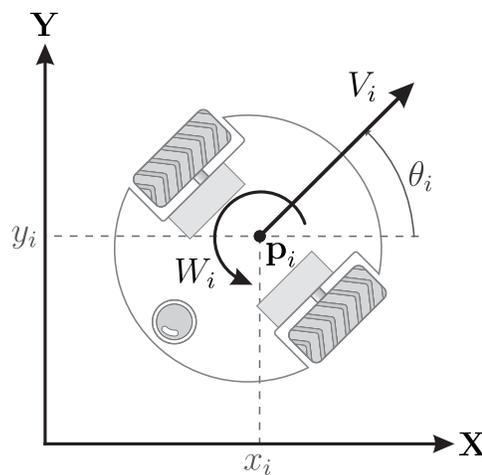


Figura 2.2: Robot diferencial dentro de un marco de referencia inercial X-Y.

Donde V_i y W_i son las variables a través de las cuales el sistema puede ser controlado y determinan las velocidades lineal y angular del robot, respectivamente; x_i y y_i son las coordenadas del punto \mathbf{p}_i que es el centro de giro del robot, mientras que θ_i representa su ángulo de orientación, en ambos casos con respecto a los ejes del marco de referencia inercial $X - Y$. El sub-índice i presente en las variables mostradas tanto en figuras como en ecuaciones, hace referencia al i -ésimo agente dentro del sistema.

Con esta información, es posible deducir el modelo cinemático del robot móvil de tracción diferencial, representado en coordenadas globales, el cual es definido mediante el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_i &= V_i \cos(\theta_i) \\
 \dot{y}_i &= V_i \sin(\theta_i) \\
 \dot{\theta}_i &= W_i
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

O bien en su forma matricial por.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & 0 \\ \sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ W_i \end{bmatrix}
 \tag{2.8}$$

Dadas las características del vehículo, se impone una limitación cinemática de *rodado sin deslizamiento*, la cual implica que la velocidad a la que se desplaza el punto de contacto entre las ruedas y la superficie, debe ser siempre paralela al plano conformado por los ejes del marco de referencia inercial, además, debe ser proporcional a la velocidad angular desarrollada por las ruedas.

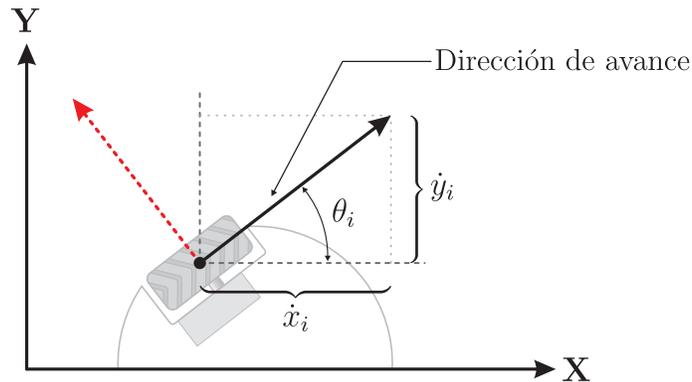


Figura 2.3: Restricción no-holonómica.

Por esta razón, no puede existir desplazamiento perpendicular a la dirección de avance y cualquier trayectoria que se imponga debe satisfacer esta restricción *no-holonómica*, [52], que analíticamente se describe por.

$$\dot{x}_i \sin(\theta_i) - \dot{y}_i \cos(\theta_i) = 0
 \tag{2.9}$$

Como consecuencia, un robot móvil de configuración diferencial puede ir a cualquier lugar del plano, pero no puede hacerlo siguiendo cualquier trayectoria, [46].

El estudio a profundidad de este tipo de sistemas, desafortunadamente muestra que no es posible desarrollar un controlador mediante estrategias basadas en retroalimentación de los estados utilizando estructuras invariantes en el tiempo, ver [7].

Es por ello que diversos trabajos que contemplan navegación, evasión de obstáculos o ambos, utilizan un sistema simplificado, ver [44], en el cual se controla la posición de un punto distinto del centro de giro del robot; este punto puede colocarse a cualquier distancia del eje de las ruedas, preferentemente sobre una línea perpendicular que pase sobre su centro, con lo cual su matriz de control será no-singular permitiendo que el sistema sea controlable y se eviten las singularidades.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

El diseño de la estrategia de control se basa, por un lado en el modelo de fuerza conductual [25] y por el otro en la generación de los comandos necesarios para alcanzar tanto una posición como una orientación deseadas dentro de un marco de referencia conocido, mediante la regulación de velocidades lineal y angular.

La parte del control que se encarga de procesar el modelo de fuerza conductual se conjunta en un bloque denominado *lazo de control externo*, mismo que aporta las propiedades de navegación autónoma y evasión de obstáculos mediante la percepción local del ambiente, a su vez, el denominado *lazo de control interno* es un bloque de control que se ocupa de transformar las señales de referencia en valores de velocidad lineal y angular necesarias para comandar al robot móvil diferencial, considerando además la posibilidad de orientarse respecto a un valor deseado θ_{d_i} , este bloque se basa en el seguimiento de una trayectoria suave y la modulación del error de orientación para converger a los valores predeterminados. La figura 3.1 muestra el acoplamiento de ambos bloques con la cinemática del robot móvil para generar el comportamiento esperado.

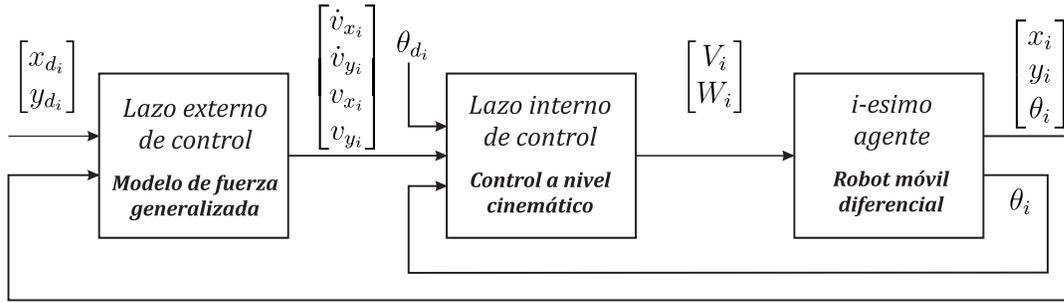


Figura 3.1: Estructura del controlador de navegación autónoma.

3.1. Lazo de control externo

Este bloque de control se encarga de procesar el algoritmo bio-inspirado de fuerza conductual descrito por (2.3) propuesto en [25], en el cual se asume que una mezcla de fuerzas socio-psicológicas y físicas influyen en el comportamiento de un grupo de individuos que comparten el mismo entorno (ver capítulo 2), dentro del contexto para el que se desarrolla el controlador de navegación, cada individuo se considera como un agente i dentro de un sistema compuesto por n agentes, así $N = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ representa el sistema en cuestión.

Este control, de naturaleza reactiva, procesa las señales que son percibidas del entorno para generar una serie de fuerzas atractivas y repulsivas, las cuales al ser procesadas, proveen referencias de aceleración \dot{v}_{x_i} , \dot{v}_{y_i} y velocidad traslacional v_{x_i} , v_{y_i} sobre un marco de referencia inercial, mediante dichas variables es posible llevar a cada agente desde su posición instantánea $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^T$ hasta una posición deseada $\mathbf{p}_{d_i} = [x_{d_i} \ y_{d_i}]^T$ dentro del mencionado marco de referencia.

Lo anterior se consigue tomando algunas consideraciones y realizando modificaciones al modelo de fuerza conductual, mediante técnicas de control basadas en distancia, de donde se toma la definición del error de posición del i -ésimo agente, es decir.

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} e_{x_i} \\ e_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d_i} - x_i \\ y_{d_i} - y_i \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Como el esquema de control propuesto está diseñado para su uso sobre sistemas multi-agente, se requiere que cada integrante del sistema vaya desde su posición instantánea hasta una deseada, situación por la cual se modifica (2.4) con base en el error de posición (3.1), con esto, el i -ésimo agente se mueve con una velocidad individual $v_i = [v_{x_i} \ v_{y_i}]$, misma que tiende a adaptarse a la velocidad deseada predefinida v_i^0 en un cierto tiempo característico τ_i , además de seguir la dirección trazada por el vector \mathbf{e}_i , que al conside-

rarse como la diferencia de posiciones deseada y actual, la trayectoria por seguir será una línea recta que inicie desde la posición instantánea \mathbf{p}_i del agente y terminará donde se coloquen las coordenadas del punto objetivo \mathbf{p}_{d_i} , de esta manera el algoritmo de control propuesto se describe como.

$$\dot{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \hat{\mathbf{e}}_i - \mathbf{v}_i) + \sum \mathbf{f}_{ij} + \sum \mathbf{f}_{iw} \quad (3.2)$$

Donde \mathbf{f}_{ij} representa las fuerzas de interacción entre agentes y \mathbf{f}_{iw} las fuerzas de reacción propiciadas por el entorno. Se propone considerar la velocidad deseada v_i^0 como constante, con lo cual, la velocidad se modula en función de la distancia existente hasta la posición deseada a través del vector \mathbf{e}_i cuya dirección se determina considerando como punto de partida la posición instantánea \mathbf{p}_i y como final la posición deseada \mathbf{p}_{d_i} , mientras que su magnitud representa la distancia entre ambos puntos, lo cual no es del todo conveniente ya que la velocidad será mayor cuando el robot se encuentre lejos de la posición final y descenderá a medida que se acerque a ella, situación que podría dar lugar a un desempeño insatisfactorio del robot debido a una convergencia lenta, [29], por lo cual se considera la normalización del vector de dirección $\hat{\mathbf{e}}_i$, como se muestra en la siguiente expresión.

$$\hat{\mathbf{e}}_i = \frac{\mathbf{e}_i}{\|\mathbf{e}_i\|} = \frac{[e_{x_i} \ e_{y_i}]^T}{\sqrt{e_{x_i}^2 + e_{y_i}^2}} \quad (3.3)$$

De este modo la velocidad se impone por la magnitud de v_i^0 que se mantiene durante el recorrido y es nula cuando se alcanza la posición deseada.

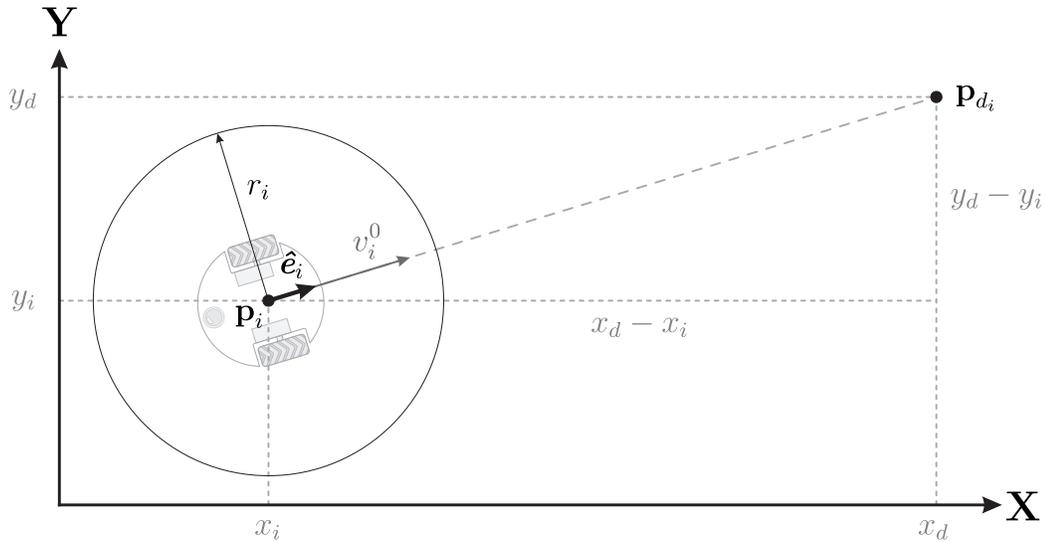


Figura 3.2: Trayectoria del agente hacia la posición deseada.

Para las fuerzas de interacción entre agentes \mathbf{f}_{ij} y con obstáculos \mathbf{f}_{iw} , descritas en el capítulo 2, se considera una tendencia en la que los individuos tratan de mantener cierta distancia en todo momento, que se caracteriza mediante una fuerza repulsiva $A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i]$, la cual tiene influencia incluso cuando se ha alcanzado la posición objetivo, por esta razón se descarta su contribución en el controlador de navegación propuesto. Así, las fuerzas de interacción entre agentes \mathbf{f}_{ij} se describen como.

$$\mathbf{f}_{ij} = k_i g(r_{ij} - d_{ij}) \mathbf{n}_{ij} - \kappa_i g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij} \quad (3.4)$$

Donde $d_{ij} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|$ denota la distancia entre los centros de giro de los agentes i y j , $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij,x}, n_{ij,y}) = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)/d_{ij}$ es un vector normalizado cuya dirección coincide con una línea que une a ambos agentes y su sentido es contrario a la posición del segundo agente, es decir, apunta desde el robot j hacia el i , mientras que el vector de dirección tangencial está dado por $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij,y}; n_{ij,x})$ como se muestra en la figura 3.3. Los términos $k_i g(r_{ij} - d_{ij})$ y $\kappa_i g(r_{ij} - d_{ij})$ representan fuerzas normales y tangenciales, respectivamente, estas fuerzas modulan la magnitud de los vectores \mathbf{n}_{ij} y \mathbf{t}_{ij} para generar cambios de dirección, además se considera la diferencia de sus velocidades tangenciales $\Delta v_{ij}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$, lo que permite una mejor reacción y giros rápidos dependiendo de la velocidad de aproximación.

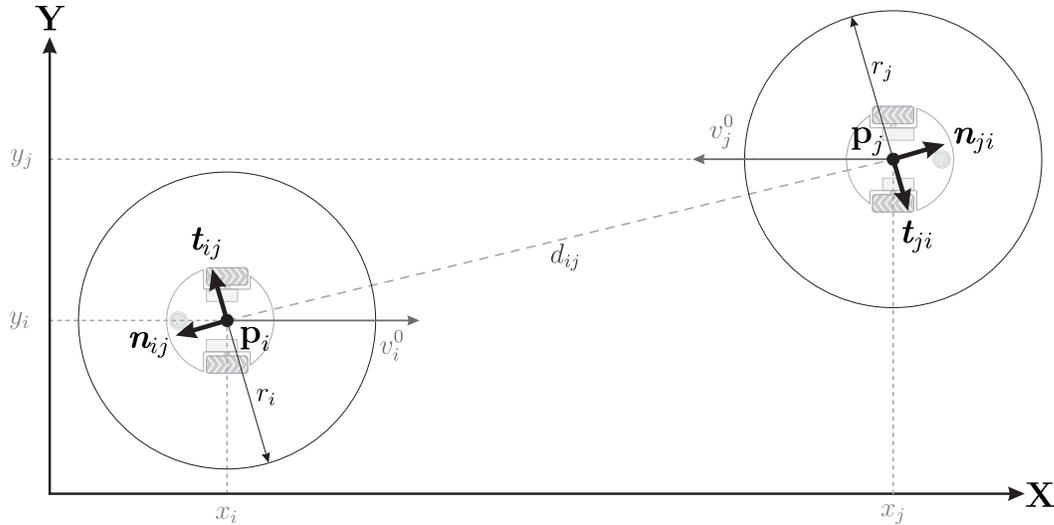


Figura 3.3: Variables involucradas en condiciones de interacción entra agentes.

Se considera que dos agentes interactúan entre sí con posibilidad de colisión, cuando su distancia d_{ij} es menor a $r_{ij} = (r_i + r_j)$, donde las variables sumadas corresponden al radio de las áreas de confort r_i y r_j que se prefieren libres.

Por otro lado, los términos \mathbf{f}_{iw} describen las fuerzas de interacción entre el i -ésimo agente con obstáculos estáticos o límites del entorno, lo cual se caracteriza como sigue.

$$\mathbf{f}_{iw} = k_i g(r_i - d_{iw}) \mathbf{n}_{iw} - \kappa_i g(r_i - d_{iw}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iw}) \mathbf{t}_{iw} \quad (3.5)$$

En la expresión (3.5) la distancia entre el agente i y un obstáculo w se denota como d_{iw} , mientras que \mathbf{n}_{iw} es el vector normalizado con dirección coincidente con la línea de detección del obstáculo y sentido contrario al mismo, por lo que apunta desde \mathbf{p}_w^0 hacia el centro de giro del agente i , finalmente \mathbf{t}_{iw} es el vector normalizado en dirección tangencial, lo que se muestra en la figura 3.4.

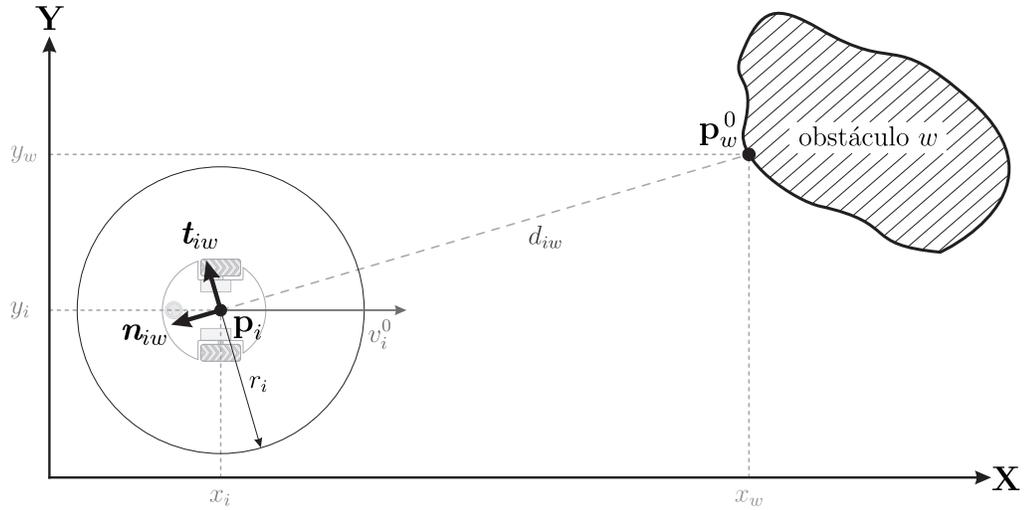


Figura 3.4: Variables involucradas en condiciones de evasión de obstáculos.

En las ecuaciones (3.4) y (3.5), k_i y κ_i son parámetros constantes positivos cuya combinación tiene influencia en las fuerzas normal y tangencial ya que modula su magnitud, mientras que la función $g(\cdot)$ es cero si no hay interacción con obstáculos estáticos ($d_{iw} > r_i$), dinámicos u otros agentes ($d_{ij} > r_{ij}$) y su argumento en caso contrario, por lo que se garantiza que las maniobras de evasión existan únicamente si se penetra el área de confort, en caso contrario se seguirá la trayectoria recta generada por medio del error de posición (3.2).

El componente normal depende de la dirección en la que se encuentra el obstáculo y controla la velocidad de avance del agente, mientras que el tangencial es responsable de la rotación, además que su contribución considera si el obstáculo es dinámico o estático, en (3.4) el término tangencial toma en cuenta la velocidad relativa de aproximación entre los agentes i y j , cuanto mayor sea, más notoria será la acción de giro, por otro lado, en (3.5) sólo se considera la velocidad de aproximación del agente al obstáculo.

3.2. Lazo de control interno

Este componente del sistema de control, se encarga de relacionar las variables entregadas por el lazo de control externo $(\dot{v}_{x_i}, \dot{v}_{y_i}, v_{x_i}, v_{y_i})$, para obtener valores de velocidad traslacional V_i y rotacional W_i , mediante las cuales el i -ésimo robot pueda ser controlado, [43].

Para lograr una correcta integración del modelo de fuerza conductual con el robot de tracción diferencial modelado a nivel cinemático (2.7), es necesario que la trayectoria a seguir, tenga ciertas características que sean compatibles con las restricciones propias del móvil (2.9) y que sea generada por medio de las variables que pueden ser determinadas dentro del sistema, como se indica en (3.6), [48].

$$S_i = [x_i, y_i, \theta_i, V_i, W_i]^T \quad (3.6)$$

Esto se soluciona al implementar una trayectoria suave, misma que puede ser definida mediante la generación sucesiva de coordenadas x, y dentro del marco inercial, donde la orientación siempre sea tangente a la trayectoria S_i . Una condición necesaria en el proceso de generación de trayectoria, es que ésta debe ser C^2 continua, esto es, debe ser dos veces diferenciable en cada punto, con lo que se hace posible el calculo de las variables de control.

Al suponer que la *postura* (posición y orientación) inicial del robot se encuentra sobre la trayectoria, además de un modelo cinemático perfecto y sin perturbaciones, es posible determinar la variable de velocidad lineal como sigue.

$$V_i^0 = v_{x_i} \cos(\theta_i) + v_{y_i} \sin(\theta_i) \quad (3.7)$$

Por otro lado, para garantizar el cumplimiento de la restricción no-holonómica (2.9), la velocidad angular se calcula a partir del ángulo tangente a cada punto del trayecto, es decir.

$$\vartheta_i = \arctan 2(v_{y_i}, v_{x_i}) \quad (3.8)$$

Donde $\arctan 2(\cdot)$ es la función tangente inversa que considera los cuatro cuadrantes para determinar un ángulo. Al calcular la derivada temporal de esta función se obtiene la expresión que regula la velocidad angular W_i^0 del robot, como se muestra a continuación.

$$W_i^0 = \frac{\dot{v}_{y_i} v_{x_i} - \dot{v}_{x_i} v_{y_i}}{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2} = V_i^0 \xi_i \quad (3.9)$$

Donde ξ_i representa la curvatura de la trayectoria seguida por el vehículo.

Bajo la consideraciones sobre las cuales se generan las variables de velocidades lineal V_i^0 y angular W_i^0 , se asegura que la trayectoria no implique desplazamientos perpendiculares a la dirección de avance del móvil.

Las expresiones (3.7) y (3.9) sirven como base para proponer las variables de control, se realizan algunas consideraciones que permiten una mayor flexibilidad del sistema al trabajar con el modelo de fuerza conductual, así como para la correcta realización de la prueba de estabilidad. Con esto, la variable de control V_i se propone como sigue.

$$V_i = k_{v_i} [v_{x_i} \cos(\theta_i) + v_{y_i} \sin(\theta_i)] \quad (3.10)$$

Donde k_{v_i} es una ganancia constante positiva que posibilita la regulación de la velocidad con que se desplaza el móvil, sin embargo, aún se requiere generar un perfil de velocidad angular apropiado que permita alcanzar la posición cartesiana deseada.

En el trabajo de [7], se establece que un sistema no-holonómico solo puede ser controlado mediante cierto tipo de leyes de control, por lo cual, para sobrepasar esta restricción, la estructura de la variable que controla la velocidad angular del dispositivo, se basa en estrategias de control por retroalimentación no-lineales variantes en el tiempo, las cuales fueron desarrolladas en [16], así como en [44].

Esto permite controlar al robot desde su centro de giro, más aún, permite orientarlo hacia una dirección preestablecida θ_{d_i} , mediante la introducción del error de orientación $e_{\theta_i} = [\theta_i - \theta_{d_i}]$, de manera que la variable de control W_i se propone como.

$$W_i = k_{a_i} \left[\left(\frac{\dot{v}_{y_i} v_{x_i} - \dot{v}_{x_i} v_{y_i}}{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + \varepsilon} \right) \sin_c(e_{\theta_i}) - k_{t_i} e_{\theta_i} \right] \quad (3.11)$$

Donde k_{a_i} y k_{t_i} son ganancias positivas, la primera como en el caso de la velocidad lineal, modula la acción completa de la variable de control, la segunda por otro lado, induce un efecto de amortiguamiento cuando el robot se orienta al valor deseado, es decir, controla la forma, tiempo e intensidad con que se busca la referencia; también se introduce el parámetro positivo $\varepsilon \approx 0$ para evitar la singularidad cuando las componentes de velocidad v_{x_i} y v_{y_i} sean cero, [42].

