



INAOE

Diseño e implementación de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado

por

María Guadalupe Jiménez Velasco

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de **Maestro en Ciencias** en la Especialidad de **Ciencias Computacionales** en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Supervisada por:

Dra. Angélica Muñoz Meléndez

Febrero 2006, Tonantzintla, Puebla

©INAOE 2006

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias en su totalidad o en partes de esta tesis



Abstract

In this thesis, the design and implementation of Mini-trans, a multi-robot system consisting of three homogeneous, mobile modules, are presented. The modules of this system were designed and built in-house. To control these modules individually, the behavior-based architecture proposed by Mataric (2002) was implemented. We incorporated a new element to this architecture, a memory module. Several coordination mechanisms were also proposed and implemented in order to enable the modules of a multi-robot system to perform collective behaviors such as gathering together, queueing, self-assembling, multi-robot motion, structure reorganization and collective box-pushing. Finally, the performance of our system in comparison with three multi-robot systems is evaluated.

Resumen

En este trabajo presentamos el diseño y la implementación de un sistema multi-robot compuesto por tres robots homogéneos móviles, denominado Mini-trans. Los robots fueron diseñados y construidos por nosotros mismos. Para programarlos individualmente, se empleó la arquitectura basada en comportamientos propuesta por Mataric (2002) a la cual se le adicionó un módulo de memoria. Se propusieron e implementaron así mismo mecanismos de coordinación para que los módulos de un sistema multi-robot se asocien, se auto-ordenen, se auto-ensamblen, se desplacen en forma ensamblada, reorganicen su estructura cambiando de dirección y ejecuten comportamientos colectivos una vez ensamblados, como empujar un objeto. Finalmente, se evaluó el desempeño de nuestro sistema en comparación con otros tres sistemas multi-robot similares.

Agradecimientos

A dios por todas las bendiciones que me ha proporcionado.

A mi familia por su amor, apoyo y comprensión.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por el apoyo económico proporcionado para mis estudios de maestría, bajo el número de beca 181509.

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, por ofrecerme el apoyo para mis estudios de maestría, en especial a la Coordinación de Ciencias Computacionales.

Al Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco (ITSC), por darme la oportunidad y apoyo para poder superarme académica y profesionalmente.

A la Dra. Angélica Muñoz Meléndez, por su apoyo, paciencia, sugerencias y direcciones realizadas durante el desarrollo de la tesis, así como por el tiempo dedicado, la experiencia compartida, y por creer en mí y darme la oportunidad de trabajar en forma conjunta.

A mis revisores, Dr. Aurelio López López, Dr. Saúl E. Pomares Hernández y al Dr. Eduardo Morales Manzanares, por sus sugerencias y recomendaciones proporcionadas para el mejoramiento de esta tesis.

A mis amigos y compañeros del INAOE y del ITSC, especialmente a Geovany Ramírez, Luis Alberto Morales, Iván Candelas, Joaquín García, Virgilio Zúñiga, Eduardo Valdivia, Carlos García, René García, Alicia Morales, José Angel Nieves, Gabriel Pérez, Miguel Angel Ramírez, Juan Trujillo, Liliana Girón, Silvia Cortés, Adriana Somellera y Gerardo Cacep.

Dedicatoria

A las dos personas más importantes en mi vida, los cuales me dieron su cariño, cuidado, consejos, amor y decidieron que naciera y fuera su hija, mi madre Jesús y mi padre Héctor.

A mis hermanas Ruby, Irene, Hilda, Paty y Dulia, por ser buenas hermanas y quererme siempre.

Índice general

Prefacio	XXIII
1. Sistemas mono-robot	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Clasificación	1
1.2. Composición sensorial	4
1.2.1. Tipos de sensores	5
1.2.1.1. Sensores de luz	5
1.2.1.2. Sensores de fuerza	5
1.2.1.3. Sensores de posición y orientación	6
1.2.2. Propiedades de los sensores	7
1.3. Composición mecánica	8
1.3.1. Locomoción	9
1.3.1.1. Arreglo de llantas	10
1.3.2. Estructura física del robot	13
1.4. Paradigmas de control	14
1.4.1. Enfoque deliberativo	14
1.4.1.1. Planificador STRIPS	16
1.4.1.2. Ventajas y desventajas	16
1.4.2. Enfoque situado o reactivo	17
1.4.2.1. Arquitectura basada en comportamientos	17
1.4.2.1.1. Composición de conductas básicas	19
1.4.2.2. Ventajas y desventajas	19

1.4.3. Enfoque híbrido	20
1.4.3.1. Ventajas y desventajas	21
2. Sistemas multi-robot	23
2.1. Antecedentes	23
2.2. Sistemas multi-robot reconfigurables	24
2.2.1. Modularidad	26
2.2.2. Reconfigurabilidad	26
2.3. Requerimientos de los sistemas multi-robot	28
2.3.1. Interacción multi-robot	28
2.3.2. Comunicación	31
2.3.3. Cooperación	32
2.3.4. Coordinación	35
2.3.4.1. Mecanismos de coordinación	36
2.3.4.2. Coordinación en los robots reconfigurables	38
2.3.4.2.1. Asociación	38
2.3.4.2.2. Auto-ordenamiento	40
2.3.4.2.3. Auto-ensamble	40
2.4. Evaluación del desempeño de un sistema multi-robot	41
3. Estado del arte	45
3.1. Configuración tipo rejilla	46
3.1.1. MTRAN	46
3.2. Configuración tipo cadena	47
3.2.1. Polypod	47
3.2.2. Polybot	47
3.2.3. CONRO	48
3.3. Configuración tipo móvil	49
3.3.1. Swarm-bots	49
3.3.1.1. Diseño	50
3.3.1.2. Locomoción	50
3.3.1.3. Interconexión	51

3.3.1.4.	Sensores	52
3.3.1.5.	Control	52
3.3.2.	Millibot-trains	54
3.3.2.1.	Diseño	54
3.3.2.2.	Locomoción	54
3.3.2.3.	Interconexión	54
3.3.2.4.	Sensores	55
3.3.2.5.	Control	55
3.3.3.	Sistema SMC rover	55
3.3.3.1.	Diseño	56
3.3.3.2.	Locomoción	57
3.3.3.3.	Interconexión	58
3.3.3.4.	Sensores	59
3.3.3.5.	Control	59
4.	Sistema multi-robot Mini-trans	61
4.1.	Requerimientos del sistema	61
4.2.	Construcción del prototipo	62
4.2.1.	Módulos	62
4.2.1.1.	Versión 1.0	63
4.2.1.1.1.	Hipótesis y objetivos	63
4.2.1.1.2.	Construcción.	63
4.2.1.1.3.	Desempeño.	63
4.2.1.1.4.	Conclusiones.	63
4.2.1.2.	Versión 1.1	64
4.2.1.2.1.	Hipótesis y objetivos	64
4.2.1.2.2.	Construcción.	65
4.2.1.2.3.	Desempeño.	65
4.2.1.2.4.	Conclusiones.	65
4.2.1.3.	Versión 2.0	66
4.2.1.3.1.	Hipótesis y objetivos	66
4.2.1.3.2.	Construcción.	67

4.2.1.3.3.	Desempeño.	67
4.2.1.3.4.	Conclusión.	68
4.2.1.4.	Versión 2.1	68
4.2.1.4.1.	Hipótesis y objetivos	68
4.2.1.4.2.	Construcción.	69
4.2.1.4.3.	Desempeño.	69
4.2.1.4.4.	Conclusión.	69
4.2.1.5.	Versión 2.2	70
4.2.1.5.1.	Hipótesis y objetivos	70
4.2.1.5.2.	Construcción.	71
4.2.1.5.3.	Desempeño.	71
4.2.1.5.4.	Conclusión.	71
4.2.1.6.	Versión 2.3	72
4.2.1.6.1.	Hipótesis y objetivos	72
4.2.1.6.2.	Construcción.	73
4.2.1.6.3.	Desempeño.	73
4.2.1.6.4.	Conclusión.	74
4.2.2.	Otros aspectos de la construcción del prototipo	75
4.2.2.1.	Pinzas	75
4.2.2.2.	Cinturón de contacto	77
4.2.2.3.	Locomoción	77
4.2.2.4.	Tarjeta de adaptación de voltaje para motores	78
4.3.	Control	79
4.3.1.	Especificación general	79
4.3.2.	Especificación del sistema Mini-trans	80
4.3.3.	Capacidades del sistema	81
4.3.3.1.	Percepción	81
4.3.3.2.	Comunicación IR	82
4.3.3.3.	Comunicación con señales luminosas	84
4.3.3.4.	Capacidades específicas o acciones simples (Ca)	85
4.3.3.5.	Comportamientos (Co)	86
4.3.3.5.1.	Comportamientos básicos CoB	86

5.2.1.2.	Caso no. 2: navegación exitosa de tres robots alrededor de un objeto a partir de posiciones iniciales repartidas y orientaciones no dirigidas, en un ambiente con restricciones de espacio.	116
5.2.1.3.	Caso no. 3: búsqueda de un objeto por tres robots a partir de posiciones iniciales repartidas y orientaciones no dirigidas, en un ambiente con fuertes restricciones de espacio.	118
5.2.2.	Experimento no. 2: seguir pared, alinearse e identificar_obstáculo	119
5.2.2.1.	Caso no. 1: seguimiento exitoso de pared por dos robots ensamblados e identificación de obstáculos realizados.	121
5.2.2.2.	Caso no. 2: seguimiento de pared exitoso por tres robots, alineamiento exitoso e identificación de obstáculos exitoso.	122
5.2.2.3.	Caso no. 3: seguimiento de pared exitoso por tres robots, alineamiento no exitoso e identificación de obstáculos no exitoso.	123
5.2.3.	Experimento no. 3: auto-ensamblarse	126
5.2.3.1.	Caso no. 1: auto-ensamblado de dos robots en la esquina de un objeto.	127
5.2.3.2.	Caso no. 2: auto-ensamblado de dos robots en un lado del objeto.	128
5.2.4.	Experimento no. 4: desplazarse_en_forma_ensamblada	130
5.2.4.1.	Caso único: desplazamiento en forma ensamblada de tres robots.	130
5.2.5.	Experimento no. 5: empujar objeto	132
5.2.5.1.	a. Con comunicación	133
5.2.5.1.1.	Caso no. 1: empuje exitoso de un objeto por tres robots ensamblados, en uno de sus lados más anchos.	134
5.2.5.1.2.	Caso no. 2: empuje no exitoso de un objeto por tres robots ensamblados, en uno de sus lados más angostos.	135
5.2.5.2.	b. Sin comunicación	136
5.2.5.2.1.	Caso no. 1: empuje exitoso de un objeto en una forma lateral por tres robots ensamblados.	136
5.2.5.2.2.	Caso no. 2: búsqueda no exitosa del objeto a empujar.	137
5.2.5.2.3.	Caso no. 3: empuje no exitoso de un objeto en forma lateral por tres robots ensamblados.	139

5.2.5.2.4. Caso no. 4: empuje no exitoso de un objeto en una de sus esquinas por tres robots ensamblados.	140
5.2.6. Experimento colectivo No. 6: cambiar de dirección	142
5.2.6.1. Caso único: Cambio de dirección exitoso de una formación en columna de tres robots ensamblados.	142
5.2.7. Conclusiones	143
6. Evaluación del sistema	147
6.1. Desempeño del sistema Mini-trans	147
6.2. Comparación de cuatro sistemas multi-robot tipo móvil	149
6.3. Hacia una generalización	154
7. Conclusiones y perspectivas	159
7.1. Recapitulativo	159
7.2. Aportaciones	160
7.2.1. Materiales	160
7.2.2. Conceptuales	161
7.3. Conclusiones	162
7.4. Perspectivas	164
Bibliografía	167
Referencias en línea	172
A. LEGOMindstorms©	175
B. Handyboard©	177
C. Tarjeta de adaptación de voltaje para motores	179
D. Funciones	181
D.1. Funciones empleadas en la percepción de los Mini-trans	181
D.2. Funciones de comunicación	181
D.3. Funciones empleadas con los Ca y Co que complementa el control del sistema Mini-trans	182

Índice de figuras

1. Metodología	XXVII
1.1. Robot fijo y robot móvil	2
1.2. Robot Genghis	2
1.3. Robots acuático Oberon	3
1.4. Robot aéreo iFRII	3
1.5. Robot espacial Sojourner	4
1.6. Sensores de luz	6
1.7. Sensores de fuerza	6
1.8. Sensores de posición y orientación	7
1.9. Partes principales de un robot	9
1.10. Robots móviles terrestres	11
1.11. Tipos de control de llantas	12
1.12. Estructura física de un robot	13
1.13. Robots con patas	13
1.14. Robot Shakey	15
1.15. Enfoque deliberativo	15
1.16. Enfoque reactivo	17
1.17. Arquitectura basada en el comportamiento	18
1.18. Combinación de conductas	19
1.19. Arquitectura híbrida	21
2.1. Clasificación de la robótica colectiva	25

2.2. Robot modular Polybot	26
2.3. Robot CONRO	27
2.4. Desplazamiento de robots ensamblados	39
2.5. Asociación de robots	39
3.1. Robot MTRAN	47
3.2. Robot Polypod	48
3.3. Robot Polybot	48
3.4. Robot Swarm-Bot	50
3.5. Sistema <i>treels</i> empleado por los S-bots	51
3.6. Conexión fija entre dos S-bots	52
3.7. Equipamiento de un S-bot	53
3.8. Millibot-trains	55
3.9. Capas de una unidad Millibot	56
3.10. SMC rover	57
3.11. Unirover	57
3.12. Locomoción <i>Unirover</i>	58
3.13. Partes de un <i>Unirover</i>	58
4.1. Prototipo Mini-trans 1.0	64
4.2. Prototipo Mini-trans 1.1	66
4.3. Prototipo Mini-trans 2.0	68
4.4. Prototipo Mini-trans 2.1	70
4.5. Prototipo Mini-trans 2.2	72
4.6. Prototipo Mini-trans 2.3	75
4.7. Prototipos de pinza	76
4.8. Cinturón de contacto	77
4.9. Arreglo de llantas de un módulo Mini-trans.	78
4.10. Construcción de la fase de locomoción	78
4.11. Establecimiento de un líder entre dos robots.	92
4.12. Cesión de liderazgo.	92
4.13. Recepción de liderazgo.	93

4.14. Reclutamiento de robots alrededor de un objeto.	94
4.15. Seguimiento del robot líder.	95
4.16. Cambio de dirección.	96
4.17. Arquitectura de control del sistema Mini-trans	98
4.18. Estrategias de ensamble	100
4.19. Mecanismo de cambio de dirección de un sistema ensamblado	102
5.1. Experimento individual no. 1, caso único.	107
5.2. Gráfica de comportamientos del experimento individual no. 1, caso único	108
5.3. Experimento individual no. 2, caso: único	109
5.4. Gráfica de comportamientos del experimento individual no. 2, caso: único	110
5.5. Experimento individual no. 3, caso no. 1	111
5.6. Gráfica de comportamientos del experimento individual no. 3, caso no. 1:	111
5.7. Experimento individual no. 3, caso no. 2.	113
5.8. Gráfica de comportamientos del experimento individual no. 3, caso no. 2.	113
5.9. Experimento individual no. 3, caso no. 3.	114
5.10. Gráfica de comportamientos del experimento individual no. 3, caso no. 3	114
5.11. Experimento colectivo no. 1, caso no. 1	116
5.12. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 1, caso no. 1	117
5.13. Experimento colectivo no. 1, caso no. 2	118
5.14. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 1, caso no. 2	119
5.15. Experimento colectivo no.1, caso no. 3	120
5.16. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 1, caso no. 3	120
5.17. Experimento colectivo no. 2, caso no. 1	122
5.18. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 2, caso no. 1	123
5.19. Experimento colectivo no. 2, caso no. 2	124
5.20. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 2, caso no. 2	124
5.21. Experimento colectivo no. 2, caso no. 3	125
5.22. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 2, caso no. 3	126
5.23. Detalle de los comportamientos ejecutados entre 0 y 140 <i>secs.</i> durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.	127

5.24. Detalle de los comportamientos ejecutados entre 750 y 850 <i>segs.</i> durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.	128
5.25. Detalle de los comportamientos ejecutados entre 1500 y 1600 <i>segs.</i> durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.	129
5.26. Experimento colectivo no. 3, caso no. 1	129
5.27. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 3, caso. no. 1	130
5.28. Experimento colectivo no. 3, caso no. 2	131
5.29. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 3, caso no. 2	131
5.30. Experimento colectivo no. 4, caso único	132
5.31. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 4, caso único.	133
5.32. Experimento colectivo no. 5a, caso no. 1	134
5.33. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5a, caso no. 1	135
5.34. Experimento colectivo no. 5a, caso no. 2	136
5.35. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5a, caso no. 2	137
5.36. Experimento colectivo no. 5b, caso no. 1	138
5.37. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5b, caso no. 1	138
5.38. Experimento colectivo no. 5b, caso no. 2.	139
5.39. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5b, caso no. 2	139
5.40. Experimento colectivo no. 5b, caso no. 3	140
5.41. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5b, caso no. 3.	141
5.42. Experimento colectivo no. 5b, caso no. 4.	141
5.43. Gráfica de comportamientos del experimento colectivo no. 5b, caso no. 4.	142
5.44. Experimento colectivo no. 6, caso único	143
5.45. Experimento colectivo no. 6, caso único.	144
6.1. Comparación de cuatro sistemas auto-reconfigurables	152
B.1. Tarjeta de control Handyboard©.	178
B.2. Tarjeta de expansión de la Handyboard©.	178

Índice de tablas

1.1. Sensores de luz	6
1.2. Sensores de fuerza	6
1.3. Sensores de posición y de orientación	7
2.1. Comparación entre la robótica no modular y robótica modular	28
6.1. Resumen de los experimentos individuales	149
6.2. Resumen de los experimentos colectivos.	150
6.3. Criterios de clasificación de los robots auto-reconfigurables tipo móvil	151
6.4. Número de módulos de cada sistema	153
6.5. Tareas de los sistemas	154
6.6. Recursos invertidos por módulo	157

Prefacio

Antecedentes

En los últimos años, el diseño y construcción de sistemas multi-robot auto-reconfigurables ha cobrado importancia debido a las múltiples ventajas que ofrecen, tales como modularidad, economía, tolerancia a falla, reconfigurabilidad, entre otros. Sin embargo, el diseño y construcción de este tipo de sistemas es aún un problema abierto, ya que no existe una guía que indique el mejor tipo de material a emplear, el equipamiento, así como los mecanismos de coordinación entre robots reconfigurables, que permitan la auto-organización y el auto-ensamble.

