

**AMBIENTE MULTI-AGENTE ROBÓTICO PARA LA
NAVEGACIÓN COLABORATIVA EN ESCENARIOS ESTRUCTURADOS**

GUSTAVO ALONSO ACOSTA AMAYA

Trabajo de Investigación para optar al título de
Magíster en Ingeniería de Sistemas

Director:

JOVANI ALBERTO JIMÉNEZ BUILES

Doctor en Ingeniería – Sistemas e Informática
Universidad Nacional de Colombia

Co-Director:

DEMETRIO ARTURO OVALLE CARRANZA

Doctor en Informática
Université Joseph Fourier, Francia

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
POSGRADO EN INGENIERIA – SISTEMAS E INFORMÁTICA
MEDELLÍN
2010**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, Febrero de 2010

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a las siguientes personas: Mi Director de Tesis, Jovani Alberto Jiménez Builes, PhD. por el apoyo y orientación que me proporcionó durante mis estudios de maestría. A los estudiantes de Ingeniería en Instrumentación y Control del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Alejandra Aristizábal y Christian Toro por el soporte en las pruebas experimentales y codificación de rutinas de mapeo en Matlab.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada familia: Nani, Pe, Bou y a Tomás Daniel, paleontólogo empírico de cinco años y experto en saurópodos y depredadores ya extintos, como el *Acrocanthosaurus* y el *Deinonychus*.

A mis amados padres y a “Agaita” por el amor que siempre me han brindado.

Tabla de Contenido

	Pág.
Tabla de Contenido	5
Lista de Abreviaturas	7
Lista de Figuras	8
Lista de Tablas	11
Resumen	12
Abstract	13
Capítulo 1. Introducción	14
1.1 Motivación	14
1.2 Antecedentes	14
1.3 Definición del problema	16
1.4 Pregunta de investigación	17
1.5 Objetivos	18
1.5.1 Objetivo General	18
1.5.2 Objetivos Específicos	18
1.6 Metodología de Trabajo	18
1.7 Contribución	18
1.8 Organización del documento	19
1.9 Conclusiones del Capítulo	19
Capítulo 2. Inteligencia Artificial Robótica: Marco Teórico y Estado del Arte	20
2.1 Inteligencia Artificial Distribuida y Sistemas Multi-Agente	20
2.2 Robótica	26
2.3 Ambientes Colaborativos	31
2.4 Representaciones Computacionales del entorno	33
2.4.1 Paradigmas en la elaboración de mapas del entorno	33
2.4.2 Modelos computacionales de entornos de trabajo	34
2.4.3 Modelo del Sonar e Interpretación de Medidas de Rango	41
2.5 Conclusiones del Capítulo	48
Capítulo 3. Conceptualización del Sistema Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa	50
3.1 Metodología MAD-Smart	50
3.1.1 Terminología	51
3.1.2 Conceptualización	53
3.1.3 Análisis	54
3.1.4 Diseño	55
3.2 Modelado de Sistemas Multi-Agente Robóticos Mediante MAD-Smart.	56
3.2.1 Conceptualización	56
3.2.2 Análisis.	59

3.2.3	Diseño.....	65
3.2.3.1	Criterios de Selección	65
3.2.3.1.1	Subsistema de control	66
3.2.3.1.2	Subsistema de comunicaciones.....	67
3.2.3.1.3	Subsistema de percepción exteroceptiva	67
3.2.3.1.4	Subsistema de percepción propioceptiva.....	68
3.2.3.1.5	Subsistema de actuación	69
3.3	Conclusiones del Capítulo	69
Capítulo 4. Ambiente Robótico para el Mapeo de Entornos.....		71
4.1	Plataforma Robótica.....	71
4.1.1	Sensórica Propioceptiva del Robot <i>Walling</i>	73
4.1.2	Caracterización de los Sensores Exteroceptivos del Robot <i>Walling</i>	75
4.2	Interfaz de Comunicaciones	83
4.3	Módulo de Navegación <i>Magalhães</i>	85
4.3.1	Arquitecturas de Control de Plataformas Robóticas Móviles	87
4.3.2	Aspectos Generales Relativos al Algoritmo <i>Fuzzy</i> de Seguimiento de Contornos.....	90
4.4	Software de Mapeo para Entornos Interiores: Módulo <i>Vespucci</i>	96
4.4.1	Modo de Adquisición de Datos.....	97
4.4.2	Modo Mapeo.....	98
4.5	Conclusiones del Capítulo	99
Capítulo 5. Pruebas y Resultados		101
5.1	Diseño de Pruebas de Validación	101
5.2	Confiabilidad de la Representación Computacional del Entorno	102
5.3	Entorno 1: área de oficinas con dos paredes y una puerta	103
5.4	Entorno 2: pasillo con dos paredes y una columna	104
5.5	Entorno 3: pasillo con dos paredes y puerta cerrada	105
5.6	Conclusiones del Capítulo	107
Capítulo 6. Evaluación		108
6.1	Respuestas a las Preguntas de Investigación.....	108
6.2	Contribuciones de esta Tesis.....	111
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajo Futuro		112
7.1	Conclusiones	112
7.2	Trabajo Futuro.....	113
Referencias.....		114
Anexos A. Diagramas de Flujo de programas y subrutinas		120

Lista de Abreviaturas

ACL	Agent Communication Language
AI	Artificial Intelligence
AM	Agent Model
BDI	Belief-Desire-Intention
CM	Communication Model
CoP	Coordination Model
CSCCL	Computer-Supported Collaborative Learning
CSCCW	Computer-Supported Cooperative Work
DAI	Distributed Artificial Intelligence
DM	Design Model
DPS	Distributed Problems Solving
EM	Expertise Model
GIDIA	Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia
MAS	Multi-Agent System
NLP	Natural Language Processing
OM	Organization Model
PAI	Parallel Artificial Intelligence
RMAS	Robotic Multi-Agent System
TM	Task Model
TOF	Rango por tiempo de vuelo
UNAL	Universidad Nacional de Colombia

Lista de Figuras

	Pag.
Figura 1.1. Sistema multiagente para el mapeo de entornos interiores de trabajo.	17
Figura 2.1. Esquema de contextualización de los agentes.	22
Figura 2.2. Estructura de un agente	23
Figura 2.3. Estructura mental del agente LALO	24
Figura 2.4. Estructura de los MAS	24
Figura 2.5. Robot Wabot-1	26
Figura 2.6. Robot Sojourner	27
Figura 2.7. Robot Wheelbarrow	27
Figura 2.8. Robot Asimo	28
Figura 2.9. Robot mascota AioErs-210	28
Figura 2.10. Primer Prototipo "Osama" construidos por Acosta & Flórez et al	29
Figura 2.11. Diagrama en Bloques del Primer Prototipo "Osama"	29
Figura 2.12. Segundo Agente Reactivo construido por Acosta & Flórez et al	30
Figura 2.13. Sistema de Localización en Ambiente Estructurado	33
Figura 2.14. Ejemplo de mapa topológico	35
Figura 2.15. Ejemplos de mapas topológicos construidos por robots móviles	36
Figura 2.16. Obtención de características geométricas del entorno mediante un sensor de rango laser	38
Figura 2.17. Segmentación 2D y extracción de primitivas geométricas de la escena mediante un sensor de rango laser	39
Figura 2.18. Dos ejemplos de mapas de celdas	40
Figura 2.19. Respuesta de la señal ultrasónica cuando incide sobre la superficie de un obstáculo	42
Figura 2.20. Medida de distancias por tiempo de vuelo (TOF) de la señal ultrasónica	43
Figura 2.21. Patrón de radiación de la presión acústica en un transductor ultrasónico	44
Figura 2.22. Fenómeno de reflexiones múltiples y crosstalk en los sistemas de sonar	46
Figura 2.23. Modelo bidimensional gaussiano (2Dgauss) del sonar	47
Figura 3.1. Actividades de la Metodología MAD-Smart	52
Figura 3.2 Modelo Jerárquico de Objetivos	56
Figura 3.3. Plantilla Rol Robot Explorador	58
Figura 3.4. Plantilla Rol Navegador	59
Figura 3.5. Plantilla Agente Explorador	59
Figura 3.6. Plantilla Agente Navegador	59
Figura 3.7. Arquitectura Interna para la navegación propuesta por Mataric	60
Figura 3.8. Especificación de una Ontología para el sistema de mapeo de escenarios estructurados	61
Figura 3.9. Modelo de Conocidos	61
Figura 3.10. Escenario de Conversación para el rescate de víctimas	61
Figura 3.11. Escenario de Formación de Grupo	62

Figura 3.12. Comportamiento relacional para el Agente Explorador (<i>Robot Walling</i>).....	62
Figura 3.13. Comportamiento relacional para el Agente Navegador (<i>Magalhães</i>).	63
Figura 3.14. Estrategia para el mapeo del entorno.	63
Figura 3.15. Plantilla para comportamiento cooperativo del agente explorador.....	63
Figura 3.16. Plantilla para comportamiento cooperativo del agente navegador.	63
Figura 3.17. Plantilla de descripción modular del agente robótico <i>Walling</i>	64
Figura 3.18. Plantilla de descripción modular del agente de software <i>Magalhães</i>	64
Figura 3.19. Relación entre los módulos constitutivos de los agentes.	64
Figura 3.20. Plantilla de diseño para el Explorador.	65
Figura 3.21. Plantilla de diseño para el Navegador.	65
Figura 3.22. Plantilla de especificaciones del módulo de control.	66
Figura 3. 23. Plantilla de especificaciones del módulo de comunicaciones inalámbricas.....	67
Figura 3. 24. Plantilla de especificaciones del módulo de percepción exteroceptiva.	68
Figura 3. 25. Plantilla de especificaciones del módulo de percepción propioceptiva.....	68
Figura 3.26. Plantilla de especificaciones del módulo de actuación.....	69
Figura 4.1. Arquitectura <i>Map-Bot</i> para el Mapeo de Ambientes Interiores.....	71
Figura 4.2. Arquitectura de cuatro niveles del Robot <i>Walling</i>	72
Figura 4.3. Disco coficado acoplado a una de las ruedas del robot.	74
Figura 4.4. Prueba de estimación odométrica para trayectos de navegación de 480 cm.	75
Figura 4.5 Descripción del sensor SRF02	76
Figura 4.6. Sensórica exteroceptiva del robot <i>Walling</i>	76
Figura 4.7. Montaje experimental para medidas de distancia con el sonar SFR02.	77
Figura 4.8. Resultados de la prueba de distancia de 4 a 40 cm.	78
Figura 4.9. Resultados de la prueba de distancias mayores a 40 cm.....	79
Figura 4.10 Prueba de reflectividad del sonar SFR02.	80
Figura 4.11. Montaje para prueba de apertura angular del haz del sensor ultrasónico.....	81
Figura 4.12. Prueba de reflexión especular para dos sensores colineales dispuestos sobre el robot <i>Walling</i>	82
Figura 4.13. Tarjeta del subsistema SCol.....	85
Figura 4.14. Paquete de datos UART que circula por el módulo de comunicaciones SCol	85
Figura 4.15. Trayectoria de navegación típica del agente robotico <i>Walling</i> en un entorno estructurado.	86
Figura 4.16. Tarjeta del sistema <i>SenCom_card</i>	87
Figura 4.17. Estructuras de control de bajo nivel en robótica móvil	88
Figura 4.18. Estructuras de control de alto nivel en robótica móvil.....	89
Figura 4.19. Estructura de control de navegación en el robot <i>Walling</i>	91
Figura 4.20. Pruebas de navegación en el robot <i>Walling</i>	92
Figura 4.21. Navegación libre de reflexiones especulares en el robot <i>Walling</i>	93
Figura 4.22. Partición de variables lingüísticas en conjuntos difusos y superficie de control del sistema de navegación <i>fuzzy</i> del Robot <i>Walling</i>	96
Figura 4.23. Presentación del entorno visual.	97
Figura 4.24. Interfaz gráfica para el modo de operación “ <i>Adquisición</i> ”, del módulo de mapeo <i>Vespucci</i>	98
Figura 4.25. Interfaz gráfica en el modo mapeo.....	99
Figura 5.1. Mapeo de un entorno de oficinas	103
Figura 5.2. Mapeo de un tramo de pasillo con paredes no colineales y columna	105
Figura 5.3. Mapeo de un tramo de pasillo con puerta cerrada entre dos paredes	106
Figura A1. Diagrama de flujo del módulo de mapeo <i>Vespucci</i>	120

Figura A2. Diagrama de flujo del programa principal del módulo de control del robot *Walling*.121

Figura A3. Rutina de atención a interrupción por recepción de datos del puerto serial en el robot *Walling*.121

Figura A4. Rutina de atención a interrupción por desbordamiento del reloj de tiempo real.122

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Problemas actuales que enfrenta la robótica móvil [2].	15
Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de las RMAS.	16
Tabla 3.1. Esquemas de ejecución de los roles, x e y son dos actividades (o agrupaciones de actividades) cualesquiera.	52
Tabla 3.2. Modelo de Arquitectura de grupo.	57
Tabla 4.1. Especificaciones técnicas del sensor SFR02	76
Tabla 4.2. Medidas de distancia entregadas por el sonar para diferentes posiciones angulares de la superficie reflectiva	80
Tabla 4.3. Datos de la prueba de apertura angular del sensor SFR02.	82
Tabla 4.4. Datos de reflectividad para dos sensores colineales	83
Tabla 4.5. Caracterización de variables lingüísticas para el controlador de navegación fuzzy del robot Walling	94
Tabla 4.6. Tabla FAM simplificada para el controlador de navegación fuzzy del robot Walling	95
Tabla 5.1. Cálculo del <i>NAMER</i> para el mapa de la figura 5.1 b).	104
Tabla 5.2. Cálculo del <i>NAMER</i> para el mapa de la figura 5.2 b).	105
Tabla 5.3. Cálculo del <i>NAMER</i> para el mapa de la figura 5.3 b).	106

Resumen

La presente tesis de maestría plantea el diseño de un sistema multi-agente robótico, constituido por un agente robótico móvil y un agente de software que cooperan entre sí en la navegación autónoma de entornos interiores de trabajo con el propósito de construir modelos computacionales de dichos entornos.

Para lograrlo se implementa un agente de software para la navegación segura del entorno, con base en comportamientos reactivos. Un primer comportamiento consiste en el seguimiento de contornos, lo que permite que el agente robótico mantenga una distancia constante respecto a obstáculos localizados en su costado derecho. Un segundo comportamiento consiste en la evitación de obstáculos localizados al frente del robot, cuando la distancia a estos es menor o igual a un cierto valor. Estos dos comportamientos aseguran la navegación segura del robot, de tal manera que puede explorar su entorno, adquirir información y transmitirla al módulo de software responsable de la elaboración de representaciones computacionales del entorno.

El agente robótico cuenta con un módulo de sensórica y percepción constituido por sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos y medición de distancias. También dispone de encoders para el cálculo de las distancias lineales que recorren su rueda izquierda y derecha. De esta forma se cuenta con un conocimiento relativo del entorno que permite la implementación de algoritmos simples de navegación reactiva.

El módulo de actuadores está compuesto una caja reductora que incorpora dos motores DC, y brinda al agente robótico la potencia mecánica requerida para que efectúe los trayectos de navegación. El control de los actuadores se realiza con base en el procesamiento de las señales suministradas por el módulo de percepción. El agente de software de navegación da cuenta de la exploración sistemática del entorno de trabajo.

La coordinación entre agentes se establece mediante un sencillo protocolo de comunicación para la transferencia de datos. La elaboración final del mapa o modelo del entorno se lleva a cabo con base en la información captada y transmitida por el agente robótico a medida que explora su entorno.

Palabras clave

Sistemas Multi-Agente, Robótica Móvil, Algoritmos de Navegación, Ambientes Colaborativos, Inteligencia Artificial.

Abstract

This master thesis presents the design of a multi-agent robotic system, consisting of a mobile robotic agent and a software agent cooperates with each other in the autonomous navigation of indoor work environments in order to construct computer models of such environments.

A software agent provides safe navigation of the environment, based on reactive behavior. The first behavior corresponds to a wall following algorithm, allowing the agent to maintain a constant distance to obstacles located on the right side. A second behavior is the avoidance of obstacles located in front of the robot to a distance equal or less to a certain value. These two behaviors ensure safe navigation of the robot; which can explore their environment, acquiring information and transmit it to the software module responsible for the development of computational representations of the environment.

The robotic agent has an ultrasonic perception system for obstacles detection and distance measurements. Encoders are also available for calculating the linear distances that run the left and right wheels. This provides the knowledge of the environment that allows the implementation of reactive algorithms for a safe navigation.

The actuator module comprises a gearbox that incorporates two DC motors, and provides the mechanical power needed to make the navigation paths of robotic agent. The control processes the signals provided by the perception module. The navigation software agent realizes the systematic exploration of the environment.

Coordination between agents is established through a simple communication protocol for data transfer. The final representation is carried out with the information captured and transmitted by the robotic agent.

Palabras clave

Multi-Agent System, Mobile Robotics, Navigation Algorithms, Collaborative Environments, Artificial Intelligence.

Capítulo 1. Introducción

El propósito de este capítulo es suministrar una visión general de la tesis, presentando la motivación y los desafíos que inspiraron el trabajo; la problemática asociada o antecedentes, la definición del problema, las preguntas de investigación, los objetivos y la metodología empleada. Finalmente se exponen las contribuciones y una visión de la estructura del documento.

1.1 Motivación

Uno de los campos de la robótica móvil que más interés ha suscitado en los últimos años en la comunidad científica internacional es el de la navegación planificada de sistemas multi-agente robóticos que desempeñan tareas de forma cooperativa en entornos estructurados de trabajo.

El éxito en la ejecución de las tareas asignadas a un sistema multiagente robótico, depende en gran medida, de la disponibilidad y confiabilidad de modelos a priori de estos entornos de trabajo. Aunque la literatura científica ha propuesto diferentes metodologías para el levantamiento y construcción de modelos de diferentes tipos de entornos de trabajo, especialmente los estructurados, sigue siendo difícil construir modelos confiables y precisos de manera rápida y económica.

Actualmente las propuestas más innovadoras se orientan al uso de Sistemas Multi-Agente (MAS) Robóticos capaces de explorar sistemáticamente un entorno estructurado de trabajo con el fin de elaborar el respectivo modelo [1]. Esta tarea se lleva a cabo de manera más eficiente, cuando se dispone de diferentes tipos de agentes que cooperan entre sí para llevar a cabo la tarea. Un MAS Robótico puede recopilar diferentes tipos de datos que permitan la construcción de un modelo del entorno que se explora.

En esta tesis se presenta el diseño y construcción de un sistema multiagente robotico con el que realiza tareas de exploración sistemática de escenarios estructurados, con base en algoritmos de navegación reactiva, que permiten la elaboración de modelos digitales de dichos escenarios.