En tal caso, si $V_i = 0$, el robot se mantiene girando sobre un punto fijo con velocidad angular igual a W_i . Finalmente se considera $\sin_c(\cdot)$ como la función seno cardinal (3.12), que permite al sistema mostrar respuestas adecuadas incluso cuando se está muy cerca del parámetro de orientación deseado θ_{d_i} , con lo que la componente de control W_i está correctamente definida, [44].

$$\sin_c(\gamma) = \begin{cases} 1 & \text{si } \gamma = 0 \\ \frac{\sin(\gamma)}{\gamma} & \forall \gamma \neq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Con los resultados de (3.2), (3.10) y (3.11), es posible controlar al i -ésimo agente usando el modelo de fuerza conductual descrito en el Capítulo 2, obteniendo una orientación deseada al final del recorrido.

3.3. Análisis de estabilidad por el método de Lyapunov para el caso libre de colisiones

En esta sección se analizan las propiedades de estabilidad en el sentido de Lyapunov para el sistema en lazo cerrado conformado por el modelo cinemático (2.7) y el controlador de navegación autónoma propuesto (3.2), (3.10), (3.11), mismo que es basado en el modelo de fuerza conductual descrito en el Capítulo 2. Se considera un ambiente libre de colisiones, es decir, con (3.4) y (3.5) iguales a cero, debido a que sus características varían de acuerdo a cada situación posible y su contribución es nula cuando no existen interacciones. Para esto se obtiene el sistema en espacio de estados que se muestra a continuación.

$$\mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x_i} \\ e_{y_i} \\ e_{\theta_i} \\ v_{x_i} \\ v_{y_i} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Al considerar la derivada temporal de (3.13) y sustituyendo el valor de cada variable, se encuentra que el sistema en lazo cerrado está descrito por.

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1_i} &= -k_v [z_{4_i} \cos^2(\theta_i) + z_{5_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)] \\ \dot{z}_{2_i} &= -k_v [z_{4_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) + z_{5_i} \sin^2(\theta_i)] \\ \dot{z}_{3_i} &= k_{a_i} \left[\left(\frac{\dot{z}_{5_i} z_{4_i} - \dot{z}_{4_i} z_{5_i}}{z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2 + \varepsilon} \right) \frac{\sin(z_{3_i})}{z_{3_i}} - k_{t_i} z_{3_i} \right] \\ \dot{z}_{4_i} &= \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{1_i} - z_{4_i}) \\ \dot{z}_{5_i} &= \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{2_i} - z_{5_i}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

El método de Lyapunov establece que un sistema es asintóticamente estable si existe una función escalar V del estado \mathbf{z}_i , con derivada de primer orden continua \dot{V} , tales que satisfagan las siguientes condiciones, [49].

- La función candidata debe ser definida positiva $V(\mathbf{z}_i) > 0$ y cero en el origen, es decir, $V(0) = 0$.
- La derivada temporal de la función candidata debe ser definida negativa $\dot{V}(\mathbf{z}_i) < 0$ y cero en el origen, es decir, $\dot{V}(0) = 0$.

Partiendo del sistema descrito por (3.14), es posible determinar que el esquema de control, conformado por el bloque de *control externo* (3.2) y el bloque de *control interno* (3.10), (3.11), asegura la convergencia asintótica para el posicionamiento y orientación en el sentido descrito por (3.15).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{x_i}(t), e_{y_i}(t), e_{\theta_i}(t) = 0 \quad (3.15)$$

Para probar lo anterior, se propone una función candidata de Lyapunov definida positiva, denotada por $V(\mathbf{z}_i)$, en este caso la siguiente función cuadrática.

$$V = \frac{1}{2} z_{1_i}^2 + \frac{1}{2} z_{2_i}^2 + \frac{1}{2} z_{3_i}^2 + \frac{1}{2} z_{4_i}^2 + \frac{1}{2} z_{5_i}^2 \quad (3.16)$$

Se considera ahora la derivada temporal de (3.16), es decir.

$$\dot{V} = z_{1_i} \dot{z}_{1_i} + z_{2_i} \dot{z}_{2_i} + z_{3_i} \dot{z}_{3_i} + z_{4_i} \dot{z}_{4_i} + z_{5_i} \dot{z}_{5_i} \quad (3.17)$$

Al sustituir el valor de las variables del sistema en lazo cerrado (3.14), se obtiene la siguiente igualdad.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -z_{1_i} \left\{ k_{v_i} \left[z_{4_i} \cos^2(\theta_i) + z_{5_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \right] \right\} \\ & -z_{2_i} \left\{ k_{v_i} \left[z_{4_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) + z_{5_i} \sin^2(\theta_i) \right] \right\} \\ & + z_{3_i} \left\{ k_{a_i} \left[\left(\frac{\frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{2_i} - z_{5_i}) z_{4_i} - \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{1_i} - z_{4_i}) z_{5_i}}{z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2 + \varepsilon} \right) \frac{\sin(z_{3_i})}{z_{3_i}} - k_{t_i} z_{3_i} \right] \right\} \\ & + z_{4_i} \left[\frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{1_i} - z_{4_i}) \right] + z_{5_i} \left[\frac{1}{\tau_i} (v_i^0 z_{2_i} - z_{5_i}) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Después de realizar las operaciones pertinentes y agrupar términos semejantes, se obtiene la expresión (3.19), mediante la cual aún no es posible llegar a una conclusión satisfactoria respecto a la estabilidad del sistema, particularmente porque se obtienen términos cruzados que impiden garantizar las condiciones impuestas por el método de Lyapunov, enumeradas anteriormente.

$$\begin{aligned}
\dot{V} = & \left[\frac{v_i^0}{\tau_i} - k_{v_i} \cos^2(\theta_i) \right] z_{1_i} z_{4_i} + \left[\frac{v_i^0}{\tau_i} - k_{v_i} \sin^2(\theta_i) \right] z_{2_i} z_{5_i} \\
& + \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 \sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} - k_{v_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \right] z_{2_i} z_{4_i} - \frac{1}{\tau_i} z_{4_i}^2 - \frac{1}{\tau_i} z_{5_i}^2 \\
& - \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 \sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} + k_{v_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \right] z_{1_i} z_{5_i} - k_{a_i} k_{t_i} z_{3_i}^2 \quad (3.19)
\end{aligned}$$

Con la finalidad de acotar los términos cruzados resultantes en (3.19), se consideran las propiedades del binomio cuadrado mostradas a continuación.

$$(a + b)^2 \geq 0 \quad ; \quad -\frac{1}{2} (a^2 + b^2) \leq ab \quad (3.20)$$

Al incorporar las propiedades mencionadas al desarrollo de la prueba de estabilidad, se obtiene la desigualdad (3.21), que restringe los valores que puede tomar la variable \dot{V} además de que permite operar con términos cuadráticos, situación favorable, puesto que su signo será siempre positivo.

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & -\frac{1}{2} \left[\frac{v_i^0}{\tau_i} - k_{v_i} \cos^2(\theta_i) \right] (z_{1_i}^2 + z_{4_i}^2) - \frac{1}{2} \left[\frac{v_i^0}{\tau_i} - k_{v_i} \sin^2(\theta_i) \right] (z_{2_i}^2 + z_{5_i}^2) \\
& - \frac{1}{2} \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 \sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} - k_{v_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \right] (z_{2_i}^2 + z_{4_i}^2) - \frac{1}{\tau_i} z_{4_i}^2 - \frac{1}{\tau_i} z_{5_i}^2 \\
& + \frac{1}{2} \left[\frac{k_{a_i} v_i^0 \sin(z_{3_i})}{\tau_i(\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2)} + k_{v_i} \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \right] (z_{1_i}^2 + z_{5_i}^2) - k_{a_i} k_{t_i} z_{3_i}^2 \quad (3.21)
\end{aligned}$$

Realizando el desarrollo aritmético correspondiente se obtiene la siguiente expresión.

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & -k_{a_i} k_{t_i} z_3^2 - \frac{1}{\tau_i} z_{4_i}^2 - \frac{1}{\tau_i} z_{5_i}^2 \\
& + \frac{1}{2} \left\{ k_{v_i} [\cos^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)] - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left[1 - \frac{k_{a_i} \sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2} \right] \right\} z_{1_i}^2 \\
& + \frac{1}{2} \left\{ k_{v_i} [\sin^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)] - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left[1 + \frac{k_{a_i} \sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2} \right] \right\} z_{2_i}^2 \\
& + \frac{1}{2} \left\{ k_{v_i} [\cos^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)] - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left[1 + \frac{k_{a_i} \sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2} \right] \right\} z_{4_i}^2 \\
& + \frac{1}{2} \left\{ k_{v_i} [\sin^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)] - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left[1 - \frac{k_{a_i} \sin(z_{3_i})}{\varepsilon + z_{4_i}^2 + z_{5_i}^2} \right] \right\} z_{5_i}^2 \quad (3.22)
\end{aligned}$$

Considerando las funciones trigonométricas en (3.22), se determina que sus posibles valores están acotados por $-1 \leq \sin(z_{3_i}) \leq 1$, $-0.2 \leq \cos^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \leq 1.2$, como se muestra en la figura 3.5a y $-0.2 \leq \sin^2(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) \leq 1.2$, en la figura 3.5b.

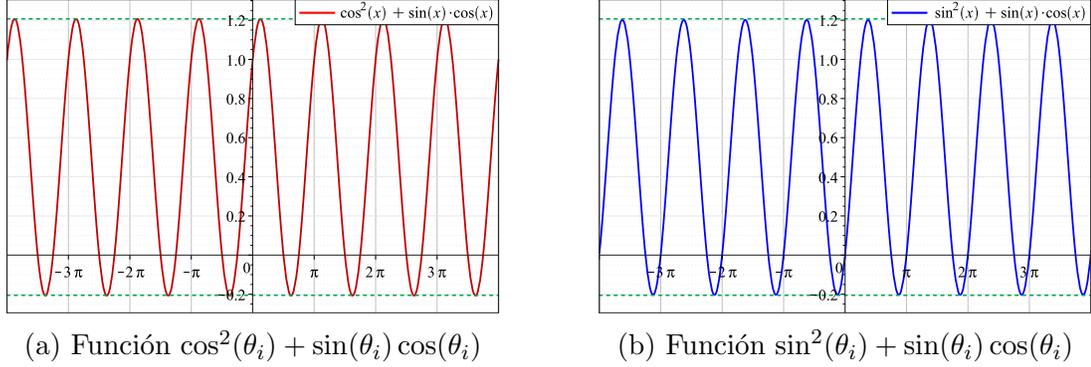


Figura 3.5: Valores máximos y mínimos de las funciones trigonométricas.

Para determinar las condiciones bajo las cuales se pueda asegurar la estabilidad del sistema, se toman los valores que induzcan el peor escenario posible, incluyendo $v_{x_i} = v_{y_i} = 0$, con lo que la función resultante es descrita por.

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & \left\{ \frac{1}{2} \left[1.2k_{v_i} - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left(1 - \frac{k_{a_i}}{\varepsilon} \right) \right] \right\} (z_{1_i}^2 + z_{4_i}^2) - k_{a_i} k_{t_i} z_3^2 - \frac{1}{\tau_i} z_{4_i}^2 \\
& + \left\{ \frac{1}{2} \left[1.2k_{v_i} - \frac{v_i^0}{\tau_i} \left(1 + \frac{k_{a_i}}{\varepsilon} \right) \right] \right\} (z_{2_i}^2 + z_{5_i}^2) - \frac{1}{\tau_i} z_{5_i}^2 \quad (3.23)
\end{aligned}$$

Dado que el origen $\dot{z}_{n_i}(0) = 0$ con $1 \leq n \leq 5$ en (3.14), es un punto de equilibrio para el sistema en lazo cerrado, es posible garantizar la estabilidad asintótica del sistema si se satisfacen las siguientes restricciones.

$$0 < \frac{k_{a_i}}{\varepsilon} < 1 \quad \frac{v_i^0}{\tau_i} > \frac{1.2k_{v_i}}{1 + \frac{k_{a_i}}{\varepsilon}} \quad \text{con} \quad k_{a_i}, k_{v_i}, \varepsilon, v_i^0, \tau_i > 0 \quad (3.24)$$

Estas condiciones aseguran que \dot{V} es definida negativa, de esta forma mediante la teoría de Lyapunov se puede concluir que el sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable.

La primera condición es una aproximación muy conservadora para asegurar la estabilidad, sin embargo la segunda desigualdad considera un espectro mucho más amplio de valores posibles para cada variable, mientras sigue garantizando la convergencia asintótica del sistema.

El análisis de estabilidad para los casos donde existe interacción con obstáculos dinámicos, estáticos u otros agentes no se desarrolla, pues las fuerzas de reacción son distintas para cada situación de posible colisión, esto expone la importancia de una correcta sintonización de las ganancias k_i y κ_i en las expresiones (2.5) y (2.6), pues con ello se asegura que las fuerzas repulsivas sean suficientes para producir giros rápidos y evitar colisiones.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos del presente trabajo es realizar la validación y comprobar el funcionamiento de la estrategia de control de navegación autónoma descrita en el Capítulo 3, sobre una plataforma experimental; lo anterior permitirá comprobar si el controlador es capaz de superar condiciones de navegación reales, que son difíciles de predecir y están presentes en un entorno físico.

La plataforma experimental desarrollada se conforma por una serie de robots diferenciales, cada uno de ellos presenta características físicas casi idénticas, por lo que los componentes utilizados para su construcción así como la programación necesaria para su operación son iguales en todos los casos.

Las posibles diferencias de funcionamiento entre los móviles provienen de las características propias de cada uno de los elementos mecánicos y electrónicos utilizados para su construcción, donde las variaciones presentes en motores y sensores son las que pueden ocasionar las discrepancias más notorias, con lo que la importancia de una correcta calibración se hace evidente.

En las siguientes secciones, se detallan los componentes utilizados para su construcción, así como las características programadas que se integran en los mecanismos.

4.1. Componentes

Una de las principales consideraciones tomadas para la construcción de la plataforma fue el espacio de trabajo disponible, dado que no es muy extenso, se optó por utilizar robots de tamaño reducido de modo que la experimentación fuera fácilmente realizable. Considerando lo anterior cada robot se basa en un chasis de aluminio con las siguientes características físicas.

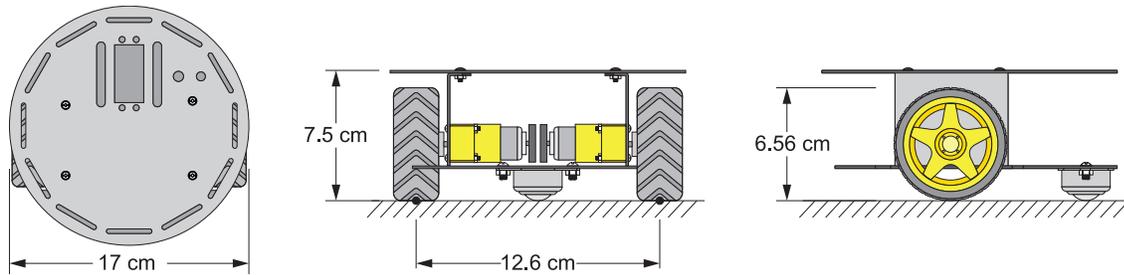


Figura 4.1: Chasis del robot.

4.1.1. Sistema de potencia

Se compone por diferentes elementos cuya finalidad conjunta es brindar al robot la capacidad de desplazarse. Los motores utilizados se alimentan mediante corriente directa (CD), cuentan con un encoder incremental acoplado directamente a su eje, el cual funciona mediante el principio de *efecto Hall*, este dispositivo se utiliza para detectar el cambio de posición angular del eje e incluso para determinar la velocidad de giro de los motores. Cuenta con ruedas de goma además de una rueda pasiva omnidireccional que le permite mantener el balance. En la tabla 4.1, se muestran las principales características de estos dispositivos.

Tabla 4.1: Características de los motores

Característica	Valor nominal (6V)
Relación de transmisión	1:120
Velocidad sin carga (6V)	200 [RPM]
Corriente sin carga (6V)	71 [mA]
Par torsional	1.92 [Kgcm]
Sensibilidad del encoder	1920* [pulsos/rev]

*Considerando la relación de transmisión

Es posible controlar la velocidad de un motor de CD simplemente regulando la entrada de voltaje que le es aplicado, uno de los métodos más utilizados para conseguirlo se basa

en la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), la cual permite ajustar el valor promedio del voltaje que alimenta al dispositivo eléctrico simplemente encendiendo y apagando la señal original con una frecuencia determinada, el voltaje promedio obtenido depende del ciclo de operación, es decir, se realiza una comparación entre el tiempo que la señal permanece encendida contra el tiempo que se encuentra apagada durante un periodo de muestreo, como se visualiza en la figura 4.2.

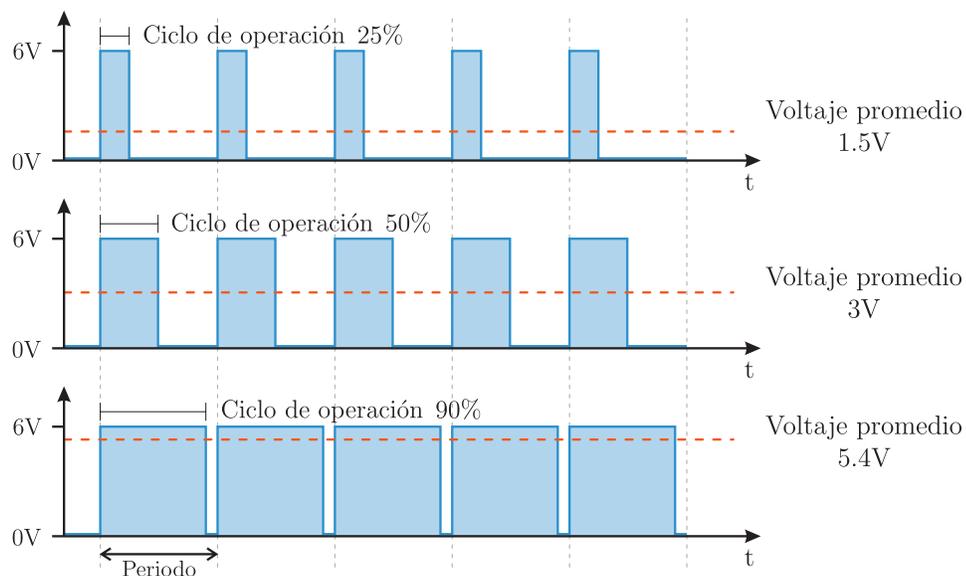


Figura 4.2: Técnica de modulación de ancho de pulso (PWM).

Por otro lado, para controlar el sentido de rotación del eje, solamente se requiere invertir la dirección del flujo de corriente hacia el motor, es decir, invertir su polaridad; el método mas común de hacerlo es mediante el uso de un circuito *punte H*.

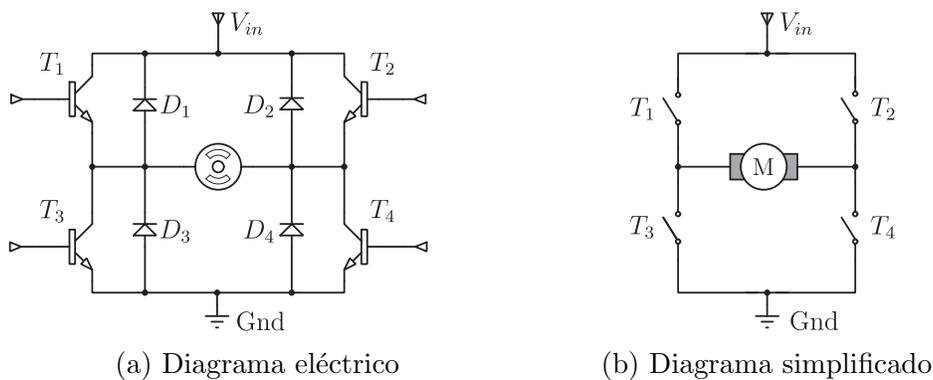


Figura 4.3: Diagrama de circuito puente H.

Este circuito está constituido por diferentes componentes electrónicos, donde el funcionamiento depende principalmente de cuatro elementos que sirven como interruptores; es usual que se incorporen transistores para realizar dicha tarea, ya que soportan altas frecuencias de conmutación, además que su vida útil es larga en comparación con otro tipo de componentes, es su disposición física en forma de H con el motor al centro del arreglo lo que le da su nombre característico, esto puede observarse en la figura 4.3.

El sentido de giro del motor se controla mediante la activación de dos interruptores de forma simultánea, es importante notar que sólo una serie de combinaciones producirá estados de funcionamiento útil, de hecho algunas de ellas deben evitarse pues pueden ocasionar corto circuito; en la tabla 4.2, se muestran los estados deseables.

Tabla 4.2: Estados útiles y su combinación de interruptores.

Funcionamiento	Interruptor			
	T_1	T_2	T_3	T_4
Giro del motor en sentido horario	1	0	0	1
Giro del motor en sentido antihorario	0	1	1	0
Frenado por inercia	0	0	0	0
Frenado rápido	1	1	0	0

Estas condiciones se muestran gráficamente en la figura 4.4, obviando el frenado por inercia, donde los cuatro interruptores permanecen inalterados.

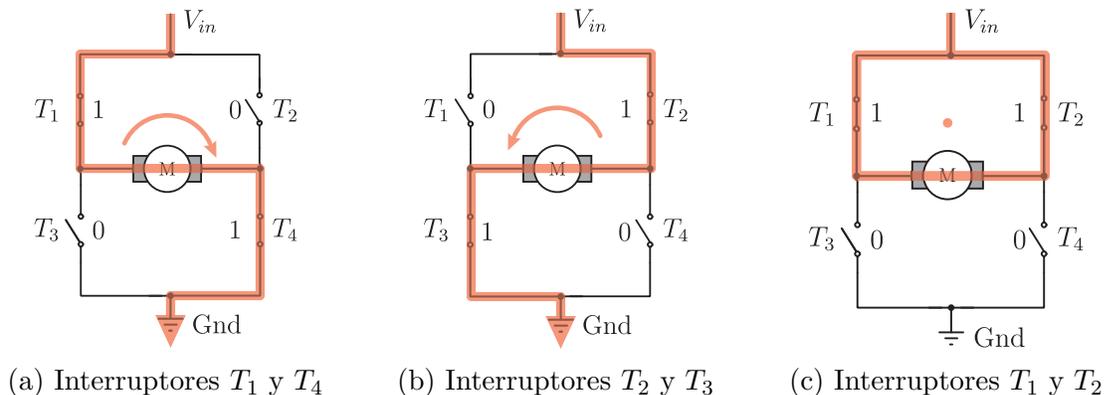


Figura 4.4: Condiciones de accionamiento, circuito puente H.

Mediante el módulo puente H, se tiene un control completo del motor, ya que combina las ventajas que proporciona utilizar una señal producida mediante la técnica de PWM

y la posibilidad de invertir el sentido de giro; existen diferentes dispositivos que cuentan con ambas características, siendo el módulo L298N, ver figura 4.5, el elegido para este caso particular, debido a que permite controlar dos motores de manera independiente.