Actualmente, existen pocos sistemas multi-robot auto-reconfigurables en el mundo, en particular los de tipo móvil (Yim et al., 2002), de los cuales se hace un recuento de los más representativos en el capítulo 3. Sin embargo, como se verá en ese capítulo, estos robots se encuentran en estado de prototipos. Al inicio de esta tesis, no se había reportado proyecto alguno de sistema auto-ensamblable autónomo. En nuestro país no existe proyecto alguno de este tipo de sistemas, siendo nuestra propuesta el primer prototipo de sistema multi-robot auto-reconfigurable.

Definición del problema

Se plantea el diseño y construcción de un sistema multi-robot auto-reconfigurable tipo móvil compuesto por tres módulos autónomos, capaces de conectarse físicamente. Cada robot o módulo del sistema deberá ser capaz de desempeñar tareas tales como navegar en forma individual o ensamblada, auto-ensamblarse y empujar un objeto en forma no dirigida, i.e. empujarlo hasta una pared sin objetivo determinado. El desplazamiento de los robots se realizará sobre un terreno plano. Los módulos del sistema deben ser capaces de ordenarse y ensamblarse. Los mecanismos

de coordinación propuestos son, sino totalmente generalizables, sí aplicables a sistemas auto-reconfigurables tipo móvil, equipados con al menos un dispositivo rígido de conexión.

Objetivos de la tesis

Diseñar y construir un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, integrado por tres módulos móviles y autónomos.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se han identificado los siguientes objetivos particulares.

1. Diseñar y construir tres módulos homogéneos, autónomos, con capacidades de auto-ensamblado. Por homogéneo, se entiende que todos los módulos tienen la misma estructura física y exhiben el mismo repertorio conductual. Por autónomo se indica que los robots están equipados de sensores, actuadores y un procesador integrados en sus cuerpos; cada robot procesa la información proveniente de sus sensores y actúa en consecuencia. Por capacidades de auto-ensamblado, se indica que los robots deben ser capaces de conectar y desconectar sus cuerpos físicamente.
2. Definir, implementar y evaluar mecanismos de coordinación para:
 - Encontrar un objeto en el ambiente
 - Auto-ordenarse
 - Auto-ensamblarse
 - Desplazarse en forma ensamblada
 - Desensamblarse
 - Trasladar en forma no dirigida un objeto

Alcances y limitaciones

Debido a la amplitud del tema, al tiempo, espacio y presupuesto disponible para el desarrollo de esta tesis, se construyó un sistema multi-robot compuesto por tres módulos con equipamiento limitado. Los módulos fueron homogéneos debido a las

ventajas que ofrecen en comparación con los sistemas heterogéneos, en los primeros no es necesario distinguir las habilidades particulares de cada módulo a diferencia de los segundos. Como parte de esta propuesta, todos los módulos del sistema excepto la tarjeta de control, los sensores, servomotores, motores y algunos actuadores y efectores finales como las llantas, fueron diseñados y construidos, debido a que es más flexible de equipar, modificar y manipular un robot de diseño y construcción propios. El control de los módulos depende de una arquitectura de control basada en el comportamiento aumentada con un módulo de memoria. Se compararon los resultados obtenidos con los sistemas auto-reconfigurables actuales de tipo móvil. Se definieron y probaron mecanismos de coordinación entre los robots para ordenarse, auto-ensamblarse, desplazarse en forma ensamblada, encontrar un objeto y empujarlo, bajo condiciones ideales. El control se realizó con una tarjeta comercial Handyboard[®]. Los experimentos se realizaron en un ambiente de $2.23\text{ m} \times 2.12\text{ m}$, con superficie plana. El ambiente fue iluminado con luz blanca de 3000 a 3500 lúmenes. El objeto a trasladar fue cúbico tráslucido, con iluminación interna de luz blanca de 3000 a 3500 lúmenes, de un peso aproximado de 10 kg .

Se realizaron dos tipos de experimentos: individuales y colectivos. Los comportamientos probados en los experimentos fueron `navegar`, `seguir_pared`, `alinearse`, `identificar_obstáculos`, `auto-ensamblarse`, `empujar un objeto` y `cambiar_dirección`. Se realizaron un total de 19 pruebas, cuyos resultados se muestran en el capítulo 5. El sistema multi-robot pudo realizar cada una de la tareas anteriormente mencionadas, aunque con algunas dificultades en la sincronización de envío y recepción de información para comunicarse.

Algunas de las limitaciones materiales de este proyecto consistieron en falta de herramientas y equipo de laboratorio para trabajar, por lo que debieron ser adquiridos a lo largo del desarrollo del proyecto. Algunos elementos para equipar el robot no se proveen en nuestro país, por lo que debieron ser adquiridos del extranjero, con el consecuente tiempo de solicitud y envío del producto. La cantidad y tipo de sensores fue limitada y simple, es decir, sólo se emplearon sensores de luz, de contacto y de rotación. El número de puertos máximos que provee la tarjeta de control es de 12 analógicos y 5 digitales. La tarjeta sólo posee un receptor infrarrojo el cual está

situado en su parte frontal, esto implica que para comunicarse, dos robots deben estar alineados, uno frente al otro. Las baterías de la tarjeta cargadas completamente proveen una autonomía energética de aproximadamente una hora. La capacidad de almacenamiento en memoria de la tarjeta es de 16 KB, por lo que los experimentos de los comportamientos de los robots se realizaron en forma separada, es decir, no se logró realizar un experimento con todos los comportamientos, debido a las limitaciones de almacenamiento. El peso del robot de aproximadamente 2.80 kg. dificultó igualmente su desplazamiento.

Metodología

El desarrollo del proyecto consistió de 5 etapas principales las cuales se muestran en la figura 1 y se describen a continuación.

- 1) **Analizar la morfología y equipamiento de un robot.** Consiste en revisar la información teórica sobre tipos de morfología de un robot, así como de sensores, actuadores, etc.
- 2) **Definir capacidades y comportamientos del robot o sistema.** Definir y programar las capacidades y los comportamientos individuales y colectivos del robot.
- 3) **Construir prototipo.** Consiste en construir físicamente el prototipo basado en las especificaciones definidas en la etapa previa.
- 4) **Experimentar.** Realizar pruebas de los comportamientos definidos con el sistema.
- 5) **Validar el sistema.** Analizar los resultados obtenidos y compararlos con los de otros sistemas similares.

Organización de la tesis

En esta tesis se presenta la definición, la construcción y el control de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado. Se describen también los experimentos realizados y los re-

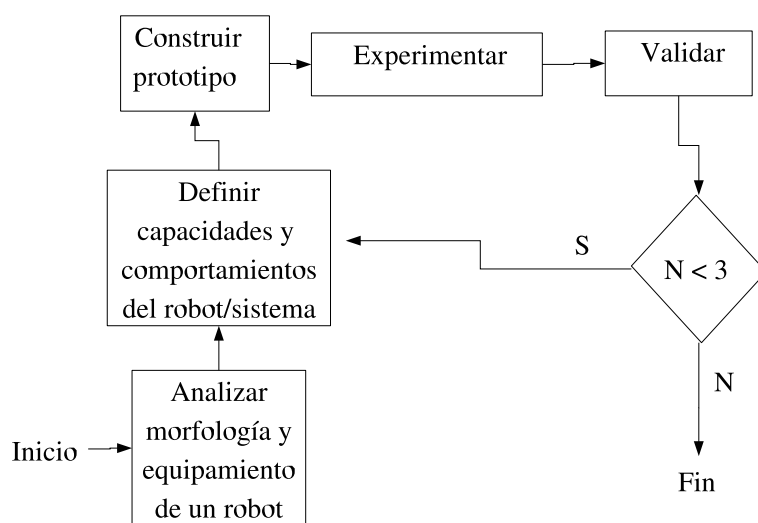


Figura 1: Metodología empleada en la realización del proyecto.

sultados obtenidos por el sistema en la ejecución de comportamientos como *navegar*, *auto-ensamblarse*, *desplazarse en forma ensamblada* y *empujar un objeto*. La tesis se encuentra organizada en 7 capítulos. En el capítulo 1 se presenta una introducción a los sistemas mono-robot, sus características, definiciones y arquitecturas de control. En el capítulo 2 se presentan características, ventajas y desventajas de los sistemas multi-robot, así como definiciones tales como interacción, ordenamiento, coordinación, comunicación y auto-ensamble, entre robots. Características y trabajos relacionados con los sistemas multi-robot también son presentados en este capítulo. En el capítulo 3 se revisa el estado del arte sobre robótica auto-reconfigurable de tipo móvil. En el capítulo 4 se describe el desarrollo del sistema multi-robot Mini-trans. En este capítulo también se describen el diseño, construcción y pruebas de diversos prototipos creados para poder seleccionar el prototipo final de los módulos que componen el sistema. Las conductas básicas, comportamientos y capacidades de los robots son igualmente descritos en este capítulo, así como la arquitectura de control empleada. En el capítulo 5 se describen los experimentos y pruebas realizadas en forma individual y colectiva del sistema Mini-trans, así como los resultados obtenidos. En el capítulo 6 se hace una comparación con los sistemas auto-reconfigurables mencionados en el capítulo 3. Finalmente, en el capítulo 7 se discuten las conclusiones, los resultados obtenidos y las perspectivas de este trabajo.

Capítulo 1

Sistemas mono-robot

En esta tesis se plantea la construcción de un sistema multi-robot integrado por tres robots móviles y autónomos. Para abordar los aspectos del diseño de sistemas multi-robot, es importante primero revisar las características de los sistemas mono-robot, componentes de los sistemas multi-robot. Esta revisión es el objetivo de este capítulo.

1.1. Introducción

Definición 1. *Un robot es una máquina programable, capaz de realizar tareas automatizadas.*

Definición 2. *Un sistema mono-robot es aquel sistema que está compuesto por un solo robot.*

1.1.1. Clasificación

Existen diversos criterios para clasificar un robot. Por ejemplo, de acuerdo a la capacidad de desplazamiento total del robot, este puede ser: fijo, semi-fijo y móvil.

Robots fijos: estos robots son mejor conocidos como manipuladores. Normalmente tienen forma de brazos o manos y no poseen la capacidad de desplazamiento de todo el cuerpo del robot (ver figura 1.1 (a)).

La manipulación es la capacidad de actuar sobre los objetos, es decir, un manipulador puede aproximarse a un objeto, tomarlo y trasladarlo de un lugar a otro, o bien modificarlo.

Robots móviles: tienen capacidad de desplazamiento o de locomoción de todo el cuerpo del robot. Para desplazarse, estos robots emplean ruedas, orugas, llantas u otro tipo de efector (ver figura 1.1 (b)).

Robots semi-fijos: son aquellos manipuladores que están montados sobre una base que puede desplazarse, pero cuyo desplazamiento está limitado a un área definida, por ejemplo, un robot montado sobre un riel (ver figura 1.1 (c)).

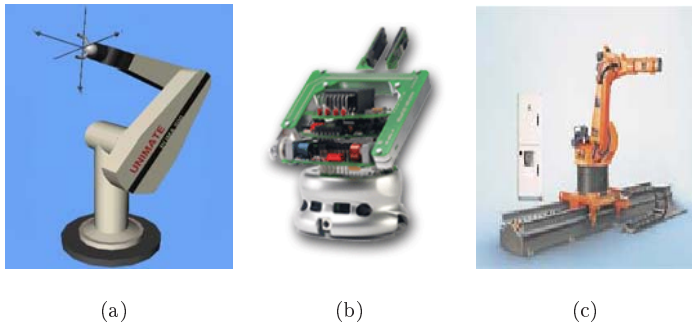


Figura 1.1: Clasificación de robots de acuerdo a su capacidad de desplazamiento: a) Robot fijo manipulador PUMA [Puma-url], b) robot móvil Khepera II [Khepera-url] y c) robot semi-fijo KUKA KL1500 [KUKA-url].

De acuerdo al medio en el cual se desempeñan o desplazan los robots, éstos se clasifican en terrestres, acuáticos, aéreos y espaciales.

Terrestres. Se desplazan en la tierra. Son diseñados para aprovechar el contacto con la superficie de la tierra o con una superficie sólida, así como de la gravedad para desplazarse (ver figura 1.2).



Figura 1.2: Robot terrestre Genghis [Robot_espacial-url].

Acuáticos. Estos robots operan en el agua o ambientes líquidos, en su superficie o al interior. La mayoría de los robots acuáticos usan propulsión a chorro o hélices acuáticas para lograr la locomoción (ver figura 1.3).



Figura 1.3: Robot acuático Oberon de 150 kilogramos, es uno de los robots autónomos desarrollado por la *Australian Center for Field Robotics* de la Universidad de Sydney (Williams et Mahon, 2004).

Aéreos. Se desplazan en el aire, pueden tener forma de avión, helicópteros o dirigibles. Las hélices son efectores muy importantes para este tipo de robots (ver figura 1.4).



Figura 1.4: Robot aéreo iFR-II realizado por Seiko Epson, hasta el momento es el más liviano del mundo. Puede ser dirigido por control remoto a través de una computadora y lleva a bordo una cámara que puede emitir imágenes a la Tierra mediante un sistema inalámbrico. Se encuentra aún en desarrollo y por el momento su tiempo de vuelo es de 3 minutos [Robot_aereo-url]

Espaciales. Son diseñados para operar en el espacio exterior (ver figura 1.5).

La superficie terrestre para el desplazamiento puede ser plana, inclinada, irregular y extrema, según se describe a continuación.



Figura 1.5: Robot espacial Sojourner, construido por la NASA, con la misión de explorar Marte [Robot_espacial-url].

1. **Plana.** La superficie no tiene pendientes ni protuberancias o depresiones, como montañas o huecos.
2. **Inclinada.** La superficie puede ser plana pero con inclinaciones.
3. **Irregular.** La superficie tiene partes planas y partes con protuberancias o depresiones pequeñas.
4. **Extrema.** La superficie tiene las características del tipo de superficie irregular, pero con protuberancias o depresiones más comunes o más grandes, así como la existencia de elementos naturales que obstaculizan o dificultan el desplazamiento como son, rocas, ramas, troncos, arena, etc.

En este trabajo, nos enfocaremos en los robots terrestres y móviles que se desplazan en superficies planas.

1.2. Composición sensorial

Un robot requiere información del mundo que le rodea para llevar a cabo alguna acción, ya que de no ser así estará prácticamente *ciego*. Los sensores le permiten a un robot obtener información que le ayuda a tomar decisiones.

A continuación se definen algunos términos que se emplearán en este trabajo.

Definición 3. *Sensar es la acción de captar y medir fenómenos físicos como pueden ser propiedades del medio ambiente o del mismo robot.*

Definición 4. *Los sensores son dispositivos que tienen la capacidad de percibir fenómenos físicos como son temperatura, fuerza, inclinación, etc. y convertirlos en señales*

eléctricas.

Los sensores tienen tres características, sensibilidad, un rango de acción y un campo de acción (Dudek et Jenkin, 2000).

Definición 5. *La **sensibilidad** es el grado de percepción mínimo que posee el sensor para reaccionar a un estímulo del fenómeno físico que mide.*

Definición 6. *El **rango de acción** de un sensor es el conjunto de valores de algún estímulo físico al cual reacciona el sensor.*

Definición 7. *El **campo del acción** de un sensor es el espacio alrededor del sensor en el cual un estímulo físico puede ser percibido por el sensor.*

Por ejemplo, un sensor térmico puede tener un campo de acción en un ángulo de 30° a una distancia de $1m$, detectar cambios de temperatura en un rango de acción de $0^\circ C$ a $40^\circ C$ y una sensibilidad para detectar cambios de temperatura de $1^\circ C$.

1.2.1. Tipos de sensores

De acuerdo al fenómeno percibido existen diferentes tipos de sensores, como son: de luz, de fuerza, de posicionamiento y orientación, de visión y de sonido.

En este trabajo, se describirán únicamente el uso y funcionamiento de los primeros tres tipos de sensores mencionados anteriormente, ya que son los tipos de sensores empleados en el desarrollo de esta tesis.

1.2.1.1. Sensores de luz

La información que proporcionan los sensores de luz puede ayudar al robot a ejecutar acciones como por ejemplo dirigirse a una fuente de luz o evadirla, recibir una señal infrarroja o luminosa. En la tabla 1.1 se presentan algunos tipos de sensores de luz y en la figura 1.6 se ilustran algunos ejemplos de éstos.

1.2.1.2. Sensores de fuerza

Los sensores de fuerza se activan cuando cierta fuerza física es aplicada sobre ellos, por ello pueden indicar al robot si algún objeto está o no haciendo contacto con él. En la tabla 1.2 y en la figura 1.7 se presenta un tipo de sensores de fuerza.

Tabla 1.1: Sensores de luz

Nombre	Función	Uso
Fotosensores	Miden la cantidad de luz que llega a ellos, la cual es recibida por una fotocelda eléctrica.	Se pueden usar para medir intensidad de luz, orientarse, etc.
Emisores y receptores infrarrojos	El emisor permite el envío de una señal la cual puede ser codificada o no a cierta frecuencia. El receptor posee la capacidad de captar una señal infrarroja.	Se emplean para transmitir y recibir información por medio de códigos permitiendo a los robots comunicarse o detectar obstáculos.



(a) Fotodiodo

(b) Sensor infrarrojo

Figura 1.6: Ejemplos de sensores de luz

Tabla 1.2: Sensores de fuerza

Nombre	Función	Uso
Micro-interruptores	Se activan al cerrarse los interruptores, en el momento en que el robot está haciendo contacto con un objeto.	Se emplean para saber si el robot ha hecho contacto o no con algún obstáculo.



(a)

(b)

Figura 1.7: El microinterruptor de contacto (a), es un tipo de sensor de fuerza que se activa cuando es presionado (b).

1.2.1.3. Sensores de posición y orientación

Los sensores de posición y de orientación proporcionan al robot la posición absoluta en que se encuentra en el medio ambiente, o su posición con respecto a un punto de referencia. En la

tabla 1.3 y en la figura 1.8 se presentan algunos tipos de sensores de posición y orientación.