1.2 Antecedentes

En el campo de la robótica móvil los esfuerzos investigativos se orientan hacia los Sistemas Multi-Agente Robóticos (RMAS) capaces de ejecutar tareas de forma cooperativa en su

entorno de trabajo. La disponibilidad de mapas confiables de entornos de trabajo son un factor clave de éxito en el desempeño de un RMAS, los cuales se vienen utilizando en aplicaciones como transporte de insumos y materias primas en complejos industriales, seguridad y vigilancia de instalaciones, búsqueda y rescate de víctimas de siniestros, entre otras. Un aspecto crítico tiene que ver con la precisión de los modelos disponibles, la cual se relaciona directamente con casi la totalidad de los problemas que enfrenta la robótica móvil en la actualidad (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Problemas actuales que enfrenta la robótica móvil [2].

Problemas Asociados a la Robótica Móvil		
ítem	Asuntos	Interrogantes por Resolver
1	Percepción	¿Qué hay en el mundo?, ¿Cómo percibo mi entorno?
2	Localización	¿Dónde estoy?, ¿Cómo me ubico en mi entorno?
3	Navegación	¿Cómo me desplazo de un sitio a otro sitio?
4	Inteligencia	¿Qué tengo que hacer?
5	Autonomía	¿Cómo lo tengo que hacer?
6	Cooperación	¿Cómo interactuó con el ser humano? ¿Cómo interactuó con otros robots?

Aunque en la literatura especializada se han propuesto diferentes metodologías para el levantamiento y construcción de modelos de diferentes tipos de entornos de trabajo, especialmente los estructurados¹, sigue siendo difícil construir modelos confiables y precisos de manera rápida y económica [3]. El problema de la elaboración de modelos prácticos y funcionales de entornos de trabajo en el campo de la robótica móvil ha sido abordado, tradicionalmente, desde una perspectiva que favorece la concentración de funciones en un sólo agente, el cual da cuenta de la exploración y recolección de datos del entorno con miras a la elaboración del modelo. En los últimos años ha cobrado fuerza una nueva aproximación que consiste en el uso de Sistemas Multi-Agente Robóticos (RMAS) que trabajan de manera colaborativa para dar solución al problema de la exploración sistemática y recolección de datos del entorno [4]. Se han podido entonces, presentar soluciones más eficientes al problema de la construcción de modelos de entornos. Las principales ventajas y desventajas de una aproximación basada en Sistemas Multi-Agente para la elaboración de mapas de entornos se enumeran en la tabla 1.2.

¹ Un ambiente estructurado corresponde a un espacio arquitectónico de oficinas o instalaciones construidas por el ser humano; es decir, no corresponde a un entorno natural.

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de las RMAS.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS MULTI-AGENTE ROBÓTICOS	
Ventajas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mejora del Rendimiento: Se requiere de menos tiempo para llevar a cabo una tarea. 2. Acción distribuida y percepción distribuida: Mejora la tolerancia a fallos, presenta redundancia.
Desventajas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Interferencias entre sistemas sensoriales cuando se emplean varios robots 2. Incertidumbre respecto a otros agentes robóticos: por ejemplo las intenciones operativas que puedan tener los demás robots. 3. Complejidad del sistema de comunicación: este permite la transferencia de datos y ordenes entre diferentes agentes.

1.3 Definición del problema

El problema de la construcción de modelos de entornos estructurados ha sido abordado desde diferentes puntos de vista. Una de las aproximación clásicas consiste en la fusión de medidas odométricas, infrarrojas (IR) y de ultrasonido (SONAR) con base en un robot móvil encargado de explorar el entorno de trabajo, adquirir información y construir y actualizar el modelo computacional a medida que se adquieren nuevos datos. Las principales desventajas de éste método son:

- Capacidad computacional concentrada en un único agente, en este caso el robot móvil. Esto conlleva a mayores consumos de energía de la plataforma robótica y una alta probabilidad de fallo del sistema debido a la que la carga computacional no se encuentra distribuida entre varios agentes.
- La concentración de tareas en un solo agente requiere de elementos de computación, percepción y locomoción que resultan, generalmente, ser más complejos y costosos.

La aproximación que se plantea se fundamenta en el uso de un Sistema Multi-Agente Robótico en el que la sensórica, la actuación y el control se distribuye entre varios agentes que pueden ser físicos y/o de software [4] [5]. El mapeo se hace con base en una plataforma robótica multiagente que explora sistemáticamente un entorno, adquiere información propioceptiva y exteroceptiva y la transmite a un módulo de software que construye, con base en la información recibida, una representaciones computacional de dicho entorno (ver figura 1.1). Las ventajas que ofrece esta aproximación son:

- Un sistema de computo distribuido permite obtener modelos del entorno en menor tiempo, puesto que no se asignan a un solo agente la ejecución de todas las atareas que se requieren.
- El costo global asociado a la construcción de modelos es menor, puesto que el robot empleado para la exploración del entorno se puede diseñar con base en una arquitectura simple que no exige el uso de elementos y componentes muy sofisticados. La eficiencia

de esta alternativa radica en el trabajo cooperativo de un equipo agentes de hardware y software.

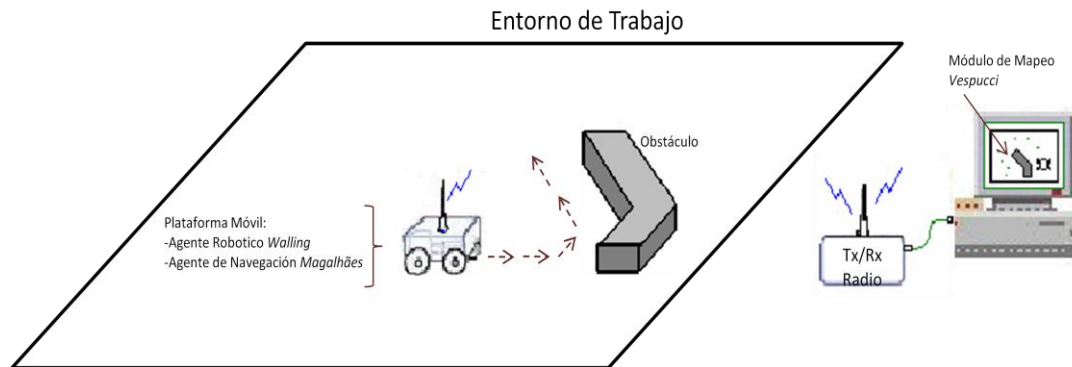


Figura 1.1. Sistema multiagente para el mapeo de entornos interiores de trabajo.

1.4 Pregunta de investigación

Enmarcados en el problema identificado se formuló la siguiente pregunta a investigar: *¿Cómo configurar un ambiente multi-agente robótico para la navegación y mapeo de entornos estructurados de trabajo?*

A partir de la pregunta formulada, surgen los siguientes interrogantes para la investigación:

- *¿Qué arquitectura de Sistema Multi-Agente será la más adecuada para solucionar el problema de la elaboración de mapas de entornos estructurados de trabajo?*
- *¿Cuales deberán ser las características de hardware y software del sistema de comunicaciones de tal forma que se garantice un intercambio eficiente de información entre agentes?*
- *¿Con que características de percepción, locomoción y control deberá contar la plataforma robótica con el fin de garantizar una exploración segura del entorno?*
- *¿Cuáles estrategias de exploración resultarán ser las más eficientes para la elaboración de mapas en entornos estructurados de trabajo?*
- *¿En qué medida resulta ser más eficiente y precisa la construcción de modelos de entornos estructurados con base en un sistema multiagente en comparación con la aproximación tradicional basada en un único agente robótico?*

1.5 Objetivos

Los objetivos trazados fueron:

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un Ambiente Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa en Escenarios Estructurados.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Conceptualizar un modelo de sistema multi-agente robótico para la navegación colaborativa.
- Diseñar un mecanismo operacional de navegación autónoma y colaborativa para el modelo de sistema multi-agente robótico.
- Diseñar un algoritmo de control dinámico integrando sensórica para el sistema multi-agente robótico.
- Diseñar un modelo de sistema multi-agente robótico integrando el mecanismo operacional de navegación autónoma y colaborativa; y el algoritmo de control dinámico.
- Validar el modelo de sistema multi-agente robótico integrando el mecanismo operacional de navegación autónoma y colaborativa; y el algoritmo de control dinámico, mediante la construcción de un sistema que permita el levantamiento de mapas digitales de entornos estructurados.

1.6 Metodología de Trabajo

En este trabajo se emplea una metodología instrumental basada en el diseño y construcción de prototipos mecatrónicos, los cuales se someten a múltiples pruebas experimentales para la validación de modelos teóricos. Se asume la evidencia teórica y experimental como aspecto orientador de los procesos de razonamiento que permiten adquirir una mayor comprensión de los fenómenos asociados al objeto de estudio, lo que facilita la resolución de problemas concretos.

1.7 Contribución

La principal contribución de este trabajo consiste en proponer y validar una arquitectura robótica reactiva para la elaboración de mapas del entorno a partir de aproximaciones conceptuales y procedimentales adaptadas de la teoría de agentes y sistemas multiagente.

El sistema propuesto incorpora un agente robótico, un agente de software, un módulo de software para la representación computacional de entornos y una estación de comunicaciones. El agente robótico, denominado *Walling* cuenta con sistemas de percepción propio y exteroceptivos, control, efectores y comunicación. A este agente le fue asignada la tarea de capturar información del entorno a medida que lo explora. El control de los desplazamientos del agente robotico, es tarea del agente de software *Magalhães*, el cual soporta la navegación segura de *Walling* en su entorno a partir de dos comportamientos emergentes. Un comportamiento de alta prioridad para la evitación de obstáculos que se basa en un control por fuerza bruta (*hard control*) y un comportamiento de baja prioridad para el seguimiento de contornos, el cual se implementó con base en un controlador *fuzzy* tipo *Mamdani*.

El sistema propuesto permitió construir representaciones de entornos de prueba tales como tramos de pasillos con columnas, muros y puertas de acceso; también se consideraron tramos de entornos de oficinas delimitados por muros y puertas de acceso. Los mapas obtenidos podrían ser utilizados en tareas de navegación, localización y planeamiento de trayectorias.

1.8 Organización del documento

El documento consta de seis capítulos.

En el capítulo uno se define el problema y se plantea la pregunta de investigación. También se establecen los objetivos de esta tesis y su nivel de contribución.

En el capítulo dos se presenta la fundamentación teórica y el estado del arte de la inteligencia artificial robótica y el mapeo de entornos de trabajo con base en sistemas ultrasónicos de percepción.

En el capítulo tres se presenta la conceptualización del Sistema Multi-Agente Robótico para la navegación colaborativa.

En el capítulo cuatro se describe el sistema multiagente propuesto.

En el capítulo cinco se presentan las pruebas experimentales y los resultados obtenidos

Finalmente, en el capítulo seis, se presentan las conclusiones y las perspectivas de trabajo futuro.

1.9 Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se identifica el problema de investigación y se establece la serie de preguntas que deberán ser contestadas para resolver el problema. Se Plantean los objetivos a cumplir y la metodología de trabajo a emplear para el logro de los objetivos.

Capítulo 2. Inteligencia Artificial Robótica: Marco Teórico y Estado del Arte

En este capítulo se suministra el marco teórico y se revisa el estado del arte de las áreas de investigación abarcadas. En la primera sección se hace una contextualización referente a la inteligencia artificial distribuida y los sistemas multi-agente. En la segunda sección se aborda el área de la robótica. En la tercera sección se examinan los ambientes colaborativos.

2.1 Inteligencia Artificial Distribuida y Sistemas Multi-Agente

La inteligencia artificial es una disciplina en la cual se desarrollan algoritmos de comportamiento que emulan ciertas características de los organismos biológicos inteligentes. Otras definiciones son [6]:

“Un campo de estudio que se enfoca a la explicación y emulación de la conducta inteligente en función de procesos computacionales” [7]

“El arte de crear máquinas con la capacidad de ejecutar funciones que son realizadas por personas y requieren inteligencia” [8]

“El estudio de las capacidades mentales mediante el uso de modelos computacionales” [9]

La necesidad de distribuir las actividades y la inteligencia puede explicarse, según [10], mediante los siguientes cinco aspectos (Figura 2.1):

- Los problemas complejos son físicamente distribuidos: así por ejemplo, una red de transporte, por su naturaleza propia, es distribuida geográficamente, al igual que un sistema de control industrial, tales como los usados en las refinerías o en líneas de ensamblaje que tienen una distribución espacial. Lo anterior se aplica igualmente al manejo del tráfico vehicular y aéreo, cada automóvil o aeroplano es una entidad autónoma, la cual trata de alcanzar su destino final en las mejores condiciones posibles.
- Los problemas son ampliamente distribuidos y heterogéneos en términos funcionales. El diseño de productos industriales así como la construcción de autos de carreras, una nave espacial o un lanzador de cohetes, requiere de la intervención de un gran número de

especialistas, los cuales tienen únicamente un punto de vista muy local con respecto a todos los problemas que están envueltos en la creación de dicho sistema. Ninguno de ellos está suficientemente capacitado o posee todo el conocimiento para construirlo por sí mismo. Un auto de Fórmula 1, por ejemplo, requiere de una gran cantidad de expertos para perfeccionar su diseño: especialistas en motores, chasis y ejes, el jefe de ingenieros, el conductor. Toda esta gente pone su conocimiento en común para tratar de hacer el mejor carro que exista.

- Las redes de información nos obligan a tener una visión distribuida. Nos encontramos en la edad de las redes de información intercontinental, en donde los datos y los procesos se encuentran distribuidos en una serie de sitios y servidores en todo el mundo. La red Internet por su parte, ya tiene decenas de miles de sitios Web donde acceder a la información. Debemos cambiar nuestra mentalidad de trabajo de sistemas cerrados y adaptarnos al enfoque de sistemas abiertos en donde cada computador es fijo o móvil, está conectado con otro computador en el planeta, a través de la gigantesca telaraña computacional que existe en el mundo.
- La complejidad de las soluciones está relacionada con un punto de vista local. Cuando los problemas son demasiados extensos para ser analizados como un todo, las soluciones basadas en enfoques locales frecuentemente permiten llegar a soluciones más rápidamente. Así por ejemplo, el problema del tráfico aéreo es un problema global, complejo y difícil de resolver por el gran número de parámetros involucrados, al igual que la gran cantidad de restricciones que deben ser manejadas. Enfoques locales hacen posible la solución de este tipo de problemas en forma rápida, elegante y eficiente.
- Los sistemas deben ser capaces de adaptarse a los cambios en la estructura del ambiente. El diseño de entidades debe actualmente enfrentar los cambios en el contexto de las operaciones. Cambios por ejemplo en el ambiente, los sistemas operativos, en los manejadores de las bases de datos, en las interfaces gráficas, en la adición de nuevo hardware y software. En este contexto, los Sistemas Multi-Agente, por su naturaleza distribuida y porque resuelven los razonamientos que ocurren localmente, pero sobre todo porque deciden de la existencia de agentes, incluso mientras el sistema está funcionando, son arquitecturas adecuadas para tomar en cuenta la capacidad de evolución y adaptación necesarias para el funcionamiento del sistema.

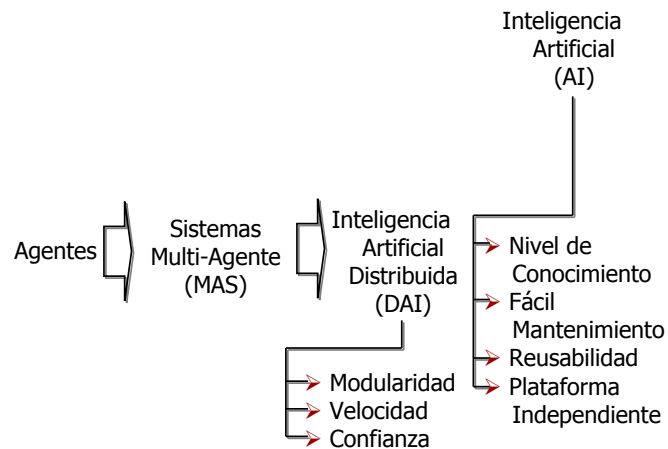


Figura 2.1. Esquema de contextualización de los agentes.

Los Sistemas de Multi-Agente (MAS) surgen en la década de los 80s a partir de las investigaciones de los agentes de software, aunque fue en la década de los 90s donde ganaron notoriedad [11].

El concepto de agente se remonta a la década de los 70s al modelo de “Actor Concurrente” propuesto por [12]. De este modelo se deriva el concepto de Agente autónomo, interactivo y ejecutor-concurrente. Tenía cierto estado interno encapsulado y podía responder a los mensajes de otros objetos similares [12]. Originariamente se describía a los agentes como “Actores”, luego fue Minsky [13] quien acuñó la palabra “Agente”.

De acuerdo a varios autores [5]; [14]; [15]; [16]; [17] se puede concluir que falta una definición formal para los agentes. La noción actual es aquella según la cual los agentes son entidades que actúan en representación de sus usuarios humanos o dueños para realizar tareas complicadas [18]; [19], se comunican por medio del protocolo de paso de mensajes y realizan sus acciones concurrentemente [12]. Poseen propiedades como: autonomía, habilidad social, reactividad, proactividad [11] [20]; [21], movilidad, continuidad temporal, adaptabilidad y aprendizaje [22]; [23]; [24]. Habitan en ciertos ambientes dinámicos y complejos, sensando y actuando de manera autónoma [6] para adaptarse al ambiente [11] [25]; [26]; mediante lo anterior, realiza una serie de tareas o metas para las cuales fueron diseñado [20]; [27]; [28] (Figura 2.2).

Los agentes se pueden clasificar en dos grandes tipos: Bióticos y de vida artificial. Al primer grupo hacen parte los seres humanos, animales, bacterias entre otros. Al segundo grupo pertenecen los agentes de software (p.ej. virus informáticos, agentes pedagógicos, motivadores, de búsqueda, entre otros) y los agentes robóticos; estos últimos se pueden clasificar en agentes de tareas específicas y agentes de entretenimiento [5].

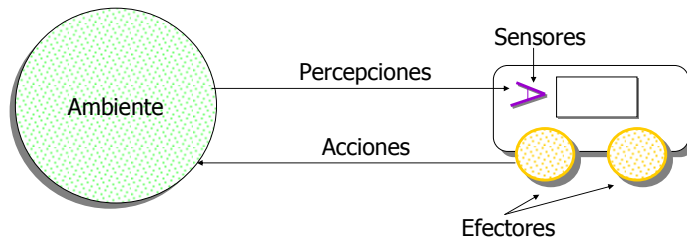


Figura 2.2. Estructura de un agente [6].

Las principales características asociadas a un agente son [11]:

- Autonomía. Es la característica por la cual los agentes operan por sí mismos sin la intervención del hombre u otros agentes, quienes no tienen control alguno en sus funciones y su estado interno.
- Habilidad Social. Por medio de la cual los agentes interactúan con otros agentes (o humanos) por medio de un lenguaje de comunicación preestablecido.
- Reactividad. Los agentes perciben el ambiente (del medio físico, por medio de una interfaz gráfica, o por medio de otros agentes) y responden de manera oportuna cambiando los sucesos.
- Pro-actividad. Los agentes no sólo actúan en respuesta a un evento, deben estar habilitados para tomar la iniciativa, con el fin de conseguir la meta propuesta.