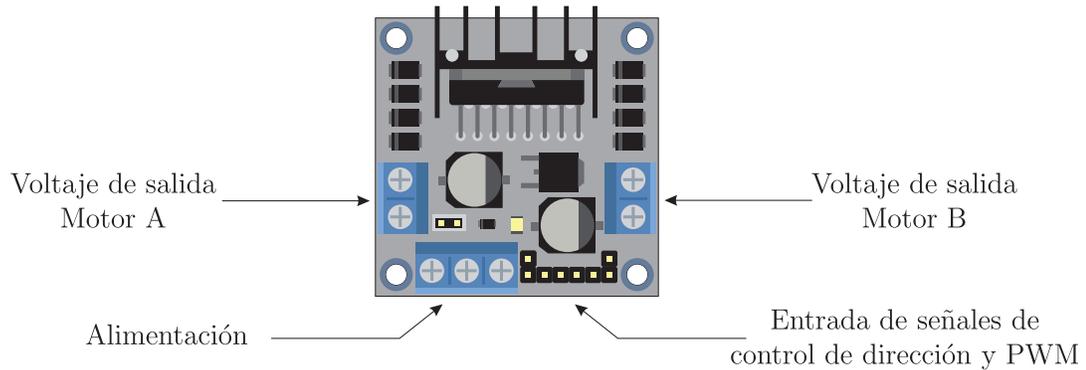


Figura 4.5: Módulo puente H (L298N).

Del cual se destacan las características enlistadas en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Características del módulo puente H L298N.

Característica	Valor nominal
Circuito integrado principal	L298N
Corriente de operación	2 [A]
Corriente pico	4 [A]
Voltaje admitido	6 - 35* [V]

*Con configuración y alimentación adecuadas

4.1.2. Sistema de percepción

Para poder realizar la implementación del controlador, es necesario que el robot sea capaz de percibir información del entorno, particularmente si existen obstáculos a una distancia determinada que representa el área de confort de un individuo; la medición de esta distancia debe ser precisa, pues de ello depende el correcto funcionamiento del algoritmo de control.

Para conseguir lo anterior, se optó por colocar una serie de sensores infrarrojos alrededor del eje de giro del robot, los cuales se ubican manteniendo una separación constante y ángulos de orientación conocidos, lo que permite conocer la posición relativa de cada

obstáculo con respecto a la dirección de avance del móvil. Lo cual es posible debido a que la percepción de este tipo de sensores es dirigida, es decir, no hay un área de detección, sino sólo un punto.

Su funcionamiento se basa en el principio de triangulación de la luz, ver figura 4.6, el cual consiste en emitir un haz dirigido, en este caso de luz infrarroja, que al hacer contacto con la superficie de un objeto regresa hasta el sensor con cierto ángulo, mismo que varía dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto, finalmente la luz es captada por una película fotosensible que proporciona un valor analógico a la salida en función de la posición en la que incide el rayo de luz, [47].

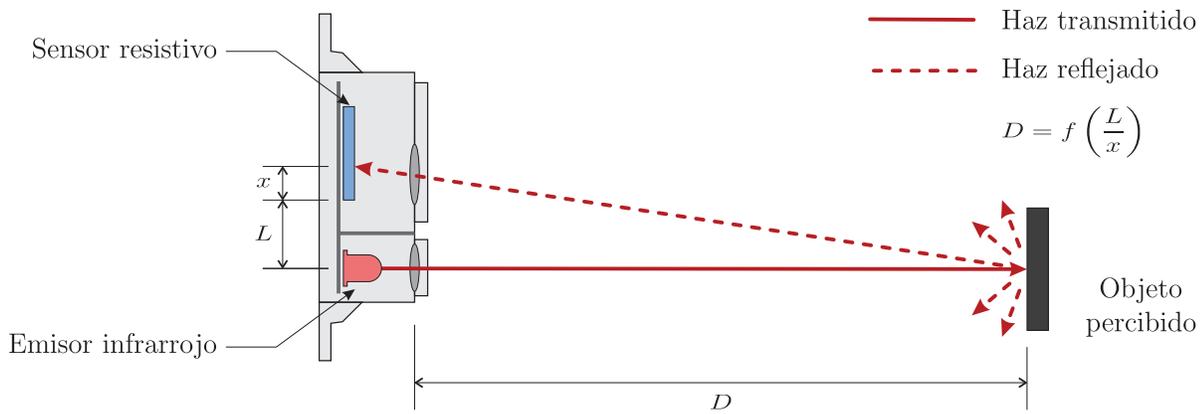


Figura 4.6: Principio de funcionamiento de un sensor de proximidad infrarrojo.

El sensor de proximidad infrarrojo utilizado es de la marca SHARP, modelo GP2Y0A02 ver figura 4.7, el cual se eligió debido a que además de contar con las características antes mencionadas, posee un rango de detección que resulta adecuado, considerando las dimensiones del robot.

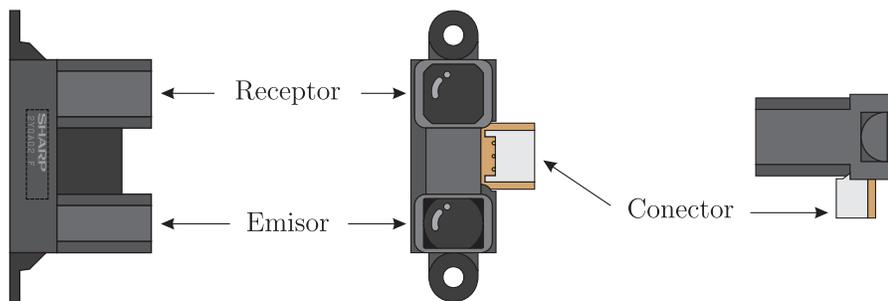


Figura 4.7: Sensor de proximidad SHARP GP2Y0A02.

En la tabla 4.4, se muestran las principales características del dispositivo.

Tabla 4.4: Características del sensor de proximidad SHARP GP2Y0A02.

Característica	Valor nominal	
Rango de medición	0.2 - 1.5	[m]
Voltaje de operación	4.5 - 5.5	[V]
Voltaje de salida	0.25 - 0.55	[V]
Consumo de corriente	33	[mA]

La señal entregada por estos sensores generalmente se ve afectada por pequeñas perturbaciones debidas a “ruido”, por lo cual debe aplicarse algún tipo de filtrado que permita obtener resultados confiables en la medición; por otro lado, su curva de respuesta no es lineal, por ello se requiere implementar algún método que convierta los datos obtenidos en valores de distancia.

Entre los más comunes se encuentra el cálculo de una curva de ajuste que se asemeje a la curva de respuesta del sensor, generalmente basada en funciones exponenciales o polinomiales, la segunda alternativa es utilizar tablas de consulta donde los valores de salida corresponden a una determinada distancia.

Para este trabajo se optó por una tabla de consulta en conjunción con interpolaciones lineales, puesto que los cálculos a considerar son sencillos y requieren menor tiempo de procesamiento.

Para el montaje de los sensores sobre el robot, se diseñó y fabricó un soporte en aluminio, ver figura 4.8, el cual asegura que se conserve la posición establecida y facilita su colocación en los ángulos requeridos.

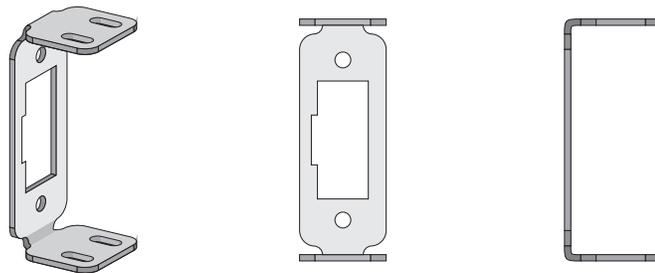


Figura 4.8: Soporte para el montaje de sensores.

El posicionamiento físico de los sensores sobre la plataforma se muestra en la figura 4.9, donde se observan 12 sensores distribuidos con intervalos uniformes de $\pi/7$ [rad] (25.71°) de separación sobre la circunferencia del chasis.

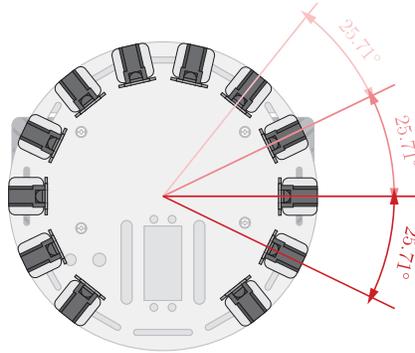


Figura 4.9: Distribución física de los sensores sobre el chasis.

4.1.3. Unidad de control

Una característica importante del sistema de control, es que se realiza de manera descentralizada, es decir, no existe un controlador global que dirija a todos los agentes, por el contrario, se dota a cada uno de ellos con capacidad de procesamiento propia mediante una tarjeta de desarrollo incorporada en la estructura física del robot.

Contemplando los requerimientos de procesamiento y el número de sensores que se desean montar al dispositivo, se optó por utilizar la tarjeta Arduino DUE, cuyo esquema se muestra en la figura 4.10.

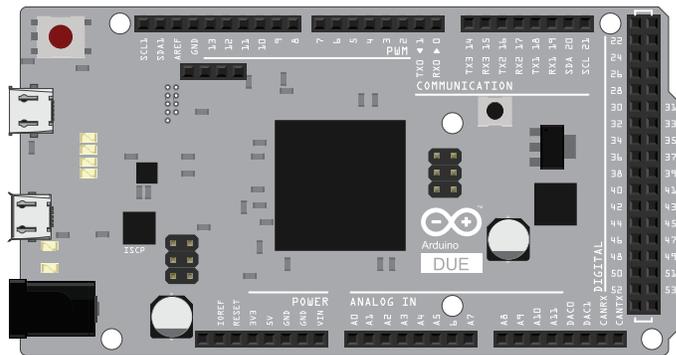


Figura 4.10: Tarjeta de desarrollo Arduino DUE.

Esta tarjeta exhibe diversas características que resultan útiles para la correcta implementación del controlador propuesto, algunas de las cuales se enlistan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Características de la tarjeta de desarrollo Arduino DUE.

Característica	Valor nominal
Voltaje de operación	3.3 [V]
Corriente de salida	800 [mA]
Microcontrolador	ARM 32bit
Entradas analógicas	12
Salidas PWM	12
Resolución PWM	12bit
Resolución ADC	12bit

Para energizar al mecanismo se utilizan dos baterías de polímero de litio (LI-PO), ambas entregan 7.4V y una corriente máxima de 1.3A, lo cual es suficiente para satisfacer el consumo de los diferentes componentes utilizados; una de ellas alimenta a los sistemas de percepción y control, mientras la segunda se encarga de brindar energía al sistema de potencia.

En la figura 4.11, se muestra un diagrama a bloques que detalla la conexión de cada componente para conformar el mecanismo.

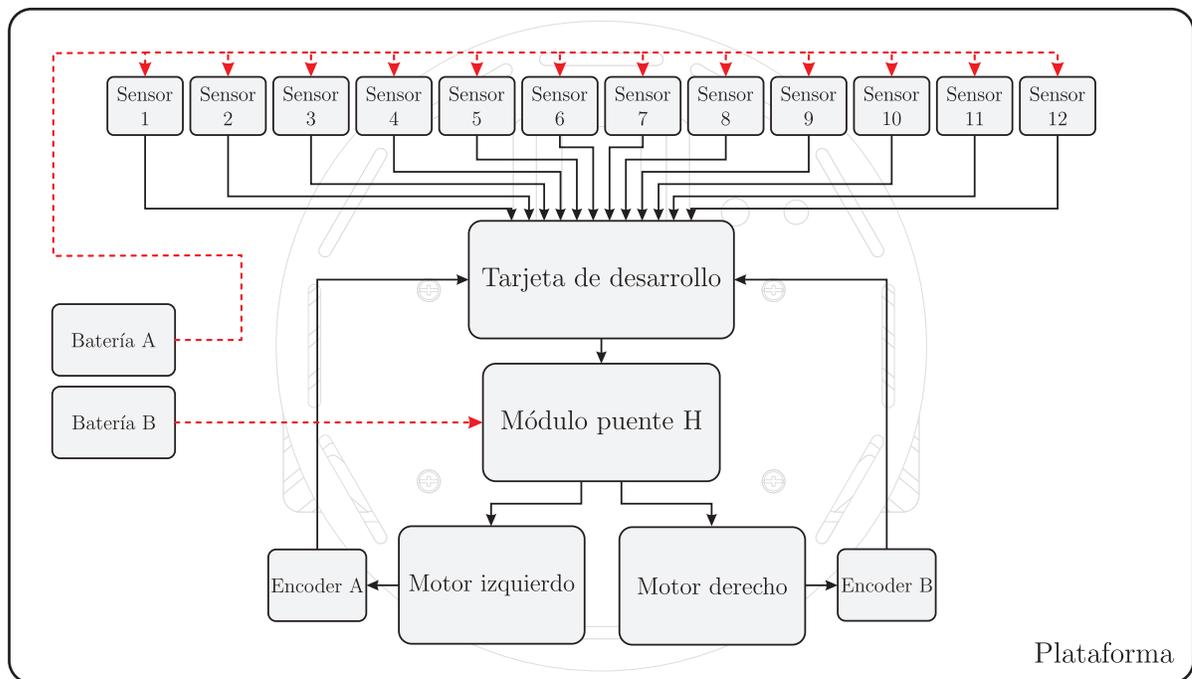


Figura 4.11: Diagrama de bloques del mecanismo.

4.2. Características programadas

Para tener certeza de que los dispositivos físicos incorporados al móvil funcionen de manera correcta, coordinada y lograr que el comportamiento programado, comandado por el modelo de fuerza conductual, se desarrolle satisfactoriamente, es necesario dotar al robot con las siguientes capacidades.

- Interpretar las variables de velocidad traslacional y rotacional producidas por el lazo de control interno, mediante el control de bajo nivel.
- Determinar la postura del vehículo y utilizar las variables de posición y orientación para realizar la retroalimentación al controlador.
- Regular la velocidad angular de ambas ruedas de forma independiente.
- Emular el área de confort con la mayor precisión posible, para que las acciones evasivas se desarrollen correctamente.

Lo cual se consigue mediante la programación de diversos módulos, que se encarguen de cada una de las tareas mencionadas anteriormente, los cuales se describen en las siguientes secciones.

4.2.1. Control de bajo nivel

Debido a que el robot utilizado es de configuración diferencial, a su construcción y a los diferentes componentes incorporados, físicamente sólo es posible modular la velocidad angular de cada una de las ruedas mediante la generación de señales PWM, así como determinar su dirección de giro.

Por lo anterior, es necesario programar un módulo de control que se encargue de generar automáticamente las señales necesarias para cambiar la velocidad y dirección de cada rueda, a partir de valores de velocidad traslacional y rotacional.

Para ello, es necesario realizar un análisis que permita determinar la relación existente entre las velocidades angulares de las ruedas así como la coordinación requerida para establecer una trayectoria de avance definida.

Para que este tipo de robot móvil desarrolle trayectorias rectas, es necesario que ambas ruedas tengan la misma velocidad de avance, es decir, $v_l = v_r$, donde los sub-índices l y r hacen referencia a las ruedas izquierda y derecha, respectivamente, ver figura 4.12, estas variables se obtienen mediante la multiplicación de las velocidades angulares $\dot{\varphi}_l$ y $\dot{\varphi}_r$, por el radio nominal de las ruedas r_w .

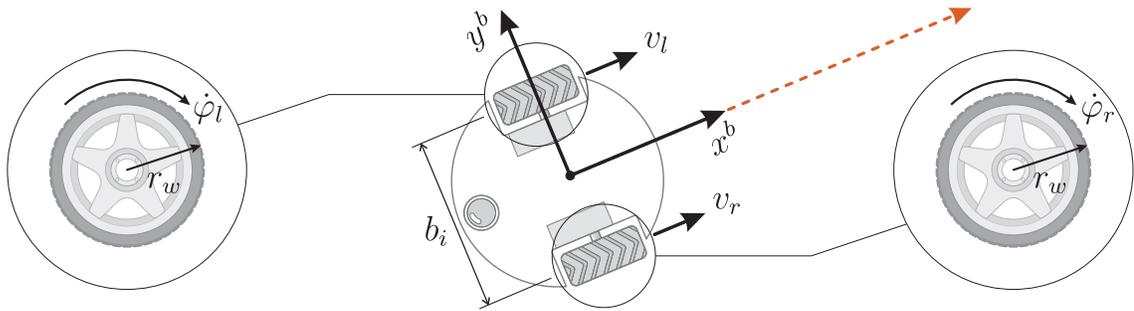


Figura 4.12: Trayectoria recta.

Por otro lado, para generar un desplazamiento que describa una trayectoria curva, se requiere que las ruedas tengan velocidades de avance distintas, ver figura 4.13, donde la magnitud del arco descrito depende directamente de dicha diferencia.

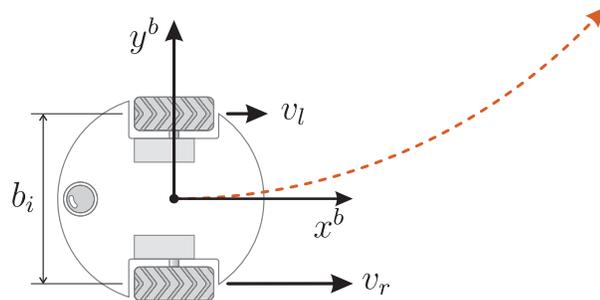


Figura 4.13: Trayectoria curva.

En las figuras 4.12 y 4.13, x^b y y^b , corresponden a los ejes de un marco de referencia local (ejes de cuerpo), que tiene como origen el centro de giro del móvil, mientras que b_i representa la distancia entre los puntos de contacto de cada rueda con la superficie.

Una trayectoria curva se puede caracterizar considerando como radio de giro una línea extendida sobre el eje de las ruedas hasta un punto en el espacio llamado *Centro de Rotación Instantáneo* (CRI), el cual se identifica mediante los arcos trazados por cada una de las ruedas, pues es el punto central que se obtiene cuando dichos arcos son concéntricos, además, en el CRI, se desarrolla una velocidad angular con idéntica magnitud respecto a ambas ruedas en un instante de tiempo determinado, ver figura 4.14

La línea que conecta al CRI con el centro de giro del robot, se denomina *radio de curvatura instantáneo* R_i , cuya longitud se considera infinita para el caso de trayectorias rectas y cero cuando el robot rota sobre su propio eje; de esta forma, cuando su valor cambia a lo largo del tiempo, es posible describir cualquier trayectoria sobre el plano.

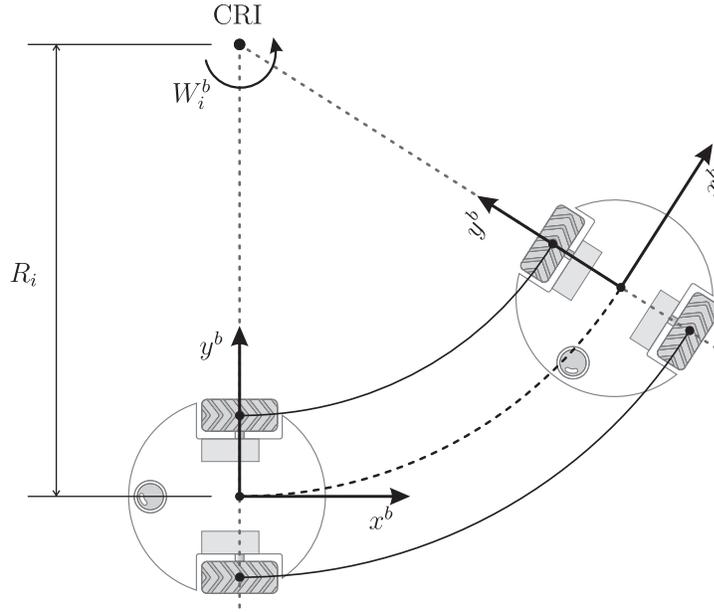


Figura 4.14: Localización del centro de rotación instantáneo (CRI).

Es inmediato notar que a medida que el robot describe una trayectoria curva, su orientación también se modifica, esto se debe a la restricción no-holonómica (2.9) a la que este tipo de móviles está sometido.

Con base en lo anterior, es posible determinar, por medios analíticos, la relación entre las diferentes variables descritas y el comportamiento del robot diferencial. Para el caso de la velocidad angular W_i^b , se considera que el móvil describe una rotación alrededor de su CRI manteniendo constante su velocidad, es importante resaltar que el CRI se encuentra a una distancia R_i del centro del móvil y su magnitud cambia dependiendo del arco que se trace como trayectoria; con esto se puede establecer la siguiente relación.

$$W_i^b = \frac{v_l}{R_i - \frac{b_i}{2}} = \frac{v_r}{R_i + \frac{b_i}{2}} \quad (4.1)$$

Partiendo de (4.1), es posible deducir expresiones que relacionan a las variables R_i y W_i^b del móvil con las velocidades lineales y angulares de cada rueda, como se muestra a continuación.

$$W_i^b = \frac{1}{b_i}(v_r - v_l) = \frac{r_w}{b_i}(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l) \quad (4.2)$$

$$R_i = \frac{b_i}{2} \frac{(v_r + v_l)}{(v_r - v_l)} = \frac{b_i}{2} \frac{(\dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_l)}{(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l)} \quad (4.3)$$

Mediante las expresiones (4.2) y (4.3) se determina la velocidad lineal del vehículo V_i^b en función de las variables de velocidad, como sigue.

$$V_i^b = W_i^b R_i = \frac{1}{2}(v_l + v_r) = \frac{r_w}{2}(\dot{\varphi}_l + \dot{\varphi}_r) \quad (4.4)$$

Finalmente, igualando las expresiones (4.2) y (4.4), se encuentra la relación existente entre las entradas de control V_i y W_i que permite generar las velocidades angulares $\dot{\varphi}_l^*$ y $\dot{\varphi}_r^*$ a las que debe girar cada rueda, lo que se muestra en las expresiones siguientes.

$$\dot{\varphi}_l^* = \frac{1}{r_w}(V_i - b_i W_i) \quad ; \quad \dot{\varphi}_r^* = \frac{1}{r_w}(V_i + b_i W_i) \quad (4.5)$$

Al programar la relación anterior en la tarjeta de desarrollo, el móvil puede interpretar correctamente las señales enviadas por el lazo de control interno.

4.2.2. Odometría

Con la finalidad de dotar con autonomía al robot móvil, se requiere conocer su localización en un instante de tiempo determinado, las técnicas desarrolladas para esto pueden dividirse en dos grupos.

Localización absoluta. Son técnicas que permiten generar un espacio de operación con base en coordenadas globales, donde su origen es independiente e inalterable; los cambios de posición de un cuerpo se miden a partir de dicho origen.

Localización relativa. Estas técnicas sólo miden los cambios de posición con respecto al punto de partida del cuerpo y sus posiciones previas.

La odometría es un caso particular del segundo grupo, en donde la posición se mide de forma incremental, es decir, la nueva estimación de posición es siempre relativa a la previamente calculada, [15].

Esta técnica utiliza como principal herramienta la información percibida por los sensores propioceptivos incorporados a cada uno de los motores del móvil, es decir, de los encoders incrementales mencionados al inicio del presente capítulo, los cuales se componen por un disco acoplado al eje del motor de cada rueda, el cual contiene una serie de polos magnéticos distribuidos sobre su circunferencia; cuando el disco gira, un par de sensores de efecto Hall se encargan de detectar los cambios en el campo magnético, produciendo un pulso eléctrico cada vez que se alinean con los polos.

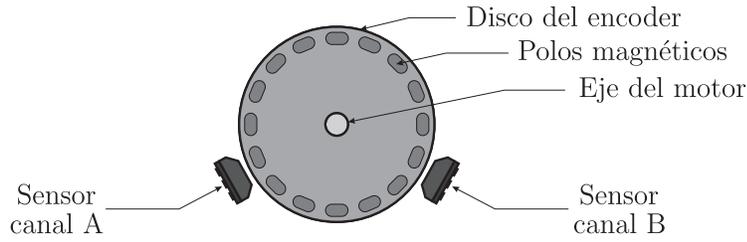


Figura 4.15: Encoder acoplado al eje del motor.