Tabla 1.3: Sensores de posición y de orientación

Nombre	Función	Uso
<i>Shaft encoder</i>	Posee una especie de disco dividido por franjas de dos colores diferentes intercaladas; el sensor tiene la capacidad de medir el número de posiciones o divisiones rotadas.	Es empleado para medir el desplazamiento realizado por el robot en un lapso de tiempo.
Giroscopios	Es un dispositivo que contiene un disco rotor en un eje que puede girar libremente en alguna dirección, de tal forma que el disco resiste a la acción de un acoplamiento aplicado y tiende a mantener la misma orientación en el espacio sin tomar en cuenta el movimiento circundante de la estructura	Es empleado para saber qué tan rápidamente un robot está rotando con respecto a un sistema de coordenadas fijo.

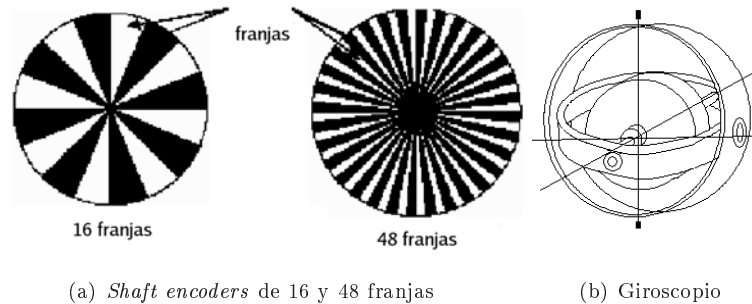


Figura 1.8: Sensores de posición y orientación.

1.2.2. Propiedades de los sensores

Aunque existe una gran variedad de sensores que proporcionan información al robot para tomar decisiones, muchos de estos sensores no son muy precisos y son susceptibles de percibir información con ruido.

Dudek et Jenkin (2000) identifican diferentes propiedades de un sensor, las cuales son descritas a continuación.

- **Velocidad de operación.** El rango en el cual las medidas son retornadas cuando los sensores están actuando, o bien el tiempo de retardo hasta que una medida es proporcionada, cuando la medida es requerida intermitentemente.
- **Costo.** Algunos sensores tienen menor costo que otros sensores, por ejemplo, un par detector-emisor infrarrojo tiene un costo menor al de un giroscopio.
- **Rango de error.** El porcentaje de error de la medida tomada, ya sea número de medidas faltantes o medidas erróneas.
- **Robustez.** Se refiere a cuántas variaciones de las condiciones ideales de operación puede el sensor soportar en el medio ambiente, para que pueda seguir operando adecuadamente. Algunas perturbaciones relevantes pueden ser disturbios físicos, ruido ambiental en términos del estímulo de interacción, etc.
- **Requerimientos computacionales.** Algunos sensores como un microinterruptor no requieren tanto poder computacional como un algoritmo de visión que procesa la información de una cámara.
- **Requerimientos de energía, peso y tamaño.** Algunos sistemas requieren suministro de energía de forma continua para mantener activo el sensor y tomar sus lecturas, mientras que otros sensores pueden ser apagados y solamente consumen poder cuando son requeridos.

La selección de sensores que equiparán a un sistema mono-robot dependerá de las capacidades que deseamos tenga el robot en función del propósito para el cual será construido. Aunque existen diversos tipos de sensores, todos poseen limitantes en su campo de acción, rango de acción y sensibilidad. Es importante entonces conocer las características de cada uno de los sensores para decidir si formará parte del equipamiento del robot.

En este trabajo, emplearemos sensores de luz como fotoresistores e infrarrojos; sensores de fuerza, como son microinterruptores y sensores de rotación como son los *encoders*.

1.3. Composición mecánica

Un robot comprende una estructura física integrada por diferentes partes y subsistemas relacionados, de tal forma que ocasionan el movimiento y funcionamiento del robot, de acuerdo a los

diferentes algoritmos empleados. La estructura mecánica de un robot la integran principalmente la morfología del robot, los actuadores y los efectores.

Definición 8. La *morfología* del robot corresponde a la forma física que presenta el robot con sus actuadores, efectores finales y sensores que son colocados sobre el robot, inclusive la carcasa que cubre a todo el robot, si éste tiene una.

Definición 9. Un *actuador* es un elemento del robot que genera la fuerza necesaria para que se muevan sus efectores.

Definición 10. Un *efector* es un elemento terminal del robot, por ejemplo pinzas, herramientas, ventosas y ganchos, cuya finalidad es afectar o producir alguna modificación en el entorno en el cual se encuentra el robot.

La figura 1.9 ilustra los sensores, actuadores y efectores de un robot.

En esta sección se tratarán aspectos como la locomoción, el arreglo de las llantas y los tipos de morfología que puede tener un robot.



Figura 1.9: Un robot está equipado de sensores, efectores y actuadores los cuales le permiten, respectivamente percibir lo que le rodea, desplazarse y llevar a cabo tareas.

1.3.1. Locomoción

Definición 11. La *locomoción* es la capacidad que posee un robot móvil para desplazarse de un lugar a otro.

Hay que considerar tres aspectos importantes en la locomoción: desplazamiento en línea recta, giros y traslaciones en múltiples direcciones.

Estos dos aspectos dependen del tipo de robot, ya que para un robot con ruedas es más fácil desplazarse en línea recta que para un robot con patas, así como para un robot ápedo

desplazarse por un plano es más difícil que para un robot con ruedas.

Los robots terrestres emplean diferentes tipos de efectores para lograr la locomoción, siendo éstos:

- **Llantas.** Este tipo de efector es accionado por motores. Aprovecha la fricción del efector con la superficie sobre la cual se desplaza. La principal desventaja de este tipo de efector es que en terrenos irregulares se desempeña pobremente (ver figura 1.10 (a)).
- **Orugas.** Las orugas también aprovechan el contacto con la superficie, teniendo mayor tracción. Este efector tiene forma de banda pero a diferencia de las ruedas, presenta mayor dificultad para realizar giros y su desplazamiento puede ser más lento que el de las llantas, además de requerir mayor consumo de energía para su desplazamiento; sin embargo, presenta mayor robustez a variaciones del terreno (ver figura 1.10 (b)).
- **Patas o extremidades.** Algunos proyectos basados en el comportamiento de humanos e insectos emplean efectores en forma de patas. Estos efectores proporcionan ventajas en exploración de terrenos muy accidentados, donde las llantas y orugas no tienen un buen desempeño. Sin embargo, presentan mayor dificultad para lograr el equilibrio del robot. Estos robots tienen mecanismos más complejos y son más propensos a fallas. El robot Genghis por ejemplo, emplea una locomoción a base de patas (ver figura 1.2).
- **Ápodos.** Robots que no poseen patas, llantas u orugas para desplazarse. Se desplazan apoyándose en su propio cuerpo, contrayéndolo y dilatándolo, desplazándose con un movimiento similar al de las serpientes o gusanos (ver figura 1.10 (c)).

En la figura 1.10 se muestran robots terrestres con diferentes efectores para su locomoción.

1.3.1.1. Arreglo de llantas

La forma en que las llantas son colocadas en un robot móvil, influye en la forma que se desplaza. A continuación se analizan algunos de los arreglos más conocidos de las llantas en un robot móvil terrestre, según Jones et Flynn (1993).

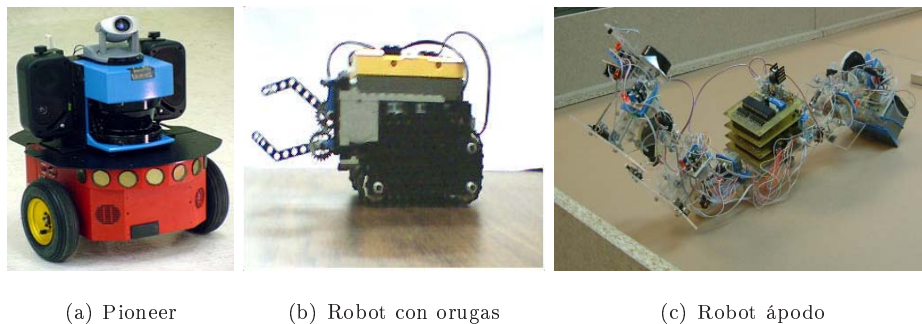
Control diferencial de llantas. Este tipo de arreglo consiste de dos llantas que están ajustadas a un eje común con control independiente una de la otra. Cada llanta puede girar a una velocidad diferente, razón por la que se le denomina direccionamiento diferencial. Generalmente, se emplean dos llantas y una llanta ‘loca’, ésta última situada en la parte trasera o delantera

del robot, la cual sirve de soporte al robot y sólo sigue el movimiento controlado por las otras llantas (ver figura 1.11 (a)).

Una de las desventajas de este tipo de arreglo de llantas es su diferencia de velocidades. La velocidad de cada llanta puede ser diferente desde un inicio, o modificarse en el momento en que una llanta pisa un terreno distinto de la otra. Este tipo de arreglo permite al robot desplazarse en línea recta y hacer giros. Sin embargo, cuando el robot se desplaza en un terreno irregular, el contacto de las llantas con el terreno puede perderse por momentos, creando inestabilidad en el robot, por lo que es importante considerar un sistema de suspensión que le permita a las llantas moverse sin perder contacto con el terreno.

Control tipo Ackerman. Consiste de dos llantas traseras y una delantera o bien de dos llantas delanteras y traseras. La llanta delantera proporciona la dirección y tracción, permitiendo a las llantas traseras desplazarse libremente. Cuando la configuración consiste de cuatro llantas dispuestas como las de un carro, las dos llantas delanteras se mueven al mismo tiempo teniendo el control de la dirección. Una desventaja de este tipo de arreglo es la pérdida de tracción y estabilidad del robot cuando se está desplazando en un terreno inclinado (ver figura 1.11 (c) y (d)).

Control sincronizado de llantas. Este tipo de control de llantas tiene dispuestas todas sus ruedas, generalmente tres, de tal forma que siempre apuntan a la misma dirección. Por medio de las llantas se controlan tanto la dirección como el movimiento del robot. Las ruedas se giran simultáneamente alrededor de un eje vertical para cambiar la dirección del robot, pero su chasis sigue apuntando en la misma dirección que tenía. El control sincronizado supera muchas de las



(a) Pioneer

(b) Robot con orugas

(c) Robot ápodo

Figura 1.10: Robots móviles con diferentes efectores: (a) llantas [Pioneer-url], (b) orugas LegoMindstorms©, y (c) su propio cuerpo (Alarcón, 2005).

dificultades del control diferencial y de triciclo, pero a costa de una mayor complejidad mecánica (ver figura 1.11 (b)).

Los tres tipos de arreglos de llantas permiten al robot un desplazamiento en forma rectilínea y curvilínea. Sin embargo, los arreglos diferencial y sincronizado permiten al robot además movimientos rotatorios, i.e. el robot es capaz de girar sobre sí mismo, en el primero apoyado sobre una de sus llantas y en el segundo sobre su eje central. Cuando un robot tiene la capacidad de desplazarse en cualquier dirección, i.e. al frente, hacia atrás, a los lados, en diagonal, en curva y sobre su propio eje central, se dice que tiene movimiento omnidireccional.

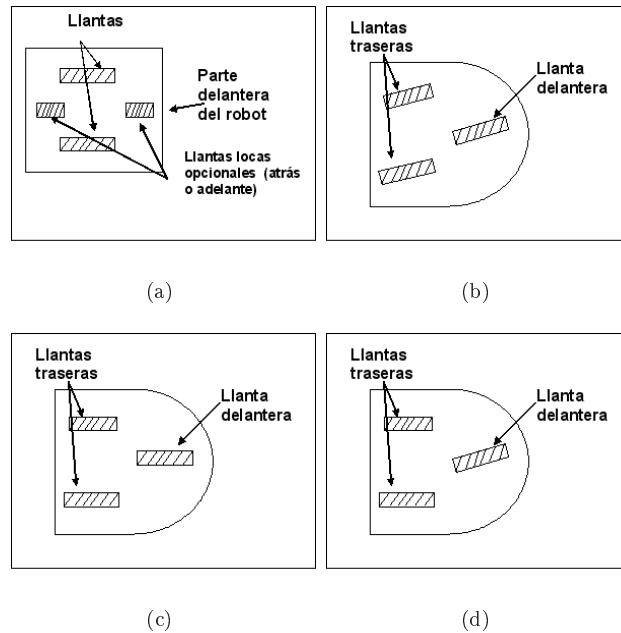


Figura 1.11: Existen tres tipos de control de llantas: diferencial, sincronizado y de triciclo. (a) El control diferencial posee normalmente dos llantas y una llanta 'loca' que da estabilidad al robot. (b) En el control sincronizado, tres llantas se mueven hacia la misma dirección al mismo tiempo. (c) y (d) En el control tipo triciclo, dos llantas son dispuestas en la parte trasera del robot y una en la parte delantera, siendo ésta última la que proporciona la dirección del robot; o bien de cuatro llantas dispuestas en forma de carro.

1.3.2. Estructura física del robot

La morfología del robot puede favorecer o perjudicar su desempeño. Por ejemplo, un robot cúbico que requiere pasar por una zona estrecha con esquinas, tendrá mayor problema para evitar las esquinas y pasar por el área estrecha, que un robot de estructura cilíndrica (ver figura 1.12).

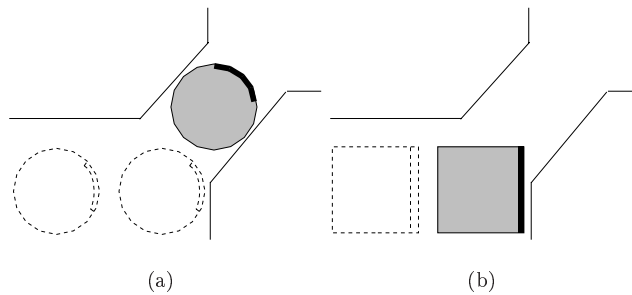


Figura 1.12: Se muestra un robot de forma cilíndrica (a) que presenta menor dificultad para poder desplazarse en una área donde existen esquinas, en comparación con un robot de forma cúbica (b). Tomado de Jones et Flynn (1993).

Uno de los problemas de diseño de robots es que se desea contar con robots capaces de desplazarse en cualquier tipo de terreno, por muy complejo que éste sea, por ejemplo, en la exploración de volcanes, otros planetas o zonas de desastre.

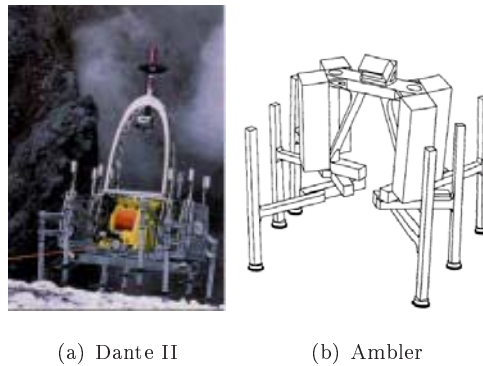


Figura 1.13: Robots con patas: a) para exploración de volcanes y b) para explorar Marte (Krotkov et al., 1995).

Dante II y CMU Ambler de Carnegie Mellon (ver figura 1.13), son robots que se construyeron con propósitos de exploración de volcanes y del planeta Marte, respectivamente. Estos robots

presentaron problemas en su desplazamiento, debido a su estructura física y peso.

En los últimos años, se ha trabajado con una nueva propuesta de sistemas multi-robot, cuya estructura física está compuesta por módulos. En el apartado 2.2 se abordarán estos sistemas.

1.4. Paradigmas de control

Los algoritmos de control juegan un papel importante para el desempeño del robot. Se identifican tres paradigmas para el control de un robot:

- Basado en el conocimiento o deliberativo
- Basado en el comportamiento, reactivo o situado
- Híbrido o deliberativo/reactivo

1.4.1. Enfoque deliberativo

Este primer paradigma fue establecido en 1967 con la aparición del robot Shakey (ver figura 1.14). Consiste en la composición de un conjunto de acciones a ejecutar denominado plan, con base en conocimiento *a priori* del entorno en el cual se desempeñará el robot. La información proporcionada por los sensores ayuda a establecer la condición en que se encuentra el robot, ésta condición es comparada con el plan establecido y de acuerdo a la condición que se cumpla, se determina una acción a ejecutar. Este paradigma consiste de tres acciones: sensar, planear y actuar (SPA), realizándose en forma secuencial y repetitiva (ver figura 1.15), según se describe a continuación.

1. **SENSAR:** Esta acción consiste en obtener información proporcionada por los sensores para conocer características del medio en el cual se encuentra el robot. Con esa información, se construye un “mapa global del mundo” (c.f. definición 12), que contiene información relevante como la presencia de obstáculos, la orientación y ubicación del robot, de tal forma que le permita al robot producir una salida de acuerdo a las condiciones en que se encuentra.
2. **PLANEAR:** El robot toma cada una de las salidas que produce la función sensar y crea una serie de pasos a seguir a partir de un conjunto de reglas de acuerdo a cada situación



Figura 1.14: Shakey, primer robot que emplea el enfoque deliberativo para su control [Shakey-ur]

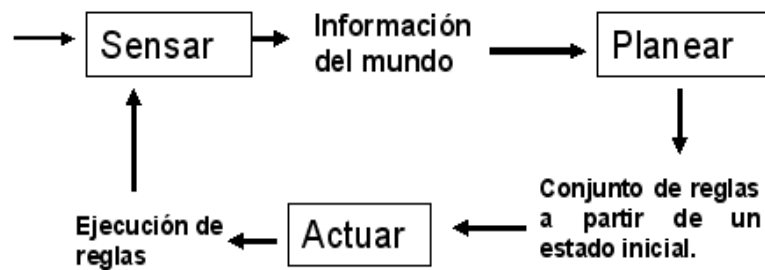


Figura 1.15: Enfoque deliberativo

que se presente, es decir un plan que le permita llevar a cabo su objetivo partiendo de un estado inicial. Por ejemplo, planificación de una trayectoria.

3. **ACTUAR:** De acuerdo al plan generado por la función planear, la función actuar envía comandos a los actuadores y efectores para que se lleven a cabo cada una de las acciones del plan a seguir.