Los agentes suelen modelarse en base a sus estados mentales. El agente LALO del Centro de Investigación Aplicada en Tecnologías de la Información de Canadá [29] está determinado por su estado mental, el cual está compuesto por sus creencias, capacidades y compromisos (Figura 2.3). El concepto de “estado mental” es fundamental en el modelado y diseño de agentes. De manera simple, un agente actuará basado en lo que cree del mundo, en lo que es capaz de hacer y en cómo sus acciones afectarán sus metas. De igual manera, las acciones de un agente son determinadas por sus decisiones, las cuales son limitadas por sus creencias. Dichas creencias hacen referencia al estado del mundo (pasado, presente o futuro), al estado mental de otros agentes y a las capacidades de él mismo y de otros agentes [14].

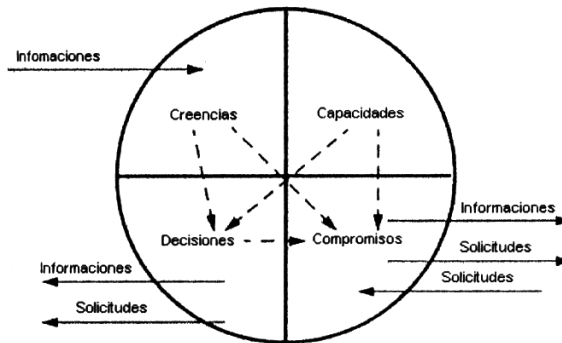


Figura 2.3. Estructura mental del agente LALO [29]; [14].

Los agentes adquieren una nueva dimensión cuando se les agrupa, formando sistemas completos [30], en los cuales se organizan y se relacionan de alguna manera mediante comunicación indirecta a través del ambiente, o por medio de comunicación directa interactuando entre ellos, compartiendo conocimiento, influenciando las decisiones de los demás agentes y haciendo compromisos con los otros (Figura 2.4).

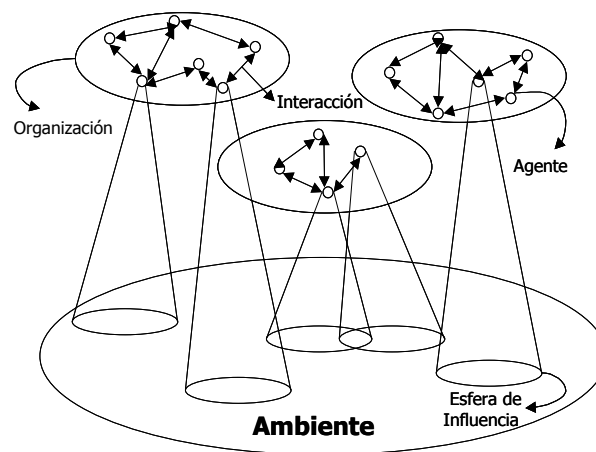


Figura 2.4. Estructura de los MAS [31].

Desde que surgió la Inteligencia Artificial Distribuida (DAI), se han abordado los temas relacionados con el estudio de los modelos y del comportamiento de varios agentes que cooperan entre sí para la resolución de un problema o desarrollo de una tarea. De acuerdo a varios autores [32]; [33]; [34]; [14]; [15]; [10]; [35]; [30]; [19], las características que deben poseer los MAS son:

- Organización Social. Es la manera como los agentes o grupos de agentes se organizan dentro del sistema de acuerdo con la función o rol que les corresponda, sus características, responsabilidades, necesidades y teniendo en cuenta el propósito de la comunicación con los demás agentes.

- Cooperación. Es el resultado de compartir resultados intermedios para producir un avance en la solución de las metas particulares de otros agentes y a la vez, aportar al logro progresivo de las metas globales del sistema. Para algunos autores, la cooperación también se entiende como negociación entre los agentes. Las negociaciones pueden surgir desde la solución de conflictos entre los agentes competitivos hasta la división de las tareas entre los agentes cooperativos. Los sistemas de negociación entre agentes pueden ser clasificados en tres tipos: Negociación basada en la Teoría de Juegos, Negociación basada en Modelos Heurísticos y Negociación basada en la Argumentación [36].
- Coordinación. Es una propiedad de los sistemas de agentes que se encuentran realizando una actividad en un ambiente compartido. Por medio de la comunicación los agentes pueden coordinar sus acciones y comportamiento con el consiguiente resultado de sistemas más coherentes, es decir, sistemas que se comportan bien como una unidad. En síntesis, el objetivo de la coordinación es evitar situaciones de conflictos entre los agentes.
- Control. Es el mecanismo básico de apoyo para la implementación de los mecanismos de la coordinación en un MAS. Este puede ser considerado desde dos puntos de vista: Control global y control local.
- Comunicación. Los agentes pueden comunicarse con el fin de alcanzar sus metas o las de la sociedad o sistema en el cual habitan. Existen tres aspectos formales con relación al estudio de la comunicación: Sintaxis, Semántica y Pragmática.

Los tipos existentes de MAS se pueden clasificar en [15]:

- Auto-organizados. Cada agente dentro del sistema realiza sus tareas de acuerdo con sus propias metas y el comportamiento global del sistema emerge de los comportamientos individuales de los agentes. Son sistemas en los cuales no hay presencia de un elemento central que organice y controle.
- Cooperativos. Los agentes se comunican continuamente para compartir información y determinar las tareas que deben realizar a nivel individual de manera que se avance en el sentido de alcanzar una meta global. El control del MAS se apoya en los mecanismos de coordinación y negociación para permitir la interacción entre los agentes.
- Adaptativos. El sistema en general por su funcionamiento anterior o su experiencia pasada.

2.2 Robótica

La mayoría de robots que se construyen actualmente se encuentran en las fábricas, donde se utilizan para realizar algunas de las tareas más pesadas o repetitivas para los seres humanos, tales como soldar, ensamblar, transportar objetos, mover cargas pesadas y rociar pintura. Generalmente tienen uno o varios brazos y su estructura mecánica está orientada a ser más funcional que estética.

De acuerdo a la Real Academia de la Lengua Española, la palabra robótica es una técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales [37].

Muchos seres humanos ven a los robots como amigos del futuro que servirán para una infinidad de aplicaciones. Es por esto que se ha demostrado un gran interés en los trabajos con androides, que son robots con apariencia humana. Se construyen con parte mecánicas y algunos se cubren con piel sintética de aspecto real, incluso se termina adecuándoles ropa para mejorar su apariencia.

Un ejemplo de androide, es el robot experimental japonés Wabot-1 mostrado en la figura 2.5, utilizado por más de una década en la experimentación de movilidad y reacción ante objetos que lo rodean. Tiene sensores de equilibrio que le permiten caminar, bajar y subir escalas sin caerse. También tiene ocho sensores de tacto en cada mano, cámaras de televisión, un micrófono y altoparlante. Cuando se le da una orden, su “voz” puede responder que ha comprendido y cuando se le indica puede “ver” un objeto, caminar hacia él, tomarlo y llevarlo al lugar indicado. Tiene el control suficiente para poder vaciar agua de un vaso a otro.

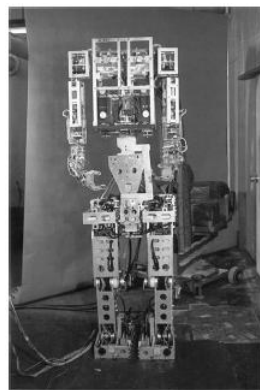


Figura 2.5. Robot Wabot-1.

Otro ejemplo es “Sim One” un modelo de “ser humano” controlado por computador. Se utiliza para ayudar a estudiantes de medicina. Su corazón late, respira y sus ojos parpadean. Su piel tiene la apariencia y tacto de la humana y puede simularse en él diferentes enfermedades. También responde a las medicinas y a los distintos tipos de tratamiento.

Actualmente existen máquinas a control remoto que pueden considerarse robots por su estructura y complejidad de los programas de control. Se usan en lugares y situaciones peligrosas para los seres humanos como es la exploración de la plataforma submarina y la inspección de construcciones subacuáticas e instalaciones petroleras. Un ejemplo de esto es el robot “Consub” que puede descender a gran profundidad en el mar.

Otra máquina a control remoto es “Mobot”, quien manipula productos químicos y radioactivos, nocivos para el ser humano, mientras que su operador permanece seguro en otro cuarto. Lleva cámaras de televisión y micrófonos y sus extremidades en forma de pinzas pueden manejar delicados recipientes de cristal.



Figura 2.6. Robot Sojourner.

En este grupo también se puede incluir el “Sojourner” (Figura 2.6) de la misión espacial “PathFinder”, un pequeño vehículo explorador enviado al planeta Marte para recoger muestras de la superficie. El robot cuenta con cámaras electrónicas para la transmisión de imágenes a la tierra a través de una antena de alto alcance que portaba la sonda que lo acompañaba.



Figura 2.7. Robot Wheelbarrow.

“Wheelbarrow”, un robot que es propiedad del ejército británico (Figura 2.7), es utilizado para buscar y manipular bombas colocadas en automóviles. Se controla a través de un cable eléctrico, tiene una cámara de televisión y otras herramientas. Desde una distancia segura el operador puede guiarlo a un automóvil sospechoso, hacer que rompa una ventana y coloque su cámara en el interior. Si detecta una bomba, el operador remotamente puede manipularla para tratar de desactivarla o de lo contrario hacerla explotar de forma controlada.



Figura 2.8. Robot Asimo.

El robot androide “Asimo”, desarrollado por Honda Motor Co. (Figura 2.8) es pequeño, liviano, y es capaz de caminar de una manera parecida a un humano. Un área básica de investigación de esta empresa en el campo de la robótica, pretende desarrollar robots que caminen autónomamente y que puedan ser útiles a los seres humanos y de uso práctico para la sociedad. La investigación y desarrollo de este proyecto comenzó en 1986.

Con el robot “Asimo” se han logrado desarrollar técnicas de desplazamiento avanzadas, basadas en un control de movimientos predictivos, de acuerdo al centro de gravedad, lo que le permite caminar como un ser humano, con una respuesta instantánea a movimientos repentinos, logrando que el caminar sea natural y estable².



Figura 2.9. Robot mascota AioErs-210.

Otra de las aplicaciones que se han encontrado en la robótica, son los robots mascota, entre los cuales está como ejemplo “Aibo” fabricado por Sony (Figura 2.9). Este robot tiene forma de perro, con una gran movilidad, capacidad de aprendizaje y está dotado de sensores que le permiten reaccionar ante estímulos externos como caricias, golpes, ruidos, entre otros. También tiene la capacidad de reconocer su nombre y algunas palabras simples.

En Colombia Acosta & Flórez et al [38] construyeron un primer prototipo (Figura 2.10) que consiste en un pequeño robot reactivo móvil dotado de una tarjeta de control diseñada con

² [En línea] http://www.21stcentury.co.uk/robotics/honda_asimo_robot.asp. Fecha de acceso: Marzo de 2008.

base en el microcontrolador MC68HC908GP32 de la firma Freescale Inc. Un módulo simple de percepción basado en sensores infrarrojos (IR) le permite determinar la presencia de obstáculos en su ruta y tomar decisiones de cambio de trayectoria.



Figura 2.10. Primer Prototipo “Osama” construidos por Acosta & Flórez et al [38].

El módulo infrarrojo consta de un par emisor-receptor modulado en frecuencia mediante un reloj de 40 KHz lo que permite evitar interferencias de otras fuentes de luz infrarroja, tales como el sol y luminarias de uso residencial. Su rango de operación es de aproximadamente 40 cm (Figura 2.11).

Los efectores de este agente reactivo corresponden a dos pequeños motores DC con control electrónico en puente H y modulación PWM. Estos permiten controlar la marcha y la dirección o posición angular del efector.

La detección se da cuando parte de la energía infrarroja transmitida por el transductor de salida o emisor, es reflejada por el obstáculo y captada en el transductor de entrada o receptor. Una limitante importante del sensor infrarrojo desarrollado es la incapacidad de determinar la distancia y las características del obstáculo detectado.

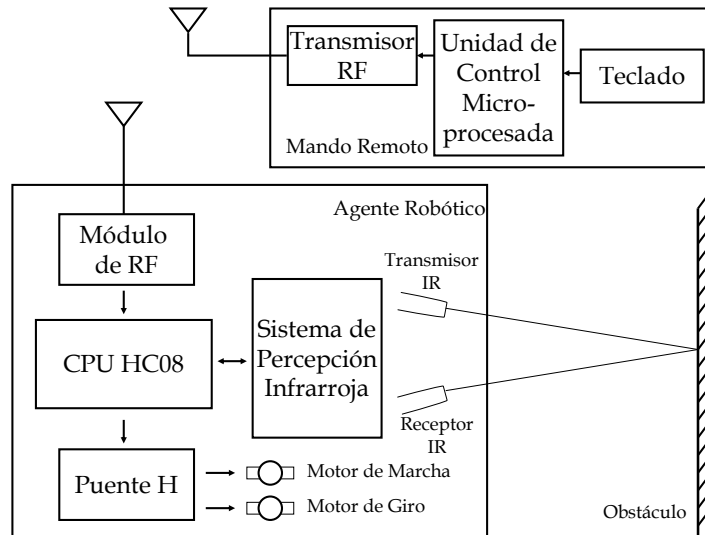


Figura 2.11. Diagrama en Bloques del Primer Prototipo “Osama” [5].

El agente reactivo puede operar en modo autónomo o tele operado. En modo autónomo, el móvil decide su trayectoria con base en la información suministrada por el módulo IR. En modo teleoperado se dispuso de un mando remoto de radio frecuencia microcontrolado especialmente diseñado para la aplicación.

Se desarrollo un segundo robot totalmente autónomo (Figura 2.12) con una sensórica un poco más elaborada, consistente en un módulo de detección de obstáculos y distancias por ultrasonido (sonar). Para este segundo prototipo se diseño una tarjeta de control que dispone de 64 Kb de memoria RAM adicionales y un microcontrolador de 16 bits con instrucciones de lógica difusa en su set de instrucciones. Este microprocesador es el MC68HC912B32, también de la compañía Freescale Inc.

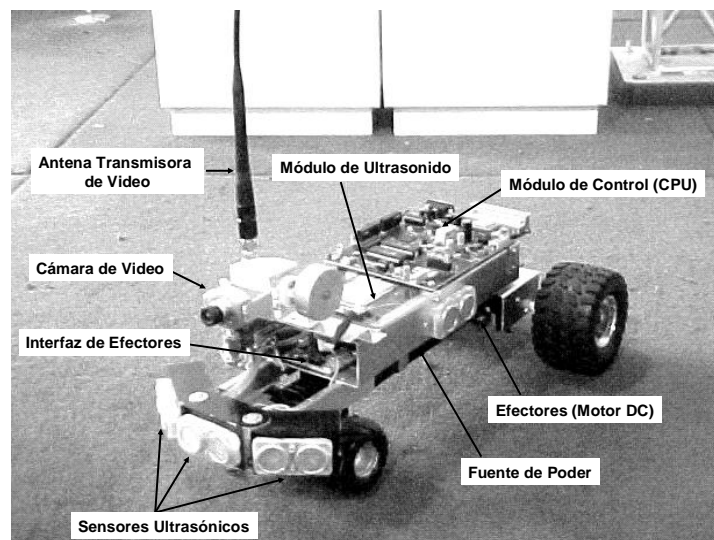


Figura 2.12. Segundo Agente Reactivo construido por Acosta & Flórez et al. Plataforma de Investigación en Robótica Móvil [5].

A pesar de que se diseño un novedoso algoritmo de control neurodifuso para la navegación en entornos estructurados, este robot sigue siendo un agente reactivo, no orientado al trabajo en ambientes colaborativos.

El desarrollo de estos prototipos permitió alcanzar un grado de experticia en el diseño y construcción de sistemas robóticos y sus resultados se vienen extrapolando a situaciones de ambientes colaborativos. No obstante, se deben enfrentar nuevos retos de diseño propios de los MAS como son la habilidad de interacción social, la proactividad, la movilidad, la adaptabilidad y el aprendizaje.

2.3 Ambientes Colaborativos

Los ambientes colaborativos hacen referencia a un grupo de entidades trabajando conjuntamente en un mismo ambiente de trabajo propiciando la colaboración.

El uso de la colaboración para facilitar el aprendizaje y la transmisión del conocimiento fue inicialmente propuesto por la National Science Foundation en 1989, después fue promovido por el National Research Council en 1993 [39].

El término CSCW (Computer-Supported Collaborative Work) fue acuñado para explorar el rol de la tecnología en el ambiente de trabajo [40]. También se conoce con los nombres de Groupware, Workflow y Group Decision Support System.

Dependiendo del grupo de trabajo, la segunda “C” de la abreviatura, puede entenderse como Cooperativo o Colaborativo. La palabra Cooperación se refiere a la búsqueda de una meta común mediante la división de tareas, mientras que la palabra Colaboración hace referencia al logro de un objetivo compartiendo tareas [5].

En un escenario colaborativo es necesario que se den tres elementos claves [41]:

- Igual participación.
- Responsabilidad individual.
- Interdependencia positiva.

Esta tecnología se clasifica según su objetivo principal de la siguiente forma [42]:

- Centrado en el Individuo: El cual gestiona localmente el trabajo de cada individuo en el interior del grupo.
- Centrado en el Escenario: El cual se esmera por la gestión de las tareas encargadas en un determinado entorno, su enrutamiento, consulta, actualización, entre otras.
- Centrado en el Proceso: El cual controla la conclusión de actividades.

Muchos estudios han demostrado que los participantes de un ambiente colaborativo necesitan tener actualizaciones constantes en la información que ellos manejan y que los demás necesitan para llevar a cabo su actividad de forma adecuada [43]; [44]. Esta clase de información se denomina “Awareness”. De esta forma, los individuos se dan cuenta de los cambios que están siendo realizados en el entorno de trabajo por parte de los demás participantes, con el propósito de tener un trabajo efectivo en grupo. Esto permite planear las acciones a realizar y adquirir nueva información [45]. En particular, awareness permite incrementar las oportunidades de una mutua comunicación y de esta forma facilitar la colaboración [46]. La mayoría de la investigación en esta área se refiere a encontrar nuevas

formas de facilitar las interacciones a través del uso de la tecnología entre los participantes de un equipo de trabajo.

➤ **Agentes Robóticos Colaborativos**

Los desarrollos más recientes en robótica móvil buscan obtener agentes robóticos dotados de percepción y cierto grado de inteligencia que realicen tareas útiles en su entorno de trabajo. Esto implica que el sistema sensorial del robot, le debe permitir a éste ciertos niveles de detalle en la comprensión espacial de su entorno.

Hasta cierto punto esta ha sido la aproximación tradicional en la que un solo agente robótico debe disponer de toda la sensorial y potencia computacional necesaria para realizar la tarea previamente definida. Entre las desventajas de esta aproximación se tienen:

- Mayores costos de diseño y construcción
- Mayor tamaño físico del agente
- Mayores niveles de consumo de energía
- Menor confiabilidad: una falla en alguno de los subsistemas que constituyen el agente puede llevar al fracaso en el cumplimiento la tarea debido a la concentración de inteligencia y sensorial en un solo agente [4].