Mediante la correcta interpretación de las señales entregadas por ambos canales del dispositivo, es posible calcular la dirección de giro de la rueda, lo cual depende directamente de su orden de activación, como se muestra en la figura 4.16.

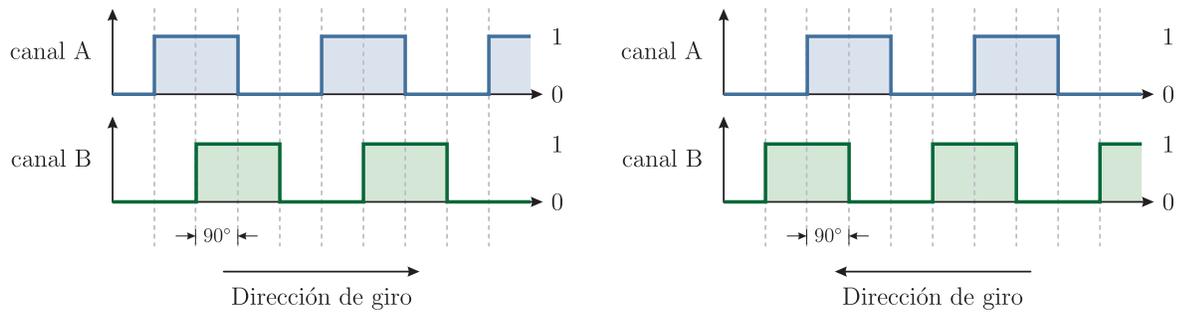


Figura 4.16: Señales obtenidas mediante encoders.

Para conocer el cambio en la posición angular es necesario analizar la secuencia de pulsos generados y relacionarlo con uno de los posibles estados, los cuales representan las diferentes combinaciones de las señales detectadas por los canales A y B del encoder; el estado actual se compara con el inmediato anterior lo que permite determinar si se debe adicionar o sustraer una unidad a la cuenta de pulsos, ver la figura 4.17.

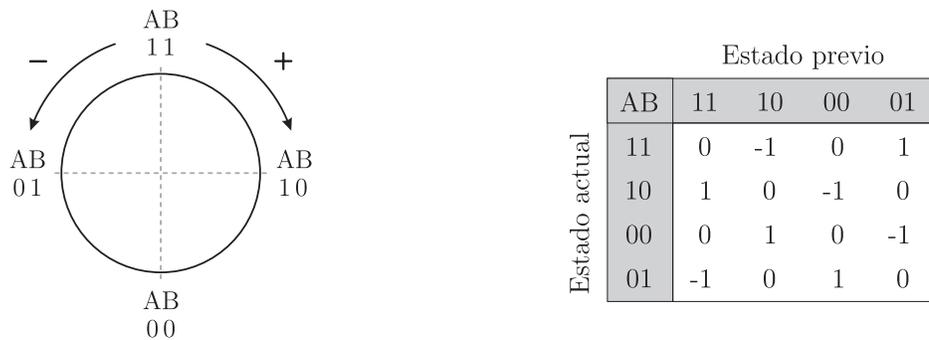


Figura 4.17: Comparación y conteo de pulsos.

Considerando lo anterior, en conjunción con los parámetros físicos del mecanismo, particularmente el diámetro nominal de las ruedas D_n , la resolución de los encoders C_e y la relación de transmisión n entre los motores y las ruedas, es posible aproximar la distancia lineal recorrida por cada pulso detectado c_m , [4], mediante la siguiente relación.

$$c_m = \frac{\pi D_n}{n C_e} \quad (4.6)$$

Con lo cual, el incremento de distancia lineal recorrida por cada rueda, en función del conteo de pulsos realizado por los encoders está definido por.

$$\Delta s_l = c_m N_{l(k)} \quad ; \quad \Delta s_r = c_m N_{r(k)} \quad (4.7)$$

Donde $N_{l(k)}$ y $N_{r(k)}$ representan el incremento en la cuenta de pulsos de los encoders durante un periodo de tiempo k , así el cambio de posición lineal Δs y angular $\Delta \theta$, medidos desde el centro de giro del robot se determinan mediante las siguientes expresiones.

$$\Delta s = \frac{\Delta s_l + \Delta s_r}{2} \quad (4.8)$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta s_r - \Delta s_l}{b} \quad (4.9)$$

Donde b , como se mencionó anteriormente, representa la distancia entre los puntos de contacto de las ruedas con la superficie. Lo descrito anteriormente se presenta de manera gráfica en la figura 4.18.

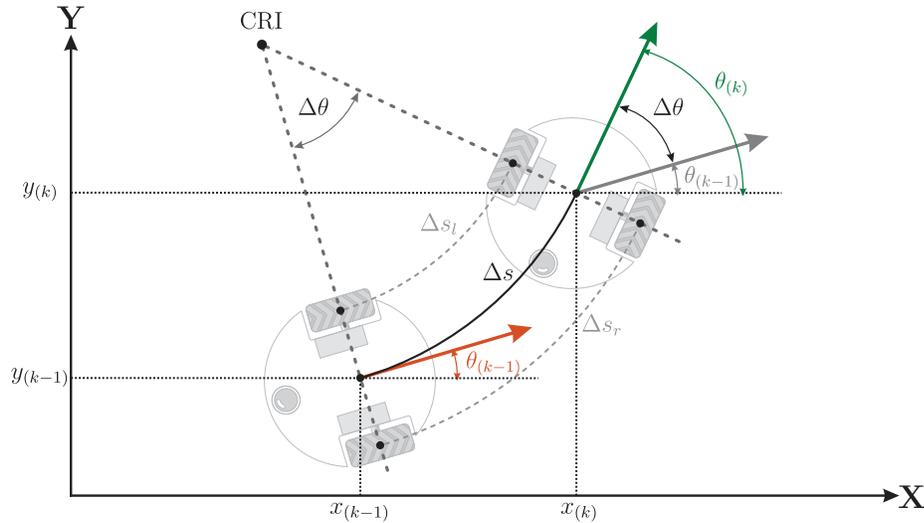


Figura 4.18: Actualización de distancias recorridas en un periodo de muestreo.

Una vez que se conocen los desplazamientos del móvil, es posible estimar su postura en diferentes instantes de tiempo a partir de una posición inicial conocida, mediante la integración de sus ecuaciones de movimiento, es decir, el modelo cinemático (2.7); lo cual en un sistema discreto, equivale a sumar las distancias cartesianas recorridas Δx , Δy y $\Delta\theta$ del periodo actual a las acumuladas en el periodo anterior, es decir.

$$x_{(k)} = x_{(k-1)} + \Delta s \cos(\theta_{(k)}) \quad (4.10)$$

$$y_{(k)} = y_{(k-1)} + \Delta s \sin(\theta_{(k)}) \quad (4.11)$$

$$\theta_{(k)} = \theta_{(k-1)} + \Delta\theta \quad (4.12)$$

Es inmediato reconocer que el planteamiento fundamental detrás de la odometría es la acumulación de desplazamientos incrementales, lo que inevitablemente conduce a incrementos en los errores de posición y orientación, los cuales crecen en proporción a la distancia recorrida, [4].

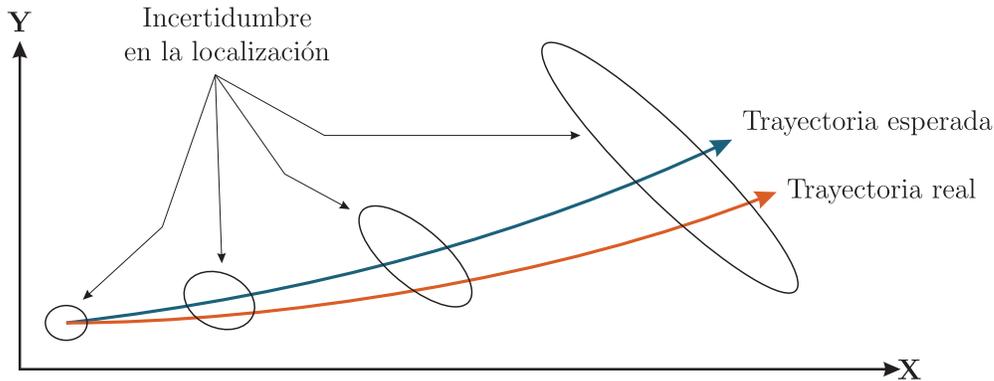


Figura 4.19: Propagación de la incertidumbre debido a errores odométricos.

Por lo cual, ésta técnica ofrece buenos resultados cuando el vehículo se traslada distancias cortas, mientras que para trayectos largos es posible encontrar desviaciones importantes, [3], cuyas causas, dependiendo de su naturaleza, se dividen en dos tipos.

Errores sistemáticos. Son ocasionados por el propio sistema, debido a deficiencias en su estructura física, es decir.

- Diferencia en el diámetro de las ruedas.
- Incertidumbre en la localización del punto de contacto con la superficie.
- Desalineamiento de las ruedas.

- Resolución del encoder.

Errores no-sistemáticos. Se caracterizan por la relación del robot móvil con el entorno, comprenden entre otras, las siguientes causas.

- Desplazamiento sobre superficies no uniformes.
- Desplazamiento sobre objetos irregulares.
- Deslizamiento de las ruedas.
 - Superficie resbalosa.
 - Sobreaceleración.
 - Giros demasiado rápidos (derrape).
 - Interacción con fuerzas externas.
 - Perder el contacto con la superficie.

Cuando esto sucede, el algoritmo programado registra desplazamientos lineales aún cuando físicamente no están ocurriendo, lo que desencadena en diferencias de la trayectoria real con respecto a la esperada, lo cual se muestra en la figura 4.20.

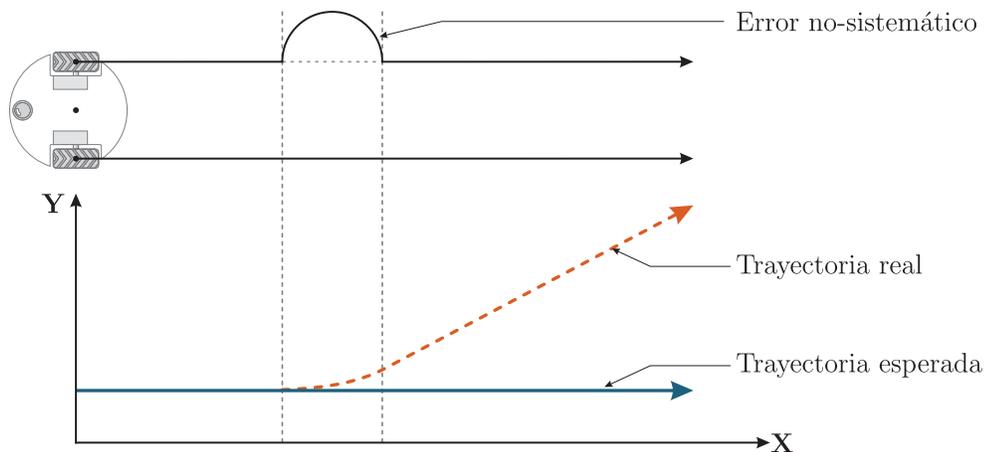


Figura 4.20: Diferencia de trayectorias debido a errores no sistemáticos.

La clara distinción entre ambos tipos de errores es de gran importancia para que su reducción sea efectiva, lo cual se logra mediante estrategias de calibración para el caso de errores sistemáticos o técnicas probabilísticas y estudios de incertidumbre para los errores no-sistemáticos [18].

4.2.3. Control de velocidad

Al conocer la velocidad angular que se requiere desarrollar en cada una de las ruedas, se hace evidente la necesidad de que dicha velocidad se reproduzca de manera correcta, pues con esto se reduce la posibilidad de errores durante la navegación.

Para esto se opta por la implementación de un controlador *Proporcional-Integral* (PI), para cada rueda de manera independiente, lo que asegura que se alcance la velocidad esperada en un tiempo relativamente corto y se mantenga estable cuando sea necesario. Para este caso particular se omite la acción derivativa debido a que existen oscilaciones inherentes al sistema a controlar, es sabido que esta acción puede aumentar dichas oscilaciones, haciendo menos preciso el desempeño general del sistema. En la figura 4.21, se muestra la estructura del controlador PI.

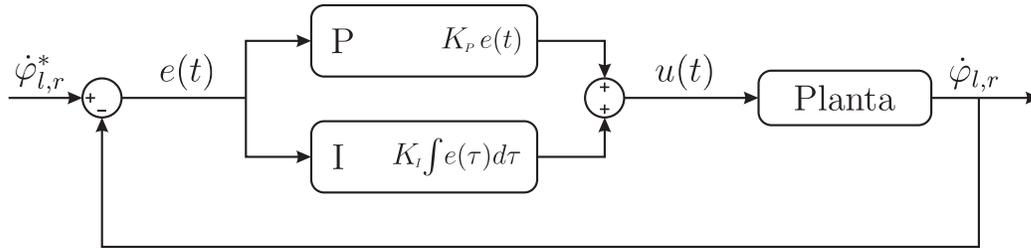


Figura 4.21: Diagrama a bloques del controlador PI.

Donde las variables de entrada corresponden a las velocidades angulares de referencia $\dot{\varphi}_l^*$ y $\dot{\varphi}_r^*$, calculadas mediante el control de bajo nivel (4.5), mientras que las variables de salida $\dot{\varphi}_l$ y $\dot{\varphi}_r$ representan las velocidades angulares reales medidas en cada rueda.

Para calcular estas velocidades se hace uso nuevamente de los encoders incorporados al robot, donde se calcula la razón de cambio de las posiciones angulares de cada rueda durante un intervalo de tiempo determinado Δt .

Por otro lado, las variables $e_l(t)$ y $e_r(t)$ se denominan errores de seguimiento y representan la diferencia entre los valores de referencia respecto a los reales, es decir.

$$e_l(t) = \dot{\varphi}_l^* - \dot{\varphi}_l \quad ; \quad e_r(t) = \dot{\varphi}_r^* - \dot{\varphi}_r \quad (4.13)$$

Mediante el controlador PI, es posible modular de forma automática la magnitud de las velocidades angulares para que tiendan, con el paso del tiempo, a los valores de referencia $\dot{\varphi}_l^*$ y $\dot{\varphi}_r^*$, esto se logra por la contribución de dos acciones.

Acción proporcional. Consiste en el producto entre la señal de error y una cierta ganancia K_P , de tal manera que la desviación entre los valores de referencia y actual se aproxime a cero al transcurrir el tiempo.

$$P_l = K_P e_l(t) \quad ; \quad P_r = K_P e_r(t) \quad (4.14)$$

Acción integral. Tiene como propósito disminuir y de ser posible eliminar el error en estado estacionario que no pueda ser corregido por la parte proporcional; actúa cuando existen desviaciones respecto a la referencia, integrándolas y multiplicando el resultado por una ganancia constante K_I . Debido a los componentes y el método de programación utilizado, la integración se resuelve mediante una aproximación rectangular, [38] es decir.

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \Delta t \sum_k e_{(k)} \quad (4.15)$$

Con lo que la acción integral se calcula como sigue.

$$I_l = K_I \Delta t \sum_k e_{l(k)} \quad ; \quad I_r = K_I \Delta t \sum_k e_{r(k)} \quad (4.16)$$

Finalmente, la magnitud de la variable encargada de modular los valores que ingresan a la planta, la cual representa al sistema de potencia, se determina mediante la suma de ambas acciones.

$$u_l(t) = K_P e_l(t) + K_I \Delta t \sum_k e_{l(k)} \quad (4.17)$$

$$u_r(t) = K_P e_r(t) + K_I \Delta t \sum_k e_{r(k)} \quad (4.18)$$

En este tipo de controladores es importante realizar una calibración adecuada, pues de ello depende que los valores de referencia sean reproducidos fielmente por los dispositivos físicos.

4.2.4. Percepción

Uno de los aspectos más importantes para el funcionamiento del modelo conductual, es el conocimiento preciso del área de confort de cada individuo, para el caso de la plataforma experimental desarrollada, dicha área debe ser reconocida por cada robot móvil, pues de ello depende la regulación de las fuerzas normales y tangenciales que se aplican para ejecutar las maniobras de evasión.

La realización física de este concepto conlleva ciertas dificultades, relacionadas principalmente a los dispositivos de sensado implementados que, como se menciona al inicio del capítulo, sólo son capaces de detectar objetos de manera puntual; esto implica que su capacidad conjunta de detección se limita, después de la correcta calibración, a una serie de puntos sobre la circunferencia que representa el área de confort, como se muestra en la figura 4.22.

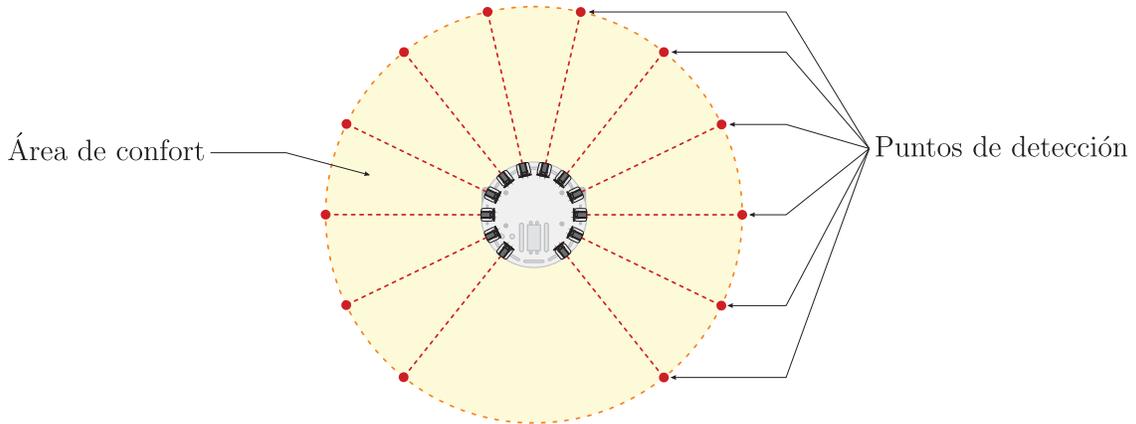


Figura 4.22: Emulación del área de confort con sensores puntuales.

El problema más evidente ocurre cuando un objeto, a pesar de haber penetrado el área de confort, no es detectado por los sensores, ver figura 4.23, debido a que se posiciona en el espacio existente entre ellos.

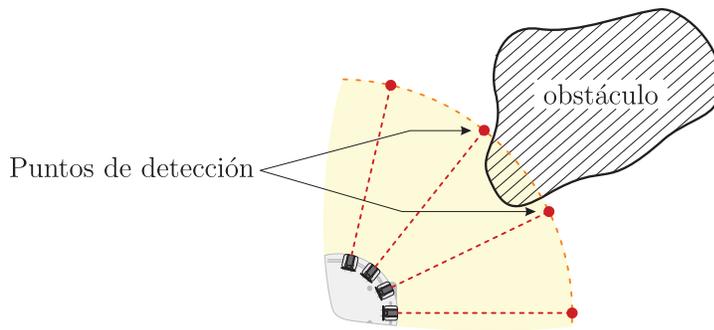


Figura 4.23: Problema de no-detección debido a percepción discontinua.

Como se mencionó anteriormente, cada sensor se ubica con una separación específica, ver figura 4.24, de tal manera que se identifique fácilmente el ángulo en el que los objetos son percibidos con respecto a la dirección de avance del móvil. Para localizarlos en el plano, simplemente se suma el ángulo correspondiente al sensor activado al calculado para el robot en un instante determinado.

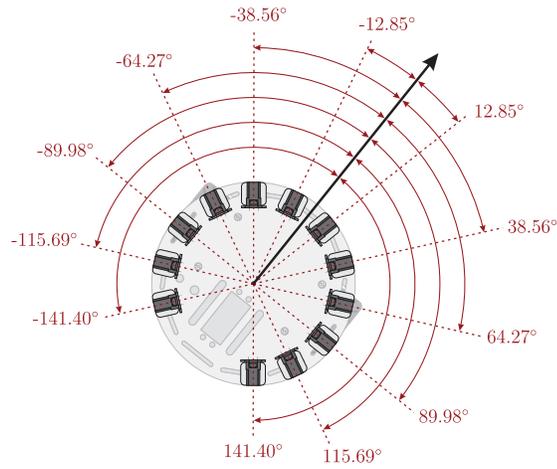


Figura 4.24: Ángulos de percepción respecto a la dirección de avance del móvil.

Para mitigar las repercusiones y errores de percepción debidos a la diferencia del sistema físico respecto al ideal, se hacen consideraciones sencillas, como colocar la mayor cantidad posible de sensores y generar una estrategia de agrupación que permita la detección incluso en ángulos intermedios, lo cual se logra mediante el análisis de los escenarios posibles, que se reducen a los siguientes casos.

Sensado individual. Cuando sólo un dispositivo reconoce la existencia del obstáculo; en este caso su posición relativa será igual al ángulo de localización del sensor habilitado y la distancia d_{iw} se procesa internamente, lo anterior se muestra en la figura 4.25

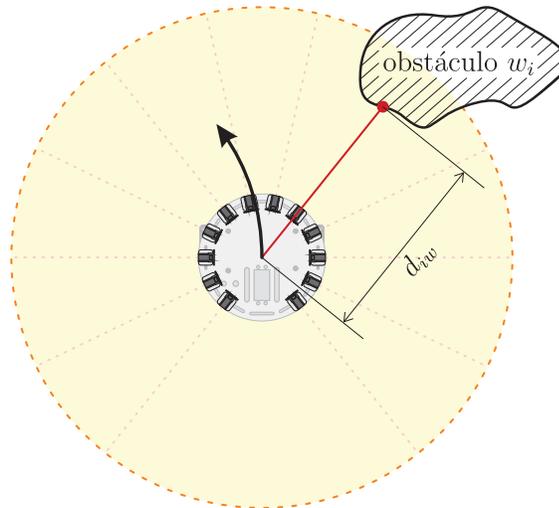


Figura 4.25: Percepción de obstáculos por un sólo sensor.

Sensado múltiple. Ocurre cuando dos o más sensores consecutivos realizan una detección simultánea; para fines prácticos se considera como si se tratase de un único obstáculo, donde su posición relativa se calcula mediante el promedio de los ángulos de localización de cada dispositivo habilitado, por otra parte, la distancia de percepción considerada para realizar el cálculo del algoritmo de control, será la de magnitud menor; en la figura 4.26, se muestran dos posibles situaciones para este caso.

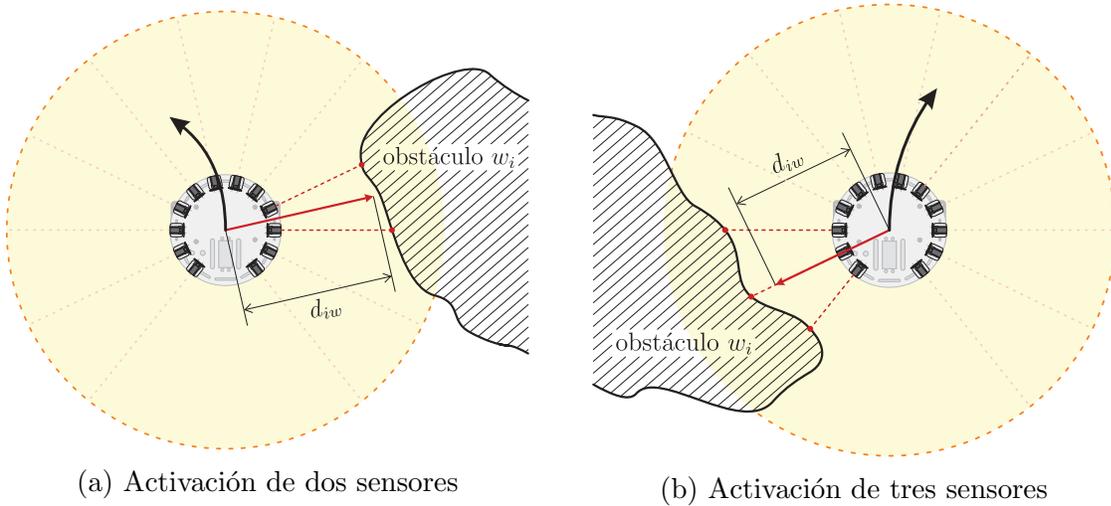


Figura 4.26: Percepción de obstáculos por múltiples sensores.