El enfoque deliberativo requiere conocimiento de las características del medio ambiente en el que se desempeñará el robot para construir un plan de acción detallado. Debido a que dicho plan depende de esas características, estas no deben cambiar, ya que de ser así el robot no

logrará realizar el plan definido. Estas características conforman un modelo del medio ambiente denominado **modelo del mundo**.

Definición 12. *El modelo del mundo representa las características del área donde se desempeñará el robot. Estas características se utilizan para construir el plan de acción del robot, y puedan referirse a la presencia de obstáculos, colores, formas, etc.*

Según Murphy (2000), el modelo del mundo contiene típicamente:

1. Una representación del mundo donde el robot opera.
2. Información sensada, para saber dónde se encuentra el robot y si está tocando algún obstáculo o no.
3. Algún conocimiento adicional que podría ser requerido para efectuar una tarea.

1.4.1.1. Planificador STRIPS

STRIPS es un ejemplo de un controlador de robots basado en el paradigma deliberativo. STRIPS (*Stanford Research Institute Problem Solver*), es una implementación de razonamiento denominado análisis de medios-fines (Newell et Simon, 1976), el cual considera que si un objetivo no se puede alcanzar con una sola acción, se busca ejecutar varias acciones que vayan reduciendo la distancia entre la situación actual y la situación final u objetivo que se desea alcanzar. Para llevar a cabo un objetivo, se realiza una revisión de las condiciones actuales y del avance del plan trazado, es decir, hasta dónde se ha realizado el plan. De acuerdo a la situación se ejecuta la acción planeada.

1.4.1.2. Ventajas y desventajas

Se presentan a continuación algunas de la ventajas y desventajas del enfoque deliberativo.

Ventajas:

1. Se cuenta con una relación ordenada de Sensar - Planear - Actuar.
2. Se logra el alcance del objetivo o ruta planeada siempre y cuando el mundo no cambie, ya que emplea conocimiento previo del mundo.

Desventajas:

1. Requiere realizar un plan a seguir, lo cual puede ser muy tardado y costoso.

2. El plan a seguir depende de que el modelo del mundo creado no cambie, por lo que es poco robusto a cambios imprevistos.
3. El modelo del mundo depende del problema a resolver.
4. No hay comunicación directa entre las funciones de sensado y acción.

1.4.2. Enfoque situado o reactivo

El enfoque situado nace a mediados de los ochenta guiado principalmente por Brooks (1986), Agre et Chapman (1987), Kaelbling et Rosenschein (1991) y Maes (1990). Este enfoque se basa en modelos biológicos y en el comportamiento de tipo estímulo - respuesta de los seres vivos. Brooks (1986) considera que para un robot, la mejor representación del mundo es el propio mundo, y que sólo basta que el robot conozca la situación actual, es decir la información más recientemente proporcionada por los sensores para decidir y ejecutar una o más acciones. Este enfoque se basa en un ciclo Sensor-Actuar, el cual no emplea un modelo del mundo ni un planificador. En la figura 1.16 se muestra el proceso reactivo. Genghis es uno de los robots controlado bajo este enfoque, aplicando una arquitectura conocida como subsumción (Brooks, 1986).

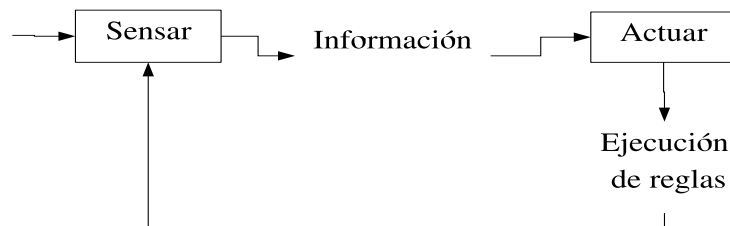


Figura 1.16: Enfoque reactivo.

1.4.2.1. Arquitectura basada en comportamientos

Fue propuesta por Maja Matarić en 1994, inspirada en los sistemas biológicos. Se basa en la noción de conducta básica, como alejarse, acercarse, detenerse, etc., para formar comportamientos más elaborados, por ejemplo seguir un objetivo. La información de los sensores o percepción y las acciones simples o comandos directos a actuadores, forman conductas básicas (ver figura 1.17).

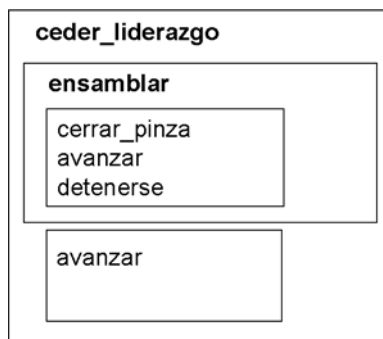


Figura 1.17: La arquitectura basada en el comportamiento de Mataric (1994) consiste de conductas básicas compuestas por acciones simples y percepción del medio por parte del robot. Estas conductas básicas conforman conductas más complejas denominadas comportamientos compuestos. Algunas veces los comportamientos compuestos están conformados por conductas básicas y acciones simples también. Las acciones simples **cerrar_pinza**, **avanzar** y **detenerse** componen la conducta básica **ensamblar**, la cual a su vez integra juntamente con la acción simples **avanzar** el comportamiento compuesto **ceder_liderazgo**.

Mataric (2002) define una conducta, de manera general, como un patrón de actividad observable, resultante de la interacción entre los robots y su medio ambiente.

Una **conducta básica** es una forma de actuar bajo ciertas condiciones, es una regla de control que se dispara ante cierta situación. Las conductas básicas son módulos independientes que pueden formar parte de conductas compuestas. Esta arquitectura plantea que se pueden almacenar representaciones en forma distribuida.

Las conductas básicas se establecen en función del dominio del problema. Sin embargo, Mataric estima que una conducta básica debe cumplir dos criterios:

- Necesidad: La conducta básica permite alcanzar la meta del robot. Si ésta conducta básica falta, la meta del robot no puede ser alcanzada.
- Suficiencia: La conducta básica o un conjunto de conductas básicas es suficiente para alcanzar la meta del robot, es decir, ninguna otra conducta es requerida para ello.

Por ejemplo, avanzar es un conducta básica necesaria para realizar la exploración. Avanzar y evadir obstáculos son conductas básicas suficientes para explorar.

1.4.2.1.1. Composición de conductas básicas Dos o más conductas básicas pueden formar un comportamiento más complejo, por lo cual se requiere de operadores de combinación directa \oplus y de combinación temporal \otimes (ver figura 1.18).

- \oplus combinación directa en donde múltiples conductas se ejecutan simultáneamente (ver figura 1.18 (a)).
- \otimes combinación temporal en donde múltiples conductas se ejecutan secuencialmente (ver figura 1.18 (b)).

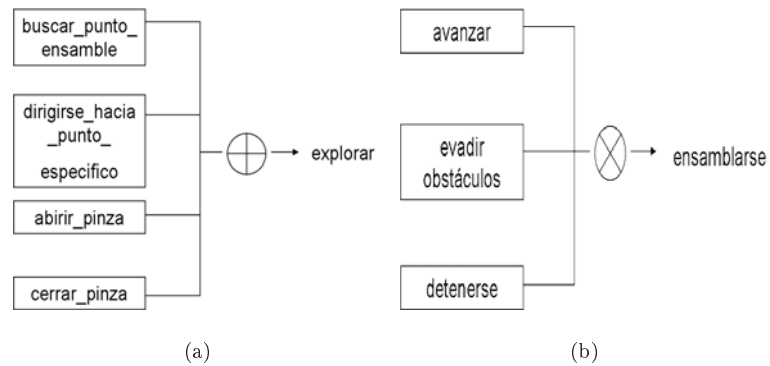


Figura 1.18: Las conductas básicas **avanzar**, **evadir_obstáculos** y **detenerse** se ejecutan al mismo tiempo, por lo que se combinan en forma directa en el comportamiento compuesto **explorar**. Las conductas **buscar_punto_ensamble**, **dirigirse_hacia_punto_especifico**, **abrir_pinza** y **cerrar_pinza** se ejecutan en forma secuencial, por lo que se combinan en el comportamiento compuesto **ensamblarse**.

1.4.2.2. Ventajas y desventajas

Algunas de las ventajas y desventajas del enfoque puramente reactivo se enuncian a continuación:

Ventajas:

1. No depende de un modelo del mundo, por lo que se puede trabajar en ambientes dinámicos bajo un esquema estímulo-respuesta, tolerando cambios en el entorno.
2. Su cómputo es más simple y rápido, ya que tiene menor necesidad de capacidad

de cálculo, pues no se emplean planificadores y sólo se reacciona a estímulos del medio, a diferencia del enfoque deliberativo.

Desventajas:

1. No emplea representación del conocimiento, por lo que es difícil emplearlo para realizar tareas de razonamiento o cooperación, o para lograr que el robot exhiba comportamientos proactivos, es decir, orientados a metas. Es decir, no alcanza objetivos elaborados.
2. Debido a que los estados del problema corresponden a combinaciones de valores de los sensores del robot, la identificación de un estado se vuelve más lenta conforme aumenta el número de sensores en el robot.

Algunas de las desventajas del paradigma puramente reactivo han sido parcialmente subsanadas con arquitecturas como la arquitectura de Mataric.

1.4.3. Enfoque híbrido

El enfoque deliberativo se basa fuertemente en la representación del conocimiento, gran parte de la actividad del robot es planeada y depende del modelo del mundo, si éste cambia, no hay garantía de que el objetivo del robot será alcanzado. Por su parte, el enfoque reactivo no depende de un modelo del mundo, se basa mayormente en los estímulos que perciben los sensores del robot y se responde rápidamente, pero no le permite al robot aprender o razonar el comportamiento a realizar. Para conciliar estos extremos se propone un tercer enfoque que intenta tomar lo mejor de los paradigmas deliberativo y del reactivo, este paradigma es conocido como **híbrido**.

Este enfoque aparece alrededor de 1990, se mezclan las reglas deliberativas y reactivas en dos capas de control ejecutándose en paralelo, pero a diferentes velocidades: una capa reactiva encargada del control de las acciones de base que no requieren un razonamiento complejo, como avanzar y evitar obstáculos, y una capa deliberativa encargada de planificar acciones más elaboradas, como dirigirse a un sitio preciso o reconocer visualmente marcas y objetos. Las capas son dispuestas en forma jerárquica y todas tienen acceso a la información de los sensores y de los actuadores.

La información proporcionada por los sensores sirve de entrada a los módulos de comportamiento, pero también a un planificador para la construcción de un modelo del mundo orientado

a metas.

El esquema utilizado es Planear, y Sensor - Actuar (ver figura 1.19). El planificador traza las acciones del robot, en función de sus objetivos globales. Los planes son secuencias de acciones de base, ejecutables por módulos programados según el paradigma reactivo. Las dos capas, reactiva y deliberativa, están comunicadas para informarse sobre las acciones a realizar y sobre sus ejecuciones (Murphy, 2000). En esta sección no se detalla ninguna arquitectura híbrida, en su lugar se presenta el esquema general de este paradigma en la figura 1.19.

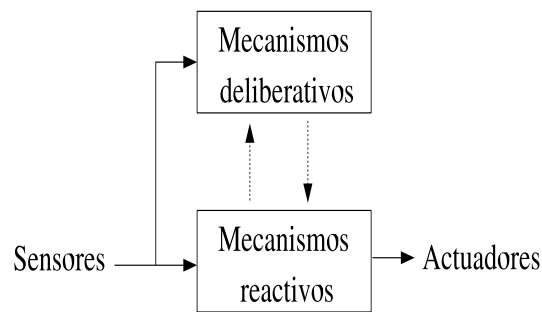


Figura 1.19: Arquitectura híbrida: Comunicación entre la capa híbrida y la deliberativa.

1.4.3.1. Ventajas y desventajas

Ventajas según Muller (1996):

1. Las funcionalidades están claramente separadas y ligadas por medio de interfaces bien definidas, ésto hace que el diseño del control del robot sea más compacto, robusto y flexible.
2. Las dos capas pueden ejecutarse en paralelo.
3. Las ventajas de los paradigmas deliberativo y reactivo se combinan, siendo este nuevo paradigma más flexible y adaptativo.

Desventajas:

1. No es trivial definir la línea divisoria entre las capas reactiva y deliberativa en las arquitecturas de este paradigma, por lo que la organización del control se hace de forma más bien arbitraria y empírica.

Capítulo 2

Sistemas multi-robot

Cuando dos o más robots se emplean para realizar en forma conjunta una tarea, además de capacidades individuales, los robots deben tener capacidades colectivas. En este capítulo presentamos algunos antecedentes, definiciones y características de los sistemas multi-robot.

2.1. Antecedentes

En las últimas dos décadas se han desarrollado investigaciones para construir sistemas con múltiples robots. Estos sistemas están generalmente constituidos de robots más simples, menos costosos que los sistemas mono-robot y que puedan en forma conjunta llevar a cabo una tarea.

Definición 13. *Un sistema **multi-robot** es aquel compuesto por dos o más robots diseñados y/o contruidos para realizar tareas conjuntas o alcanzar objetivos comunes.*

Los robots de un sistema multi-robot pueden ser homogéneos o heterogéneos. Los robots homogéneos son aquellos que están basados en el mismo diseño, es decir poseen igual morfología e igual arquitectura de control. Los robots heterogéneos son aquellos que están basados en diferente diseño, es decir, poseen distinta morfología y distinta arquitectura de control (Cao et al., 1997).

Los robots que conforman un sistema multi-robot pueden realizar tareas en forma individual para obtener un beneficio propio o tareas grupales donde todos colaboran en forma conjunta para alcanzar un objetivo común o realizar una misma tarea.

La robótica colectiva es el área de la robótica que se ocupa de los sistemas multi-robot. El comportamiento de cada robot de un sistema multi-robot puede afectar el comportamiento de los otros robots del sistema (Cao et al., 1997).

Los sistemas multi-robot presentan diversas ventajas en comparación a los sistemas mono-robot. Algunas de esas ventajas se describen a continuación.

1. Realizar tareas más complejas o imposibles de realizar por un solo robot. Tareas que pueden realizarse en menos tiempo empleando varios robots en lugar de uno solo, por ejemplo explorar o monitorear un área amplia, transportar objetos voluminosos, desactivar un área de minas, etc.
2. Construir varios robots simples puede ser menos costoso que construir un solo robot especializado para resolver una tarea.
3. Sustituir un robot simple de un sistema multi-robot que realiza una tarea, puede ser menos costoso que sustituir el único robot que realiza la tarea.

Desventajas de los sistemas multi-robot:

1. Coordinar los robots de un sistema multi-robot no es tarea fácil, por ejemplo se deben implementar mecanismos para que no colisionen entre ellos, para ensamblarse y trasladar un objeto.
2. Establecer comunicación entre los robots de un sistema multi-robot es costoso, por ejemplo el uso de señales de radio o tarjetas de red requiere infraestructura y tiempo de cómputo.

En la figura 2.1, se muestra una clasificación de la robótica colectiva. La robótica modular o reconfigurable es de especial interés para este trabajo, por lo cual se analizará en la siguiente sección.

2.2. Sistemas multi-robot reconfigurables

Ha surgido la necesidad de contar con sistemas robóticos que sean más tolerantes a falla, más fácil o flexibles de reparar y menos costosos que los sistemas mono-robot. Mark Yim (1994) propuso un nuevo concepto de robots modulares y reconfigurables, donde un robot puede estar compuesto por módulos o subrobots (considerados también robots), con la capacidad de reconfigurarse, es decir, de modificar la estructura del robot cambiando la forma en que se encuentran

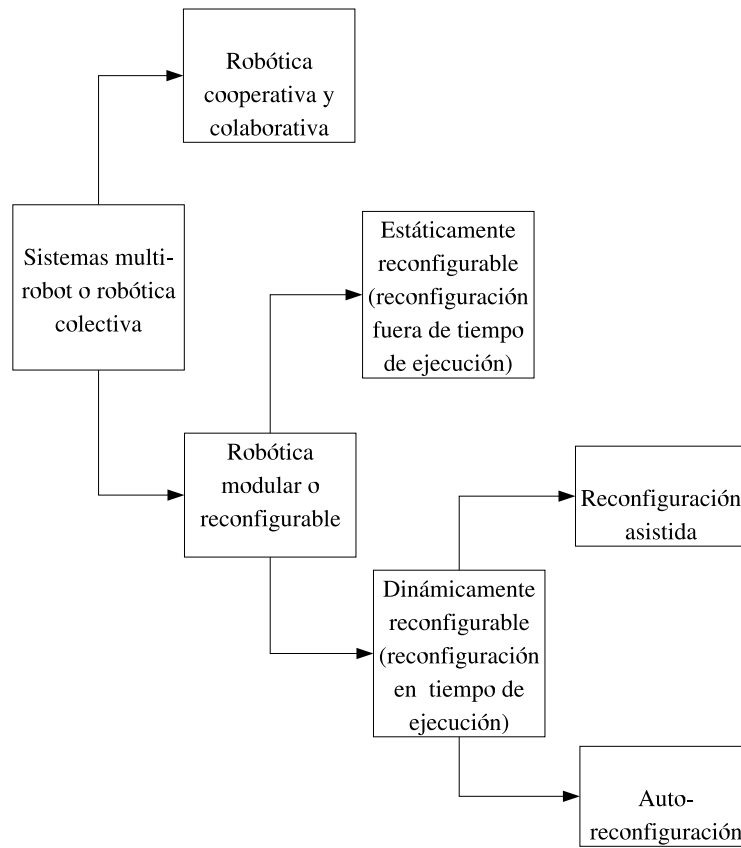


Figura 2.1: Clasificación de la robótica colectiva

conectados los módulos que lo conforman. Por lo anterior, Mark Yim es considerado el padre de la robótica modular reconfigurable.

A continuación analizaremos algunos aspectos de esta nueva disciplina.

2.2.1. Modularidad

Mark Yim describe la modularidad como “*la característica que posee un robot de estar construido por un conjunto de componentes estandarizados, los cuales pueden ser intercambiados*” (Yim, 1994, p. 3). Cada módulo debe poseer la característica de estar mecánicamente y eléctricamente conectado a uno o más módulos y puede poseer cierta autonomía y capacidad de comunicación con otros módulos. Los robots modulares tienen el potencial de ser más fáciles de mantener y de reparar debido a la redundancia de los módulos que componen el sistema.