La idea de diseñar sistemas cooperativos de agentes no es nueva y ofrece una serie de ventajas comparativas con respecto a al esquema tradicional, como por ejemplo:

- Simplificación y distribución de tareas mediante la estrategia de solución de problemas conocida como “divide y vencerás”.
- Sensorial e inteligencia distribuida que potencializa el paralelismo de tareas.
- Posibilita el diseño de mini-robots de bajo consumo de energía y de arquitectura más simple, haciendo que el sistema sea más confiable.

Estas ventajas hacen que los RMAS dispongan de mayor capacidad de trabajo, más aún, cuando algunos de los agentes se tornan especialistas en la ejecución de tareas específicas, esto da origen a un trabajo cooperativo más eficiente y adaptable. No obstante el diseñador enfrenta problemas más complejos a la hora de implementar un MAS, comparado con la aproximación tradicional de sistema mono-agente; como son: la coordinación entre agentes y toma de decisiones, la inteligencia y sensorial distribuida que deben de ser soportados por un sistema de comunicaciones robusto y confiable.

El mapeo digital (cartografiado) de un entorno de trabajo es uno de los ámbitos en los que más se utilizan los robots móviles trabajando de forma cooperativa con otros agentes (Figura 2.13). Un equipo de agentes trabaja, y coopera en la tarea de explorar y construir mapas de un entorno estructurado o no, en el cual, posteriormente un grupo de agentes ha

de llevar a cabo una tarea. Una vez el equipo de exploración y mapeo elabora una representación computacional del entorno, el modelo puede ser transferido posteriormente a un segundo grupo de robots que han de ejecutar las tareas predefinidas en dicho entorno. El grupo responsable del levantamiento cartográfico puede entonces desplazarse a otro entorno.

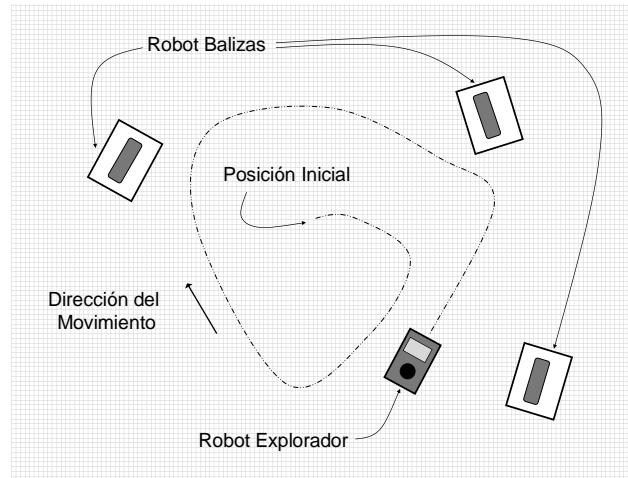


Figura 2.13. Sistema de Localización en Ambiente Estructurado [47]

2.4 Representaciones Computacionales del entorno

El mapeo de espacios físicos desconocidos y dinámicos constituye, hoy por hoy, uno de los problemas esenciales de la robótica móvil. Es un problema complejo que no resulta fácil de resolver, en parte, debido a que se encuentra altamente correlacionado con otros problemas como son la navegación, la localización y la percepción [48], [49]. En efecto, tareas complejas como el trazado de rutas y la navegación deliberativa requieren de modelos precisos y confiables del entorno, que se puedan actualizar fácilmente cuando se trata de entornos cambiantes (objetos y personas en movimiento).

En la mayoría de casos no se cuenta con mapas *a priori* del entorno, de manera tal que nuevas destrezas y habilidades son exigidas a los robots móviles en la actualidad. Por ejemplo habilidades para la exploración segura, adquisición y procesamiento de información del entorno y, sobre todo, la capacidad para la elaboración, *in situ*, de mapas. A medida que el robot va elaborando una representación del entorno, también debe poder determinar, de manera simultánea, su localización en esta representación. En la literatura científica se le denomina SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) o CML (*Concurrent Mapping and Localization*) al problema de la elaboración de mapas y localización simultánea de robots en su entorno.

2.4.1 Paradigmas en la elaboración de mapas del entorno

En robótica móvil se denomina *mapeo*, al problema de incorporar la información sensorial adquirida por uno o más robots a un modelo computacional del entorno. En este sentido, dos aspectos cruciales en la elaboración de mapas son: las técnicas disponibles para la

representación de entornos físicos y los modelos para la correcta estimación de los datos proporcionados por los sistemas sensoriales.

La ejecución rápida y eficiente de las tareas asignadas a un robot móvil depende en gran medida de la disponibilidad de mapas del entorno. Un buen modelo del entorno le permitirá a al robot establecer rutas seguras y óptimas que le permitan alcanzar los sitios en los que deberá ejecutar sus tareas [50]

La construcción y actualización de mapas resulta ser un problema complejo debido a factores como:

- i. Incertidumbre sensorial: Las medidas suministradas por los sistemas de percepción exteroceptivos se ven alteradas por diferentes fuentes de ruido.
- ii. Incertidumbre en desplazamientos: Para medir los desplazamientos lineales y angulares, se emplean dispositivos odométricos que se acoplan a las ruedas del robot (sensores propioceptivos), sin embargo los desplazamientos y orientaciones reales pueden diferir de los datos odométricos debido a fenómenos de deslizamiento en las ruedas. Este tipo de error se conoce como error odométrico.
- iii. Condiciones desfavorables del entorno: Por ejemplo altas concentraciones de partículas de polvo en el aire afectan drásticamente el funcionamiento de los sistemas de percepción infrarrojos y, en el caso de los sensores ultrasónicos, los entornos altamente reflectivos dan lugar a medidas de rango erróneas.
- iv. Limitaciones de alcance: la mayoría de los sensores empleados en la robótica móvil presentan limitaciones de alcance que restringen el campo de observación al entorno próximo al robot (entorno local), la obtención de información global requiere de la exploración completa del entorno [51], [52], [53].

2.4.2 Modelos computacionales de entornos de trabajo

En las últimas dos décadas el mapeo de entornos ha sido un ámbito de investigación con una marcada preferencia por las técnicas probabilísticas, lo que se debe al hecho de que permiten modelar las incertidumbres asociadas a los sistemas de percepción comúnmente empleados en la robótica móvil [48]. Dispositivos como el sonar, el laser, módulos infrarrojos, compases, brújulas y GPS, permiten a los robots percibir y adquirir datos del entorno; sin embargo se hace necesario además, plantear estrategias de navegación para la exploración del medio circundante que permitan compensar ruido en las medidas y limitaciones en los rangos de observación [51].

Actualmente los paradigmas dominantes en la representación de entornos de trabajo son los mapas topológicos, los mapas métricos y versiones combinadas de éstos. Mientras que en las representaciones métricas se busca establecer relaciones métricas exactas entre obstáculos en las representaciones topológicas se busca establecer conexiones entre localizaciones reconocibles y distintivas del entorno.

2.4.2.1 Mapas Topológicos

Los mapas topológicos (figura 2.14) buscan establecer conexiones entre localizaciones reconocibles y distintivas del entorno. Pueden ser considerados como representaciones abstractas que describen relaciones entre diversos elementos del entorno sin necesidad de emplear referencias absolutas [54].

Desde un punto de vista formal, las representaciones topológicas se valen de grafos para representar el espacio físico. Las marcas, puntos o lugares característicos se representan por nodos a los que se asocia información perceptual como histogramas de colores, imágenes y datos métricos [54]. Los arcos permiten establecer una relación simple de conectividad entre nodos y pueden indicar, por ejemplo, que tan viable puede ser desplazarse a sitios contiguos. También se suele asignar a cada arco un peso con el que se indica el costo de acceder a un nodo adyacente. En los mapas topológicos no es necesario incluir información métrica adicional puesto que en cada nodo se incorporan datos relativos a los nodos contiguos a los que puede acceder [55], [56].

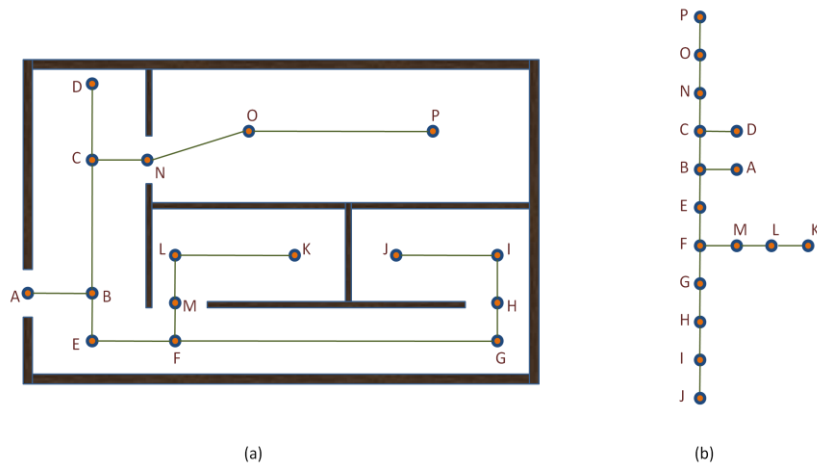


Figura 2.14. Ejemplo de mapa topológico. a) representación métrica del entorno en la que se indican los nodos. b) representación topológica en la que se establece la relación entre nodos.

Entre las características más relevantes de los mapas topológicos están:

- Son representaciones compactas en las que solamente se capturan aquellas características del entorno necesarias para la navegación. Por tal motivo constituyen representaciones fáciles de almacenar y comunicar.
- Puesto que el reconocimiento de características depende del punto de vista del robot, entonces se presentan con cierta frecuencia situaciones de ambigüedad (*aliasing*) en la identificación de marcas.
- Son representaciones que permiten razonamiento simbólico de alto nivel para el mapeo, navegación, planeamiento y comunicación; características que facilitan notablemente el diseño de interfaces de usuario.
- Los errores de desplazamiento y de orientación que se acumulan durante el desplazamiento de un nodo a otro no necesariamente son acumulados en la representación global del entorno.

- Para entornos de grandes dimensiones resultan ser modelos de difícil construcción y mantenimiento [48], [55], [57], [58].

En la figura 2.15 se presentan ejemplos de mapas topológicos construidos por robots móviles [59], [54]. En la figura 2.15 a) se pueden observar claramente nodos y arcos de interconexión. En la figura 2.15 b) cada nodo del mapa topológico corresponde a una representación métrica local, este tipo de representaciones se conocen como mapas híbridos.

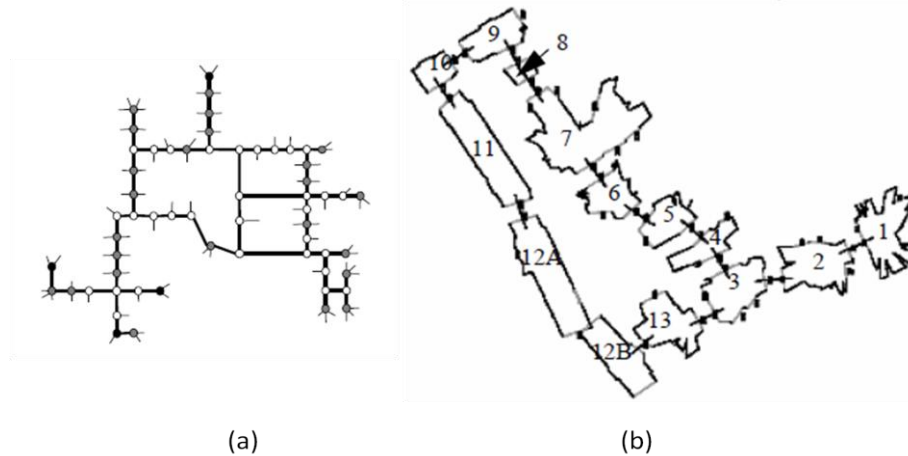


Figura 2.15. Ejemplos de mapas topológicos construidos por robots móviles. a) ejemplo de mapa topológico tomado de [56]. b) ejemplo de mapa híbrido tomado de [60].

2.4.2.2 Mapas Métricos

Los modelos métricos buscan a obtener representaciones geométricas relativamente detalladas del entorno. Permiten describir el mundo a partir de sus propiedades geométricas o mediante su discretización. En el primer caso se elaboran descripciones métricas detalladas entre objetos con diferentes propiedades geométricas. En el segundo caso la superposición de una malla o rejilla permite discretizar el entorno en una serie de celdas uniformes que representan, cada una, una parte del área de trabajo. A cada celda se asigna una o más propiedades que indican la creencia de que esa porción del espacio se encuentra ocupada o no [59], [54].

- **Mapas Geométricos**

Frecuentemente en la navegación de espacios interiores y exteriores es posible capturar formas geométricas simples (*primitivas*) mediante los sistemas de percepción del robot. En los mapas geométricos generalmente se establecen distancias, dimensiones y posiciones entre primitivas geométricas que se pueden ser consideradas como características distintivas del entorno o balizas. Una o varias de estas características permiten representar los objetos presentes en el área de trabajo, por ejemplo, dos segmentos de línea que se interceptan representan una esquina. En tal sentido, una representación geométrica del entorno no sería más que una lista de características geométricas referenciadas con precisión en un sistema global de coordenadas.

En la elaboración de mapas geométricos, las primitivas geométricas deberán cumplir una serie de requerimientos como son: no dar lugar a ambigüedades y ser distinguibles, permanecer visibles a los sistemas de percepción del robot, ser estables e variar poco con el tiempo y permitir la determinación de distancias entre ellas [57], [54], [61], [62].

En la literatura [57], [63], [64], [65], [66] se hace referencia a diferentes características del entorno que pueden considerarse como de balizas geométricas. A éstas se puede incorporar información métrica como localización, orientación y tamaño. Las primitivas geométricas de uso más generalizado son:

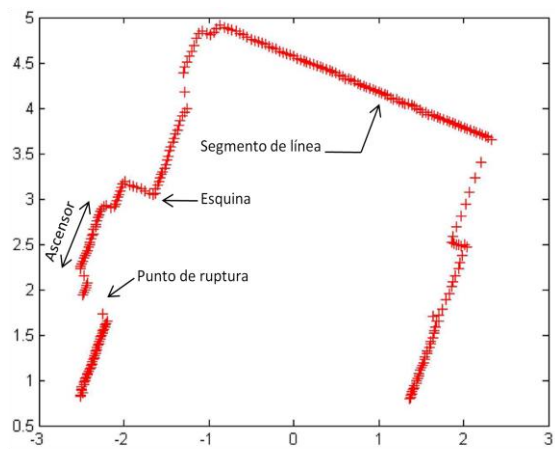
- Puntos: en mapas bidimensionales representan objetos dispuestos verticalmente y de espesor reducido, como por ejemplo postes o bordes de muros.
- Segmentos de línea: generalmente corresponden a fronteras de obstáculos presentes en el entorno como por ejemplo muros y puertas [54]. En representaciones 2D se parametrizan vectorialmente e incorporan información relativa al origen local de coordenadas, la longitud del segmento y la orientación con respecto al sistema de referencia global [67], [68].
- Esquinas: conformadas por dos segmentos de línea que se interceptan ortogonalmente.
- Segmentos de arco: primitivas que representan columnas con secciones transversales de patrón circular, como depósitos circulares de basura, lámparas, etc.
- Polígonos: constituyen el contorno de los obstáculos en el plano horizontal.

En la figura 2.16 a), adaptada de [69], se aprecia la fotografía de un espacio interior típico en un edificio. La línea roja punteada corresponde a una aproximación al plano en el cual se llevo a cabo un barrido del entorno mediante un sensor de rango láser. En la figura 2.16 b) se pueden identificar características como segmentos de línea y esquinas obtenidas a partir de los datos obtenidos del barrido del entorno. Para los puntos de ruptura indican discontinuidades en la obtención de datos de distancia debido a obstrucciones en la ventana de observación del sensor [69].

En [70] se resumen algunos métodos de segmentación 2D y extracción de características geométricas del entorno a partir de datos proporcionados por un sensor de rango láser. La mayoría de los métodos presentados son válidos tanto para entornos interiores como exteriores. El proceso de segmentación de datos ayuda a identificar y separar segmentos asociados a objetos presentes en el entorno. En la fotografía de la figura 2.17 a) se aprecia uno de los escenarios de prueba para la obtención de datos mediante el sensor láser. En la figura 2.17 b) se observan segmentos de línea y arco asociados a objetos del entorno. Por ejemplo los segmentos 10 y 11 corresponden a las esquinas cóncavas y convexas ubicadas a la derecha e izquierda de la escena; el segmento 8 corresponde al robot cilíndrico de la izquierda y los segmentos 4 y 5 a las piernas del maniquí ubicado a la derecha.

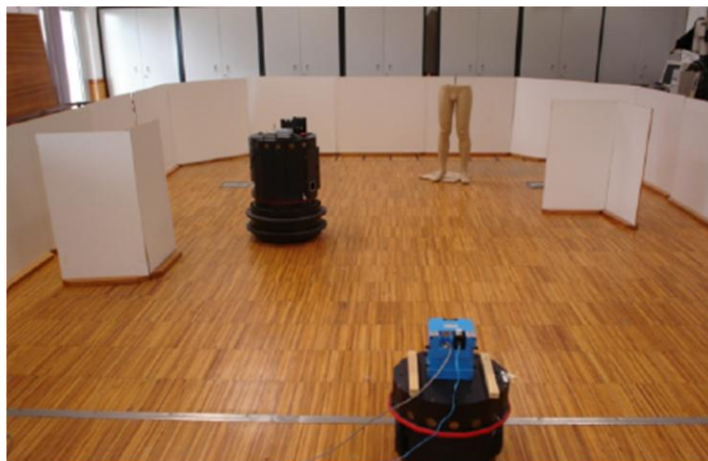


a)



b)

Figura 2.16. Obtención de características geométricas del entorno mediante un sensor de rango laser, a) fotografía del entorno, b) identificación de características a partir del escaneo del entorno. Figura tomada y adaptada de [69].



a)

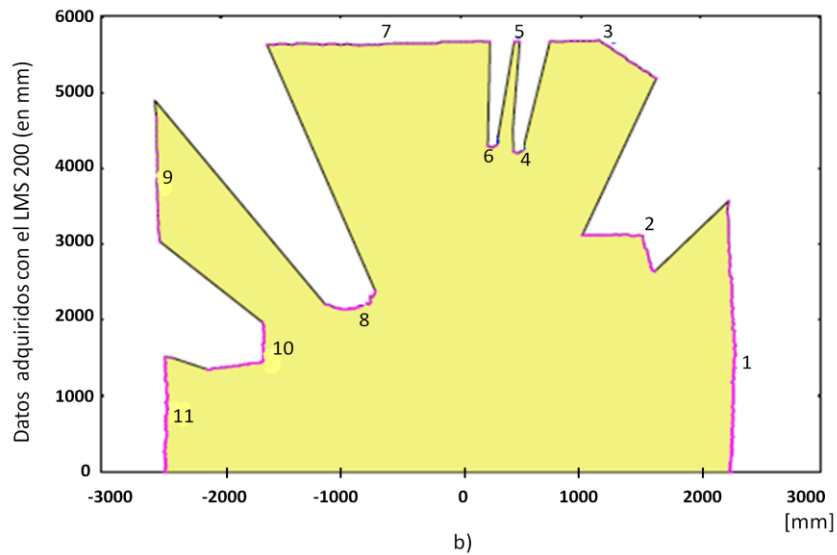


Figura 2.17. Segmentación 2D y extracción de primitivas geométricas de la escena mediante un sensor de rango laser, a) fotografía del entorno, b) segmentación y extracción de primitivas. Figura tomada y adaptada de [70].