Se considera que existen diferentes obstáculos cuando la detección, a pesar de ser múltiple, no es consecutiva, es decir, se distinguen grupos de detección separados por al menos un sensor inactivo, como se muestra en la figura 4.27.

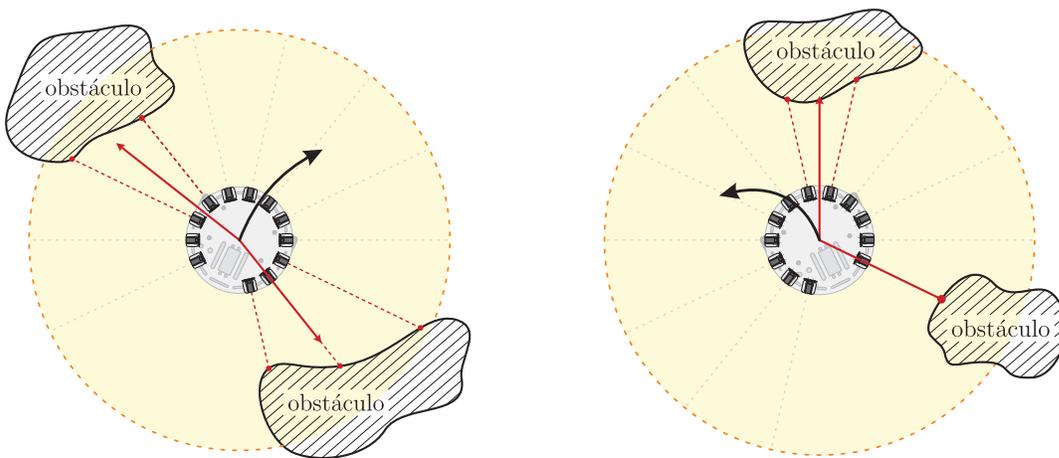


Figura 4.27: Percepción de obstáculos múltiples.

Para el caso donde existe interacción entre múltiples agentes o con obstáculos dinámicos, situación que se detalla en el Capítulo 2, se debe considerar la velocidad relativa de aproximación, que para fines prácticos se obtiene mediante la comparación de la distancia registrada hacia el objeto en dos instantes de muestreo consecutivos, esta velocidad de aproximación percibida se compara con la velocidad instantánea del robot móvil, si la diferencia es considerable, se sabe que el objeto tiene movimiento propio, por lo cual debe tratarse de otro agente o de un obstáculo dinámico, esto provocará que las acciones evasivas sean más rápidas, por lo menos en cuanto a la respuesta de giro, situación que se ilustra mediante la figura 4.28.

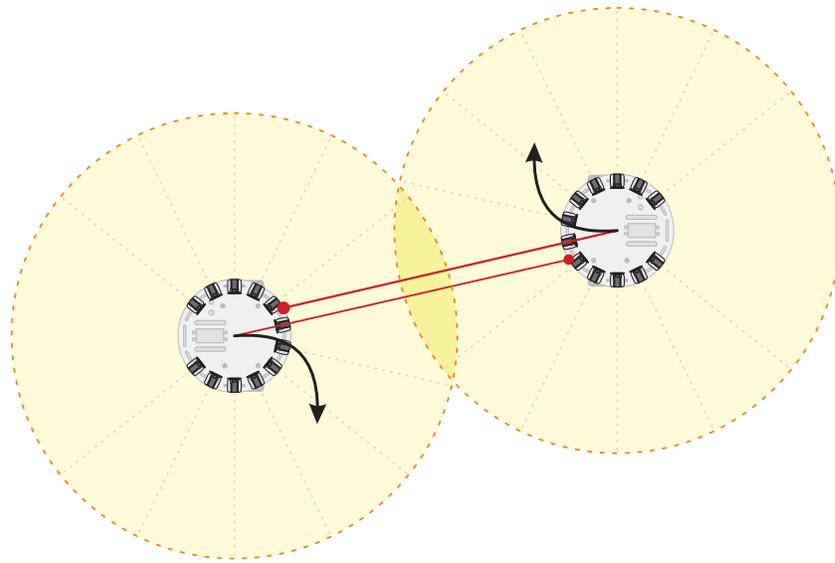


Figura 4.28: Percepción de obstáculos dinámicos u otros agentes.

Las estrategias incorporadas al sistema de percepción se consideran suficientes para emular el área de confort requerida para la implementación y correcto funcionamiento del esquema de control propuesto.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Con la finalidad de comprobar el desempeño del controlador de navegación propuesto y validar su funcionamiento, se desarrolló un entorno de simulación en MATLAB[®], el cual crea una animación que permite visualizar el comportamiento de un sistema multiagente, e incluso generar un ambiente determinado, cada agente es representado por un círculo de radio $R_i = 0.085[m]$ con un pentágono inscrito que define su orientación; mediante este simulador es posible observar gráficamente las interacciones entre ellos y con el ambiente, lo anterior facilita la identificación de las estrategias para la evasión de colisiones, la capacidad de alcanzar una posición final deseada así como una orientación particular al final del recorrido.

En las secciones siguientes se analizan diversas simulaciones numéricas que muestran la evolución del sistema en diferentes situaciones, para lo cual se utilizan los parámetros mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros utilizados en simulaciones

v_i^0 [m/s]	τ_i [seg]	k_i	κ_i	k_{v_i}	k_{a_i}	k_{t_i}	ε
0.125	0.1	69	105	0.995	1.21	0.5	0.008

5.1. Simulación numérica para un sólo agente.

La intención al introducir casos que muestren el comportamiento de un agente aislado, es analizar de la manera más clara posible la evolución del sistema de control, visualizar como se afecta cada variable al considerar distintos escenarios y notar como se modifican las entradas de control para reproducir las estrategias de evasión, que generalmente consisten en cambios en la velocidad seguidos por giros, evitando colisiones.

5.1.1. Caso libre de colisiones.

El objetivo de este caso, es asegurar que el algoritmo de control permite al agente alcanzar una posición cartesiana determinada y posteriormente orientarse con un ángulo específico. La tabla 5.2 contiene la información de posición y orientación tanto inicial como deseada.

Tabla 5.2: Condiciones iniciales y deseadas.

$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
0	-0.5	0	1.5	0.5	$\pi/2$

En la figura 5.1, puede verse como el agente se mueve trazando una línea recta desde la posición inicial hasta la deseada, donde se orienta hacia el valor preestablecido.

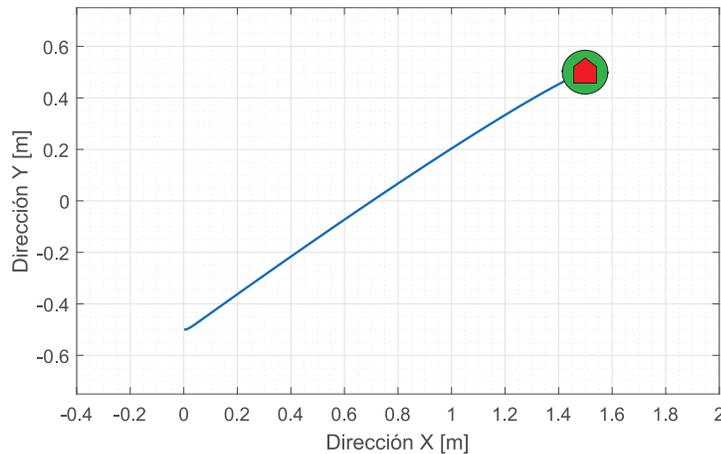


Figura 5.1: Trayectoria libre de colisiones; un agente.

Los errores de posición e_x y e_y respecto a los ejes del marco de referencia, así como el error de orientación e_θ , se muestran en la figura 5.2, los cuales convergen a cero lo que

implica que se alcanzan los valores de posición cartesiana y orientación deseados.

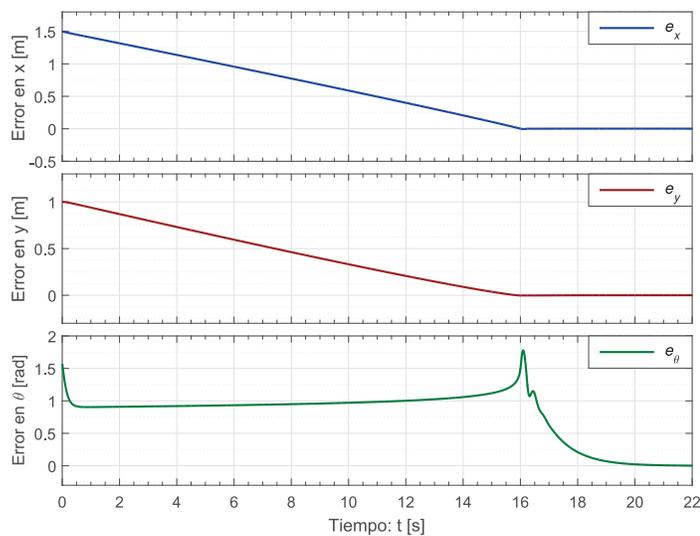


Figura 5.2: Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; un agente.

En la figura 5.3, se muestran los valores de las variables de control V_i y W_i calculados para comandar al agente; una característica particular del controlador, es que las acciones para orientar al móvil se realizan después de alcanzar la posición cartesiana.

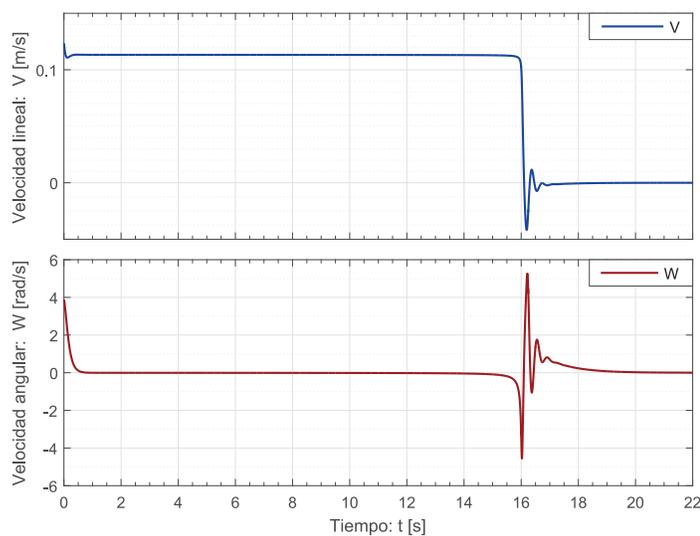


Figura 5.3: Variables de control, caso libre de colisiones; un agente.

5.1.2. Caso con posibilidad de colisión para un sólo agente.

Con la introducción de este caso se pretende validar que la parte del controlador encargada de evitar colisiones funciona correctamente, para ello se considera un obstáculo estático, representado por el círculo gris de $0.75[m]$ de diámetro. La tabla 5.3 contiene los parámetros de posición y orientación utilizados.

Tabla 5.3: Condiciones iniciales y deseadas.

r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
0.4	0	0.5	0	2	0.1	$-\pi/6$

Se observa en la figura 5.4 que al inicio del recorrido, cuando el obstáculo esta fuera de el área de confort, el agente sigue una línea recta, pero cuando dicha área es penetrada, se generan fuerzas de repulsión que se manifiestan por medio de dos componentes vectoriales, uno normal a la dirección en la que se percibe el obstáculo y otro tangencial a la misma, es la regulación de ambas magnitudes y la dirección del vector resultante lo que provoca el cambio de orientación para cada instante, generando en este caso, el segmento curvo de la trayectoria y permitiendo al móvil evitar la colisión, como se detalla en el Capítulo 2. Finalmente, cuando el obstáculo sale del área de confort, se vuelve a calcular una recta hasta el punto de destino.

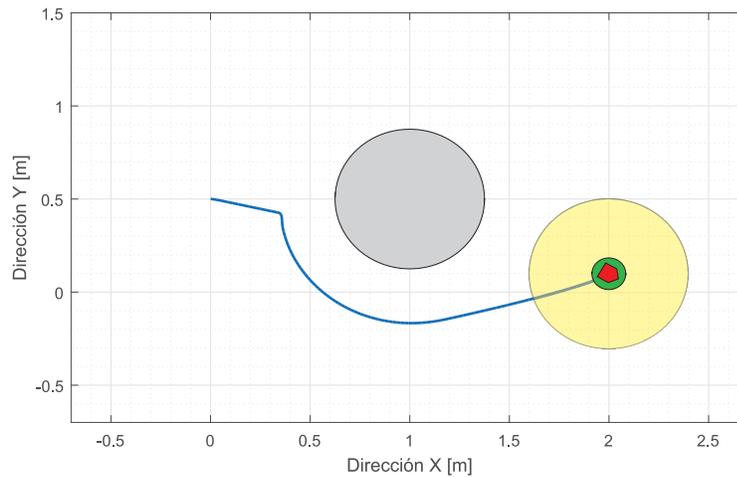


Figura 5.4: Trayectoria con posibilidad de colisión; un agente.

En la figura 5.5 se muestran los errores de posición y orientación, mismos que convergen a cero, lo que asegura que se ha alcanzado la postura esperada.

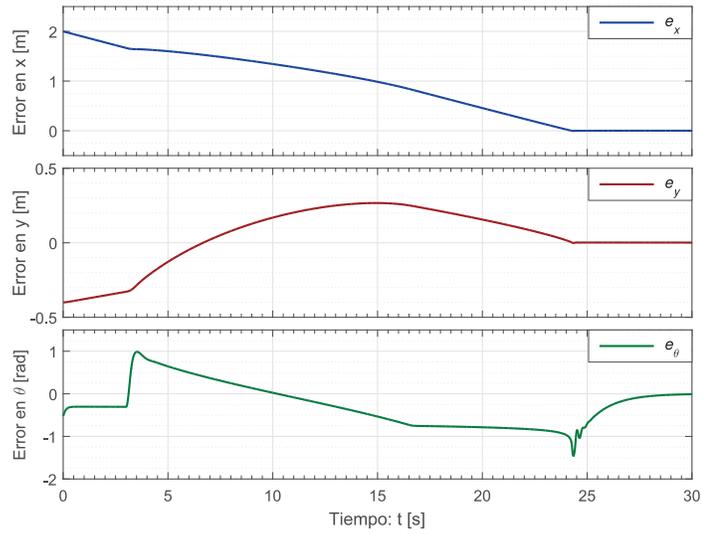


Figura 5.5: Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; un agente.

En la figura 5.6, se muestra la evolución de las variables de control, es importante notar que el móvil puede aumentar o disminuir la velocidad al detectar un obstáculo para mejorar su reacción.

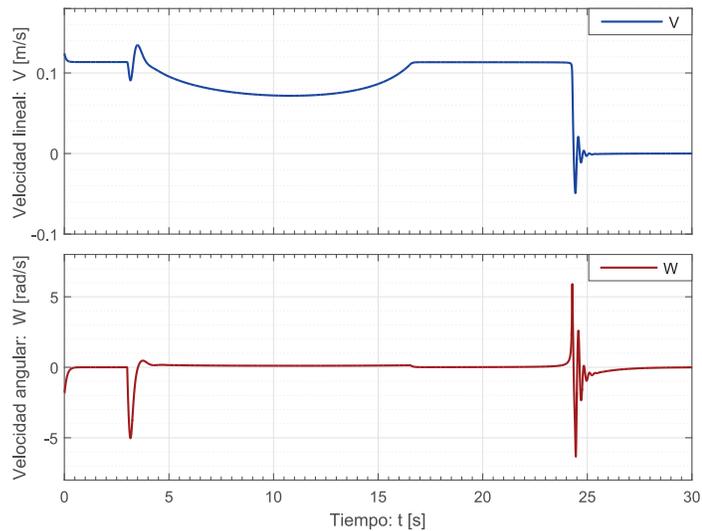


Figura 5.6: Variables de control, caso con posibilidad de colisión; un agente.

5.2. Simulación numérica para dos agentes.

Se presenta el escenario donde interactúan dos agentes, esto permite analizar la parte del control encargada de evitar colisiones entre ellos, en estos casos la velocidad deseada de avance se modifica a $v_i^0 = 0.15[m/s]$, la ganancia de respuesta normal a $k_i = 10$, y la ganancia para fuerzas tangenciales a $\kappa_i = 135$, con esto se resta rigurosidad a la penetración en el área de confort mientras que se aumenta la capacidad de giro.

5.2.1. Caso con posibilidad de colisión, obstáculo estático.

Una cualidad del controlador propuesto es que puede programarse de manera descentralizada, es decir, el procesamiento de información y la elección de parámetros se realizan de forma individual, con lo que cada agente además de tomar acciones distintas para cada situación, puede ser programado de forma distinta según la respuesta deseada, en este caso, se eligen áreas de confort de diferentes tamaños, ver tabla 5.4.

Tabla 5.4: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.3	0	-0.5	0	2.1	0.4	0
2	0.35	2	0.5	π	-0.1	-0.4	π

Es inmediato notar que el comportamiento de cada agente corresponde al esperado, es decir, buscar la posición final mediante una recta, evadir los obstáculos que penetren el área de confort y orientarse al valor preestablecido, como se muestra en la figura 5.7.

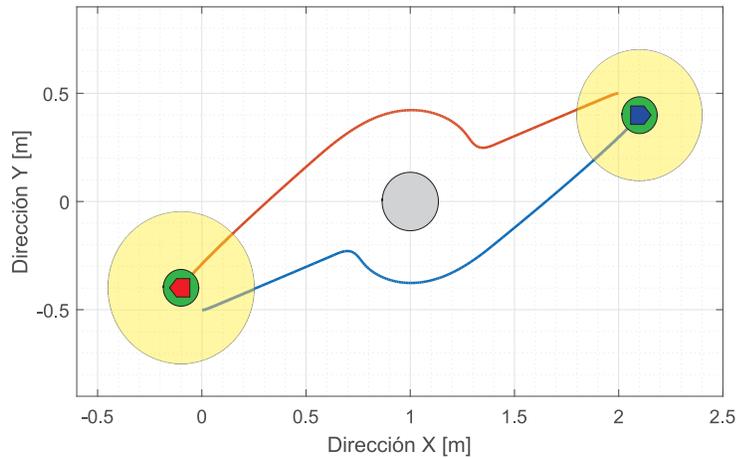


Figura 5.7: Trayectoria con posibilidad de colisión; dos agentes.

Más aún, en la figura 5.8, se muestra la evolución de los errores de posición y orientación, mismos que convergen a cero al alcanzar los valores deseados.

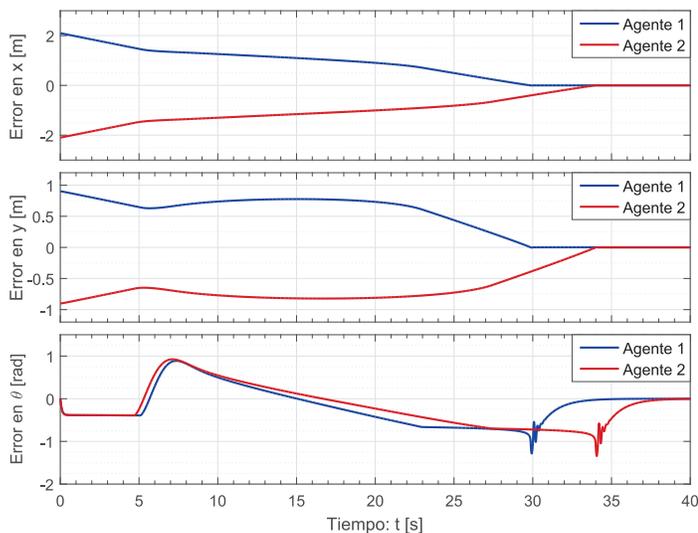


Figura 5.8: Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; dos agentes.

La evolución de las variables de control se muestra en la figura 5.9. Se observa un desfase de la velocidad traslacional V_i del segundo agente, esto se debe a que su área de confort es mayor y el obstáculo tarda más tiempo en abandonarla, modificando su comportamiento.

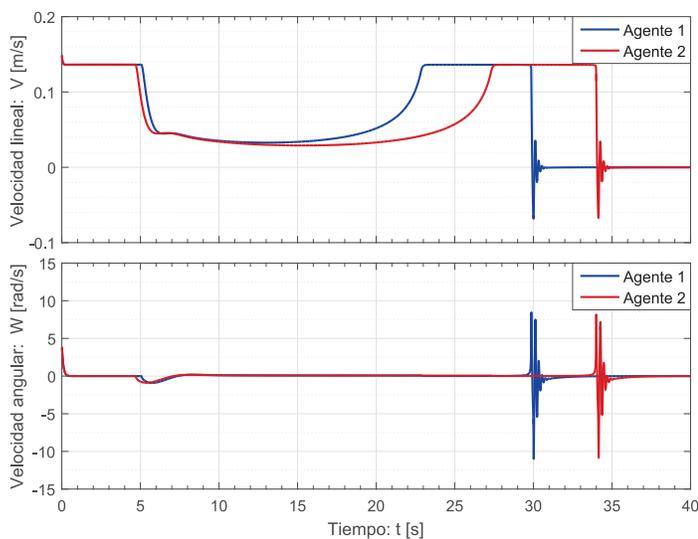


Figura 5.9: Variables de control, caso con posibilidad de colisión; dos agentes.

5.2.2. Caso con posibilidad de colisión debido a la interacción directa entre agentes.

Mediante este caso, se valida el funcionamiento del controlador cuando existen interacciones directas entre agentes, aquí se considera la velocidad relativa de aproximación, que consiste en la suma de las velocidades que cada agente desarrolla con respecto a la línea de detección, ver Capítulo 2. Este parámetro opera como una ganancia que modifica la respuesta en dirección tangencial, lo que resulta en giros más rápidos para desarrollar maniobras evasivas exitosas. En la tabla 5.5 se muestran los parámetros de posición y orientación utilizados.

Tabla 5.5: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.4	0	-0.06	0	1.4	-0.06	0
2	0.45	1.4	0.06	π	0	0.06	π

En la figura 5.10, se observa que las acciones evasivas comienzan con una distancia mayor respecto al caso de obstáculos estáticos, esto se debe a que la interacción inicia cuando se superponen las áreas de confort de cada agente, la ventaja de esta situación es que se cuenta con mayor espacio para girar reduciendo la posibilidad de impactos.

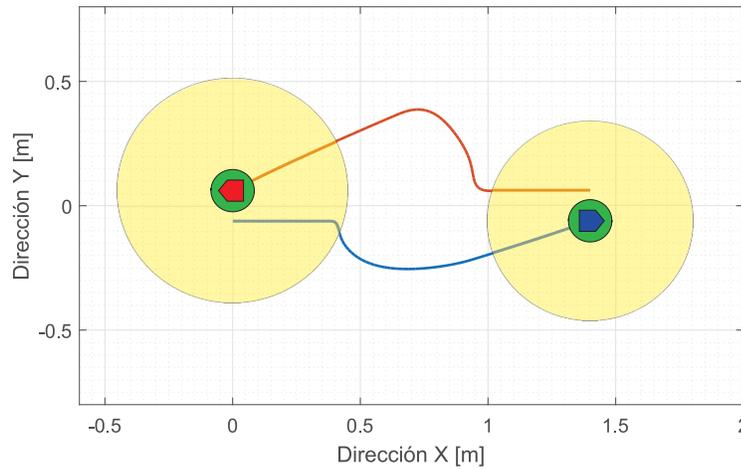


Figura 5.10: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; dos agentes.