Un sistema multi-robot puede ser n -modular de acuerdo al número n de módulos distintos que posea, es decir, *uni*-modular significa que el sistema posee un mismo tipo de módulos, *bi*-modular indica que el sistema posee dos tipos distintos de módulos, etc.

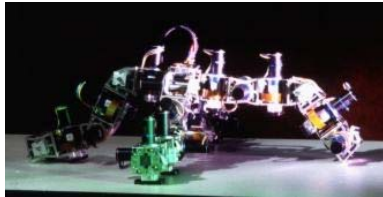


Figura 2.2: El robot modular Polybot (Yim et al., 2002) consiste de varios módulos homogéneos con capacidad de acoplarse y desacoplarse a otros módulos del sistema, formando distintas configuraciones que permiten al robot desplazarse como serpiente o subir escaleras.

El Polybot propuesto por Mark Yim, es un robot compuesto por varios módulos, como se muestra en la figura 2.2.

2.2.2. Reconfigurabilidad

La reconfigurabilidad de un robot modular puede ser **estática** o **dinámica**.

En los robots *estáticamente reconfigurables*, la modificación de su estructura se lleva a cabo fuera de tiempo de ejecución (*off-line*).

En los robots *dinámicamente reconfigurables*, la modificación de su estructura se realiza durante el tiempo de ejecución (*on-line*). Éstos pueden ser *reconfigurables en forma asistida* o *auto-reconfigurables*.

Los robots *dinámicamente reconfigurables en forma asistida* (ver figura 2.3), son aquellos cuya reconfiguración es realizada por otro agente, humano o robot, que no forma parte del sistema multi-robot.

Los robots *dinámicamente auto-reconfigurables* son aquellos cuya reconfiguración es realizada por el propio sistema multi-robot sin interacción de agentes externos. El robot Polybot (ver figura 2.2) realizado por Mark Yim, es un ejemplo de este tipo de robots.

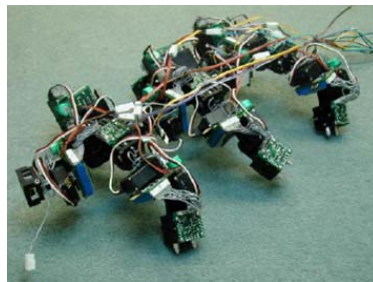


Figura 2.3: CONRO, robot dinámicamente reconfigurable en forma asistida, en este caso por una persona (Castano et al., 2002).

En los sistemas modulares, el medio de acoplamiento es muy importante para lograr el ensamble de un módulo con otro. Algunos robots emplean un medio de acoplamiento constituido por orificios y puntas que se introducen en dichos orificios, por ejemplo el Millibot-Trains (Brown et al., 2002); otros emplean pinzas que se sujetan a una parte del robot, como el Swarm-bot (Hemelrijk, 2002) y otros se acomplan empleando electroimanes como el caso de los MTRAN (Kamimura et al., 2002). El acomplamiento que se realiza puede ser fijo o flexible, lo que le puede permitir al sistema multi-robot moverse en una, dos o tres dimensiones.

En la tabla 2.1 se resumen las diferencias entre los sistemas no modulares y los sistemas multi-robot modulares o reconfigurables. En el capítulo 3 se abundará sobre los tipos de robots auto-reconfigurables.

Tabla 2.1: Comparación entre la robótica no modular y robótica modular

Propiedades	Sistemas mono-robot	Sistemas multi-robot	
		No modulares	Modulares
Composición	Compuesto por un solo módulo.	Compuesto por más de un módulo.	
Tareas	Individuales.	Individuales y colectivas	
Robustez	Si falla el módulo, la ejecución de la tarea se detiene y se requiere el reemplazo de todo el sistema.	Si falla un módulo, no se detiene todo el sistema y el reemplazo del módulo se lleva a cabo sin afectar todo el sistema.	
Ambiente	Controlados y semi-controlados.	Controlados y semi-controlados	Semi-controlados y no controlados.
Interacción	Robot - ambiente.	Robot - ambiente, robot - robot.	
Comportamientos	Individualistas.	Individualistas y colaborativos.	

2.3. Requerimientos de los sistemas multi-robot

Los módulos que conforman un sistema multi-robot, al trabajar en un mismo ambiente y de forma conjunta, requieren de ciertos aspectos para el alcance de la tarea global del sistema. Estos aspectos están fuertemente relacionadas y se enlistan y describen a continuación.

1. La **interacción** de los módulos del sistema,
2. La cantidad y tipo de **comunicación** requerida,
3. La **cooperación** entre los módulos,
4. La **coordinación** de sus acciones, y
5. La **forma de evaluar** un sistema multi-robot

2.3.1. Interacción multi-robot

Munoz (2003) define la **interacción** como la relación entre los módulos de un sistema multi-robot y entre éstos módulos y su medio ambiente, que hace que las acciones de unos tengan efectos o influencias sobre los otros.

La interacción de los componentes o módulos de un sistema multi-robot implica una serie de aspectos a considerar en la realización de tareas individuales y colectivas. Dichos aspectos son

enumerados a continuación y detallados posteriormente.

1. **Compartición de recursos**
2. **Obtención de información**
3. **Dependencia entre los módulos**
4. **Arquitectura del sistema multi-robot**
5. **División y asignación de tareas**

Compartición de recursos. Los módulos de un sistema multi-robot interactúan en un mismo medio y este medio puede contener una serie de recursos que pueden ser utilizados por cualquier módulo del sistema, lo cual implica que los robots necesitan compartir recursos entre ellos, como es el espacio mismo en el que se desempeñan.

Supongamos que todos los robots deben recargar su batería cada determinado tiempo; en tal escenario, más de un módulo podría intentar emplear al mismo tiempo un cargador, por lo que deben organizarse para evitar el conflicto que ahí se produce. Algunas formas para decidir en qué orden se usa un recurso, aunque no todas ellas son siempre aplicables, son:

1. **Desafío.** Consiste en que todos los módulos se retan para ganar el siguiente turno de uso del recurso. Por ejemplo, cada módulo elige un número aleatorio y lo expresa, aquel que posea el número más grande será el siguiente en usar el recurso. El desafío puede repetirse hasta que uno de los módulos del sistema gane el desafío.
2. **Votación.** De forma similar al **desafío**, los módulos votan por cuál de los otros módulos deberá seguir en el orden de uso, el que obtenga la mayor votación lo usará. En caso de empate, la votación se vuelve a realizar.
3. **Prioridad o jerarquía.** Los módulos pueden tener asignadas diferentes prioridades, ya sea por color, número, etc., de tal forma que sus prioridades indicarán también el orden en que emplearán un recurso.
4. **Orden de llegada.** El recurso es utilizado de acuerdo al orden en que los módulos llegan para acceder al recurso.
5. **Aleatoriamente.** En forma aleatoria se elige cuál de los módulos deberá ser el siguiente en usar el recurso.

6. Tiempo compartido. Se otorgan intervalos de tiempo y turnos específicos e iguales de uso de un recurso para todos los robots.

Los métodos anteriores no sólo son aplicables para la asignación explícita de recursos, sino para la toma de ciertas decisiones como pueden ser la elección de cooperar o no en la realización de una tarea.

Obtención de información. Cada miembro del sistema requiere ser alimentado de información para la toma de decisiones y realización de tareas individuales o conjuntas, esta información puede ser local o global y obtenida por medio de sensado y comunicación entre los robots.

Dependencia entre módulos. Las acciones de un módulo pueden afectar el comportamiento y la toma de decisiones de los otros módulos, principalmente cuando se requiere un comportamiento cooperativo entre ellos, por lo que existe una dependencia entre los miembros del sistema.

Estructura del sistema multi-robot. La morfología y el control del sistema pueden ser homogéneos o heterogéneos. Cuando son homogéneos, se facilita la comunicación y desempeño de los robots, no así con los heterogéneos. Cuando el sistema es homogéneo todos los robots del sistema son iguales en hardware y software, por lo que cada robot sabe cómo están equipados los otros robots, su morfología, su sistema de comunicación y su comportamiento. Por su parte, los sistemas heterogéneos tienen robots con diferente hardware y software, por ejemplo, diferente estructura física, diferente equipamiento, diferente forma de comunicación, etc., lo cual dificulta la interacción entre los robots del sistema (Cao et al., 1997).

División y asignación de tareas. La realización de una tarea en conjunto puede requerir una división de la tarea en subtareas y la asignación de subtareas entre los módulos. Sin embargo, ¿quién va a decidir cómo se deben dividir las tareas?, una vez hecha esta división, ¿quién hará la asignación?, ¿cuándo y cómo se realizará esta división y asignación? Estos son algunos de los problemas que presenta el diseño de un sistema multi-robot y que nos dan pauta para introducir el aspecto de la comunicación en la siguiente sección.

Consenso. Dos o más robots intercambian información y a aquel que posea las características más adecuadas a la solución de la tarea o subtarea, se le otorga la prioridad. Por ejemplo,

si dos o más robots recolectores de frutos desean depositar su cargamiento en un depósito específico, se le otorga la prioridad al que posea más frutos recolectados.

La interacción de los robots puede establecerse sin comunicación, esto es por medio de percepción local, es decir, los robots identifican cierta información de los otros robots o del medio ambiente sin que se les haya proporcionado de manera explícita. Por ejemplo, si varios módulos están colectando hojas, y un módulo se dirige a una hoja para recogerla pero percibe que otro módulo se ha acercado a ella antes que él, entonces el primer módulo puede decidir abandonar esa tarea y buscar otra hoja para recogerla.

2.3.2. Comunicación

Definición 14. *La **comunicación** es la capacidad que poseen los robots para transmitir y recibir información entre ellos. La información es codificada o construida empleando un mismo lenguaje conocido por todos los robots.*

La necesidad de comunicación se presenta cuando un robot desea notificar a otro robot una información. El robot que envía el mensaje es denominado **transmisor** y el robot al cual va dirigido el mensaje es el **receptor**, la información que se envía se denomina **mensaje**. Cuando el transmisor ha emitido el mensaje y el receptor lo capta, entonces se establece la comunicación.

En la interacción entre los módulos de un sistema multi-robot, la comunicación entre sus módulos puede ser de gran utilidad en el desempeño de sus actividades y en la toma de sus decisiones. Si un robot quiere comunicar información a un segundo robot, el segundo robot debe ser capaz de reconocer dicha información. Pero ¿qué pasa si ambos robots intentan comunicarse al mismo tiempo? ésto puede ocasionar cruce y pérdida de información provocando que ninguno de los dos reciba el mensaje del otro, por lo que se requiere que los robots se coordinen para enviar y recibir información. En la sección 2.3.4 abundaremos sobre este tema.

La comunicación puede ser síncrona o asíncrona:

- La comunicación **síncrona** es realizada cuando un robot manda un mensaje a otro robot y espera respuesta de él.
- La comunicación **asíncrona** es aquella en la que el robot transmisor no espera respuesta de parte del robot receptor.

De acuerdo a la forma de transmisión de información, la comunicación puede ser (Pereira et al., 2002):

Directa. Consiste en el intercambio de mensajes entre módulos, donde un robot envía información a otro robot específico y éste la recibe. Los robots deben manejar un mismo lenguaje y requieren de cierta coordinación, ya que en ocasiones puede haber más de un robot queriendo comunicar al mismo tiempo, lo cual puede provocar colisiones de mensajes y que la comunicación no se realice en forma adecuada.

Indirecta. Consiste en proporcionar información a otro robot no específico, por ejemplo, la realización de marcas en el medio o en los mismos robots, las cuales pueden ser percibidas por ellos. Estas marcas proporcionan o indican cierta información a los robots que pueden provocar algún cambio en sus comportamiento. Esta forma de comunicación es conocida normalmente como *estigmergia*. Por ejemplo, las hormigas dejan rastros en el ambiente para proporcionar información a otras hormigas (Bonabeau et al., 1999; Kube et Bonabeau, 2000). Para que se lleve a cabo este tipo de comunicación cada robot debe ser capaz de reconocer e identificar las marcas.

2.3.3. Cooperación

Existen tareas que ofrecen mayores ventajas o requieren la participación de más de un módulo del sistema para ser llevada a cabo, como son trasladar un objeto, recolectar, explorar, monitorear grandes espacios. El tipo de participación puede ser de dos tipos:

Comportamiento cooperativo. En el cual todos los módulos que participan en la realización de una tarea poseen las mismas habilidades.

Comportamiento colaborativo. En el cual los módulos que participan en la realización de una tarea no poseen las mismas habilidades.

Cao et al. (1997) definen la cooperación como la capacidad de colaboración entre los módulos de un sistema multi-robot para la realización de una tarea.

Cooperar es definido por el diccionario de la Real Academia Española (RAE, 2001) como *obrar juntamente con otro u otros para un mismo fin*. Cooperar es sinónimo de colaborar definido como *trabajar con otra u otras personas en la realización de una obra* y sinónimo de contribuir,

ayudar con otros en el logro de un fin. Un ejemplo de comportamiento cooperativo es definido por un grupo de robots que empujan una misma caja para trasladarla a otro lugar.

Para Uny Cao y su equipo (1997), el comportamiento cooperativo es considerado como tal, si proporciona un incremento en la utilidad total del sistema.

Sin embargo, en esta tesis consideraremos el comportamiento cooperativo y colaborativo de forma indistinta. Definimos cooperación de la siguiente forma:

Definición 15. *Cooperación es el comportamiento de un sistema multi-robot para alcanzar un objetivo común. El cumplimiento de dicho objetivo está determinado cuantitativamente por el número de módulos que participan, y cualitativamente por las habilidades y capacidades de estos módulos.*

Algunos criterios importantes para decidir si una tarea requiere cooperación son:

- Cuando las capacidades de un sólo módulo del sistema no son suficientes para realizar la tarea.
- Cuando existe una ventaja, en términos de tiempo o costo por ejemplo, de la participación de más de un módulo en la realización de esa tarea.

La cooperación puede darse de forma explícita, debido a una solicitud de ayuda realizada por otro módulo, o en forma implícita, cuando no ha habido ninguna solicitud pero cada módulo coopera sin saber que lo está haciendo. Por ejemplo, supongamos que nuestra tarea T es recolectar todas las hojas colocadas en un área A . Dicha tarea será llevada a cabo por un sistema multi-robot de N módulos, los cuales individualmente poseen la capacidad de evitar obstáculos, de identificar una hoja y recogerla, así como de identificar otro módulo y evitarlo. Podemos distribuir los N módulos en el área A y esperar que cada módulo realice su tarea contribuyendo a la realización de la tarea global, sin mediar solicitud de ayuda entre los módulos.

El comportamiento cooperativo puede requerir comunicación o no. En el caso de la cooperación explícita, se requiere comunicación directa o indirecta. En el caso de la cooperación implícita, puede no requerirse comunicación.

Algunas interrogantes con respecto a la cooperación son:

- a) ¿Cómo identificar el momento en que se requiere cooperación?
- b) ¿Cómo lograr que otros módulos cooperen?
- c) ¿Cómo saber cuántos módulos deben cooperar para realizar una tarea?

- d) ¿Cómo agrupar a todos los módulos para que la cooperación se realice?
- e) ¿Cómo saber o detectar cuándo no se requiere más la cooperación?

Las respuestas a las interrogantes anteriores dependen en su mayoría de la tarea que se desea realizar. Sin embargo, se presentan a continuación algunas propuestas:

a) ¿Cómo identificar en qué momento se requiere la cooperación?

Cuando un módulo del sistema intenta realizar la tarea por sí solo un número determinado de veces y no logra realizarla, puede entonces determinar que requiere ayuda de otros módulos. Pueden haber otros casos donde la tarea puede ser realizada por un sólo módulo, pero el diseñador ha establecido que la tarea debe ser realizada con la ayuda de otros módulos para obtener un beneficio como reducción de tiempo o costo.

b) ¿Cómo lograr que otros módulos cooperen?

Se puede solicitar ayuda a uno o más módulos a la vez de forma directa o indirecta (sección 2.3.2). La solicitud puede ser enviada a todos los módulos del sistema o sólo a aquellos módulos que poseen características de interés para la tarea a realizarse. En el primer caso, si todos los módulos poseen las mismas capacidades, cualquiera de ellos puede cooperar. En el segundo caso, el módulo solicitante tendría que conocer las capacidades de cada uno de los módulos del sistema y realizar un proceso de selección de los módulos o permitir que los módulos se propongan por sí mismos para participar en la realización de una tarea.

c) ¿Cuántos módulos deben participar en la cooperación?

Podría determinarse de varias formas, algunas de ellas son:

- a) Ir convocando un módulo a la vez, intentar realizar la tarea con el nuevo módulo integrado un número definido de veces y si no se logra, convocar a un módulo más, y así sucesivamente, hasta que la tarea se pueda realizar.
- b) Convocar a un número M de módulos a la vez para que se reúnan y cooperen, donde M es menor o igual a N , siendo N el número de módulos del sistema multi-robot. Este número de módulos puede intentar cooperar en la realización de la tarea, si se logra una coordinación adecuada entre los módulos y la tarea se realiza, entonces no es necesario convocar más módulos. En caso de que la tarea no permita la cooperación con M módulos -por ejemplo hay más módulos de los que pueden colocarse alrededor de un objeto para transportarlo-, se puede descartar un módulo e intentar nuevamente

realizar la tarea, si aún así no se logra, entonces descartar otro módulo y así sucesivamente.

d) ¿Cómo agrupar a todos los módulos para que la cooperación se realice?

Una vez que los módulos han llegado al lugar de reunión en donde fueron convocados a cooperar, deberán ponerse de acuerdo para formar una configuración espacial que consideren adecuada para la realización de la tarea. Esta configuración puede ser lineal, semicircular, circular, etc (Fukuda et al., 2002). Si formaran equipos o subgrupos, estos subgrupos también podrían formar alguna de las configuraciones espaciales antes mencionadas. Parte de la respuesta a esta pregunta se discute en la sección 2.3.4.

e) ¿Cómo identificar cuándo no se requiere más la cooperación?