- **Mapas de Celdas**

Propuestos inicialmente por Moravec y Elfes [71], los mapas de celdas constituyen una herramienta de modelado probabilístico para la representación de obstáculos en entornos de trabajo. Se elaboran a partir de la discretización del entorno mediante una rejilla de celdas rectangulares uniformes [60], [72].

Con el tiempo han surgido un número relativamente elevado de variaciones que dependen del contenido de las celdas, su forma y la manera en que se incorpora nueva información a ellas [57]. Se conocen las siguientes aproximaciones:

- Celdas de Ocupación (Occupancy Grid)
- Celdas de Certeza (Cetainty Grid)
- Mapas de Probabilidad (Probability Maps)
- Histograma de Celdas (Histogramic Grids)
- Celdas de Inferencia (Inference Grids)

En los mapas de celdas, cada celda representa una porción del área de trabajo, a la cual se asigna un valor con el que se indica la probabilidad de encontrarse ocupada o no por un obstáculo. El valor se calcula a partir de medidas de rango y estimaciones odométricas suministradas por los sistemas de percepción del robot durante la exploración del entorno.

El valor de probabilidad de ocupación para cada celda se encuentra en el rango $[0,1]$. Un cero asignado a una celda indica que ésta se encuentra totalmente libre de obstáculos, a una celda totalmente ocupada se le asigna un valor de uno. El valor de incertidumbre es de 0.5 e indica que se desconoce si la celda se encuentra ocupada o libre [51].

Los mapas de celdas reproducen de manera explícita la estructura del entorno, por lo que resulta relativamente fácil determinar la localización del robot en el modelo a partir de su localización en el mundo físico. Es precisamente esta correspondencia geométrica unívoca del modelo con el entorno lo que hace de los mapas de celdas descripciones fáciles de construir y mantener, pero muy sensibles a errores odométricos acumulativos.

Una desventaja de los mapas de celdas es que se torna un modelo muy demandante de recursos de memoria cuando se quieren representar espacios de grandes dimensiones. Esto obedece a que la resolución de la celda se debe poder permitir capturar detalles importantes del entorno. También presenta problemas de complejidad computacional en los algoritmos empleados para la obtención de información elaborada, lo que dificulta las tareas del planeamiento de trayectorias.

Al demarcar explícitamente las zonas ocupadas y las zonas libres de obstáculos, los mapas de celdas facilitan la navegación segura del robot en el área de trabajo. Así mismo hacen posible determinar, de manera no ambigua, situaciones específicas del mundo real, aunque las medidas sensoriales hayan sido capturadas desde diferentes puntos de observación [48], [57], [58].

En la figura 2.18 se pueden apreciar ejemplos de mapas de celdas presentados por Krebsbach *et al.* y Li *et al.* en [73] y [74] respectivamente. El mapa bidimensional que se observa en la figura 2.18 a) se elaboró a partir de la exploración del entorno mediante un robot AIBO provisto de visión estereoscópica y tres sensores infrarrojos de distancia. Para la construcción del El mapa tridimensional de la figura 2.18 b) se empleó un robot Pioneer II para la exploración del entorno, los datos perceptuales son proporcionados por un anillo de sonares y un sensor de de rango laser.

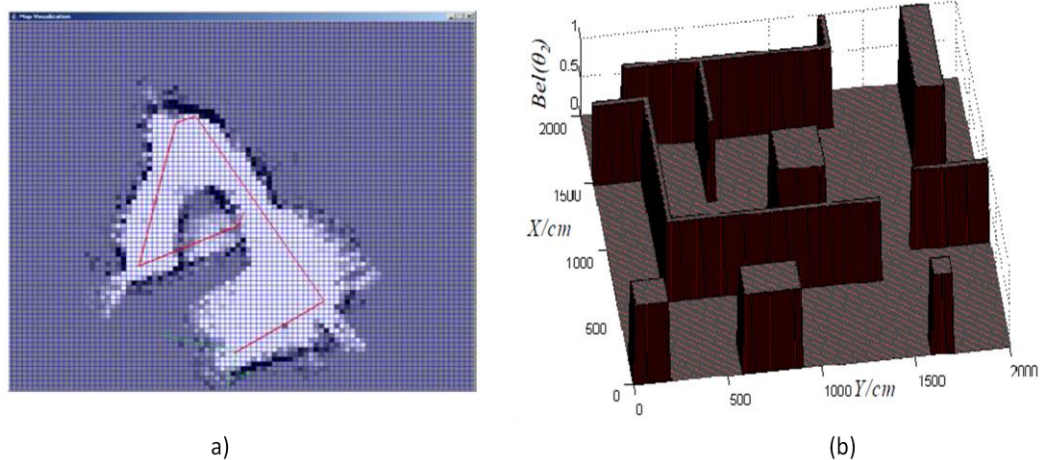


Figura 2.18. Dos ejemplos de mapas de celdas. a) Mapa bidimensional de celdas presentado por Krebsbach *et al.* en [73], b) mapa tridimensional de celdas construido por Li *et al.* en [74].

2.4.3 Modelo del Sonar e Interpretación de Medidas de Rango

2.4.3.1 Características de los Sistemas de Rango Ultrasónicos

En el ámbito de la robótica móvil el sonar (Sound Navigation and Ranging) es probablemente el dispositivo de percepción que presenta la mejor relación costo/beneficio. El dispositivo se emplea para la detección de obstáculos y el cálculo de distancias. Ofrece una serie de ventajas frente a otros dispositivos telemétricos basados en laser, visión y radar [57]:

- Bajo costo: un robot se puede equipar con el suficiente número de dispositivos para tomar lecturas de todo su alrededor, con solo una secuencia de activación de cada sonar.
- Bajo consumo: menor en comparación con otros sistemas de percepción. Un menor consumo significa mayores niveles de autonomía en lo relativo a las a fuentes de energía disponibles para el robot.
- Bajo ancho de banda de la señal acústica: esto se traduce en bajos costos computacionales asociados al procesamiento de la señal.
- Baja sensibilidad al humo y a material particulado suspendido en el aire.
- Baja sensibilidad a la luz y el brillo reflejado por obstáculos en el entorno.

Entre las principales desventajas que presentan los sistemas de sonar se pueden citar:

- Baja resolución angular: debido al ancho de haz excesivo que no permite determinar la posición angular exacta del obstáculo detectado en la escena.
- La velocidad de propagación del sonido depende de la temperatura y la humedad. La velocidad del sonido en el aire como función de la temperatura viene dada por la siguiente expresión:

$$V_s = V_o \sqrt{1 + T/273} \quad [m/s] \quad (1)$$

Donde:

V_s : Velocidad del sonido en el medio de propagación.

V_o : Velocidad absoluta del sonido en el medio a 0°C. Corresponde a 331 m/s para el aire.

T: Temperatura del medio en grados centígrados.

- La señal sonora exhibe un comportamiento especular: para superficies con rugosidades algo menores o similares a la longitud de onda (λ) de la señal acústica, parte de la energía que incide en el obstáculo se refleja hacia el transmisor con en el mismo ángulo de incidencia con que incidió sobre la superficie. Para superficies “lisas”, es decir aquellas con rugosidades de dimensiones mucho menores a la longitud de onda de la señal sonora, parte de la energía que incide sobre la superficie del obstáculo será

reflejada al transmisor solo si la superficie se encuentra en posición frontal u ortogonal respecto al ángulo de incidencia de la onda. Si no es este el caso, la energía será reflejada más allá del sonar y el obstáculo no será detectado. En la Figura 2.19 se aprecia el comportamiento de una superficie “rugosa” y una “lisa” cuando la señal sonora emitida por un sonar incide en dirección no ortogonal a la superficie.

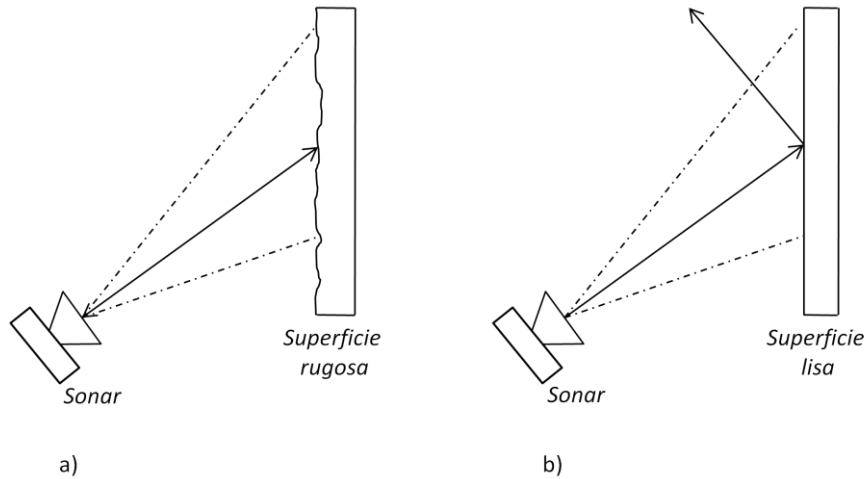


Figura 2.19. Respuesta de la señal ultrasónica cuando incide sobre la superficie de un obstáculo. a) Una superficie con rugosidades comparables a la longitud de onda de la señal ($\lambda \approx 8$ mm para transductores de 40 KHz), b) una superficie lisa con rugosidades considerablemente menores a la longitud de onda de la señal.

2.4.3.2 Medida de Rango por Tiempo de Vuelo (TOF)

Los sistemas ultrasónicos de percepción se emplean para la detección y medida de distancias a objetos presentes en el área de trabajo en la que se desempeña un robot móvil. El principio de operación es algo simple y se conoce como eco-detección. Un elemento transmisor de ondas de ultrasonido emite un pulso acústico al medio circundante, en presencia de un obstáculo, un eco se recibe en el elemento de recepción del sonar. La distancia al obstáculo que retorna el eco se calcula con base en la medida del tiempo de vuelo *TOF* (time of fly) transcurrido desde la emisión de la señal ultrasónica hasta la recepción del primer eco. La ecuación (2) permite calcular la distancia al objeto a partir del *TOF*. En la figura 2.20 se explica el principio operativo de eco-localización asociado a los sistemas de sonar.

$$D = (V_s \times TOF)/2 \quad (2)$$

Para esta expresión se tiene:

D: Distancia del sonar a la superficie del objeto detectado más próximo.

V_s: Velocidad del sonido en el medio de propagación, 340 m/s a nivel del mar.

T : Tiempo de vuelo del pulso ultrasónico desde su emisión hasta la recepción del eco.

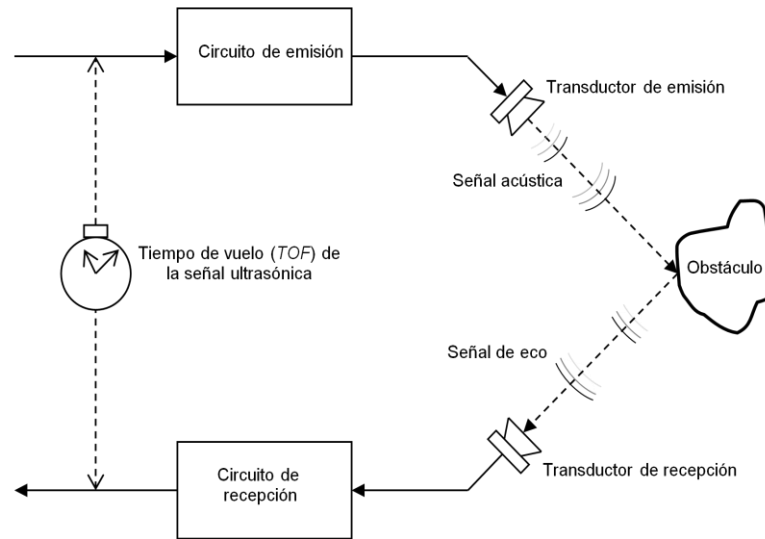


Figura 2.20. Medida de distancias por tiempo de vuelo (TOF) de la señal ultrasónica. Tomada y adaptada de [74].

2.4.3.3 Física del Sonar

Los sonares emplean como principio de transducción la propagación de la energía acústica en un medio compresible. La información del entorno se obtiene después de procesar los ecos que devuelven los objetos presentes en el campo de detección del sensor. Generalmente en los sistemas ultrasónicos de medida, el transmisor se modela como un pistón circular plano y delgado de radio a , encerrado en una pantalla acústica infinita y que vibra a una frecuencia de f Hz [57]. El patrón de radiación de la onda de presión sonora generada por el pistón viene dado por la ecuación (3):

$$P(\theta) = \frac{2J_1(kasen(\theta))}{kasen(\theta)} \quad (3)$$

con:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi \frac{f}{c} \quad (4)$$

Para estas dos ecuaciones se tiene:

a : Radio del pistón.

θ : Ángulo azimutal.

J_1 : Función de Bessel.

λ : Longitud de onda de la señal ultrasónica.

Es interesante notar que, tal como lo indican las ecuaciones (3) y (4), el patrón de radiación es función de la frecuencia y de las dimensiones del transductor [75], [76], [53].

En la figura 2.21 se distinguen dos zonas: una cercana o zona de Fresnel y una lejana o zona de Fraunhofer. En la zona cercana, la onda se encuentra confinada al interior de un cilindro de diámetro $2a$ que se extiende desde el transmisor hasta una distancia igual a a^2/λ . En la zona lejana la onda diverge con un ángulo θ_0 dado por:

$$\theta_0 = \text{sen}^{-1}(0.6158 \lambda / a) \quad (5)$$

La presión de la onda en un punto de la zona lejana se modela mediante una curva gaussiana de varianza $\theta_0/2$ descrita mediante:

$$p(r, \theta) = \frac{P_0}{r} e^{-\frac{2\theta^2}{\theta_0^2}} \quad (6)$$

Donde:

r : distancia al punto.

P_0 : Constante real positiva.

La expresión anterior indica que la presión acústica ejercida en un punto ubicado en la zona lejana es inversamente proporcional a la distancia r del punto al emisor. Si se empleara un amplificador con ganancia variable respecto al tiempo, para compensar la atenuación debida a la distancia, la ecuación (6) se podría expresar como:

$$p(r, \theta) = P_{max} e^{-\frac{2\theta^2}{\theta_0^2}} \quad (7)$$

De la ecuación (5) se tiene que la variación de presión con respecto a la posición angular θ es de tipo gaussiano, el valor máximo de presión, P_{max} , se obtiene para $\theta = 0^\circ$ (ver figura 2.21).

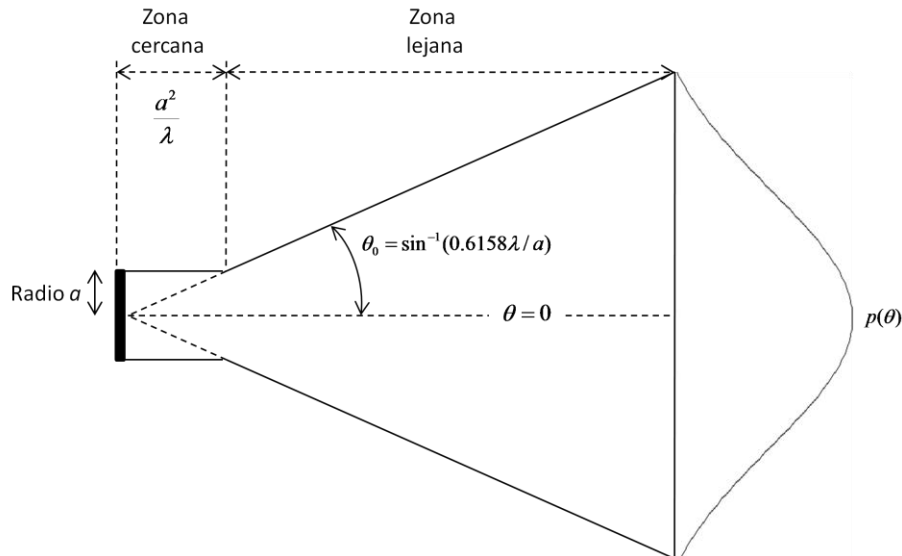


Figura 2.21. Patrón de radiación de la presión acústica en un transductor ultrasónico.

A medida que se propaga por el medio, la intensidad de la señal ultrasónica decae debido a fenómenos de absorción de energía y ensanchamiento del haz ultrasónico. La ecuación (8) permite cuantificar la disminución de amplitud de la señal ultrasónica a medida que se desplaza por el aire.

$$A(x) = A_0 \frac{e^{-\alpha x}}{x} \quad (8)$$

Expresión en la que:

A_0 : Constante del transductor, en (voltios) x (metro) [vm].

α : Coeficiente de absorción en el aire, en decibeles por metro [$dB m^{-1}$].

x : Distancia entre el emisor y el receptor, en metros [m].

2.4.3.4 Fuentes Principales de Error Asociadas a los Sonares

Son precisamente los principios físicos que dan cuenta de la operación de los sistemas de sonar, los que explican los errores de medida que presentan. Las principales fuentes de error asociadas a los sistemas ultrasónicos de percepción son:

- Reflexiones múltiples: la onda ultrasónica emitida, es reflejada varias veces por diversas superficies antes de que el elemento de recepción reciba un eco. La medida de rango así obtenida, indica de manera errónea, que el obstáculo se encuentra a una mayor distancia de la que realmente se encuentra. El fenómeno de reflexiones múltiples incorpora un alto grado de incertidumbre en las medidas de rango para entornos altamente especulares. En la figura 2.22 a) se explica en qué consiste el error de medida por múltiples reflexiones.
- Crosstalk: este fenómeno corresponde a la aparición de señales indeseadas o “ruido” en el receptor. El crosstalk se presenta por interferencias emisor-receptor en un mismo sonar (figura 2.22 c)) o en sonares diferentes (figura 2.22 b)). En el primer caso el crosstalk es producto del solapamiento entre los lóbulos de emisión y recepción de los elementos de transmisión y recepción del sonar. En el segundo caso, la interferencia se presenta cuando la señal emitida por un sonar es captada por otro debido a las reflexiones que presenta la señal ultrasónica en diferentes obstáculos del entorno.