En la figura 5.11 se muestran los errores de posición y orientación, los cuales reflejan el comportamiento de cada agente hasta que se alcanzan la postura esperada.

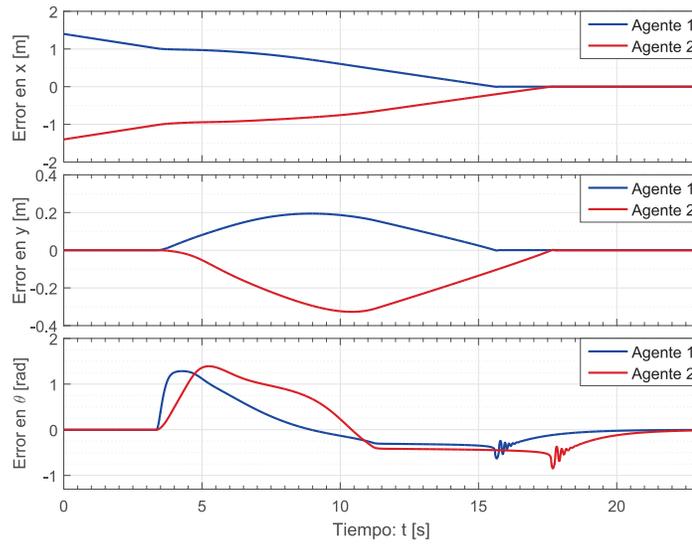


Figura 5.11: Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; dos agentes.

El cambio, en las variables de control V_i y W_i sucede exactamente al mismo tiempo, lo que indica el instante en que inicia la interacción, después de esto, las estrategias de evasión son diferentes a pesar de recorrer la misma distancia, ya que las áreas de confort no tienen la misma dimensión. Como se muestra en la figura 5.12.

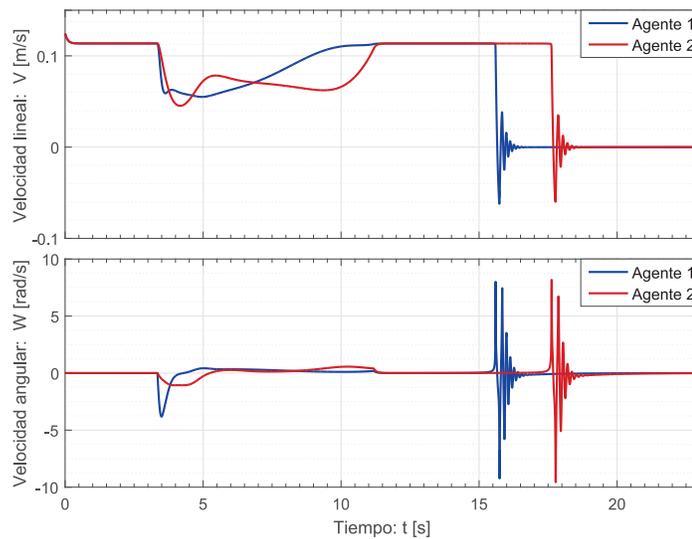


Figura 5.12: Variables de control, caso con interacción directa; dos agentes.

5.3. Simulación numérica para múltiples agentes.

Una vez que se conoce el comportamiento del sistema en cada posible situación, se pueden simular casos con mayor complejidad e involucrar un número mayor de agentes, cinco para los casos contemplados a continuación. Los parámetros son modificados, ver tabla 5.6, para mejorar la respuesta y capacidades del controlador.

Tabla 5.6: Parámetros utilizados en simulaciones de agentes múltiples

v_i^0 [m/s]	τ_i [seg]	k_i	κ_i	k_{v_i}	k_{a_i}	k_{t_i}	ε
0.3	0.05	69	105	0.995	1.21	0.85	0.008

5.3.1. Caso libre de colisiones y sin interacción entre agentes

Este caso se presenta para visualizar claramente el hecho de que los agentes seguirán una trayectoria recta siempre que no exista ningún tipo de interacción, sin importar cuantos de ellos compartan el entorno.

En la tabla 5.7 se enlistan los valores iniciales y deseados de posición y orientación para cada agente. Es importante notar que para este caso los agentes 1, 2 y 3 comparten posición inicial y final respecto al eje X , por lo que recorren la misma distancia, su orientación deseada también es idéntica; de manera análoga, los agentes 4 y 5 comparten valores para estos parámetros.

La importancia de esta agrupación reside en la sencillez con la que pueden ser visualizados los resultados y sienta las bases para la presentación de casos más complejos.

Tabla 5.7: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.28	0	0	0	4.5	0	0.2
2	0.28	0	1.2	0	4.5	1.2	0.2
3	0.28	0	2.4	0	4.5	2.4	0.2
4	0.28	0.5	0.6	0	4.0	0.6	-0.2
5	0.28	0.5	1.8	0	4.0	1.8	-0.2

El resultado de la simulación numérica se muestra en la figura 5.13, donde las líneas superior e inferior representan límites físicos del entorno.

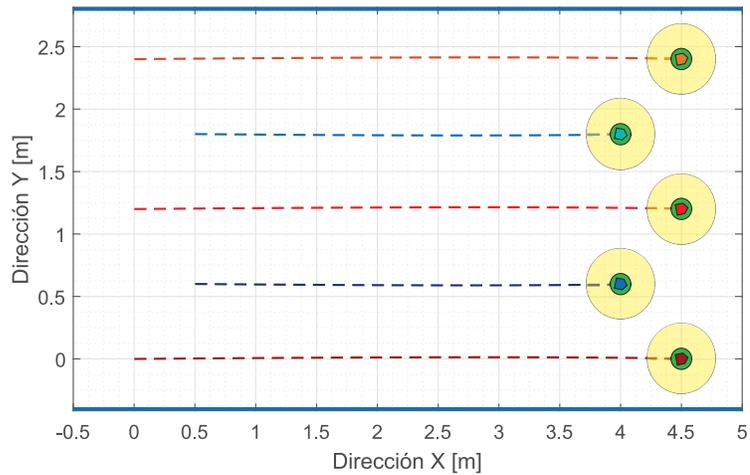


Figura 5.13: Trayectorias libres de colisiones; cinco agentes.

En cada sub-gráfico dentro de la figura 5.14 es clara la agrupación anteriormente mencionada, se observa que para los errores e_{x_i} , sólo se distinguen dos comportamientos que reflejan las diferentes distancias recorridas, la mayor por los agentes 1, 2 y 3, mientras que la mas corta es seguida por los agentes 4 y 5.

Para el error e_{y_i} los valores se mantienen cerca de cero durante el recorrido debido a que no hay movimientos importantes en esa dirección, sin embargo se observa una ligera curvatura en las trayectorias.

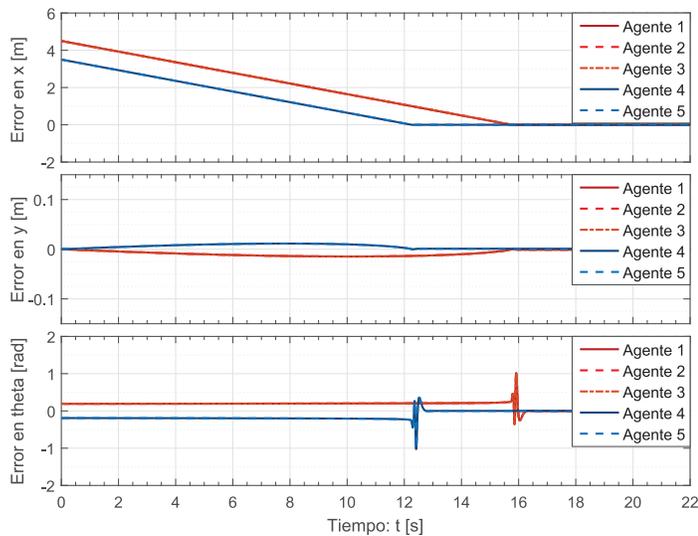


Figura 5.14: Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; cinco agentes.

La orientación mantiene un error constante e_{θ_i} hasta el que se alcanza la posición cartesiana, cuando esto sucede, cada agente comienza a orientarse hacia el valor deseado hasta que el error converge a cero.

En la figura 5.15 se observa que la velocidad lineal V_i se mantiene hasta que se alcanza la posición objetivo, situación que se presenta primero para los agentes 5 y 6 debido a que la distancia recorrida es menor.

Como se ha mencionado anteriormente, cada agente comienza a orientarse hacia el valor preestablecido una vez que los errores de posición son cero, este comportamiento indica que dirigirse a la posición objetivo tiene prioridad sobre las acciones que permiten alcanzar la orientación deseada.

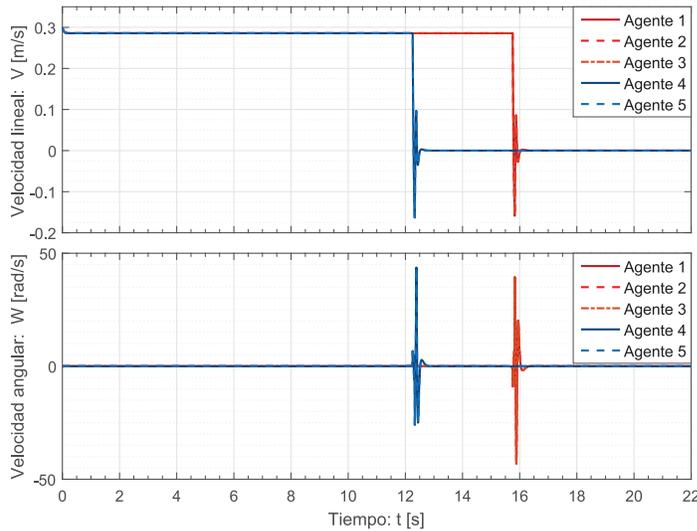


Figura 5.15: Variables de control, caso libre de colisiones; cinco agentes.

5.3.2. Caso libre de obstáculos estáticos con interacción directa entre agentes

Aprovechando las capacidades mostradas por el controlador, particularmente la programación descentralizada, en este caso de simulación, se modifica individualmente la magnitud del radio del área de confort r_i , con lo que cada agente tomará acciones evasivas particulares, lo cual permitirá mostrar, por un lado, la versatilidad del sistema y por el otro las diferentes acciones desarrolladas debido a la modificación de este importante parámetro.

Para hacer aún mas claros los resultados, visualizar la respuesta del sistema y validar su correcto funcionamiento, las posiciones iniciales y deseadas que se muestran en la tabla 5.8, se eligen con la intención de provocar interacciones directas y encuentros frontales, por ello los agentes 1, 2 y 3 comienzan su recorrido en la parte izquierda del gráfico, mientras que los agentes 4 y 5 lo hacen en la parte derecha.

Tabla 5.8: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.38	0	0.15	0	4.5	2.4	0.3
2	0.29	0.5	1.20	0	4.5	0	0.3
3	0.35	0	2.25	0	4.5	1.2	0.3
4	0.42	4.5	0.65	π	0.5	0.2	π
5	0.24	4.5	1.75	π	0.5	2.2	π

En la figura 5.16, es posible notar que cuando se invaden las áreas de confort r_i , cada agente modifica su tendencia a ir en línea recta hacia la posición deseada y cambian su orientación mediante la modulación de su velocidad angular W_i , comportamiento que corresponde al esperado, puesto que ha sido apreciado en los casos anteriores.

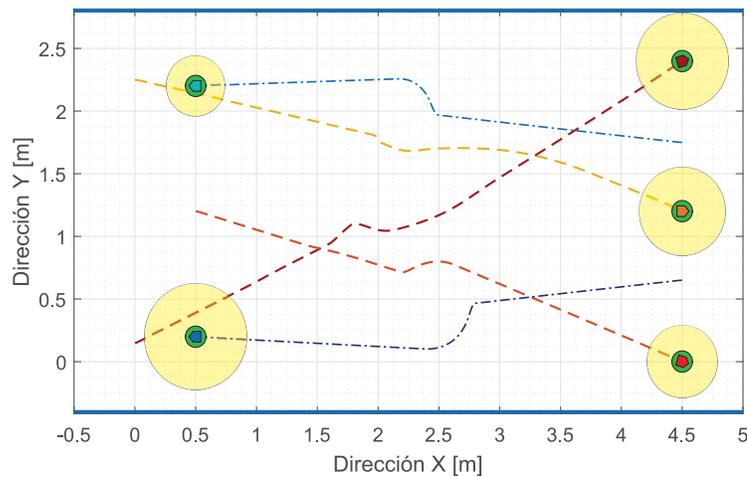


Figura 5.16: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; cinco agentes.

Es claro, en la figura 5.17, que cada agente alcanza la posición y orientación deseadas, por supuesto, su comportamiento y el tiempo de convergencia difieren para cada uno, ya que sus acciones de evasión y cambios de velocidad así lo demandan.

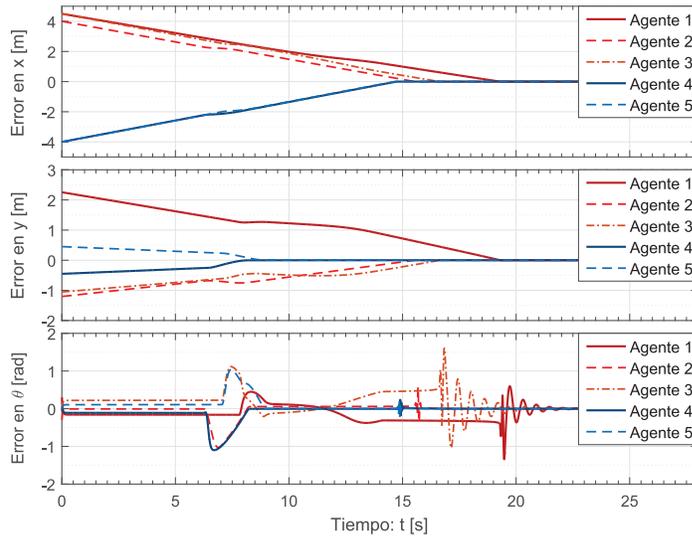


Figura 5.17: Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; cinco agentes.

A pesar de que la estrategia más común para evitar colisiones consiste en bajar la velocidad antes de girar, en la figura 5.18, se observa claramente que cuando existen este tipo de interacciones, algunos agentes optan por acelerar para evitar el contacto.

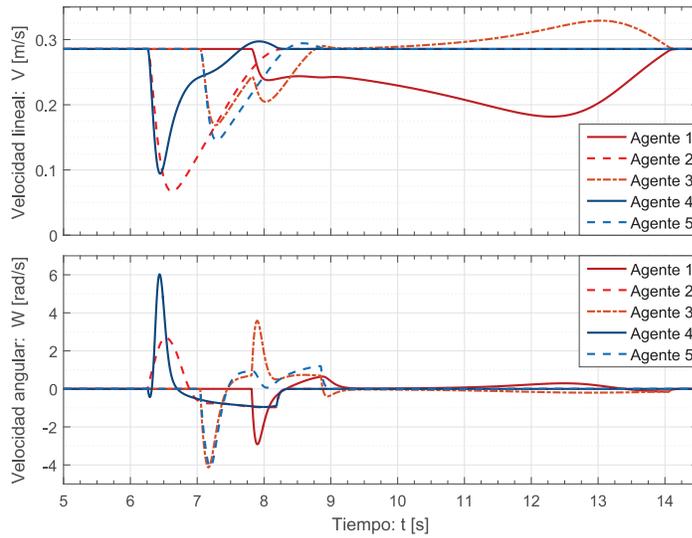


Figura 5.18: Variables de control, caso con interacción directa; cinco agentes.

5.3.3. Caso con posibilidad de colisión por interacción directa entre agentes y con obstáculos estáticos en el entorno

En este ambiente se favorecen interacciones tanto entre agentes como con el entorno, pues se agregan una serie de obstáculos estáticos de tamaños distintos que afectaran de forma particular las trayectorias seguidas; mediante las posiciones finales se genera una formación regular, donde la orientación es igual para todos los agentes. Con esto se pretende emular el caso más general donde se debe evitar el contacto con el entorno mientras se evita golpear a otros individuos. Los valores de posición iniciales y deseados se enlistan en la tabla 5.9.

Tabla 5.9: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.4	0	0	0	4.20	0.50	0.314
2	0.4	0	1.2	0	3.92	1.36	0.314
3	0.4	0	2.4	0	4.65	1.89	0.314
4	0.4	0.45	0.6	0	5.10	0.50	0.314
5	0.4	0.45	1.8	0	5.38	1.36	0.314

En la figura 5.19, cada agente inicia con un recorrido recto hacia la posición deseada, durante el trayecto se toman acciones para evitar colisiones, cuando se ha logrado la evasión se recalcula la trayectoria desde la posición instantánea de cada agente.

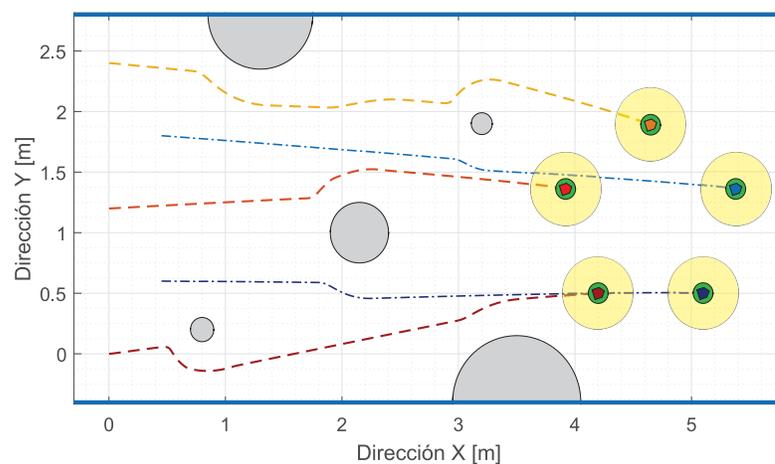


Figura 5.19: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa entre agentes y con el entorno; cinco agentes.

Los errores de posición y orientación convergen a cero, con lo cual se garantiza que se alcanzan los valores preestablecidos, ver figura 5.20.

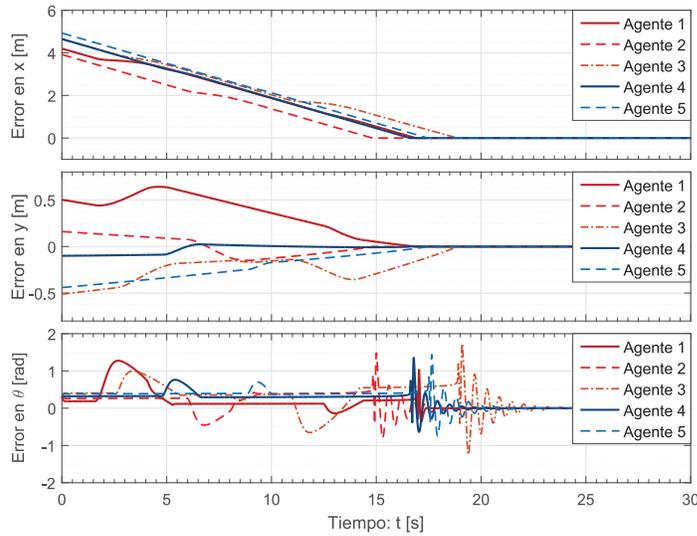


Figura 5.20: Errores de posición y orientación, caso con interacción de agentes y entorno; cinco agentes.

Finalmente, en la figura 5.21, se muestran las variables de control V_i y W_i , que reflejan las estrategias seguidas por cada agente durante la evasión de colisiones.

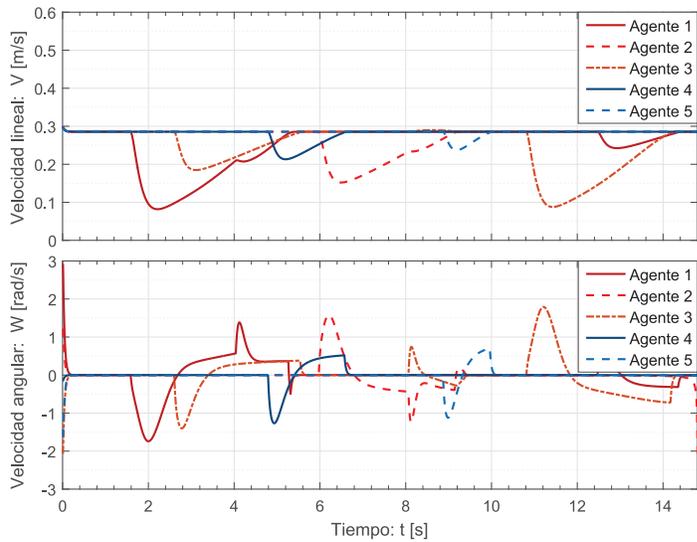


Figura 5.21: Variables de control, caso con interacción de agentes y entorno; cinco agentes.

En las figuras 5.18 y 5.21 se omite la parte donde se realiza la orientación ($t > 15[seg]$), ya que es muy similar al comportamiento que se observa en el resto de las simulaciones, este cambio permite ver con claridad el desempeño de cada agente durante las maniobras de evasión.

Basados en las simulaciones presentadas en este capítulo, se considera que el controlador de navegación propuesto tiene un desempeño satisfactorio y por lo tanto, como siguiente etapa se considera su programación en dispositivos físicos, que para este trabajo consisten en robots móviles de configuración diferencial.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de haber comprobado el funcionamiento del controlador de navegación propuesto mediante las simulaciones numéricas presentadas en el capítulo anterior, el algoritmo se programa en la plataforma experimental desarrollada, cuyas características se detallan en el Capítulo 4.

Cabe resaltar que las mencionadas simulaciones se realizaron considerando los parámetros físicos de los robots móviles construidos, por lo cual se espera que los resultados sean similares y reflejen el potencial del controlador.

Como era de esperarse, la sintonización de las ganancias y parámetros difiere con respecto a las utilizadas en el entorno de simulación, los valores utilizados en los experimentos se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Parámetros utilizados en experimentos

v_i^0 [m/s]	τ_i [seg]	k_{v_i}	k_{a_i}	k_{t_i}	ε
0.125	0.5	1	0.9	0.15	0.001

6.1. Implementación experimental para un agente.

De manera análoga a los casos de simulación, se comienza con las situaciones más sencillas a las que puede estar sujeto el sistema, se inicia con un sólo agente y se inducen situaciones de navegación libre y con interacción del entorno, esto permite observar de manera clara el desempeño del controlador programado e identificar fácilmente su efecto sobre el móvil.

6.1.1. Caso libre de colisiones.

Es el entorno más sencillo que se puede explorar, solamente se requiere que el móvil avance desde un punto inicial hasta uno deseado, donde adquiera una orientación predefinida. Los parámetros de postura inicial y deseada se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Condiciones iniciales y deseadas.

$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
0	-0.5	0	1.5	0.5	$\pi/2$

Es inmediato notar que los parámetros para este caso corresponden a los utilizados en simulación, con lo cual se favorece la comparación directa de ambos casos y se tiene una mejor perspectiva en cuanto al funcionamiento general del sistema experimental.

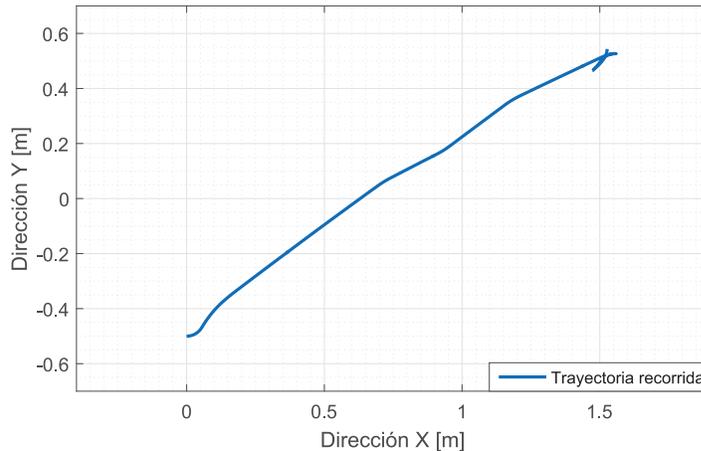


Figura 6.1: Trayectoria libre de colisiones; un agente.