Cuando la tarea ha sido realizada, ya no se requiere más de la intervención de los módulos, por lo que pueden dar por terminada su acción o participación en dicha tarea y continuar con la tarea que estaban realizando antes de acudir al llamado de cooperación. Cabe mencionar, que suponemos que todos los módulos conocen y son capaces de identificar el objetivo o estado final de la tarea. De no ser así, por lo menos el módulo inicial, es decir el módulo que hace la convocatoria, debe conocer el objetivo o estado final de la tarea y al alcanzarlo debe comunicarlo a los demás módulos. Si la tarea no se logra realizar o no se conoce si se ha alcanzado el objetivo, después de un tiempo, los módulos del sistema podrían desistir de realizarla.

2.3.4. Coordinación

Un sistema multi-robot requiere de la toma de decisiones individuales y conjuntas para realizar sus movimientos y acciones de tal forma que no hayan colisiones ni conflictos entre sus módulos, y se alcance la tarea del sistema completo. Otras razones por las cuales se requiere de coordinación en un sistema multi-robot son la dependencia entre los módulos con respecto a sus acciones.

Definición 16. *Coordinación es la capacidad que poseen los miembros de un sistema multi-robot para desempeñar diferentes acciones de forma simultánea, evitando colisiones y conflictos entre ellos y aprovechando sus capacidades y habilidades para alcanzar un objetivo común.*

Para que la coordinación o sincronización se lleve a cabo, los robots deben poder distinguir los módulos de los objetos y obstáculos que hay en el ambiente, e identificar igualmente a los otros módulos del sistema, así como emplear probablemente cierta forma de comunicación y obtener información de sus sensores.

En esta sección se presentan algunos mecanismos de coordinación empleados por algunos autores, así como algunas propuestas de cómo evaluar la coordinación de un sistema multi-robot.

2.3.4.1. Mecanismos de coordinación

Un mecanismo de coordinación define la forma de coordinar las acciones de los robots del sistema. Existen dos clases de mecanismos de coordinación: centralizado y descentralizado, los cuales se presentan a continuación.

En la **coordinación centralizada**, la información es concentrada en un solo módulo líder y éste dirige a los demás módulos asignándoles tareas u otorgándoles permisos, e indicando a cada módulo el momento y/o la forma de proceder. El líder puede ser establecido desde un inicio y ser permanente, o bien puede ser elegido en tiempo de ejecución. Un ejemplo de este tipo de sistemas es el proyecto de Gerkey et Mataric (2002), en donde un robot observador dirige a otros dos robots trabajadores en el proceso de empujar una caja a un lugar específico que sólo conoce el observador.

En la **coordinación descentralizada**, a diferencia de la coordinación centralizada, no existe un módulo que centralice el control del sistema todo el tiempo, sino que las decisiones se consensan. Si acaso interviene un líder, éste es eventual y cualquier módulo puede asumir dicho cargo. En este tipo de coordinación, los módulos realizan sus comportamientos y toman decisiones de acuerdo a su interacción con el medio ambiente y comunicándose con los otros módulos del sistema, por ejemplo los Swarm-bots (c.f. sección 3.3.1).

La coordinación descentralizada puede ser *jerárquica* o *distribuida*. La coordinación jerárquica es aquella en la que aunque no existe un módulo que controle el sistema, sí existe jerarquía entre los módulos, teniendo prioridad el módulo de mayor jerarquía, por ejemplo cuando existe competencia para obtener recursos del ambiente, el de mayor jerarquía gana, o bien para ensamblarse, se ensambla primero el de mayor jerarquía. En cambio, en la coordinación descentralizada distribuida, todos los componentes del sistema multi-robot poseen la misma

prioridad, pudiendo cualquiera de ellos obtener un recurso cuando surgen conflictos entre ellos, empleando algunas de las técnicas presentadas en la sección 2.3.1.

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones con sistemas multi-robot, empleando diferentes mecanismos de coordinación. Algunas de estas investigaciones se presentan a continuación.

Pereira et al. (2002) presenta experimentos con dos robots móviles homogéneos que trasladan una caja. Emplea un mecanismo de coordinación descentralizado jerárquico con un robot como **líder** y otro como **seguidor**, con opciones de intercambio de liderazgo, es decir el líder podría en un momento determinado ceder el mando al robot seguidor. El robot **líder** dirige al otro robot hacia donde se debe empujar la caja. El robot **seguidor** sigue el movimiento del **líder**. Los robots están contruidos con Lego®Mindstorm™ y una tarjeta Handy board™. La parte del robot que hace contacto con la caja, contiene un sensor de fuerza que ayuda al robot a percibir un cambio de control del liderazgo, ya que cuando el líder quiere ceder el liderazgo al seguidor, en lugar de empujar, se retira cierta distancia de la caja y el robot seguidor al sensar el cambio de fuerza, inmediatamente adopta el papel de líder, dejando el papel de seguidor al otro robot.

Stentz et al. (2004) presentan un método basado en “mercadeo” para sistemas multi-robot llamado **robots comerciantes** (*Traderbots*), en el cual existe una especie de mercado, donde hay ingresos y egresos. Los robots reciben ganancias por realizar subtareas y pagan por consumir recursos del sistema. Los robots podrían calcular el costo más efectivo del equipo y tratar de obtener la mayor ganancia posible. Este experimento emplea un mecanismo de coordinación descentralizado jerárquico.

Gerkey et Matarić (2002) hacen uso de un método denominado **trabajador - observador**, empleando dos robots que desempeñan el papel de **trabajador** y un robot que desempeña el papel de **observador**. Cuando los trabajadores empujan una caja no pueden ver por donde van; sin embargo, el observador puede ver la posición actual del objeto y del objetivo, por lo que va indicando a los trabajadores hacia dónde deben de moverse, dirigiéndolos hasta llegar al objetivo. Estos experimentos se realizaron empleando mecanismos de coordinación centralizado.

Es importante mencionar que los mecanismos hasta ahora mencionados han sido aplicados a sistemas multi-robot móviles sin capacidades de auto-ensamblado.

Trianni (2003) presenta la evolución de los movimientos coordinados de un grupo de robots auto-ensamblados empleando técnicas de aprendizaje automático. El sistema multi-robot aprende a evadir ‘huecos’ y paredes en la zona de desplazamiento. Este trabajo emplea mecanismos de

coordinación descentralizado.

Se han publicado pocos trabajos relacionados con la coordinación en sistemas multi-robot auto-reconfigurables, en especial de los de tipo móvil. Uno de los propósitos de esta tesis es proponer y evaluar mecanismos de coordinación para un sistema multi-robot compuesto por tres módulos con capacidad de auto-ensamblado. El sistema no poseerá un módulo líder previamente establecido. Sin embargo, cuando uno de los módulos llegue hasta donde se encuentra ubicado un objeto el cual deben trasladar, este módulo buscará a otros módulos del sistema multi-robot y les solicitará ayuda para ensamblarse a él. Una vez integrado el sistema ensamblado, el sistema deberá trasladar el objeto. En el capítulo 4 se abunda más sobre esta propuesta.

2.3.4.2. Coordinación en los robots reconfigurables

Para que la coordinación se lleve a cabo, los robots deben saber de alguna forma dónde están otros módulos, distinguir dónde hay un obstáculo, y probablemente comunicarse.

Para la realización de una tarea, los sistemas multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, necesitan también de la implementación de diversos mecanismos que permitan lograr satisfactoriamente la asociación y el ensamblado de los módulos del sistema. Una vez ensamblado, cada módulo del sistema pierde individualidad y forma parte de un sistema completo: un nuevo robot compuesto por todos los módulos o robots. Es un nuevo reto para el sistema lograr la coordinación de sus movimientos y acciones, de tal forma que cada módulo contribuya al movimiento y acción de la nueva estructura como si se tratara de un solo robot, capaz de desplazarse, de evitar obstáculos y de trasladar objetos (ver figura 2.4).

Hemos identificado tres acciones para lograr la coordinación entre los robots de un sistema auto-reconfigurable, **asociación**, **organización** y **ensamblado**, las cuales se detallan a continuación.

2.3.4.2.1. Asociación

Definición 17. *La capacidad de asociación de un sistema multi-robot, es la acción conjunta de los robots del sistema, que los lleva a reunirse en un lugar específico y permanecer en él, sin colisionar.*

La acción conjunta de los módulos del sistema reconfigurable requiere de la reunión física de sus módulos (ver figura 2.5). Esta reunión puede ser convocada por algún módulo del sistema,

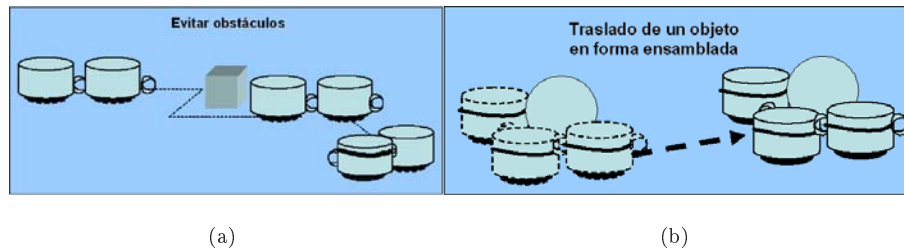


Figura 2.4: (a) Desplazamiento y evasión de obstáculos de robots ensamblados y (b) traslado de un objeto por robots ensamblados.

estimulada u ocasional.

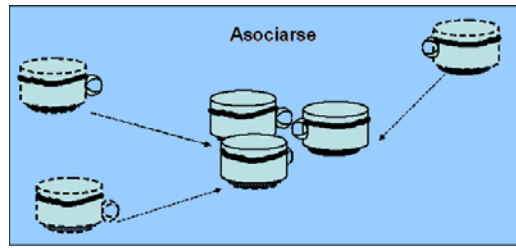


Figura 2.5: Proceso de asociación de los módulos de un sistema.

Asociación por convocatoria. Se produce cuando un módulo solicita ayuda a otros módulos convocándolos a reunirse y ensamblarse para intentar realizar una tarea, los otros módulos acuden al llamado. En caso de que dos o más módulos soliciten ayuda al mismo tiempo, podrán emplear un método para decidir cuál de todos tendrá mayor prioridad, y los que pierdan, deberán acudir al llamado del módulo ganador (c.f. sección 2.3.1).

Asociación por estímulo. Se produce cuando un factor en el ambiente que no es provocado por ningún módulo del ambiente, por ejemplo, fuente de luz, marca o sonido, provoca la atracción de los módulos del sistema hacia un punto específico del ambiente (Kube et Zhang, 1996).

Asociación ocasional. Se produce cuando los robots coinciden en un mismo punto del ambiente. Estos robots podrían identificarse y decidir si permanecen reunidos o no.

2.3.4.2.2. Auto-ordenamiento

Definición 18. *El **auto-ordenamiento** de un sistema multi-robot, es la capacidad que posee el sistema para disponer sus módulos, y con ello sus recursos, en un lugar, tiempo y forma, de acuerdo a las condiciones requeridas para alcanzar un objetivo común.*

Una vez asociados, los módulos requieren posicionarse de tal forma que puedan ensamblarse, esto dependerá de la configuración que deben adoptar: lineal, circular, semi-circular, etc.

Una vez que la asociación se produjo, pueden presentarse dos casos distintos:

- a) Dos módulos se asociaron.
- b) Más de dos módulos se asociaron.

Cuando más de dos módulos coinciden en un espacio determinado, requieren organizarse para actuar de tal forma que no se obstaculicen y que logren la meta establecida, por ejemplo, el orden de ensamble de los módulos.

En el caso de los sistemas con capacidad de ensamble, se requiere que los módulos se ordenen para decidir cómo se realizará el ensamble. Si dos módulos se encuentran, requieren decidir quién se ensamblará a quién y cómo lograr el ensamble. Esa tarea se complica cuando coinciden más de dos módulos. No son tareas triviales para los módulos saber qué módulo llegó primero y qué módulo llegó después, reconocer si hay o no otros módulos conectados al otro módulo, así como saber si están posicionados de frente, a un lado o detrás de otro módulo, en especial si el equipo sensorial del módulo es limitado. Es parte de este trabajo plantear una solución a dichos problemas.

2.3.4.2.3. Auto-ensamble

Definición 19. *La capacidad de **auto-ensamble** de un sistema multi-robot, es la acción de sus módulos de conectarse entre ellos utilizando medios físicos rígidos o flexibles, sin asistencia de algún agente externo al sistema.*

Cuando dos módulos desean ensamblarse, se requiere alinear sus dispositivos de ensamble de tal forma que el ensamble pueda lograrse. Para el caso particular abordado en este trabajo, de módulos que tienen en su parte trasera un medio dónde ser conectados o sujetados por otro módulo, y en su parte delantera el dispositivo de conexión, se proponen tres estrategias para

lograr la alineación de los dispositivos de ensamble, para llevar a cabo el ensamble en forma de columna, suponiendo que se ha establecido el orden de ensamble. En la sección 4.3.5.2 se describen tres mecanismos de coordinación descentralizados propuestos para establecer el orden de ensamble.

Para lograr un ensamble, los módulos del sistema, deben poseer un dispositivo físico que les permita sujetarse o acoplarse a otro módulo y a su vez un medio físico que le permita a otro módulo sujetarse o acoplarse a ellos.

Pueden emplearse diferentes medios para lograr el ensamble, como son pinzas, electroimanes, ganchos, etc. que se conectan entre ellos para formar un nuevo sistema integrado por dos o más módulos.

El ensamble puede ser rígido o flexible (Hemelrijk, 2002). El ensamble rígido es aquel que requiere que los módulos al ensamblarse formen una estructura cuya conexión de ensamble permanezca firme.

El ensamble flexible permite movilidad en la conexión de ensamble, sin permitir no obstante la desconexión del sistema ensamblado.

El sistema ensamblado requiere de un movimiento coordinado, el cual debe cumplir las siguientes características: sincronía, precisión y orientación.

Definición 20. *La capacidad de movimiento coordinado de un sistema multi-robot, es la acción de desplazarse en forma sincronizada.*

Definición 21. *La capacidad de auto-desensamble de un sistema multi-robot, es la capacidad que posee cada uno de los módulos del sistema multi-robot para desconectarse de los módulos a los cuales se encuentran ensamblados, sin asistencia de algún agente externo al sistema.*

2.4. Evaluación del desempeño de un sistema multi-robot

Evaluar el desempeño del sistema depende de la tarea que se desea realizar y de las condiciones del ambiente en que se realiza, como son espacio, iluminación, tipo de terreno, presencia de obstáculos, etc. Se puede evaluar el desempeño de cada módulo del sistema o del sistema en forma global. Algunos parámetros que pueden emplearse para evaluar la coordinación son tiempo, resultado, distancia, costo, solución de conflictos (Balch et Parker, 2002), los cuales son

explicados a continuación.

El tiempo

Una tarea o subtarea pueden o no tener restricciones de tiempo. Si tienen restricciones, éstas pueden considerar un tiempo mínimo, máximo o específico de realización.

Algunos de los aspectos que pueden evaluarse, relacionados a las capacidades discutidas en las secciones previas, son:

- Tiempo que tarda un robot en responder al llamado de otro robot.
- Tiempo de ordenamiento de los robots.
- Tiempo de resolución de conflictos entre los robots.

Y para robots reconfigurables:

- Tiempo de ensamble.
- Tiempo de desensamble.
- Tiempo en que se realiza cierta tarea una vez ensamblados

Otro aspecto que puede evaluarse es el tiempo en que se ejecuta la tarea global medido, por ejemplo, en función del tiempo promedio de las medidas anteriores. Si la realización de la tarea cumplió o no con restricciones de tiempo establecidas, puede evaluarse con puntos positivos o negativos respectivamente.

Resultado

Otro aspecto que puede ayudar a evaluar la coordinación realizada por los módulos del sistema, es el resultado final alcanzado. Si la tarea se realizó por el sistema multi-robot, puede afirmarse que la coordinación fue efectiva, en caso contrario no fue efectiva.

Distancia

La distancia que recorre el módulo del sistema está relacionada con su tiempo de operación y su consumo de energía (Hayes, 2002). Algunos aspectos que pueden evaluarse con respecto a la distancia son:

- Distancia promedio recorrida por los módulos.
- Distancia recorrida para llegar a un objetivo.

- Distancia recorrida por el sistema multi-robot ensamblado.
- Distancia recorrida por cada módulo o por el sistema ensamblado en la realización de una tarea.

Degradación del sistema

La degradación del sistema durante la realización de la tarea es otro aspecto a evaluar. El número de módulos que fallaron entre el número de módulos que permanecieron activos nos darían un porcentaje de degradación del sistema.

Solución de conflictos

Otro aspecto que puede ser evaluado en el desempeño de un sistema multi-robot es la solución de conflictos, bajo los siguientes criterios:

- Logro de la solución de conflictos.
- Tiempo requerido para solucionar el conflicto.
- Solución viable del conflicto.

A cada uno de los aspectos anteriores, puede ser asignado un valor numérico, cuya suma puede ser considerada como el valor del aspecto global para evaluar el desempeño del sistema.

Conjunto de parámetros

Por último, podemos evaluar el desempeño del sistema multi-robot considerando más de uno de los parámetros anteriores, calculando un promedio o suma de ellos. O bien, asignar factores de peso de acuerdo a la relevancia asociada a cada parámetro y evaluar el desempeño del sistema sobre esa base.

Establecer métricas y evaluar el desempeño del sistema nos permite conocer la efectividad de éste. Algunos autores proponen formas de evaluación más precisas. Hayes (2002), por ejemplo, establece métricas para evaluar el desempeño del sistema en la realización de una tarea, como son el tiempo que tarda cada módulo para llegar al punto de reunión p , la distancia que recorre (relacionada con la cantidad de energía que gasta el sistema) y el número de robots que componen el sistema.

Por su parte, Rosenfeld et al. (2004, p. 910) proponen el uso de una medida llamada interferencia para comparar varios mecanismos de coordinación. La interferencia es definida como el “tiempo total que tarda cada robot en resolver conflictos con otros robot”.

Goldberg et Matarić (2002) emplean parámetros de distancia promedio recorrida por el sistema, promedio de interferencias o colisiones entre los robots y tiempo promedio empleado para la realización de la tarea.

Capítulo 3

Estado del arte de los sistemas multi-robot auto-reconfigurables

En el capítulo anterior se introdujeron algunos conceptos y características de la robótica modular reconfigurable. Debido a que en esta tesis nos enfocaremos en sistemas de auto-reconfiguración tipo móvil, en este capítulo se revisan prototipos de robots modulares de dicha categoría.