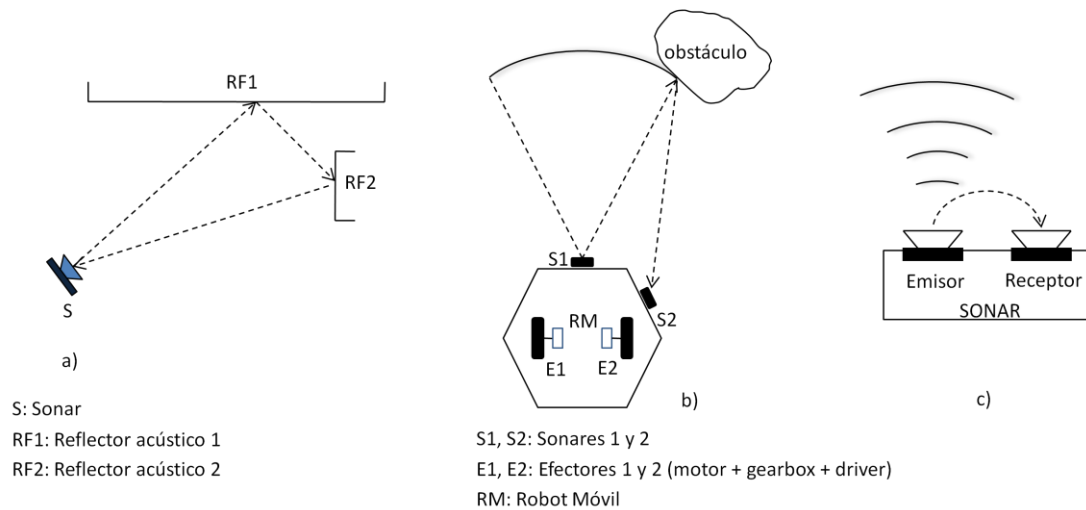


Figura 2.22. Fenómeno de reflexiones múltiples y crosstalk en los sistemas de sonar.

2.4.3.5 Modelo Bidimensional Gaussiano

Los sensores ultrasónicos proveen información de una superficie o volumen y no de un punto particular del entorno. Una situación común en la construcción de mapas con base en robots provistos de sensores ultrasónicos se aprecia en la figura 2.23. Un pulso de frecuencia f , por ejemplo de 40 KHz, emitido por el sonar S alcanza el obstáculo ubicado en C_{ij} y su superficie reflectora devuelve un eco. La medida del TOF de la señal, desde la emisión del pulso hasta la recepción del primer eco, permite obtener una medida de rango R . Las medidas de rango así obtenidas no son suficientes para la construcción de mapas del entorno. Se debe contar con un modelo en el que se tengan en cuenta las incertidumbres propias del sistema de percepción, la manera en que se interpretan las medidas de rango y como se trasladan estas lecturas a valores con los que se indica el grado de ocupación de las celdas C_{ij} en el mapa.

En la figura 2.23 se presenta el modelo bidimensional gaussiano de sonar propuesto por Moravec y Elfes [71], [77] y al cual se hará referencia de aquí en adelante como $2D_{gauss}$. Debido a la gran apertura angular del lóbulo principal de radiación del transductor, las medidas de rango realmente proporcionan información indirecta del grado de ocupación de las celdas ubicadas en el campo de visión del sensor. El obstáculo que devuelve el eco, puede estar localizado en cualquier lugar al interior de la región semicircular comprendida entre $[R-\epsilon, R+\epsilon]$ y $[-\omega/2, \omega/2]$ que en la figura 10 corresponde a la región II. Se asume que no hay obstáculos localizados en la región I, es decir a una distancia menor a $R-\epsilon$.

i. Actualización del espacio libre mediante el modelo $2D_{gauss}$

Para las celdas localizadas en la región I de la figura 2.23, el valor de probabilidad de encontrarse libres de obstáculos se calcula mediante:

$$P_E(x, y) = E_r(\delta) * E_a(\varphi) \quad (9)$$

Donde:

$P_E(x, y)$: Probabilidad de que la celda C_{ij} , localizada en las coordenadas (x, y) , se encuentre vacía (*empty*).

$E_r(\delta)$: Estimación de celda vacía con base en la medida de rango.

$E_a(\varphi)$: Estimación de celda vacía con base en su distancia angular al eje acústico del sensor.

Los valores de $E_r(\delta)$ y $E_a(\varphi)$ se calculan mediante las ecuaciones (10) y (11) respectivamente. Estas ecuaciones indican que mientras más cerca se encuentre una celda al sonar, y menor sea su distancia angular con respecto al eje acústico, mayor será la probabilidad de encontrarse vacía [77].

$$E_r(\delta) = \begin{cases} 1 - ((\delta - R_{\min}) / (R - \varepsilon - R_{\min}))^2, & \text{para } R_{\min} \leq \delta \leq R - \varepsilon \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_a(\varphi) = 1 - (2\varphi / \omega)^2, \quad \text{para } \omega/2 \leq \varphi \leq \omega/2 \quad (11)$$

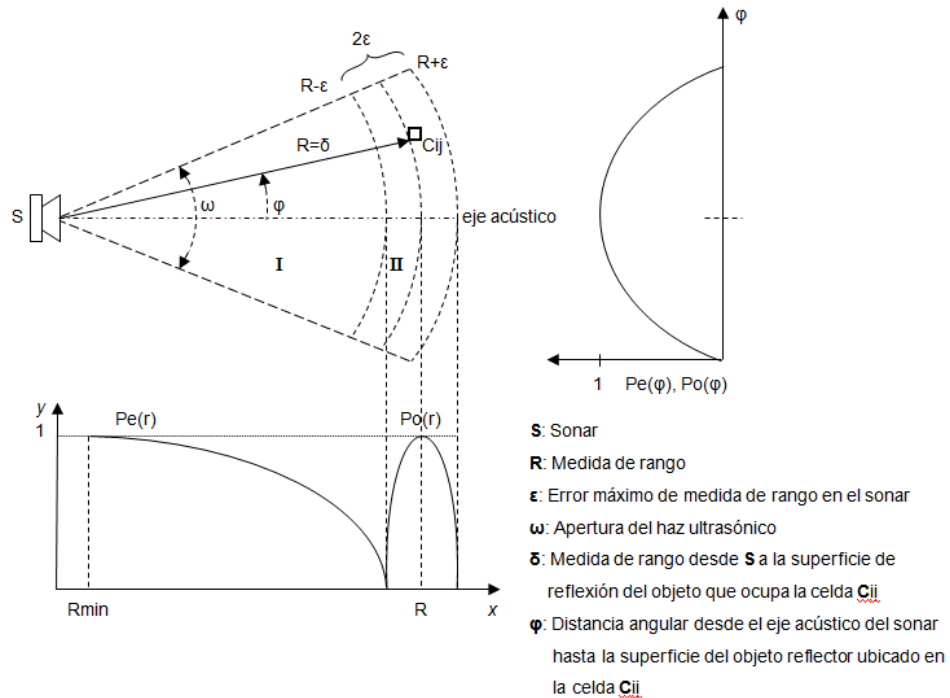


Figura 2.23. Modelo bidimensional gaussiano (2Dgauss) del sonar.

ii. Actualización del espacio ocupado mediante el modelo 2D_{gauss}

Las celdas localizadas en la región II de la figura 2.23 presentan una probabilidad de encontrarse ocupadas dada por la siguiente ecuación:

$$P_O(x, y) = O_r(\delta) * O_a(\varphi) \quad (12)$$

Donde:

$P_o(x, y)$: Probabilidad de que la celda C_{ij} , localizada en las coordenadas (x, y) , se encuentre ocupada (*occupied*).

$O_r(\delta)$: Estimación de celda ocupada con base en la medida de rango.

$O_a(\varphi)$: Estimación de celda ocupada con base en su distancia angular al eje acústico del sensor.

Las ecuaciones (13) y (14) permiten calcular los valores $O_r(\delta)$ y $O_a(\varphi)$. La ecuación (13) permite establecer que mientras más cerca se encuentre la celda de la región semicircular comprendida entre $[R-\varepsilon, R+\varepsilon]$ y $[-\omega/2, \omega/2]$, mayor será la probabilidad de encontrarse ocupada. El máximo valor de probabilidad lo presentan las celdas ubicadas al interior de esta región. Por otra parte la ecuación (14), indica que mientras más cerca se encuentre una celda del eje acústico del sonar, mayor será su probabilidad de encontrarse ocupada [78].

$$O_r(\delta) = 1 - ((\delta - R) / \varepsilon)^2, \quad \text{para } R - \varepsilon \leq \delta \leq R + \varepsilon \quad (13)$$

$$O_a(\varphi) = 1 - (2\varphi / \omega)^2, \quad \text{para } -\omega/2 \leq \varphi \leq \omega/2 \quad (14)$$

2.5 Conclusiones del Capítulo

- Conclusiones de MAS y CSCL

A pesar de que el agente robótico diseñado por Acosta & Flórez et al [38] posee un novedoso algoritmo de control neurodifuso para la navegación en entornos estructurados, este robot sigue siendo un agente reactivo, no orientado al trabajo en ambientes colaborativos.

El desarrollo de estos prototipos ha permitido alcanzar un grado de experticia en el diseño y construcción de sistemas robóticos y sus resultados se vienen extrapolando a situaciones de ambientes colaborativos. No obstante, se deben enfrentar nuevos retos de diseño propios de los MAS como son la habilidad de interacción social, la proactividad, la movilidad, la adaptabilidad y el aprendizaje.

Los robots móviles hasta ahora desarrollados constituyen agentes reactivos, puesto que obtienen información de su entorno mediante el sistema de sensores, procesan esta información y exhiben un comportamiento acorde con los algoritmos diseñados. Para varios de los prototipos construidos se han diseñado e implementado algoritmos de inteligencia artificial como redes neuronales y sistemas neurodifusos.

La arquitectura de los agentes, propuesta en esta tesis se diseño con base en una nueva generación de agentes móviles cooperativos dotados de capacidades de comunicación, coordinación, control y organización social; estructurados en un ambiente colaborativo.

- Conclusiones de Mapeo de Entornos

Se discutieron los paradigmas dominantes en la construcción de representaciones computacionales del entorno, con una marcada orientación hacia los mapas de celdas de ocupación con base en el uso de sistemas ultrasónicos de percepción. Las razones que justifican el empleo de este tipo de sensores son: bajo costo, tamaño y peso reducido, fácil uso y una amplia disponibilidad de literatura científica en la cual se exponen sus ventajas, desventajas y una amplia variedad de modelos matemáticos. Se presenta un modelo probabilístico del sonar que resulta ser simple, funcional y de aplicación inmediata en la elaboración de mapas bidimensionales de entornos de trabajo.

Capítulo 3. Conceptualización del Sistema Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa

En el desarrollo de metodologías para el diseño de MAS, los investigadores han enfocado sus esfuerzos en extender las metodologías existentes. Estas extensiones se han realizado principalmente sobre dos áreas: Metodologías orientadas a objetos (Object Oriented) e ingeniería de conocimiento (Knowledge Engineering) [88]. La metodología utilizada extiende a su vez las metodologías para MAS existentes, buscando dar mayor cobertura a la implementación física y al desarrollo de estrategias para la solución cooperativa de problemas.

El capítulo está distribuido de la siguiente manera: en la sección 3.1 se introduce la metodología explicando sus orígenes, concretando algunos términos claves, y explicando cómo se documentan las fases de conceptualización, análisis y diseño de un proyecto RMAS. En la sección 3.2 se aplica la metodología para el desarrollo del RMAS; para finalmente en la sección 3.3 extraer algunas conclusiones respecto a las expectativas de la metodología y se discuten algunos aspectos que aún quedan por abordar.

3.1 Metodología MAD-Smart

El enfoque de la Metodología para el Análisis y Diseño de Sistemas Multi-Agentes Robóticos MAD-Smart está fundamentado en:

- Independencia de las técnicas de implementación.
- Proceso metodológico ascendente iniciando en la determinación de los requerimientos del proyecto para llegar a las estrategias de solución de éstos de manera cooperativa.

La metodología recoge elementos de trabajos existentes para la construcción de Sistemas Multi-Agente como son GAIA [11], Mas-CommonKADS [79] y MaSe [80] a la vez que introduce otros nuevos que surgen desde la propia área de los Sistemas Multi-Agentes Robóticos. Hay que tener en cuenta que las metodologías surgen en gran medida para asesorar el desarrollo a nivel industrial de una tecnología [81], por lo que el desarrollo de Sistemas Multi-Agente Robóticos al realizarse a tan baja escala se encuentra desprovisto de metodologías de aceptación general.

Se debe de tener en cuenta que la metodología no está orientada hacia la síntesis automática de grupos o equipos. Este campo hasta ahora se ha abordado en su mayor parte desde la computación evolutiva permitiendo la definición de estrategias a partir de un grupo de robots heterogéneos y una misión para llevar a cabo [82]. En lugar de esto la metodología propuesta se busca que sirva como herramienta de documentación y guía de proyectos a la vez que permite conservar conocimiento que puede ser reutilizado en desarrollos posteriores.

Los ocho pasos que constituyen la metodología se aprecian en la figura 3.1 y están orientados a capturar la definición de mecanismos para la comunicación y manejo de conceptos entre los agentes, la descripción de los agentes individuales –incluyendo características hardware y software–, la descripción de los mecanismos de interacción entre los miembros del grupo, y la distribución de tareas entre los agentes.

3.1.1 Terminología

Algunos de los términos que serán usados a lo largo de las actividades de la metodología son los siguientes:

- **Agente:** Entidad física o abstracta que puede percibir su ambiente mediante sensores, es capaz de evaluar tales percepciones y tomar decisiones por medio de mecanismos de razonamientos simples o complejos, comunicarse con otros agentes para obtener información y actuar sobre el medio en el que se desenvuelven a través de ejecutores [83].
- **Comportamiento:** Constituye una regla de control que permite alcanzar o mantener un objetivo particular.
- **Interacción:** Es una relacional física o funcional que se da entre dos o más agentes y que esta mediada por comportamientos bien definidos.
- **Comportamiento Colectivo:** Denota el comportamiento de un agente en un sistema en el cual hay más de un agente.
- **Comportamiento Cooperativo:** Es una subclase de comportamiento colectivo que esta caracterizado por la asociación de partes en busca del beneficio mutuo. Un sistema multi-agente robótico mostrara comportamiento cooperativo si, debido a algún mecanismo de cooperación, hay un incremento en el desempeño del sistema. El mecanismo de cooperación puede estar basado en la imposición por parte del diseñador de una estructura de control o comunicación, en aspectos de especificación de tareas, en las dinámicas de interacción de los comportamientos de los agentes [84].
- **Rol:** Es la descripción abstracta de una funcionalidad que se espera satisfaga algún objetivo importante en el sistema. Un agente en su periodo de ejecución puede desempeñar uno o más roles. La notación para especificar el ciclo de ejecución de un rol hace uso de los siguientes elementos (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Esquemas de ejecución de los roles, x e y son dos actividades (o agrupaciones de actividades) cualesquiera.

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
x.y	Se realiza la actividad x seguido de y
x *	x se ejecuta 0 o más veces
x ^w	x ocurre infinitas veces
x y	x se ejecuta en paralelo con y
x y	Se ejecuta x o y
x ⁺	x ocurre 1 o más veces
[x]	x es opcional

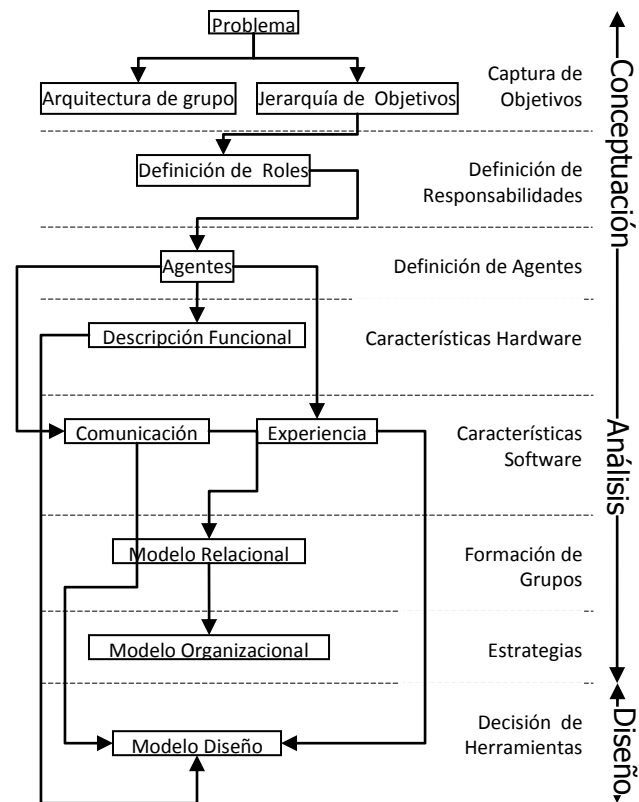


Figura 3.1. Actividades de la Metodología MAD-Smart.

Interferencia y Conflicto: Interferencia hace alusión a alguna influencia que no permite que un agente alcance un objetivo. Se puede competir por un recurso limitado como el espacio o por un recurso requerido por varios agentes en un momento determinado para alcanzar un objetivos diferentes.

Comunicación: Es el modo más común de interacción entre agentes. En estos sistemas puede haber comunicación directa o mediante el paso explícito de mensajes y comunicación indirecta o mediante el sentido de otros agentes o el medio.

Otros términos relevantes de la metodología se introducirán a medida que se muestren las actividades en las cuales son relevantes.

3.1.2 Conceptualización

La finalidad de esta etapa es permitir al desarrollador tener una mejor comprensión de cuál es el problema a resolver, el alcance y limitaciones del sistema a desarrollar. A este nivel la definición de los agentes no es importante. Los pasos a este nivel son:

Descripción verbal del Proyecto: se busca obtener una descripción completa en lenguaje natural del sistema que se está buscando haciendo énfasis en los objetivos que se espera que cumpla. Es de utilidad que el encargado de la descripción haga uso de la terminología propuesta de manera que se facilite el desarrollo de los pasos posteriores. Es válido hacer uso de material de otros proyectos a modo de ejemplo.

Identificación de los objetivos: Los objetivos descritos en la fase anterior se estructuran mediante las relaciones que tienen y los sub-objetivos que engloban. Los objetivos se jerarquizan mediante un árbol en el cual los nodos hijos representan los sub-objetivos en los cuales se puede descomponer el nodo padre.

Definición de la arquitectura del grupo: La arquitectura de un sistema computacional es aquella parte del sistema que permanece inalterada hasta que un agente externo la cambie [85]. Este modelo permite definir la infraestructura sobre la que se implementaran los comportamientos colectivos, y determina las capacidades y limitaciones del sistema. Se hace uso de una tabla en la cual se nombra el ítem, la decisión y la descripción. Algunos ítems que se definen en esta actividad son:

- Nombre del Sistema: Permite denotar la naturaleza del sistema.
- Toma de Decisiones: Existe básicamente dos mecanismos: centralizado, un agente determina que tareas deben llevar a cabo los otros agentes; y distribuido, cada agente determina las acciones que llevará a cabo teniendo en cuenta su estado actual y negociaciones con otros agentes.
- Distribución del Conocimiento: Igual que el anterior se tiene: centralizado un agente tiene el modelo del mundo, modelo que es actualizado por información que proviene de otros agentes y distribuido determina que cada agente maneja su propio modelo del entorno y comparte información solo cuando es requerido.
- Comunicación: Cuando es por modificaciones del entorno o mediante la interacción de comportamientos bien definidos, se habla de comunicación indirecta. Cuando la comunicación se hace por un canal explícito, como por una banda del espectro electromagnético, mediante el intercambio de mensajes con algún tipo de significado semántico, la comunicación es de carácter directo.
- Topología de la Comunicación: Determina como transcurre la información en el sistema. Por ejemplo punto a punto, broadcast.