En la figura 6.1, se observa que el móvil traza una línea recta desde la posición inicial hasta la final, donde se orienta con un ángulo deseado, mientras que en la figura 6.2 se muestran los errores de posición y orientación e_{x_i} , e_{y_i} y e_{θ_i} .

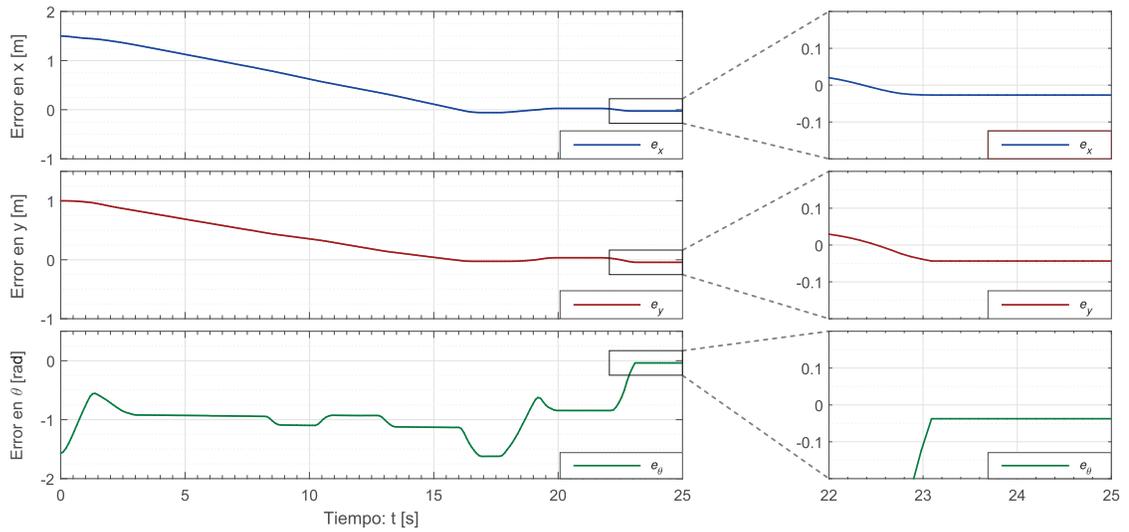


Figura 6.2: Errores de posición y orientación, caso libre de colisiones; un agente.

Es importante resaltar que los errores no terminan exactamente en cero, pues en la práctica se elige un rango de valores en los que el resultado es aceptable, ya que es difícil que las tres variables converjan simultáneamente a un valor puntual; lo anterior se atribuye al método utilizado en la estimación de posición (odometría) y a la resolución con la que el móvil calcula las distancias.

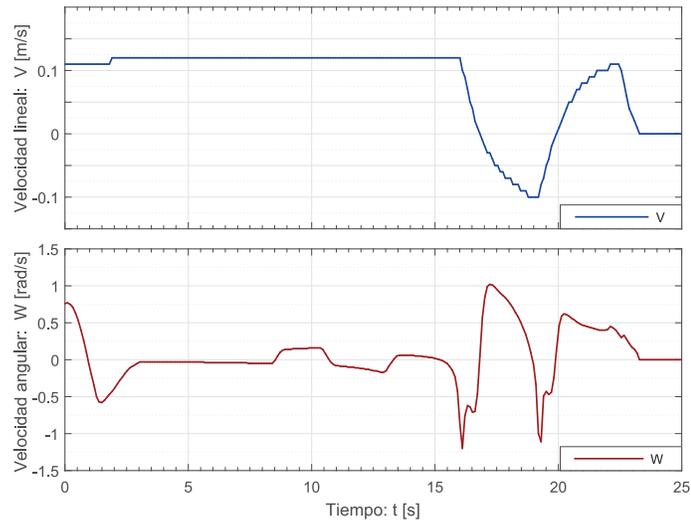


Figura 6.3: Variables de control, caso libre de colisiones; un agente.

En la figura 6.3 se muestran las variables de control, es decir, las velocidades traslacional V_i y rotacional W_i necesarias para comandar al robot.

A diferencia de la simulación del mismo caso, las oscilaciones son más grandes y la respuesta más lenta, lo que es de esperarse de un sistema mecánico, aún así el móvil se orienta rápidamente, incluso oscila menos que la simulación numérica, esto nuevamente se debe a que no se exige converger a un valor sino estar dentro de un rango determinado.

A pesar de que la trayectoria no es exactamente igual a la esperada, el comportamiento general se mantiene y al final se alcanzan valores aceptables, suficientemente cercanos a los deseados.

6.1.2. Caso con posibilidad de colisión para un agente.

Como en la simulación, se introduce un obstáculo estático con un diámetro de $0.75[m]$ al centro del espacio de trabajo. En la tabla 6.3 se muestran los parámetros utilizados.

Tabla 6.3: Condiciones iniciales y deseadas.

r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
0.4	0	0.5	0	2	0.1	$-\pi/6$

En la figura 6.4, se muestra el resultado del experimento, la trayectoria que al inicio es recta, se modifica para evadir al obstáculo y finalmente se alcanza la posición deseada.

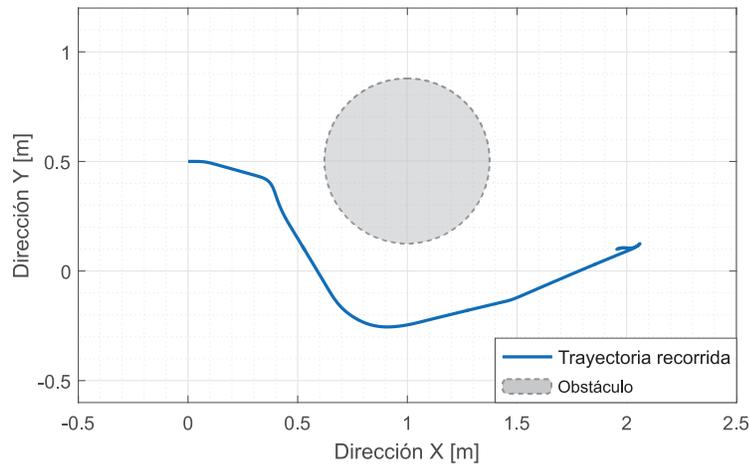


Figura 6.4: Trayectoria con posibilidad de colisión; un agente.

Los errores de posición y orientación se muestran en la figura 6.5, nuevamente sus valores

finales se encuentran muy cerca de cero.

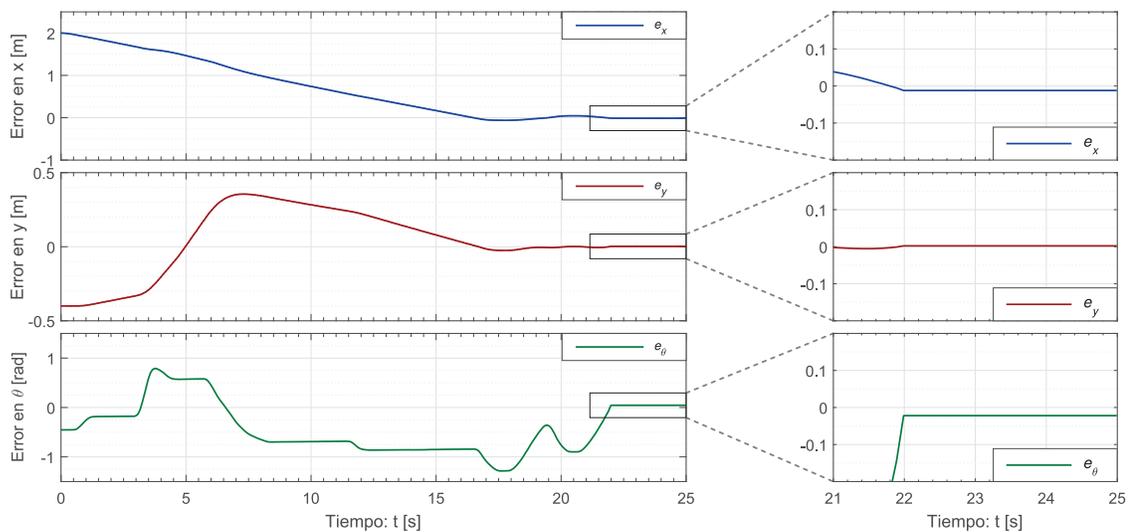


Figura 6.5: Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; un agente.

La evolución de las variables de control a lo largo del experimento se muestran en la figura 6.6, como se esperaba, el controlador comienza a modular la velocidad angular para orientar al móvil hasta que se ha alcanzado la posición cartesiana.

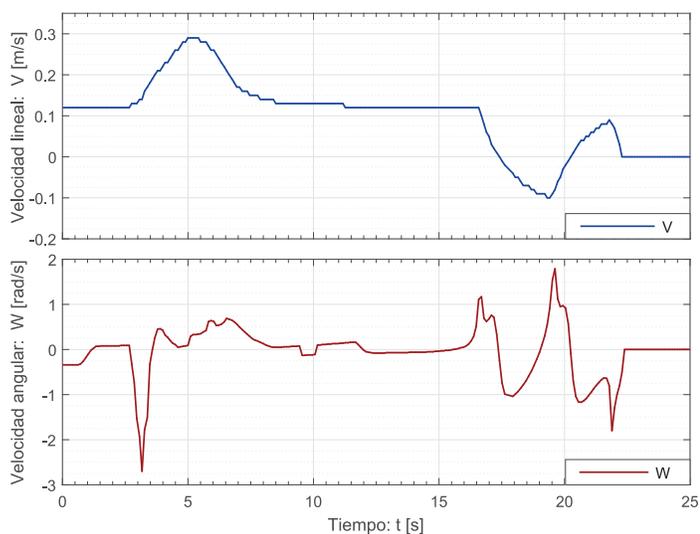


Figura 6.6: Variables de control, caso con posibilidad de colisión; un agente.

6.2. Implementación experimental para dos agentes.

Se considera que los resultados de un sistema compuesto por dos agentes resulta suficiente para mostrar que el controlador se desempeña satisfactoriamente, pues como se determinó en los casos de simulación, al incorporar un mayor número de individuos, se incrementa la complejidad en el comportamiento global, sin embargo, cada uno sigue desarrollando las mismas estrategias al encontrarse con obstáculos u otros agentes.

Cabe resaltar que para los experimentos siguientes se utilizaron exactamente los mismos parámetros y ganancias que para los casos de un sólo agente.

6.2.1. Caso con posibilidad de colisión, obstáculo estático.

Para este caso, cada móvil inicia en un extremo del espacio de trabajo y se coloca un obstáculo con diámetro de $0.27[m]$ al centro del mismo, las posiciones iniciales y finales se enlistan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.3	0	-0.4	0	1.5	0.5	0
2	0.35	1.8	0.4	π	0.3	-0.5	π

En la figura 6.7 se muestra el resultado del experimento, en el cual sólo se interactúa con el obstáculo central, ya que las áreas de confort nunca se intersectan.

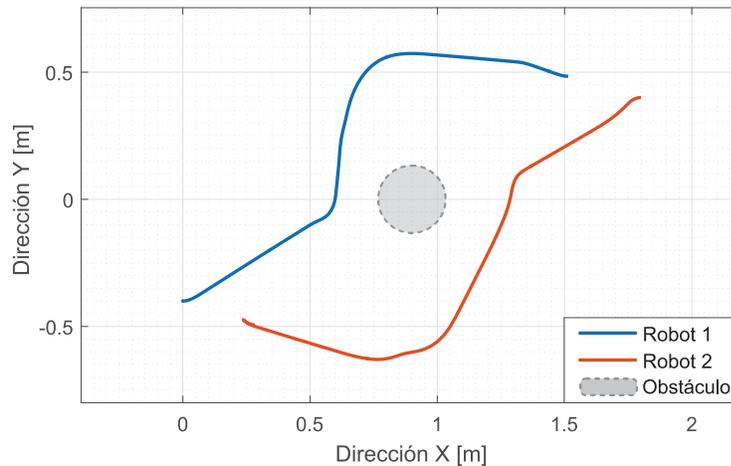


Figura 6.7: Trayectoria con posibilidad de colisión; dos agentes.

Se observa en la figura 6.8 que las trayectorias difieren para cada agente, esto se debe principalmente a que los radios de las áreas de confort r_i son diferentes para cada uno.

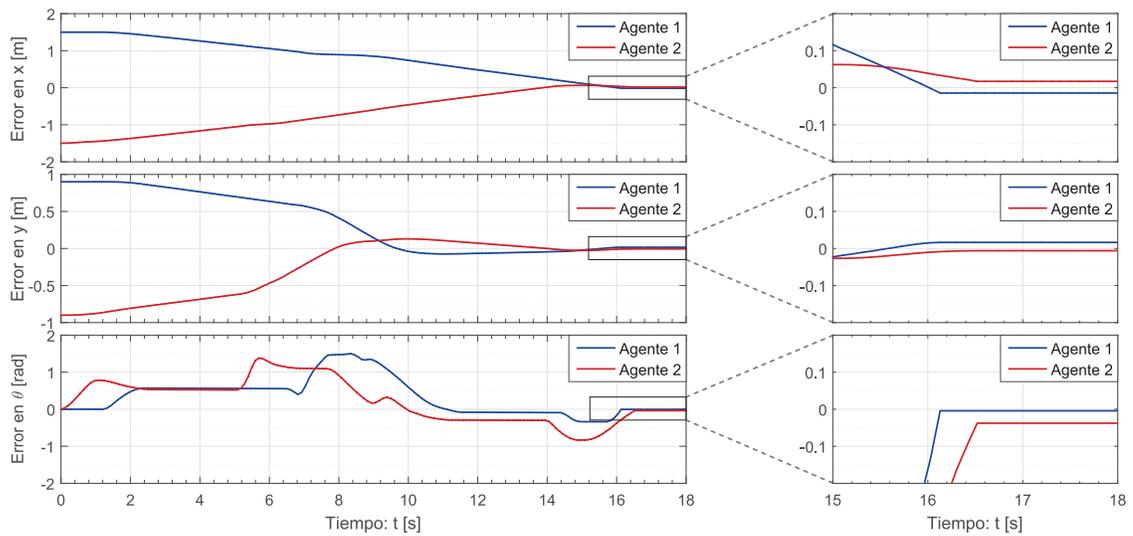


Figura 6.8: Errores de posición y orientación, caso con posibilidad de colisión; dos agentes.

Para este caso, ambos agentes tienden a acelerar mientras giran para realizar la evasión, nuevamente las diferencias se atribuyen a las áreas de confort.

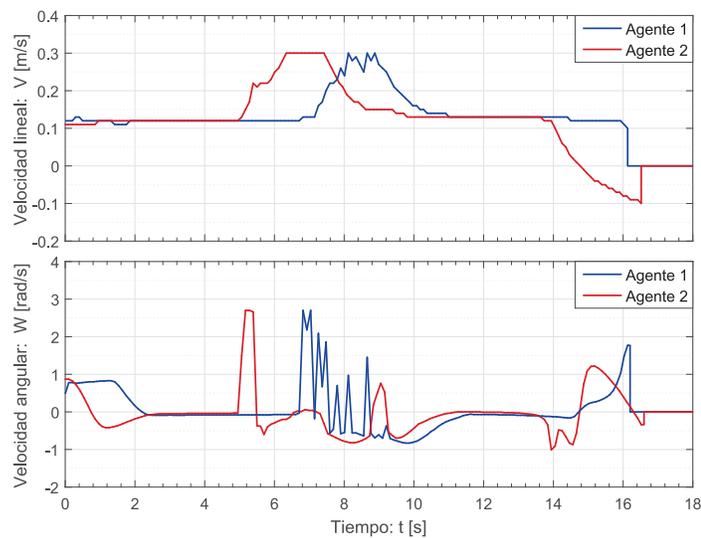


Figura 6.9: Variables de control, caso con posibilidad de colisión; dos agentes.

6.2.2. Casos con posibilidad de colisión debido a la interacción directa entre agentes.

A diferencia de las simulaciones numéricas, donde las posiciones y velocidades de cada agente son conocidas por el resto en tiempo real, y son usadas para calcular la distancia y la velocidad relativa de aproximación, en los casos experimentales, esos datos se obtienen mediante los sensores de proximidad montados en el chasis de cada robot.

El sistema puede diferenciar entre los obstáculos estáticos y otros agentes al calcular la velocidad de aproximación y compararla con la velocidad instantánea del robot, si existe diferencia entre ambos valores, se considera que el obstáculo es móvil o que se trata de otro agente. En la tabla 6.5 se muestran los valores de posición y orientación utilizados.

Tabla 6.5: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.4	0	-0.06	0	1.4	-0.06	0
2	0.45	1.4	0.06	π	0	0.06	π

Las trayectorias seguidas por los agentes se muestran en la figura 6.10, se aprecia que una de ellas tiene un arco más pronunciado que el otro, esto nuevamente se debe a la diferencia de las áreas de confort, pues el tiempo que el otro agente es percibido es mayor, esto implica cálculos y acciones evasivas más duraderas.

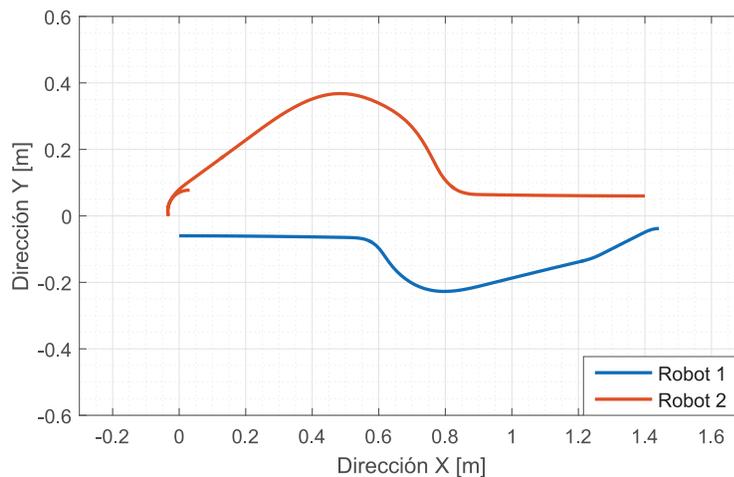


Figura 6.10: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa; dos agentes.

Los errores de posición y orientación se muestran en la figura 6.11, donde se hace evidente que el agente con menor área de confort, requiere menor cantidad de tiempo para llegar a la postura deseada.

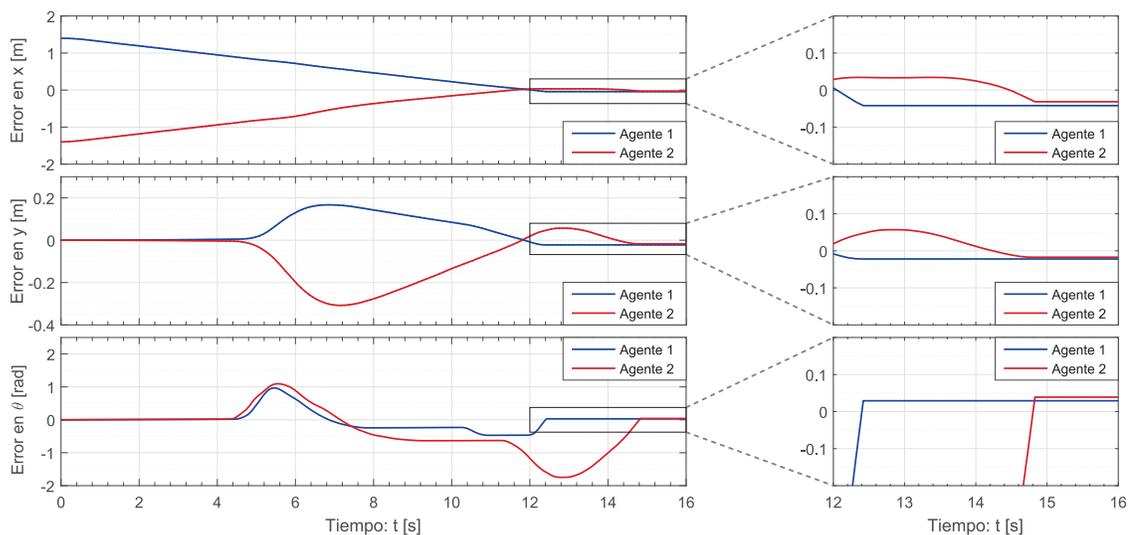


Figura 6.11: Errores de posición y orientación, caso con interacción directa; dos agentes.

Las variables de control reafirman las estrategias estudiadas hasta ahora, lo cual puede observarse a detalle en la figura 6.12.

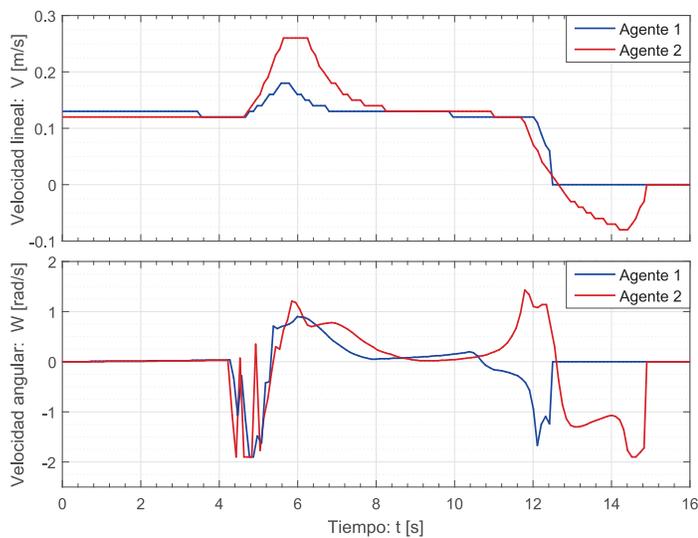


Figura 6.12: Variables de control, caso con interacción directa; dos agentes.

En el experimento anterior se trató el caso en el que los agentes se aproximan de frente, a continuación se analiza un caso común, donde los agentes se encuentran de forma lateral.

En este escenario, cada móvil debe llegar al lado opuesto del espacio de trabajo, lo que implica que las trayectorias de ambos deben cruzarse en un punto, donde deberán desarrollar su estrategia de evasión. Las posiciones y orientaciones se presentan en la tabla 6.6.

Tabla 6.6: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.3	0	0.33	0	1.7	-0.43	0
2	0.35	0	-0.43	0	1.4	0.43	0

Esta situación conlleva ciertas dificultades, pues a diferencia de lo que se ha presentado hasta ahora, las acciones de cada agente deben ser muy distintas una de la otra; para tener éxito, uno de los agentes debe pasar primero, mientras que el otro tendrá que esperar hasta que el camino quede despejado.

Lo anterior parece complicado debido a que ambos robots tienen programado el mismo algoritmo y actuarían de manera similar, sin embargo, al detectarse con un ángulo distinto puede solucionarse el problema. En la figura 6.13 se muestran las trayectorias seguidas.