Definición 22. *La reconfiguración es la capacidad que posee un sistema robótico modular de modificar su estructura física, conectando y desconectando los módulos del sistema.*

Yim et al. (2002) clasifican a los robots auto-reconfigurables de acuerdo al método de reconfiguración empleado, de la siguiente forma:

Reconfiguración móvil: Los módulos separados pueden desempeñar tareas en forma independiente; en ocasiones se ensamblan a otros módulos para desempeñar tareas que no pueden realizar en forma individual. Ejemplo: Millibot-Trains (c.f. 3.9).

Reconfiguración tipo rejilla: Los módulos están unidos en forma de rejilla, es decir, cada módulo está conectado a otro módulo por alguno de sus lados, por lo que sus movimientos se realizan desconectándose de algunos de sus módulos contiguos y conectándose a otros. Los módulos no poseen la capacidad de desprenderse del resto de los módulos y de actuar

en forma individual, sino que requieren estar siempre conectados a alguno de los módulos del sistema. Ejemplo: MTRAN (c.f. 3.1).

Reconfiguración tipo cadena: Los módulos se conectan y desconectan formando cadenas de módulos, de tal forma que nunca hay módulos independientes, es decir, siempre se mantiene un componente conectado a otro. Los módulos no poseen la capacidad de desconectarse del resto de los módulos y de actuar de forma autónoma. A diferencia de la configuración tipo rejilla, en la configuración tipo cadena un módulo puede conectarse a cualquier otro módulo del sistema, no necesariamente a un módulo contiguo. Ejemplo: Polybot (c.f. 2.2).

A continuación se detallan estas categorías, iniciando con la que no conciernen directamente nuestro trabajo, y abundando en la que se ubica el sistema desarrollado en esta tesis.

3.1. Configuración tipo rejilla

Los módulos están unidos en forma de red, es decir, cada módulo está conectado a otro módulo por alguno de sus lados, por lo que sus movimientos se realizan desconectándose de algunos de sus módulos contiguos y conectándose a otros, manteniendo siempre una estructura de red. Un ejemplo de robots con este tipo de configuración es el MTRAN.

Se analizan a continuación algunos de los trabajos realizados en esta área, especialmente la reconfiguración del tipo móvil.

3.1.1. MTRAN

MTRAN, robot modular *transformer*, propuesto por *The Distributed System Design Research Group of Intelligent Systems Institute* ubicado en Japón. Este robot está integrado por una serie de módulos conectados en forma de rejilla, es capaz de cambiar su estructura y de desplazarse de tal forma que se adapta al medio. Sus módulos pueden conectarse y desconectarse de algún otro módulo contiguo. Todos sus movimientos son planeados de antemano, por lo que su control está basado en el enfoque deliberativo. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de posibles configuraciones de MTRAN.

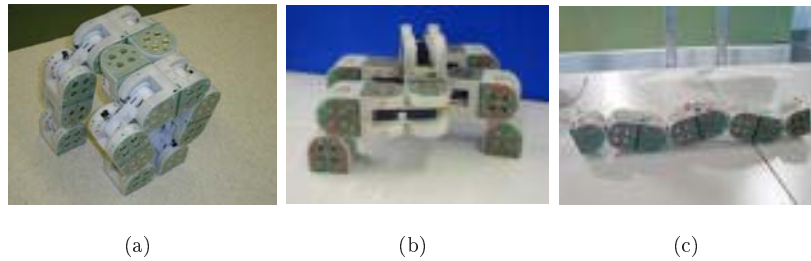


Figura 3.1: Robot modular tipo rejilla MTRAN (Kamimura et al., 2002) presentando diferentes configuraciones.

3.2. Configuración tipo cadena

Los módulos se conectan y desconectan formando cadenas de módulos, de tal forma que nunca hay módulos independientes, es decir, siempre se mantiene un componente conectado a otro, por lo que los módulos no poseen la capacidad de desconectarse del resto de los módulos y actuar de forma autónoma. A diferencia de la configuración tipo rejilla, los módulos de los sistemas con configuración tipo cadena puede conectarse a cualquier otro módulo del sistema, no necesariamente a un módulo contiguo. Los robots Polypod y el Polybot son ejemplos de robots que emplean este tipo de configuración.

3.2.1. Polypod

La Universidad de Stanford desarrolló el Polypod en el período 1992 - 1994. Este Robot consiste de dos tipos de módulos: el segmento y el nodo, repetidos varias veces. Un segmento tiene sensores de posición y de fuerza, un microcontrolador y dos puertos de conexión. Los nodos no tienen ningún grado de libertad, son módulos rígidos con seis puertos de conexión, uno en cada uno de sus lados. Este módulo tiene dos propósitos, cargar el suministro de energía para alimentar los segmentos y permitir configuraciones no lineales acoplándose con los segmentos (Yim, 1994). En la figura 3.2 se ilustran los segmentos y nodos que componen al Polypod.

3.2.2. Polybot

En 1998, *Palo Alto Research Center* (PARC) inicia una nueva generación de robots reconfigurables llamada **Polybot** (Yim et al., 2002, 2003). Este proyecto se encuentra actualmente en su tercera generación. El robot posee grandes capacidades de locomoción y auto-reconfiguración.

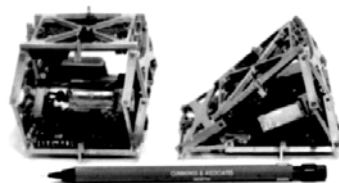


Figura 3.2: Robot modular tipo cadena: Polypod (Yim, 1994). Tiene dos tipos de módulos: un nodo (izquierda) y un segmento (derecha).

Sus módulos son homogéneos y poseen la capacidad de conectarse y desconectarse a cualquier módulo, de mantener una conexión tipo cadena, de formar una o más cadenas manteniendo cada módulo conectado al menos a otro, es decir, sin dejar módulos aislados. Este robot no posee alimentación autónoma, aunque este hecho no afecta su desempeño para adoptar diferentes configuraciones. Entre las configuraciones que el robot puede realizar están la cadena, que le permite configurarse y desplazarse como robot ávido; la rueda, donde la cadena de módulos conectados se cierra, conectándose el último módulo con el primero; y por último la forma de cuadrúpedo (ver figura 3.3).

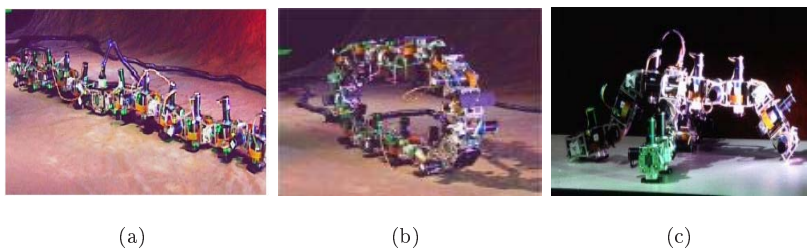


Figura 3.3: Polybot en configuración tipo cadena (a), tipo rueda (b) y tipo cuadrúpedo (c) (Yim et al., 2002).

3.2.3. CONRO

CONRO (Castano et al., 2002) es otro tipo de robot que fue desarrollado para explorar y hacer búsquedas en zonas urbanas. Todos sus módulos son homogéneos y tienen la capacidad de reconfigurarse de acuerdo al medio ambiente en el que se encuentren. El sistema multi-robot tiene forma de hexápodo y mide $10 \text{ cm.} \times 4.5 \text{ cm.}$ (ver figura 2.3).

3.3. Configuración tipo móvil

Los módulos se separan y se mueven independientemente hasta unirse a otro módulo en otra parte del robot. Es importante mencionar que las figuras que los módulos formen al ensamblarse pueden ser variadas, por ejemplo, pueden ensamblarse en forma de cadena, de círculo y semi-círculo. Sin embargo, no debe confundirse la forma de cadena con la auto-reconfiguración tipo cadena, ya que los módulos de los sistemas con reconfiguración móvil se caracterizan por ser autónomos y móviles. Estos módulos pueden no estar conectados y en el momento en que se requiera, auto-ensamblarse.

Los módulos de los sistemas de reconfiguración móvil usan el ambiente para maniobrar y acoplarse con otros módulos. Son muy complejos debido a que pueden realizar tareas en forma individual y ocasionalmente, ensamblarse para ejecutar tareas colectivas, que requieren de coordinación precisa, ordenamiento, comunicación, auto-ensamble, alineación de módulos, etc. Estos sistemas están poco estudiados y son el tipo de robots propuestos y descritos en este trabajo.

Por ser de especial interés para nosotros, en esta sección se describirá el diseño, locomoción, forma de interconexión, control y equipamiento sensorial de tres ejemplos de sistemas multi-robot de reconfiguración tipo móvil.

3.3.1. Swarm-bots

Uno de los trabajos más importantes y recientes de esta clase, es **Swarm-bots** (Hemelrijk, 2002), desarrollado dentro del programa *Future and Emerging Technologies* de la Unión Europea compuesta por laboratorios de Bélgica, Italia y Suiza. Este proyecto consiste en la construcción física de robots que tienen la capacidad de auto-ensamblarse y de auto-ordenarse. Este sistema está conformado por alrededor de 30 a 35 robots pequeños y autónomos llamados **S-bots**. Estos S-bots pueden navegar, explorar, percibir su medio ambiente, sujetar objetos, comunicarse con otros S-bots y unirse físicamente a ellos en forma rígida o flexible, formando el sistema Swarm-bots, todo ello en forma autónoma. La estructura física es combinada con una arquitectura de control adaptativa distribuida, inspirada en comportamientos de una colonia de hormigas. En la figura 3.4, se muestra un S-bot (a) y el Swarm-bots formado por varios S-bot ensamblados (b).

Usando conexiones flexibles o rígidas, los S-bots pueden formar un Swarm-bots teniendo

estructuras de 1D, 2D o 3D.

3.3.1.1. Diseño

Cada S-bot tiene una forma cilíndrica y una pinza flexible en la parte superior; está equipado con 50 sensores, 9 actuadores y 11 procesadores. Cada S-bot posee además una pinza para conexión rígida en un eje horizontal y se desplaza empleando manejo diferencial denominado *treels* el cual se abordará en el apartado siguiente. Un S-bot pesa 660 *gr.* y sus baterías le permiten autonomía energética de aproximadamente 1 hora y media.

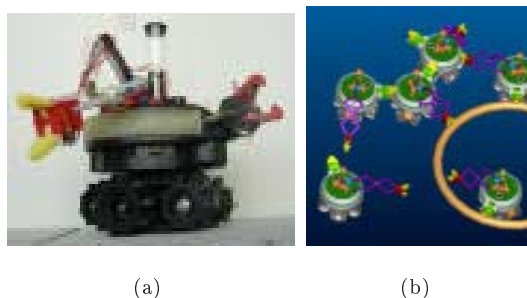


Figura 3.4: Swarm-bots es un sistema multi-robot compuesto por módulos autónomos llamados S-bots, que poseen la capacidad de auto-ensamblarse (Hemelrijk, 2002).

3.3.1.2. Locomoción

La locomoción del sistema es llevada a cabo mediante una combinación de orugas y llantas. Este tipo de estructura es llamado por los autores como manejo diferencial *treels*, donde *treels* es formado por TRacks y whEELS (ver figura 3.5). Cada *treels* lateral, una oruga y una llanta, es controlado por un motor, así que el S-bot puede moverse libremente en el medio ambiente y rotar fácilmente sobre su mismo eje. El sistema de manejo diferencial *Treels* permite a cada S-bot moverse en terrenos rugosos. Cada módulo S-bot tiene la capacidad de moverse en forma autónoma y en ocasiones ensamblarse para formar una configuración específica, como formar una cadena de S-bots para pasar un terreno accidentado (ver figura 3.6). Este tipo de modularidad y flexibilidad es parecido al empleado por un robot auto-reconfigurable tipo cadena, para sobremontar obstáculos grandes. Si comparamos la movilidad del Swarm-bots con los robots auto-reconfigurables tipo rejilla o tipo cadena, se observa que los Swarm-bots tienen menor capacidad en 3D que los robots auto-reconfigurables tipo cadena o rejilla, pero explotan

la capacidad de movilidad autónoma de cada módulo, lo cual no está presente en los robots tipo rejilla y tipo cadena.

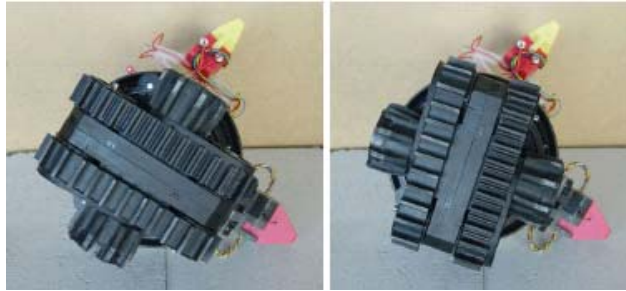


Figura 3.5: El sistema de locomoción de un S-bot emplea un manejo diferencial denominado *treels* (*TRack y whEELS*) compuesto por una llanta y una oruga o *track*.

3.3.1.3. Interconexión

Los S-bots tienen dos posibles formas de interconectarse: una rígida y otra semi-flexible.

La **conexión rígida** es realizada por medio de una pinza montada en la parte frontal del Swarm-bots (ver figura 3.6) a la altura de un cinturón para ensamble colocado alrededor del cuerpo del robot. La pinza se conecta a otro S-bot sujetando el cinturón que rodea el cuerpo de otro S-bot. Si los robots no están muy cercanos, la conexión permite algunos grados de libertad al robot, ya que la pinza tiene dos grados de libertad: horizontal y vertical.

La **conexión semi-flexible** es realizada por medio de un brazo paralelo flexible accionado por tres motores. El brazo posee tres grados de libertad, por lo que puede extenderse y retraerse, moverse lateralmente o verticalmente. El extremo del brazo posee una pinza similar a la que se emplea en la conexión rígida.

La conexión rígida es empleada principalmente para formar cadenas rígidas que tienen que pasar espacios huecos o grandes obstáculos, como se muestra en la figura 3.6. La conexión semi-flexible es adecuada para configuraciones donde cada robot debe tener su propia movilidad en la estructura formada, como se muestra en la figura 3.7. Es importante mencionar que los módulos del Swarm-bot pueden adoptar las dos configuraciones a la vez, rígidas y flexibles, es decir, conectarse de forma rígida a un S-bot u objeto y de forma flexible a otro S-bot u objeto.



Figura 3.6: Se muestra una conexión fija de dos S-bots, y la cooperación entre ellos para contender con huecos en la superficie del terreno.

3.3.1.4. Sensores

Cada S-bot está equipado con todos los sensores necesarios para la navegación, tales como una cámara omnidireccional a color, 16 sensores de proximidad infrarroja en los lados y 4 en la parte inferior, 24 sensores de luz, un acelerómetro de 3 ejes, 2 sensores de humedad, sensores de rotación incrementales, sensores de torque en cada uno de sus 9 grados de libertad entre otros (ver figura 3.7).

El Swarm-bots es un sistema multi-robot con gran equipamiento y capacidades, lo cual es muy costoso. En el capítulo 6 se hace una comparación de este sistema con los otros que a continuación veremos, incluyendo así mismo el sistema propuesto en esta tesis.

3.3.1.5. Control

Consiste de algoritmos distribuidos basados en información local y reglas simples de auto-organización inspiradas en el comportamiento de colonias de hormigas. Los S-bots hacen uso de aprendizaje automático y activación probabilística de comportamientos básicos. Aunque este tipo de control no requiere de gran poder computacional, el gran número de sensores empleados y los grados de libertad de los robots requieren rapidez de procesamiento, fusión sensorial y un control eficiente.

Trianni et al. (2002), Gross et Dorigo (2004) y Groß et al. (2006) presentan experimentos realizados con el sistema multi-robot Swarm-bot para empujar un objeto y auto-ensamblarse.

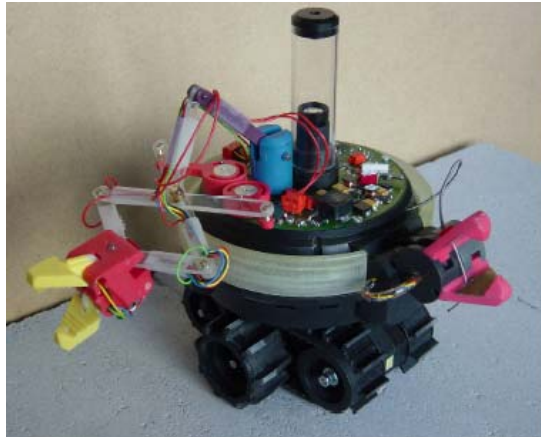


Figura 3.7: Un S-bot está equipado con 50 sensores y 9 actuadores, una pinza flexible y otra rígida.

Los S-bots son capaces de auto-ensamblarse, de desplazarse en forma ensamblada sobre una superficie rugosa y empujar un objeto hacia un punto específico.

Su estrategia de auto-ensamblado consiste en activar el color de los S-bot en rojo o azul. Los robots de color azul están disponibles para ser ensamblados por otro S-bot. Los robots de color rojo indican que se encuentran ensamblados. Inicialmente, un S-bot se activa de color rojo y los demás S-bots de color azul. Cuando un S-bot se conecta a otro S-bot, cambia su estado a color rojo. Su estrategia también emplea aprendizaje automático para mapear las entradas de los sensores a los comandos de los actuadores.

Cuando un S-bot no puede pasar por una superficie con huecos, se coloca de un color que indica a otro S-bot que necesita ayuda. Un segundo S-bot, se dirige hacia el S-bot que requiere la ayuda y se conecta a él, posteriormente ambos S-bots se desplazan en forma conjunta, apoyándose mutuamente.

Su estrategia de empujado de un objeto hacia una fuente de luz consiste en colocar en forma aleatoria y no ensamblada a los S-bots alrededor del objeto. Los S-bots localizan la luz y el objeto, empleando sus sensores de luz y cámara, y empujan el objeto hacia la fuente de luz localizada.

3.3.2. Millibot-trains

Carnegie Mellon desarrolló un grupo de robots semi-autónomos y autónomos, llamados Millibot-trains. Este sistema tiene dos versiones distintas (Brown et al., 2002). El concepto principal de este sistema consistió de un grupo de robots teleoperados, capaces de ensamblarse en forma de ‘tren’ y de escalar grandes obstáculos. El segundo modelo no posee dispositivos ni capacidades de ensamble. Sin embargo, posee un método de radio localización, el cual es una de las principales características de este sistema. Cada Millibot es un módulo del sistema Millibot-trains que posee diversos sensores y la capacidad de auto-ensamblado. En esta sección hablaremos del primer modelo de Millibot-trains.