- Redundancia: Los sistemas redundantes son aquellos en los cuales ante el fallo de un integrante, el sistema sigue en operación ya que otro integrante ocupa su lugar sin comprometer el desempeño del sistema.

- Otros elementos que se pueden tener en cuenta son [86]: Rango de Comunicación, Ancho de Banda para la comunicación, Mecanismos de Reconfiguración de los equipos, habilidad de procesamiento del equipo.

Definición de los Roles: Mediante los roles se define las funcionalidades, a un nivel muy abstracto, que permitirán que los objetivos sean alcanzados. El correcto modelado de los roles permitirá la identificación de los agentes en la fase de análisis [87]. Mataric et al, muestra como la distribución de tareas entre los agentes puede conducir a diferentes tipos de sistemas [88].

3.1.3 Análisis

Al finalizar esta fase se definirán o se reutilizarán los agentes con sus respectivas características físicas, de comunicación, razonamiento, y las estrategias para la formación de equipos y la solución cooperativa de tareas para el alcance de objetivos.

Se define tres capas a desarrollar en el agente con similitud a la propuesta de CASSIOPEIA [88]: Arquitectura Interna: define la operación del agente a nivel individual en condiciones normales; Capa Relacional: Aquí se encuentran los comportamientos necesarios para la formación de grupos de trabajo; Capa Organizacional: Es la encargada de la exhibición de comportamientos para la solución cooperativa de tareas. Las actividades a desarrollar son las siguientes:

- Desarrollo del modelo de Agente: Este modelo permite especificar las características de un agente como son sus capacidades de razonamiento, la manera en que interactúa con el mundo mediante sensores y efectores, y los grupos de agentes a los que pertenece. Se encuentra basado en el modelo de Agente de Mas-CommonKADS [89]. Hay que tener presente que los agentes son en muchos aspectos una abstracción conveniente, la cual puede o no tener inteligencia. El único requisito es que se pueda integrar dentro del ámbito de cooperación del sistema, esto es, que este orientado a satisfacer algún objetivo.

- Desarrollo del Modelo de la Experiencia: En esta actividad se describe el conocimiento requerido por los agentes para alcanzar sus objetivos. De acuerdo a la generalidad que se acepta para los agentes los agentes generados pueden bien manejar conocimiento o datos. Al finalizar esta actividad se tendrán definidos:

- La Ontología del sistema: Una ontología permite estructurar el conocimiento que se tiene respecto a un dominio especificado en torno a un conjunto de conceptos que son claves en ese dominio [90]. Hay que tener en cuenta que los conceptos no tienen que estar necesariamente dados como información explícita, por ejemplo cierta alteración del entorno por parte de un agente puede representar un concepto en el sistema.

- Representación del Mundo: Hay varios modos de representar el mundo, por ejemplo los Vectores de Características o las Representaciones Icónicas [91], o métodos de representación espacial o geométrica [92]. Se desarrollarán tantas representaciones del

mundo como versiones hayan para los diferentes agentes, esto debido a que los agentes podrían o no tener un modelo del mundo.

- Representación de los otros agentes: El modelado de las intenciones, creencias, acciones, capacidades, y estados de otros agentes puede conducir a mecanismos más efectivos de cooperación entre robots [84]. Los modelos más usados son los probabilísticos [78] inferencias sobre invariantes de información [93], o cualquier otro. Se desarrollan tantas representaciones de los agentes como modelos manejen los agentes de sus compañeros.

- Arquitectura Interna de los Agentes: Constituye la primera capa de un agente. La arquitectura a usar es de libre elección pudiendo ser reactivas, deliberativas, híbridas, BDI, entre otras. Componentes comunes de los agentes son: sistemas de sensado, de representación, de procesamiento y de acción. Los sistemas basados en comportamiento son los que han logrado mayor participación en esta área [94].

- Desarrollo del modelo de comunicación: La cooperación es un modo de interacción que se suele encontrar basada en alguna forma de comunicación [3]. Si la comunicación es directa la cooperación es explícita, si la comunicación es indirecta la cooperación es implícita. Al finalizar esta actividad se deberá tener definidos cuales agentes se comunican de manera directa y cuáles de forma indirecta –modelo de conocidos-, así como los protocolos o especificaciones de pasos de mensajes entre agentes –modelo de conversaciones-. Propuestas para estructuras de comunicación se puede encontrar en [95].

- Desarrollo del modelo Relacional: En esta fase el diseñador especifica los comportamientos de la Capa Relacional que permiten a los agentes la formación y disolución de grupos de trabajo y documenta los escenarios en los cuales la formación de dichos grupos será posible.

- El modelo jerárquico de objetivos permite determinar donde convergen los agentes para la solución de objetivos que van más lejos de su alcance individual y solo se cumplirán mediante la cooperación de los agentes implicados.

- Desarrollo del modelo Organizacional: Una vez conformados los grupos que participaran en la solución de un objetivo, se debe de generar las estrategias de cooperación de forma que el equipo actúe de una manera efectiva. En esta fase también se especifican los comportamientos cooperativos o comportamientos de la capa Organizacional.

Especificación de los Módulos Físicos de las Plataformas: Teniendo en cuenta toda la información recolectada de las fases anteriores se bosqueja los requerimientos hardware por parte de los agentes. Se busca hacer énfasis en las características físicas que deberán de tener los agentes robóticos finales, aspecto muy relegado en las metodologías existentes [96].

3.1.4 Diseño

El propósito en esta fase es acercar lo más posible los agentes definidos en la fase anterior a su posterior implementación. En este punto se tiene en consideración para cada agente su parte hardware y software en una misma plantilla. El nivel de abstracción manejado se busca que sea lo más alto posible ya que las posibilidades de implementación en el campo

de la robótica son muy amplias tanto a nivel de los sensores y efectores disponibles como a nivel de procesamiento y control [97].

3.2 Modelado de Sistemas Multi-Agente Robóticos Mediante MAD-Smart

En esta sección se plantean algunos modelos que permiten ejemplificar varias de las actividades enunciadas en la sección anterior.

3.2.1 Conceptualización

3.2.1.1 Actividad: Desarrollo del Modelo Jerárquico de Objetivos

La figura 3.2 muestra la descomposición en sub-objetivos de un caso simple de modelamiento de entornos [3]. Se debe tener una buena relación entre el nivel de abstracción en los objetivos definidos de manera que sean lo más genéricos posible a la vez que sean alcanzables por el sistema. Los objetivos están enumerados para poder asignarlos luego mediante el número a roles específicos del sistema.

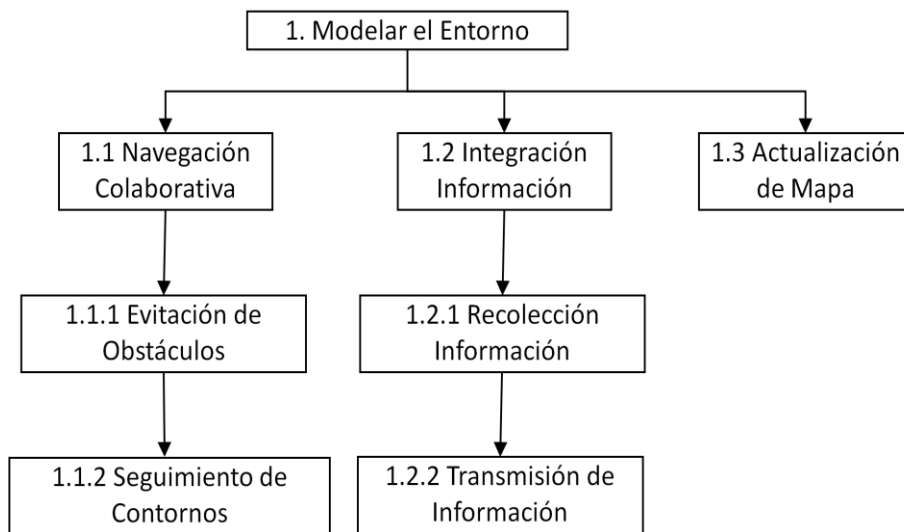


Figura 3.2 Modelo Jerárquico de Objetivos.

3.2.1.2 Actividad: Desarrollo del Modelo de Arquitectura del Grupo

La tabla 3.2 muestra la Arquitectura de Grupo básica de un sistema para el modelamiento cooperativo de entornos estructurados.

Tabla 3.2. Modelo de Arquitectura de grupo.

ÍTEM	DECISIÓN	DESCRIPCIÓN
<i>Nombre del Sistema</i>	<i>Map-Bot</i>	Acrónimo de mapeo de entornos con robots móviles: Sistema Multi-Agente para la elaboración de mapas de entornos interiores de trabajo
<i>Número de Agentes Robóticos</i>	1	<i>Walling</i> : Acrónimo de <i>Wall Following</i> , una estrategia de navegación reactiva en entornos estructurados. <i>Walling</i> es un robot explorador que recaba información del entorno
<i>Número de Agentes de Software</i>	1	<i>Magalhães</i> : Navegante Portugués. Agente de navegación que implementa comportamientos reactivos emergentes con los que se garantiza la navegación segura del agente <i>Walling</i> en su entorno
<i>Toma Decisiones</i>	Centralizada	El agente <i>Magalhães</i> implementa dos comportamientos reactivos jerárquicos: <ul style="list-style-type: none"> - Evitación de obstáculos: control por fuerza bruta (<i>hard</i>). - Seguimiento de contornos: controlador <i>fuzzy</i> tipo <i>Mamdani</i> El agente de navegación <i>Magalhães</i> toma las decisiones relativas a los trayectos de navegación de acuerdo al estado del entorno
<i>Característica del grupo</i>	Heterogéneo	El agente explorador se diferencia del agente navegador. El explorador corresponde a un agente robótico físico (<i>Walling</i>) y el navegador a un agente de software (<i>Magalhães</i>).
<i>Módulos adicionales</i>	<i>Vespucci</i>	Cartógrafo, navegante y explorador Florentino: Módulo de software para la construcción de mapas del entorno a partir de la información suministrada por el agente <i>Walling</i> . Este módulo no corresponde a un agente.
<i>Comunicación</i>	Directa	Comunicación explícita entre el explorador y el módulo de mapeo <i>Vespucci</i> mediante dispositivos de radiofrecuencia (módulos de comunicaciones <i>XBee</i>)
<i>Topología de comunicación</i>	Punto a Punto	Todo mensaje tiene un destinatario definido
<i>Redundancia</i>	No	Cada agente juega un papel único en el sistema

3.2.1.3 Actividad: Desarrollo del Modelo de Roles

El modelo incluye una descripción de los roles propuestos, la condición bajo la cual estará activo en el sistema, las rutinas que se ejecutarán cuando se encuentra activo y los objetivos que se espera satisfaga (Figuras 3.3 y 3.4).

PLANTILLA DEL ROL: EXPLORADOR
<p><i>Descripción:</i> Este rol se encarga de establecer distancias a obstáculos en el entorno próximo al robot y calcular la distancia recorrida.</p>
<p><i>Condición de Activación:</i> Este rol se activa una vez se recibe la orden de inicio desde el módulo de mapeo <i>Vespucci</i>. El agente explorador <i>Walling</i> inicia la exploración del entorno con base en estrategias de navegación provistas por el agente de navegación <i>Magalhães</i>.</p>
<p><i>Condición de Desactivación:</i> Este rol se desactiva una vez se recibe la orden de parada desde el módulo de mapeo <i>Vespucci</i>.</p>
<p><i>Actividades:</i> exploración y percepción del entorno: se adquieren dos distancias laterales y una frontal a obstáculos del entorno (<i>S0, S1, S2</i>), cálculo de distancias recorridas: desplazamientos lineales de la rueda derecha e izquierda (<i>P-izq, P-der</i>), transmisión de la información adquirida.</p>
<p><i>Objetivos que satisface:</i> 1.2.1, 1.2.2</p>
<p><i>Esquema de Ejecución del Rol:</i> (S <i>S0, S1, S2, P-izq, P-der</i>)</p>

Figura 3.3. Plantilla Rol Robot Explorador.

PLANTILLA DEL ROL: NAVEGADOR
<p><i>Descripción:</i> Este rol se encarga de proveer trayectorias seguras de navegación para el agente robotico <i>Walling</i>. La navegación se soporta con base en dos comportamientos reactivos emergentes que son:</p> <ul style="list-style-type: none">- seguimiento de paredes- evitación de obstáculos
<p><i>Condición de Activación:</i> Este rol se activa una vez se recibe la orden de inicio desde el módulo de mapeo <i>Vespucci</i>. Los comportamientos emergentes provistos por el agente de navegación <i>Magalhães</i> permiten que el agente explorador <i>Walling</i> lleve a cabo la exploración segura del entorno.</p>
<p><i>Condición de Desactivación:</i> Este rol se desactiva una vez se recibe la orden de parada desde el módulo de mapeo <i>Vespucci</i>.</p>
<p><i>Actividades:</i> procesar información sensorial y generar señales de control.</p>
<p><i>Objetivos que satisface:</i> 1.1, 1.1.1, 1.1.2</p>

<i>Esquema de Ejecución del Rol: (S, P)</i>

Figura 3.4. Plantilla Rol Navegador.

3.2.2 Análisis

3.2.2.1 Actividad: Desarrollo del Modelo de Agente

Las plantillas para la definición de agentes permite especificar, entre otras cosas, los roles que los agentes podrán asumir y las capacidades esperadas para que puedan hacerlo (figuras 3.5 y 3.6).

<i>Agente: Walling (Explorador)</i>
<i>Capacidades de Sensado/Acción:</i> Movimiento a través del entorno, determinación de presencia/ausencia de objetos, comunicación mediante enlaces de radiofrecuencia, medición exteroceptiva por ultrasonido, medición propioceptiva por odometría.
<i>Capacidades Razonamiento/Experiencia:</i> Capacidad de desplazamiento, recolección y transmisión de datos.
<i>Roles:</i> Explorador
<i>Grupo al que pertenece:</i> Map-Bot.

Figura 3.5. Plantilla Agente Explorador.

<i>Agente: Magalhães (Navegador)</i>
<i>Capacidades de Sensado/Acción:</i> Procesamiento de información procedente del entorno, generación de señales de control.
<i>Capacidades Razonamiento/Experiencia:</i> Motor de inferencia difuso tipo Mamdani.
<i>Roles:</i> Navegador
<i>Grupo al que pertenece:</i> Map-Bot.

Figura 3.6. Plantilla Agente Navegador.

3.2.2.2 Actividad: Desarrollo del Modelo de la Experiencia

En esta actividad se muestran las herramientas de razonamiento de las cuales harán uso los agentes para la solución de sus tareas. La Figura 3.7 muestra un diagrama de Arquitectura Interna para un agente propuesto por Maja Mataric [98] y la figura 3.8 muestra un ejemplo de especificación de ontología para un sistema de navegación y mapeo de entornos.

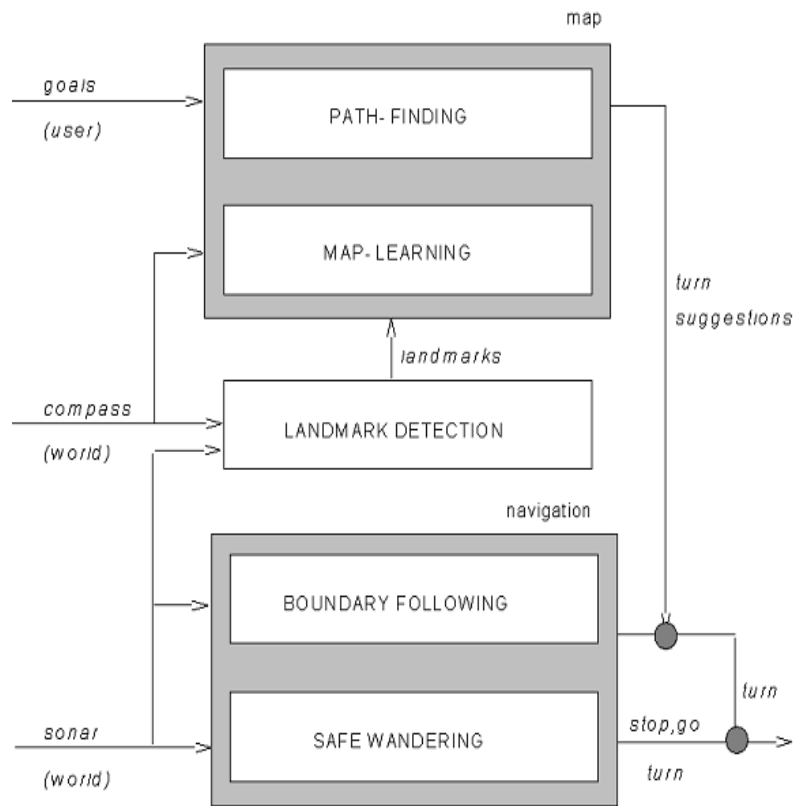


Figura 3.7. Arquitectura Interna para la navegación propuesta por Mataric.

<i>Concepto:</i> Entorno
<i>Descripción:</i> Medio físico en el que se desenvuelve el sistema
<i>Atributos:</i> Matriz de NxN enteros. Cada entrada se asocia a un nivel en la escala de grises que indica el grado de ocupación de la celda correspondiente: <ul style="list-style-type: none"> - Nivel de gris 20 (gris oscuro): indica una muy alta probabilidad de que la celda respectiva se encuentre ocupada por un obstáculo. - Nivel de gris 40 (gris claro): indica una alta probabilidad de que la celda se encuentre ocupada. - Nivel de gris 55 (gris muy claro): indica una baja probabilidad de que la celda se encuentre ocupada.
<i>Concepto:</i> Recorrido
<i>Descripción:</i> Distancia recorrida por el agente explorador de manera segura
<i>Atributos:</i> Recorrido lineal de cada rueda del agente explorador. Datos proporcionados por los encoders.
<i>Concepto:</i> Medida_Distancia
<i>Descripción:</i> Distancias proporcionadas por los

El modelo jerárquico de objetivos permite determinar donde convergen los agentes para la solución de objetivos que van más lejos de su alcance individual y solo se cumplirán mediante la interacción de los agentes implicados.

- Desarrollo de los escenarios de formación de grupos: La figura 3.11 muestra un escenario de formación de grupo donde la responsabilidad de la formación y disolución del grupo recae sobre el módulo de software *Vespucci*.