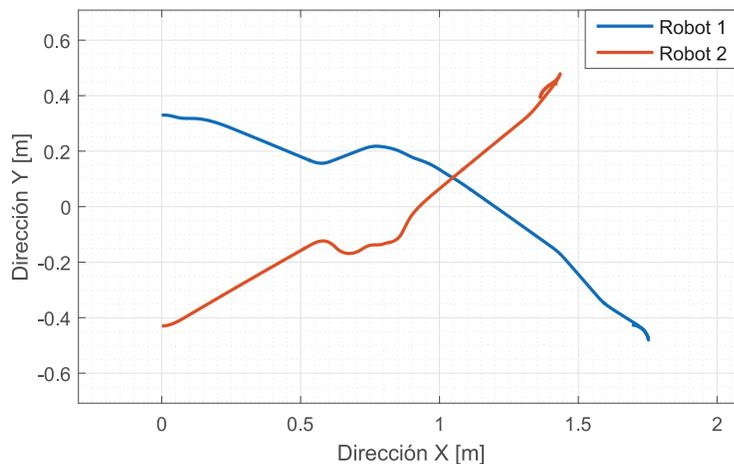


Figura 6.13: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción lateral; dos agentes.

En la figura 6.14, los errores e_{x_i} y e_{y_i} para el agente 2 mantienen su valor alrededor de $t = 7[s]$ hasta $t = 13[s]$, esto implica que se mantiene en la misma posición durante dicho

periodo de tiempo, mientras tanto el otro agente continúa con su trayectoria, una vez que el camino está libre, ambos continúan hasta alcanzar la posición objetivo.

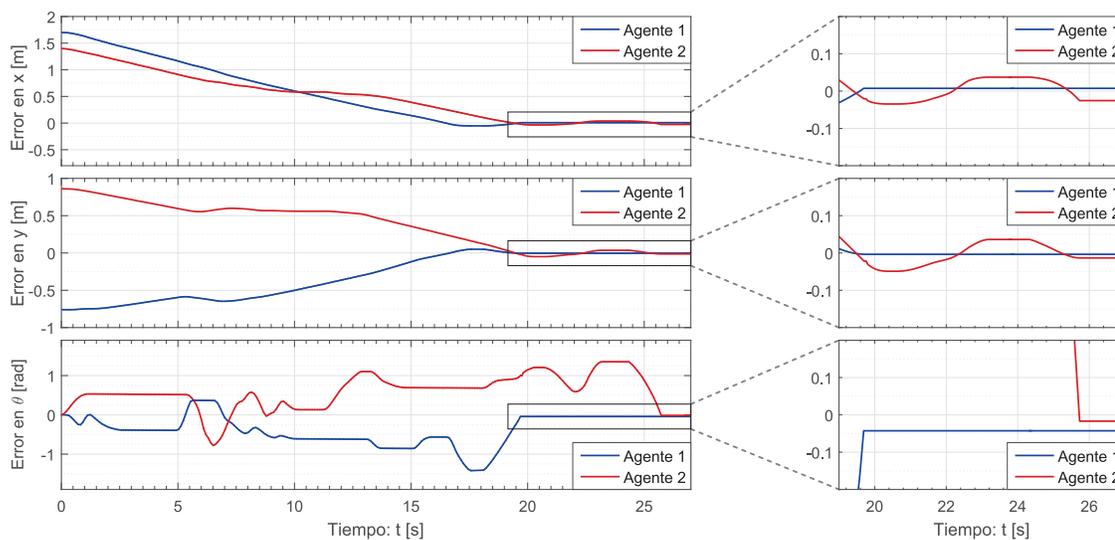


Figura 6.14: Errores de posición y orientación, caso con interacción lateral; dos agentes.

Las variables de control se muestran en la figura 6.15, donde se aprecia que el agente 2 baja su velocidad hasta detenerse, lo que confirma el comportamiento descrito.

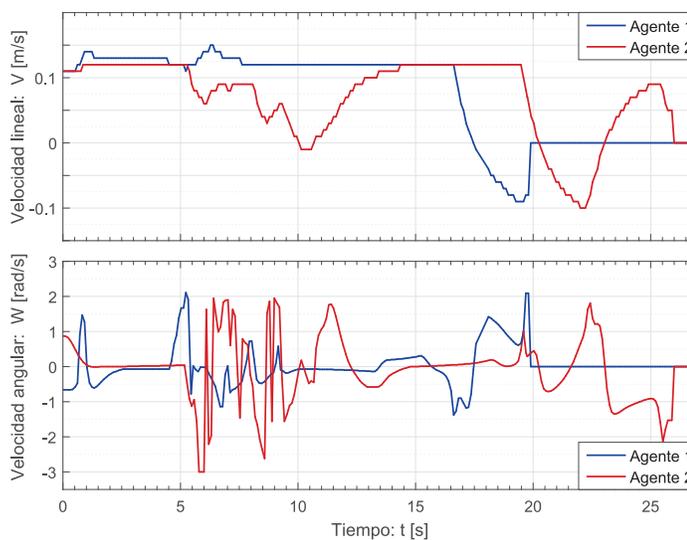


Figura 6.15: Variables de control, caso con interacción lateral; dos agentes.

6.2.3. Caso con interacción directa entre agentes y con obstáculos estáticos en el entorno

Como último caso se presenta una situación convencional donde se incorpora tanto interacción directa entre agentes como con el entorno, para esto se agregan obstáculos de tamaños distintos que provocarán acciones particulares mientras cada agente sigue su camino hasta la posición objetivo.

Las posiciones y orientaciones tanto iniciales como deseadas se enlistan en la tabla 6.7.

Tabla 6.7: Condiciones iniciales y deseadas.

Agente	r_i [m]	$x_i(0)$ [m]	$y_i(0)$ [m]	$\theta_i(0)$ [rad]	x_{d_i} [m]	y_{d_i} [m]	θ_{d_i} [rad]
1	0.3	0	0.3	0	2.4	0.35	0
2	0.3	0	-0.3	0	2.4	-0.35	0

Las trayectorias de cada agente en este experimento se muestran en la figura 6.16, donde cada círculo representa un obstáculo en el entorno.

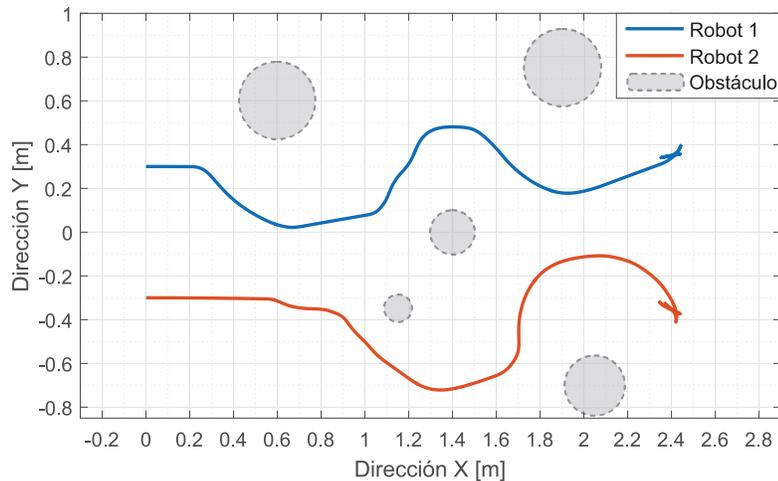


Figura 6.16: Trayectoria con posibilidad de colisión por interacción directa entre agentes y con el entorno; dos agentes.

Mediante el análisis de los errores en la figura 6.17, es posible notar que, a pesar de que la posición cartesiana es alcanzada en tiempos similares, al primer agente le toma un poco más conseguir la orientación esperada y su error e_{θ_i} tarda más en converger a un valor aceptable.

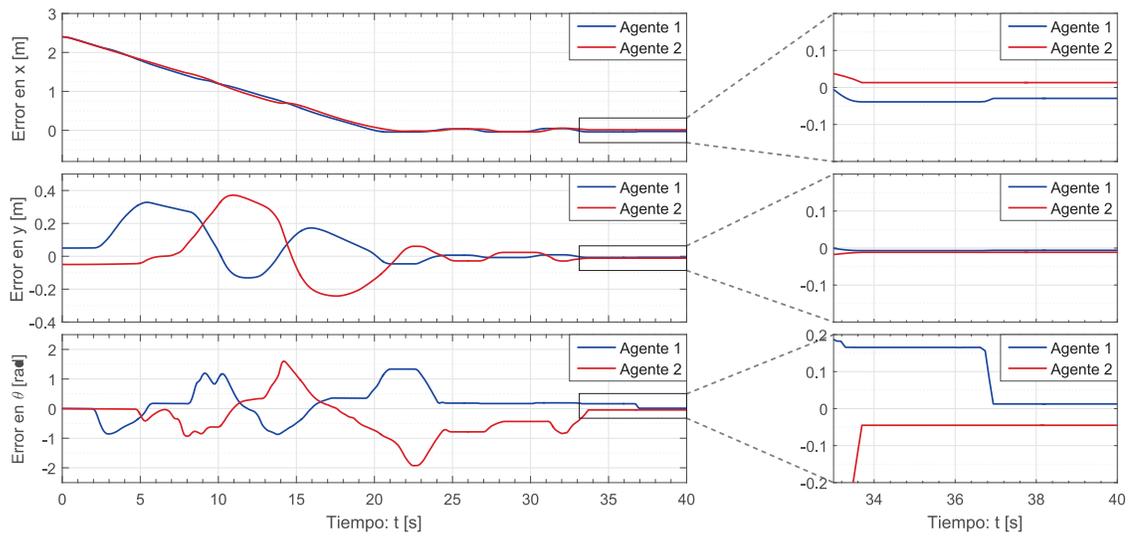


Figura 6.17: Errores de posición y orientación, caso con interacción de agentes y entorno; dos agentes.

Por otro lado, en la figura 6.18, se muestra la evolución de las variables de control V_i y W_i para este caso; se observan oscilaciones al final de la trayectoria, generadas para alcanzar la orientación que se desea.

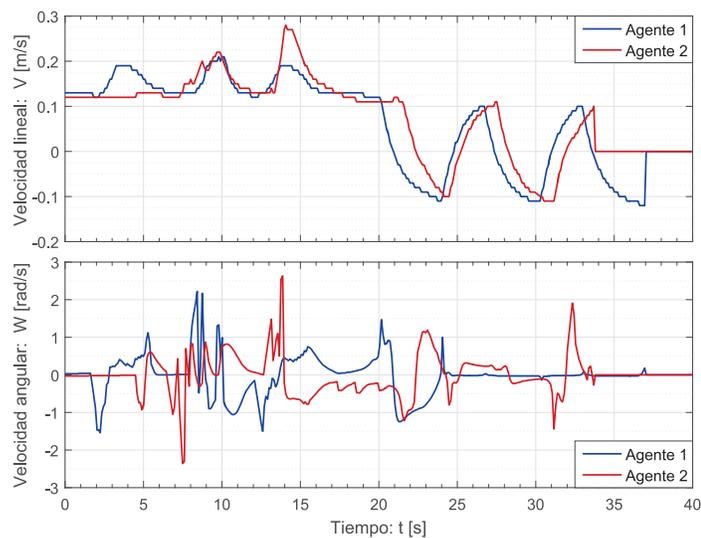


Figura 6.18: Variables de control, caso con interacción de agentes y entorno; dos agentes.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el presente trabajo se propone un controlador que permite la navegación de manera autónoma a un conjunto de agentes que comparten el mismo entorno.

Se hace uso de un modelo conductual inspirado en la dinámica observada en individuos inmersos en multitudes, ver Capítulo 2, el cual se modifica tomando ciertas consideraciones con la finalidad de implementarlo, tanto virtual como físicamente a un conjunto de robots móviles de tracción diferencial.

En dicho modelo se destaca el concepto de espacio individual o área de confort, que se define como el espacio físico que un individuo requiere para “sentirse” cómodo, lo cual en el contexto del sistema de control se interpreta como el espacio que debe permanecer libre de obstáculos para continuar con la trayectoria hacia la posición deseada, dicho de otro modo, si un obstáculo de cualquier tipo se encuentra dentro de esta área, se opta por realizar acciones evasivas con la finalidad de evitar colisiones, modificando la ruta original; lo cual se trata a detalle en el Capítulo 3.

Una característica a destacar de éste sistema de control, es que se procesa de manera descentralizada, es decir, no se requiere de equipos externos que procesen el algoritmo, por el contrario, el cálculo se realiza a bordo de cada robot mediante la incorporación

de una tarjeta de desarrollo. Lo anterior permite utilizar parámetros distintos para cada agente, resultando en acciones y comportamientos propios con el fin de conseguir los objetivos planteados.

Mediante el análisis de estabilidad en sentido de Lyapunov, se demuestra la estabilidad asintótica y convergencia del sistema en lazo cerrado para el caso libre de colisiones, se considera que el vector de estados está compuesto por las variables que representan los errores de posición y orientación, así como las velocidades respecto a los ejes del marco de referencia inercial, ver Capítulo 3, donde el origen es un punto de equilibrio del sistema. Este análisis facilita además la elección de las ganancias para el controlador, ya que éstas deben satisfacer las condiciones de estabilidad encontradas.

Por medio del entorno de simulación generado y los experimentos realizados con los robots físicos, se logró comprobar y validar el funcionamiento del esquema de control propuesto, lo cual ha permitido generar las conclusiones y plantear las perspectivas de trabajo futuro enlistadas en las secciones siguientes.

7.1. Conclusiones

- Con base en los resultados obtenidos, es posible afirmar y corroborar que los modelos basados en comportamiento se pueden considerar como alternativas importantes a esquemas de control deliberativo, desarrollados para robots móviles, particularmente para sistemas multiagente.
- Es importante destacar que el controlador desarrollado permite a cada agente, alcanzar una posición cartesiana y una orientación específica mediante el mismo algoritmo, situación que amplía su campo de aplicación con respecto a sistemas que garantizan convergencia sólo en posición.
- Debido a su naturaleza reactiva, el controlador puede ser utilizado en ambientes poco estructurados o de los cuales no se cuenta con un modelo virtual, incluso en espacios pequeños e interiores, donde para otras estrategias, se presentan dificultades para la evasión de obstáculos, por supuesto, contando con una correcta sintonización de ganancias.
- Al no requerir una construcción numérica del entorno en el que se desenvuelve, éste controlador resulta económico en términos de capacidad de procesamiento, lo cual ha permitido el desarrollo descentralizado para brindar autonomía al sistema.
- Como se demuestra por medio del análisis de estabilidad, el esquema de control es confiable, siempre y cuando se tenga cuidado de satisfacer las condiciones de estabilidad.

7.2. Perspectivas

Los puntos que se muestran a continuación se plantean como propuestas de trabajo futuro, en el caso de que se desee mejorar o ampliar los alcances del sistema presentado, o incluso si es considerado como base para desarrollos alternos.

- Mejorar las prestaciones de cada robot utilizando componentes de mayor calidad, principalmente para el caso de los motores; esto permitirá reducir los errores en la localización, mejorar la respuesta del robot ante los cambios de dirección y cuando se requiera desarrollar velocidades bajas.
- Incorporar sensores adicionales para calcular la posición relativa del móvil, como pueden ser acelerómetros o giroscopios, que aunados a la respuesta de los odómetros permitan mejorar la precisión y fiabilidad de los valores de posición y orientación.
- Incrementar el número de agentes que interactúan en el sistema para validar el funcionamiento en situaciones complejas de multitudes o escape.
- Extender la aplicación del sistema para el seguimiento de trayectorias.
- Incorporar comportamientos adicionales para realizar formaciones o tareas cooperativas.
- Aprovechar las características de seguimiento y evasión de obstáculos en combinación de otro tipo de estrategias de control.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arkin, R. C. (1998). *Behavior-based robotics*. MIT press.
- [2] Balch, T. & Arkin, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 14(6), 926–939.
- [3] Bermúdez, G. (2003). Modelamiento cinemático y odométrico de robots móviles: aspectos matemáticos. *Tecnura*, 20(12).
- [4] Borenstein, J., Everett, H., Feng, L., et al. (1996). Where am i? sensors and methods for mobile robot positioning. *University of Michigan*, 119(120), 27.
- [5] Borenstein, J. & Koren, Y. (1990). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, (pp. 572–577). IEEE.
- [6] Borenstein, J. & Koren, Y. (1991). The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*, 7(3), 278–288.
- [7] Brockett, R. W. et al. (1983). Asymptotic stability and feedback stabilization. *Differential geometric control theory*, 27(1), 181–191.
- [8] Bruemmer, D. J., Dudenhoeffer, D. D., & Marble, J. L. (2002). Dynamic-autonomy for urban search and rescue. In *AAAI mobile robot competition*, (pp. 33–37).
- [9] Bruno, L., Tosin, A., Triccerri, P., & Venuti, F. (2011). Non-local first-order modelling of crowd dynamics: A multidimensional framework with applications. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 426–445.

- [10] Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., & Kahng, A. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous robots*, 4(1), 7–27.
- [11] Chen, X., Yang, Y., Cai, S., & Chen, J. (2009). Modeling and analysis of multi-agent coordination using nearest neighbor rules. In *Informatics in Control, Automation and Robotics, 2009. CAR'09. International Asia Conference on*, (pp. 273–277). IEEE.
- [12] Cheng, H., Chen, H., & Liu, Y. (2015). Topological indoor localization and navigation for autonomous mobile robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(2), 729–738.
- [13] Dai, Y., Lee, S., Kim, Y.-G., & Wee, S.-G. (2014). A switching formation strategy for obstacle avoidance of multi-robot system. In *Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2014 IEEE 4th Annual International Conference on*, (pp. 457–462). IEEE.
- [14] Dai, Y. & Lee, S. G. (2014). Formation control of mobile robots with obstacle avoidance based on goacm using onboard sensors. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 12(5), 1077–1089.
- [15] Davidek, D., Klecka, J., Horak, K., & Novacek, P. (2016). Odometer module for mobile robot with position error estimation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 346–351.
- [16] de Wit, C. C., Siciliano, B., & Bastin, G. (2012). *Theory of robot control*. Springer Science & Business Media.
- [17] Dosey, M. A. & Meisels, M. (1969). Personal space and self-protection. *Journal of personality and social psychology*, 11(2), 93.
- [18] García, D. N., Gilabert, G. B., González, L. H. R., & López, M. B. (2007). Mejoras en la localización odometrica de un robot diferencial mediante la corrección de errores sistemáticos. *Scientia et Technica*, 5(37), 37–42.
- [19] Ge, S. S. & Cui, Y. J. (2002). Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous robots*, 13(3), 207–222.
- [20] Gibson, J. J. (1950). The perception of the visual world. *American Psychological Association*.
- [21] Helbing, D. (1991). A mathematical model for the behavior of pedestrians. *Systems Research and Behavioral Science*, 36(4), 298–310.
- [22] Helbing, D. (1994). A mathematical model for the behavior of individuals in a social field. *Journal of Mathematical Sociology*, 19(3), 189–219.

- [23] Helbing, D. (1998). Models for pedestrian behavior. *arXiv preprint cond-mat/9805089*.
- [24] Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science*, 39(1), 1–24.
- [25] Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.
- [26] Helbing, D. & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
- [27] Helbing, D. & Molnar, P. (1998). Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *arXiv preprint cond-mat/9806152*.
- [28] Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and planning B: planning and design*, 28(3), 361–383.
- [29] Khalil, H. K. (1996). Nonlinear systems. *Prentice-Hall, New Jersey*, 2(5).
- [30] Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1), 90–98.
- [31] Klančar, G., Zdešar, A., Blažič, S., & àkrjanc, I. (2017). *Wheeled Mobile Robotics. From Fundamentals Towards Autonomous Systems* (First ed.). Butterworth-Heinemann.
- [32] Koren, Y. & Borenstein, J. (1991). Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, (pp. 1398–1404). IEEE.
- [33] Kovács, B., Szayer, G., Tajti, F., Burdelis, M., & Korondi, P. (2016). A novel potential field method for path planning of mobile robots by adapting animal motion attributes. *Robotics and Autonomous Systems*, 82, 24–34.
- [34] Lewin, K. (1951). Field theory in social science. selected theoretical papers. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 276, 146–147.
- [35] Liao, W., Zhang, J., Zheng, X., & Zhao, Y. (2017). A generalized validation procedure for pedestrian models. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 77, 20–31.
- [36] Meyer, H. G., Bertrand, O. J., Paskarbit, J., Lindemann, J. P., Schneider, A., & Egelhaaf, M. (2016). A bio-inspired model for visual collision avoidance on a hexapod walking robot. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, (pp. 167–178). Springer.

- [37] Montiel, O., Orozco-Rosas, U., & Sepúlveda, R. (2015). Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5177–5191.
- [38] Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. Pearson educación.
- [39] Orozco-Rosas, U., Montiel, O., & Sepúlveda, R. (2015). Pseudo-bacterial potential field based path planner for autonomous mobile robot navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(7), 81.
- [40] Park, J.-W., Kwak, H.-J., Kang, Y.-C., & Kim, D. W. (2016). Advanced fuzzy potential field method for mobile robot obstacle avoidance. *Computational intelligence and neuroscience*, 2016, 10.
- [41] Patla, A. E. (1997). Understanding the roles of vision in the control of human locomotion. *Gait & Posture*, 5(1), 54–69.
- [42] Rodriguez-Angeles, A., Nijmeijer, H., & van Kuijk, F. J. (2016). A bio-inspired autonomous navigation controller for differential mobile robots based on crowd dynamics. In *International Conference in Swarm Intelligence*, (pp. 553–560). Springer.
- [43] Sadowska, A., Van den Broek, T., Huijberts, H., Van de Wouw, N., Kostić, D., & Nijmeijer, H. (2011). A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling. *International Journal of Control*, 84(11), 1886–1902.
- [44] Samson, C. & Ait-Abderrahim, K. (1991). Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 1136–1141). IEEE.
- [45] Sasaki, T., Brscic, D., & Hashimoto, H. (2010). Human-observation-based extraction of path patterns for mobile robot navigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(4), 1401–1410.
- [46] Siciliano, B. & Khatib, O. (2016). *Springer handbook of robotics*. Springer.
- [47] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
- [48] Simba, K. R., Uchiyama, N., & Sano, S. (2016). Real-time smooth trajectory generation for nonholonomic mobile robots using bézier curves. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 31–42.
- [49] Slotine, J.-J. E., Li, W., et al. (1991). *Applied nonlinear control*, volume 199. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.

- [50] Tomizawa, T. & Shibata, Y. (2016). Oncoming human avoidance for autonomous mobile robot based on gait characteristics. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 28(4), 500–507.
- [51] Turner, A. & Penn, A. (2002). Encoding natural movement as an agent-based system: an investigation into human pedestrian behaviour in the built environment. *Environment and planning B: Planning and Design*, 29(4), 473–490.
- [52] Tzafestas, S. G. (2013). *Introduction to mobile robot control*. Elsevier.
- [53] Ueno, K., Kinoshita, T., Kobayashi, K., & Watanabe, K. (2015). Development of a robust path-planning algorithm using virtual obstacles for an autonomous mobile robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 27(3), 286–292.
- [54] Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., & Shochet, O. (1995). Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical review letters*, 75(6), 1226.
- [55] Weiss, G. (2016). *Multiagent Systems* (Second ed.). The MIT Press.
- [56] Wolf, D. E. & Grassberger, P. (1997). *Workshop on Friction, Arching, Contact Dynamics: HLRZ*. World scientific.
- [57] Wooldridge, M. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems* (Second ed.). John Wiley & Sons Ltd.

ARTÍCULOS PUBLICADOS

Vázquez-Chávez, L. F. & Rodríguez-Angeles, A. Navegación Autónoma Bio-Inspirada para Robots Móviles Diferenciales, *Congreso Nacional de Control Automático*, Monterrey, N.L., México, Octubre 2017, 534-539.

Vázquez-Chávez, L. F. & Rodríguez-Angeles, A. Control de navegación autónomo descentralizado bio-inspirado para sistemas multiagente, *XIX Congreso Mexicano de Robótica*, Mazatlán, México, Noviembre 2017, 155-160.

Rodríguez-Angeles, A. & Vázquez-Chávez, L. F. Bio-Inspired Decentralized Autonomous Robot Mobile Navigation Control for Multi Agent Systems, *Kybernetika*, 2018.