<i>Nombre del Grupo Formado:</i> Grupo_Mapeador
<i>Agentes que intervienen:</i> Walling (explorador), Magalhães(navegador)
<i>Módulos adicionales:</i> Vespucci (mapeador)
<i>Responsable:</i> Módulo Vespucci
<i>Secuencia de Formación del Grupo:</i>
1. En el estado inicial el módulo <i>Vespucci</i> se comunica con el agente <i>Walling</i> y le transfiere la orden de arranque.
2. Una vez <i>Walling</i> inicia la exploración del entorno, el agente de navegación <i>Magalhães</i> , con base en la información provista por los sensores de <i>Walling</i> , provee señales de control para la navegación segura de <i>Walling</i> en su entorno.
3. Periódicamente <i>Walling</i> transmite datos de distancias exteroceptivas y propioceptivos al módulo de mapeo <i>Vespucci</i> .
<i>Secuencias Alternativas:</i>
[2.1] Explorador, con la cooperación de navegador, busca mantener una distancia constante a obstáculos localizados a su costado derecho.
[2.2] Explorador, con la cooperación de navegador, evade obstáculos en la dirección de su desplazamiento.
[2.3] Explorador transmite datos de distancia al Mapeador.
[2.4] Mapeador actualiza la representación computacional del entorno.
<i>Políticas de Disolución del Grupo:</i>
Mapeador envía orden de detención a Explorador.
Mapeador entrega un modelo gráfico del entorno.

Figura 3.11. Escenario de Formación de Grupo.

- Descripción de los comportamientos relacionales de los agentes: Los comportamientos relacionales son aquellos que se dan dentro del marco de formación de grupos de trabajo. El conjunto de estos comportamientos para un agente determinado conforman la capa relacional del agente. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran la descripción de comportamientos relacionales para los agentes que participan en el escenario de la figura 3.11.

<i>Comportamiento Relacional:</i> enviar_info_entorno
<i>Agente Propietario del Comportamiento:</i> Explorador
<i>Condición de Activación:</i> Arribo de datos procedentes de los subsistemas de percepción.
<i>Condición de Permanencia:</i> No recepción de orden de parada.
<i>Condición de Finalización:</i> Recepción de orden de parada.
<i>Conversaciones:</i> estado_entorno, distancia_recorrida.

Figura 3.12. Comportamiento relacional para el Agente Explorador (Robot *Walling*).

<i>Comportamiento Relacional:</i> generar_señal_control_actuador
<i>Agente Propietario del Comportamiento:</i> Navegador
<i>Condición de Activación:</i> Arribo de información sensorial exteroceptiva.
<i>Condición de Permanencia:</i> No recepción de orden de parada.
<i>Condición de Finalización:</i> Recepción de orden de parada.
<i>Conversaciones:</i> estado_entorno, señal_control.

Figura 3.13. Comportamiento relacional para el Agente Navegador (*Magalhães*).

3.2.2.5 Actividad: Desarrollo del Modelo Organizacional

- **Secuencia de Cooperación:** En este punto se definen las estrategias para el alcance de objetivos. Las estrategias son acciones que los agentes deben ejecutar para alcanzar objetivos a largo plazo. La figura 3.14 muestra la descripción de una estrategia en la metodología y las figuras 3.15 y 3.16 presentan los comportamientos cooperativos que exhiben los agentes en la estrategia.

<i>Nombre del Grupo Implicado:</i> Grupo_Mapeador
<i>Objetivos a alcanzar:</i> 1 Modelar el entorno (en el modelo jerárquico de objetivos)
<i>Secuencia de Alcance del Objetivo:</i> <ol style="list-style-type: none"> 1. En cualquier momento Mapeador transmite orden de inicio. 2. Explorador inicia la marcha. 3. Explorador sensa el entorno. 4. Navegador recibe datos del subsistema exteroceptivo de percepción y genera señales de control de efectores. 5. Explorador envía el estado del entorno a Mapeador. 6. Si Mapeador supera dimensiones del entorno virtual fin, en otro caso volver a 3.

Figura 3.14. Estrategia para el mapeo del entorno.

<i>Comportamiento:</i> exploración_entorno
<i>Agente Propietario del Comportamiento:</i> Explorador
<i>Condición de Activación:</i> recepción orden inicio
<i>Condición de Permanencia:</i> no recepción de orden de parada
<i>Condición de Finalización:</i> ninguna
<i>Efectos:</i> Se capta y transmite información

Figura 3.15. Plantilla para comportamiento cooperativo del agente explorador.

<i>Comportamiento:</i> control_navegación
<i>Agente Propietario del Comportamiento:</i> Navegador
<i>Condición de Activación:</i> recepción orden inicio
<i>Condición de Permanencia:</i> recepción información exteroceptiva de agente explorador
<i>Condición de Finalización:</i> ninguna
<i>Efectos:</i> Soporta la navegación segura del agente explorador

Figura 3.16. Plantilla para comportamiento cooperativo del agente navegador.

3.2.2.6 Actividad: Desarrollo del Modelo de Descripción Modular.

Esta actividad permite delimitar ciertas características que se espera que tengan los agentes. Ejemplos de plantilla se aprecian en las figuras 3.17 y 3.18.

Sistema Mecánico: Tracción diferencial constituida por dos motores DC y una caja de engranajes. Tercera rueda de apoyo para estabilizar la plataforma.
Sistema Sensorial: Se cuenta con sensores ultrasónicos para la medida de distancia a obstáculos presentes en el entorno y encoders de cuadratura para medida de desplazamientos. No hay otros sistemas sensoriales.
Sistema de Comunicación: Comunicación serial asíncrona con el Mapeador mediante módulos de RF.
Sistema Control: Sistema basado en microcontrolador de 32 bits.

Figura 3.17. Plantilla de descripción modular del agente robótico *Walling*.

Esquema de Control: reactivo, incorpora dos comportamientos implementados por software.
Comportamientos: <ul style="list-style-type: none"> - Seguimiento de paredes: Control <i>fuzzy</i> tipo Mamdani - Evitación de obstáculos: Control por nivel de umbral
Sistema de Comunicación: Transferencia de información a través de estructuras de datos.

Figura 3.18. Plantilla de descripción modular del agente de software *Magalhães*.

Después de tener claros los módulos que van a constituir el sistema, se clarifican las relaciones entre estos módulos. La mejor manera de hacerlos es mediante un diagrama de bloques (Figura 3.19).

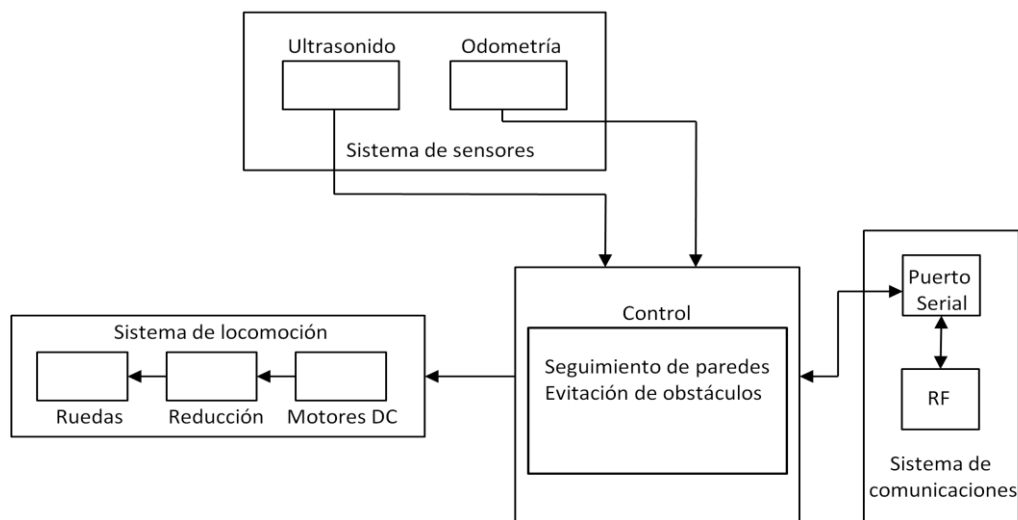


Figura 3.19. Relación entre los módulos constitutivos de los agentes.

3.2.3 Diseño

Se define una plantilla en la cual se especifican ciertas características que tendrán los agentes en su versión funcional. Ejemplos de plantillas se aprecian en la figura 3.20 y 3.21.

Nombre Agente: Explorador
Lenguaje Implementación: C
Plataforma Implementación: plataforma robótica móvil
Subsistemas Software: Rutinas de adquisición de información y comunicaciones
Comportamientos: Seguir paredes, evitar obstáculos, adquirir y transmitir datos.
Subsistemas Hardware: Mecánicos: Caja reductora con motores DC Sensóricos: Sensor ultrasónico SRF02, encoder de cuadratura WW-01 Comunicación: Módulo XBee de 2.4 GHz, estándar IEEE 802.15.4 Control: Tarjeta microcontrolada DEMOQE 128

Figura 3.20. Plantilla de diseño para el Explorador.

Nombre Agente: Navegador
Lenguaje Implementación: C
Plataforma de Desarrollo: CodeWarrior IDE
Comportamientos: Procesar datos, generar señales de control.
Hardware: Procesador: Microcontrolador ColdFire MCF51QE128 Longitud de Palabra: 32 bits Memoria: -Flash: 128 KB -RAM: 8 KB Frecuencia de Reloj: 26 MHz MIPS: 2 MIPS por MHz Software: Interrupciones del reloj de tiempo real para el procesamiento de datos y la generación de señales de control.

Figura 3.21. Plantilla de diseño para el Navegador.

3.2.3.1 Criterios de Selección

A continuación se presentan las plantillas de especificación de los subsistemas de hardware para el agente explorador. La descripción detallada de las especificaciones soporta una adecuada selección de componentes que, en última instancia, le permitirán al agente, cumplir con las tareas asignadas. Algunos criterios a tener en cuenta son:

- Poder computacional, recursos de memoria y periféricos para el módulo de control.
- Principio de transducción, precisión, resolución y tipo de interfaz de los sistemas de percepción.
- Alcance, potencia, velocidad de transferencia, ancho de banda y tipo de interfaz de los dispositivos de comunicaciones.

- Potencia mecánica, velocidad de desplazamiento y configuración del sistemas de actuación.

3.2.3.1.1 Subsistema de control

Se define la plantilla en la cual se consignan los criterios de selección del módulo de control. Esta plantilla se aprecia en la figura 3.22.

Nombre Agente: Explorador
Subsistema : Módulo de control
Criterios de Selección: <ul style="list-style-type: none"> - Longitud de Palabra - Cantidad de Memoria - Periféricos Internos - Frecuencia de Reloj - Poder Computacional
Especificaciones Mínimas del Módulo de Control: Longitud de Palabra: 32 bits Memoria: -Flash: 128 KB -RAM: 8 KB Periféricos Internos -ADC: 12-ch., 10 bits -UART: 2 -SPI: 2 -I2C: 2 -Timers/PWM: 3x3-ch. -RTC: 1 -GPIO: 20 Frecuencia de Reloj: 20 MHz MIPS: 2 MIPS por MHz
Módulo Seleccionado: DEMOQE 128 Procesador: MCF51QE128 Fabricante: Freescale Semiconductor, Inc. Costo: \$230 USD
Terminología: Flash: Memoria no volátil de solo lectura RAM: Memoria de lectura/escritura KB: Kilobytes ADC: Canales de conversión análogo a digital UART: Interfaz de comunicaciones seriales asíncronas SPI: Periférico síncrono de comunicaciones seriales I2C: Bus de comunicaciones seriales síncronas (Inter Integrated Circuits Bus) PWM: Modulación pot ancho de pulso (Pulse Width Modulation) RTC: Reloj de Tiempo Real (Real Time Clock) GPIO: Entradas/salidas de propósito general (General Purpose Input/Output) MIPS: Millones de instrucciones por segundo (Million of Instructions per Second)

Figura 3.22. Plantilla de especificaciones del módulo de control.

3.2.3.1.2 Subsistema de comunicaciones

Se define la plantilla en la cual se consignan los criterios de selección del módulo de comunicaciones inalámbricas. Esta plantilla se puede observar en la figura 3.23.

Nombre Agente: Explorador
Subsistema : Módulo de comunicaciones inalámbricas
Criterios de Selección: <ul style="list-style-type: none">- Velocidad de transferencia- Rango- Potencia de transmisión- Sensibilidad del receptor- Interfaz- Banda de frecuencia de operación- Estándar de comunicaciones- Opción de antena
Especificaciones del Módulo de Comunicaciones: Velocidad de transferencia (RF Data Rate): 250 kbps o superior Rango en entornos interiores: 30 m o superior Potencia de transmisión: 1mW o inferior Sensibilidad del receptor: -92 dBm o superior Interfaz: CMOS UART Banda de frecuencia de operación: ISM 2.4 GHz Estándar: IEEE 802.15.4 Opción de antena: Wire o chip
Módulo Seleccionado: XBee Fabricante: Digi International Costo: \$60 USD
Terminología: RF: Señal radiofrecuencia kbps: Rata de transferencia en kilobits por segundo mW: Unidad de medida de potencia, milliwatt dBm: Nivel de potencia en decibeles UART: Interfaz de comunicaciones seriales asíncronas ISM: Bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) IEEE: Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos

Figura 3. 23. Plantilla de especificaciones del módulo de comunicaciones inalámbricas.

3.2.3.1.3 Subsistema de percepción exteroceptiva

Se define la plantilla en la cual se consignan los criterios de selección del módulo de percepción exteroceptiva. En la figura 3.24 se puede apreciar dicha plantilla.

Nombre Agente: Explorador
Subsistema : Módulo de percepción exteroceptiva
Criterios de Selección: <ul style="list-style-type: none">- Tipo de variable- Principio de transducción- Rango de medida- Frecuencia de operación

<ul style="list-style-type: none"> - Interfaz - Velocidad de transferencia - Apertura del haz de radiación
<p>Especificaciones del Módulo de Percepción Extereceptiva:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Variable de interes: Distancia - Principio de transducción: Ultrasonido - Rango de medida: De 20 cm a 600 cm - Frecuencia de operación: 40 KHz - Interfaz: UART - Velocidad de transferencia: 9600 bps o superior - Apertura del haz de radiación (lóbulos principal): [-30° a 30°]
<p>Módulo Seleccionado: SRF02 Fabricante: Devantech Ltd. Costo: \$30 USD</p>
<p>Terminología: KHz: Kilohertz UART: Interfaz de comunicaciones seriales asíncronas bps: Rata de transferencia en bits por segundo</p>

Figura 3. 24. Plantilla de especificaciones del módulo de percepción extereceptiva.

3.2.3.1.4 Subsistema de percepción propioceptiva

Se define la plantilla en la cual se consignan los criterios de selección del módulo de percepción propioceptiva. En la figura 3.25 se aprecia la plantilla.

<p>Nombre Agente: Explorador</p>
<p>Subsistema : Módulo de percepción propioceptiva</p>
<p>Criterios de Selección:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de variable - Principio de transducción - Resolución - Interfaz
<p>Especificaciones del Módulo de Percepción Propioceptiva:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Variable: Desplazamiento lineal - Principio de transducción: Odometría - Resolución: 32 pulsos/rotación o superior - Interfaz: GPIO TTL
<p>Módulo Seleccionado: WW-01 Fabricante: Noetic Design, Inc. Costo: \$80 USD</p>
<p>Terminología: GPIO: Entradas/salidas de propósito general (General Purpose Input/Output) TTL: lógica transistor a transistor</p>

Figura 3. 25. Plantilla de especificaciones del módulo de percepción propioceptiva.

3.2.3.1.5 Subsistema de actuación

Se define la plantilla en la cual se establecen los criterios de selección del módulo de actuación. En la figura 3.26 se presenta la plantilla.

Nombre Agente: Explorador
Subsistema : Módulo de actuación
Criterios de Selección: <ul style="list-style-type: none">- Tipo de actuador- Configuración- Tipo de motor- Velocidad axial- Par continuo a la salida- Máxima carga axial
Especificaciones del Módulo de Actuación: <ul style="list-style-type: none">- Tipo de actuador: Electromecánico- Dispositivo de conversión de energía: Motor DC- Configuración: Diferencial MOTOR: <ul style="list-style-type: none">- Velocidad sin carga: 12300 rpm max.- Voltaje nominal: 5V max.- Torque (a máxima eficiencia): 0.74 mN-m- Corriente (a máxima eficiencia): 0.56 A CAJA DE ENGRANAJES: <ul style="list-style-type: none">- Razón de reducción: 203:1- Velocidad axial: 60 rpm max.
Módulo Seleccionado: Twin-Motor Gearbox Kit ref:70097 Fabricante: Tamiya, Inc. Costo: \$20 USD
Terminología: V: Voltios DC: Corriente Directa rpm: Revoluciones por Minuto mN-m: milinewton por metro A: Amperios

Figura 3.26. Plantilla de especificaciones del módulo de actuación.

3.3 Conclusiones del Capítulo

La metodología propuesta trata de dar cobertura a gran número de los problemas que se encuentran en los Sistemas Multi-Agentes Robóticos como son: Naturaleza de la información en el sistema, mediante el modelo de la experiencia; comunicación entre los agentes, modelo de comunicación; y estrategias de cooperación para la solución de problemas mediante los modelos relacional y organizacional.

Otro aspecto relevante de la metodología es que busca desde el principio que la solución del problema sea de naturaleza distribuida mediante un buen modelado de los objetivos,

llegándose finalmente a los agentes individuales con sus respectivas características software y hardware.

La metodología esta mejor pensada para el modelado a nivel microscópico en el cual se considera cada robot en el sistema con sus respectivas interacciones y comportamientos en un nivel alto de detalle. Hay que tener en cuenta que la mayor parte del trabajo está orientado al modelado a nivel macroscópico en el cual se trabaja a nivel de comportamiento del sistema sin consideración de los agentes individuales [99].

Finalmente la similitud con las metodologías orientadas al diseño de Sistemas Multi-Agente lo hace de fácil uso para las personas con experiencia de trabajo en esta área.

Aspectos no abordados:

La metodología no está pensada para la definición de métricas y de costos de los sistemas individuales (como el uso de ciertos sensores) y de componentes interactivos (como aquellos relacionados con la comunicación). Tampoco se trabaja la parte de aprendizaje y de solución de conflictos que constituyen líneas básicas de investigación en el área [84].

También en el manejo de incertidumbre, aunque esto finalmente se comenzaría por resolver desde el modelo funcional donde se especifica las características del entorno de trabajo, en el modelo de descripción modular donde se describe la naturaleza de los sensores requeridos y finalmente en el modelo de diseño donde la escogencia de un sensor determinado se debe de hacer de acuerdo a la naturaleza de la información requerida.

Se debe de tener en cuenta que la metodología no está orientada a servir de guía en la búsqueda de optimización de problemas; de esta manera preguntas como: ¿dada una misión específica, cual es la configuración óptima del equipo de agentes?, no es directamente abordable desde la metodología, aunque si se espera que los pasos en el proceso ayuden al diseñador en la toma de decisiones que sean cruciales en el proyecto.