3.3.2.1. Diseño

Un Millibot está hecho de material de fibra de vidrio, mide cerca de 11 *cm.* de largo y 6 *cm.* de ancho, con un peso de 266 *gr.* y tiene un aspecto semejante a un tanque de guerra (ver figura 3.8). Cada Millibot es autónomo y posee dos baterías recargables de NiMH y una tercera en reserva. Estas baterías proveen suficiente energía para un arreglo limitado de sensores y una autonomía energética de 30 a 90 minutos, dependiendo de la complejidad de la tarea a realizar.

3.3.2.2. Locomoción

Los Millibot-trains emplean un par de orugas para desplazarse, permitiendo su desplazamiento en terrenos planos y rugosos. Cuando los Millibots están ensamblados, pueden inclusive subir escaleras o sobremontar áreas altas u objetos, debido a su configuración lineal.

3.3.2.3. Interconexión

Cuando un módulo Millibot requiere subir escaleras o sobremontar un obstáculo requiere del apoyo de otros módulos del sistema, por lo que los módulos se ensamblan en forma de cadena. Para poder ensamblarse, cada Millibot posee en su parte trasera dos orificios para acoplamiento y en la parte frontal dos puntas para acoplarse con otro robot (ver figura 3.8). Para subir una escalera, aún estos robots pueden requerir un poco de ayuda de un humano, aunque logran desplazarse adecuadamente en terrenos planos y rugosos, así como evitar obstáculos.

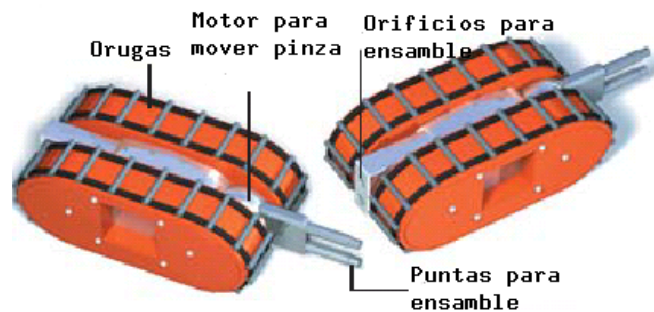


Figura 3.8: Los Millibot-trains son robots auto-reconfigurables de tipo móvil, poseen la capacidad de acoplarse empleando dos puntas de acoplamiento, las cuales se insertan en un par de orificios de acoplamiento ubicado en la parte trasera de otra unidad Millibot.

3.3.2.4. Sensores

Este módulo contiene sensores infrarrojos para medir distancia y detectar cercanía de obstáculos, sensores de rotación y un radio modem para comunicación con otros Millibot.

La versión más reciente de Millibot consiste de robots pequeños que poseen tres capas: movilidad, control y sensado (ver figura 3.9). Está equipado con sensores tales como de proximidad, sonares, sensor de temperatura, una cámara de video y radio modem para comunicación con otros Millibot. Estos robots no se ensamblan, pero pueden desplazarse sobre una configuración lineal o de tren de Millibots de la primera versión.

3.3.2.5. Control

Debido a las limitantes del procesador, los módulos del Millibot son controlados fuera de la tarjeta empleando un *joystick*. Cada Millibot tiene un microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*) en la tarjeta de control, el cual recibe comandos para activar los motores, por medio de un radio modem con un espectro de 900 MHz para la comunicación.

Los Millibot-trains pueden desplazarse sobre superficies planas y rugosas y escalar grandes obstáculos. Sin embargo, no se ha encontrado información de los Millibots-trains referente a otros tipos de comportamientos para realizar tareas colectivas.

3.3.3. Sistema SMC rover

Kawakami et al. (2003) e Hirose (2000) propusieron un sistema denominado SMC rover como

un robot de exploración planetaria, el cual consta de unos módulos llamados *Unirovers* y de un cuerpo principal compuesto por una batería solar, la cual no puede moverse por sí sola, sino que tiene que ser transportada por los *Unirovers* (ver figura 3.10). Una segunda versión de este sistema es el sistema *Super Mechano Colony* el cual, consiste de 12 módulos homogéneos *Unirovers* con capacidades de auto-ensamblado, del cual no se ha podido obtener mayor información. En esta tesis hablaremos sólo de la primera versión de este tipo de sistema.

3.3.3.1. Diseño

Cada módulo está compuesto de una llanta y de un brazo manipulador (ver figura 3.11). El robot está compuesto por varios módulos que enlazados forman un robot ápodo. El sistema completo es llamado **Colonia Super Mecano** y está compuesto por varios módulos heterogéneos.

El SMC rover consiste de un cuerpo principal y de múltiples unidades pequeñas. El cuerpo principal tiene una batería celular, dispositivos de comunicación, analizador de muestras, cargador de baterías, y herramientas de reparación para los módulos.

El *Unirover* posee una sola llanta de 190 mm de diámetro y 140 mm de ancho, posee un solo manipulador con tres uniones de 170 mm y al final del brazo hay una pequeña llanta loca con

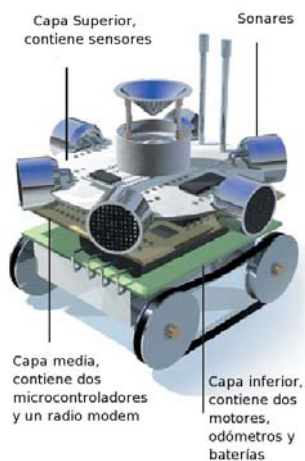


Figura 3.9: Segunda versión de una unidad Millibot compuesta por tres capas: movilidad (capa inferior), control (capa media) y sensado (capa superior).

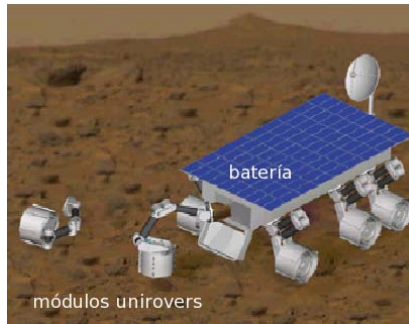


Figura 3.10: SMC rover compuesto por *Unirovers* y una celda solar, los primeros sostienen y trasladan a la segunda (Hirose, 2000).

sujetadores en forma de 4 dedos. Los circuitos controladores, el transmisor y la batería para los motores también están localizados en la llanta. Hay un servomotor en cada unión. El *Unirovers* es controlado con un controlador manual inalámbrico.

3.3.3.2. Locomoción

El sistema SMC rover puede desplazarse sobre superficies irregulares y estrechas, adaptando su cuerpo compuesto de todos los módulos enlazados a la forma del terreno. Cuando se requiere pasar por un obstáculo grande, el robot se mueve de tal forma que todos sus módulos conectados pueden proporcionar movimiento de robot ápedo, donde los módulos de adelante de cierta forma jalan a los de atrás y los de atrás empujan a los de adelante. Este robot puede comportarse también como un manipulador (ver figura 3.11).

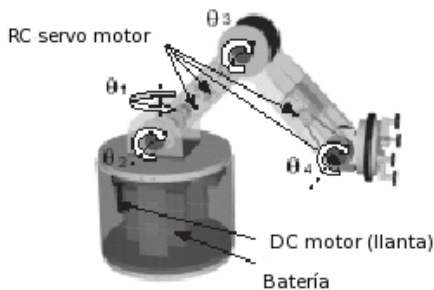


Figura 3.11: Unirovers compuesto sólo por una llanta y un brazo manipulador (Hirose, 2000).

El cuerpo principal del sistema multi-robot SMC rover no puede moverse por sí mismo, pero los *Unirovers* sostienen el cuerpo principal del SMC rover por medio de sus manipuladores actuando como llantas activas del cuerpo principal, y en ocasiones pueden separarse de la batería que sostienen para hacer otras tareas (ver figura 3.12).

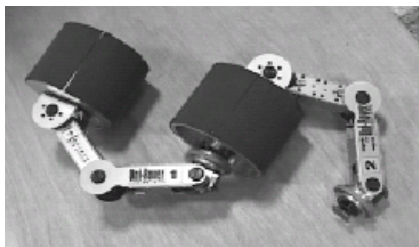


Figura 3.12: Se muestran dos *Unirovers* ensamblados de tal forma que uno de ellos sujeta al otro permitiendo la movilidad de las llantas.

Un solo *Unirover* no puede cargar una batería solar, pero todos conectados a ella pueden transportarla y obtener a la vez energía de ella.

3.3.3.3. Interconexión

Su ensamblado se realiza mediante el efector final que posee el brazo, en forma de ‘dedos’ que sujeta el eje de la rueda de otro *Unirover*. Para que el sistema SMC rover se desplace, la llanta se adapta al terreno y el brazo mantiene el movimiento generado por el movimiento propulsivo de la llanta cuando ésta fricciona sobre el piso. Para reducir la fricción del brazo con respecto al terreno, una llanta loca es colocada alrededor de la muñeca del brazo (ver figura 3.13).

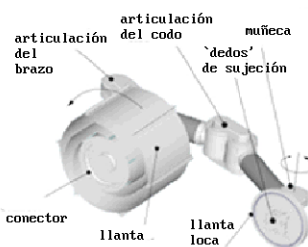


Figura 3.13: Los *Unirovers* constan de una llanta con un brazo. El brazo contiene una pequeña llanta loca que le permite reducir al brazo la fricción con el terreno. La llanta loca tiene pequeños dedos que permiten acciones de sujeción.

3.3.3.4. Sensores

No obtuvimos información del equipamiento sensorial del SMC rover.

3.3.3.5. Control

Posee un sistema descentralizado con un líder. El sistema *Unirovers* es controlado por un operador humano, por medio de un controlador inalámbrico.

Los *Unirovers* pueden desprenderse de la celda solar y explorar. También pueden conectarse a la celda solar y desplazarse en forma coordinada cargándola. Se ha reportado, que los *Unirovers* también poseen la capacidad de manipular objetos. Sin embargo, no hemos obtenido mayor información sobre experimentos realizados sobre sus capacidades y comportamientos.

Capítulo 4

Sistema multi-robot Mini-trans

En este capítulo se presentan las especificaciones, diseño, construcción y comportamientos de un sistema multi-robot auto-reconfigurable tipo móvil, denominado Mini-trans. El sistema Mini-trans consiste de tres módulos homogéneos y autónomos. Se presenta la estructura física de cada módulo del sistema y la del sistema completo, así como su arquitectura de control. También son presentados en este capítulo, mecanismos de coordinación descentralizados utilizados en algunos comportamientos colectivos del sistema multi-robot Mini-trans.

4.1. Requerimientos del sistema

Los objetivos de la tesis comprenden:

1. Diseñar y construir un sistema multi-robot compuesto por tres módulos homogéneos y móviles.
2. Definir, implementar y evaluar mecanismos de coordinación por parte del sistema multi-robot para la realización de las siguientes tareas:
 - Encontrar un objeto en el ambiente
 - Auto-ordenarse
 - Auto-ensamblarse
 - Desplazarse en forma ensamblada
 - Desensamblarse

- Trasladar en forma no dirigida un objeto

El desarrollo físico del sistema para alcanzar el primer objetivo se detalla en la sección 4.2.

Por otra parte, los aspectos ligados al control de los módulos del sistema multi-robot, para alcanzar el segundo objetivo, se describen en la sección 4.3. Para la realización de las tareas marcadas en los objetivos, se identificaron capacidades con las cuales equipar a los módulos del sistema, las cuales comprenden avanzar, girar, detenerse, detectar y evadir obstáculos, percibir la intensidad de un estímulo que identifique un objeto de interés, desplazarse alrededor de un objeto de interés, identificar otro robot, reclutar robots, enviar y recibir señales, auto-ensamblarse, auto-desensamblarse de otro robot y desplazarse en forma ensamblada.

4.2. Construcción del prototipo

La estructura física del sistema completo depende de la estructura física de cada uno de los módulos que lo conforman, por lo que es de suma importancia considerar la morfología y equipamiento de cada uno de los módulos para cumplir con las características requeridas por el sistema, de tal forma que su estructura les ayude a alcanzar sus objetivos, no sólo a los módulos individuales, sino también al sistema completo. En la realización del sistema Mini-trans se diseñaron, construyeron y probaron diferentes prototipos de un módulo del sistema. Esta sección describe los requerimientos del sistema Mini-trans, la morfología y el equipamiento empleados para los diferentes prototipos y versiones construidos, así como sus ventajas y desventajas. Se proporcionan también detalles de la versión elegida para conformar el sistema Mini-trans.

4.2.1. Módulos

Se construyeron tres módulos homogéneos y autónomos para conformar al sistema multi-robot Mini-trans. Se tuvieron que construir varias versiones de módulos para elegir un tipo de módulo para integrar al sistema Mini-trans. La construcción y equipamiento de estos módulos no fue fácil, requirió de mucho trabajo, precisión, pruebas y adecuaciones, ya que no existe una guía que nos indique los aspectos a considerar y la forma de construir un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado. Sin embargo, se tuvieron muchas experiencias enriquecedoras. A continuación se presentan cada una de las hipótesis planteadas para el diseño y construcción de los prototipos, así como las características, forma de construcción y desempeño que presentaron.

4.2.1.1. Versión 1.0

Debido a que aún no se contaba con el material y equipo de trabajo requerido, se construyó el primer prototipo empleando material de LEGOMindstorms© (ver apéndice A), de tal forma que nos permitiera avanzar en el diseño y establecimiento de algunos comportamientos del robot.

4.2.1.1.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis 1: Se puede construir un robot con capacidades de auto-ensamblado que pueda formar parte de un sistema multi-robot, empleando únicamente material de un *kit* comercial de desarrollo de robots.

Objetivos: Diseñar un módulo autónomo de forma cúbica con capacidad de ensamble, desplazamiento y, detección y evasión de obstáculos.

4.2.1.1.2. Construcción. El primer prototipo (ver figura 4.1) consistió de un cuerpo cúbico empleando piezas de LEGOMindstorms©. Para su locomoción empleaba dos orugas. Fue equipado con una pinza en forma de dedos largos para ensamblarse a otro robot, 4 interruptores de contacto para detección y evasión de colisiones. Este prototipo fue controlado por un LEGO Brick y desempeñaba comportamientos básicos como explorar, detenerse y ensamblarse.

4.2.1.1.3. Desempeño. El robot presentó dificultad para desplazarse, en especial para realizar giros. Su sistema de detección de colisiones era muy limitado. La operación de su pinza fue igualmente deficiente debido a su longitud y fragilidad, al igual que el desempeño de los comportamientos explorar y navegar, debido a que el robot no tenía un sistema de detección de colores u objetos, lo cual implicaba que no se podía reconocer una zona objetivo marcada de algún color o forma en el ambiente. El marcado de una zona objetivo era indispensable para indicar las zonas de salida o de llegada del módulo.

4.2.1.1.4. Conclusiones. Algunas de las ventajas de este prototipo fueron que el material de LEGO incluye piezas de una gran variedad de formas y tamaños, las cuales pueden ser fácilmente ensambladas para formar diseños variados de robots y equiparlos con motores y sensores de contacto o luz incluidos en el *kit*. Sin embargo, su capacidad de equipamiento es limitada, la pérdida de piezas de la estructura del robot y de la pinza es frecuente debido a la poca resistencia a la fuerza aplicada durante el ensamble. Concluimos que el empleo del *kit* de

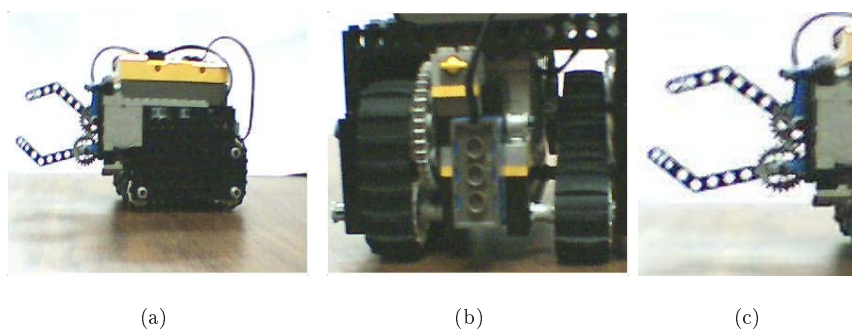


Figura 4.1: (a) Prototipo Mini-trans 1.0, b) Detalles de ubicación de sensores de luz y de contacto, así como disposición de las orugas y (c) Pinza construida para este prototipo.

desarrollo de LEGOMindstorms© ofrece ventajas de rápida materialización del diseño, pero es necesario equipar al robot con más sensores y actuadores, redefinir su sistema de colisiones, su pinza y diseño en general, para mejorar el desempeño del robot.

La lección aprendida se resume a continuación:

1. Un *kit* comercial es útil para iniciar pruebas, pero es insuficiente para el desarrollo de prototipos de robots con capacidades de auto-ensamble.

4.2.1.2. Versión 1.1

Para el segundo prototipo se emplearon una tarjeta controladora Handyboard© (ver apéndice B) y dos kits de LEGOMindstorms© debido a la persistente falta de equipo y material, como son llantas y algunos sensores que serían empleados en el equipamiento del sistema. Sin embargo, se creyó que un segundo prototipo nos permitiría tener una idea más clara de los requerimientos del robot y establecer algunos comportamientos que podrían ser empleados o modificados para el prototipo final.

4.2.1.2.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis 1: Un prototipo de robot con deficiente desempeño, puede ser mejorado aumentando sus capacidades de percepción y de actuación.

Hipótesis 2: Se puede construir un robot que pueda formar parte de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, empleando material de un *kit* comercial de desarrollo para robots para la composición de su cuerpo y empleando una tarjeta

controladora con capacidad de usar variedad de sensores y actuadores.

Objetivos: Construir un módulo autónomo de forma cúbica con sensor de contacto circular, capacidades de navegación, evasión de obstáculos y auto-ensamble.

4.2.1.2.2. Construcción. La segunda versión de este prototipo consistió en un robot cúbico formado por piezas de LEGOMindstorm©. Las piezas fueron ensambladas unas sobre otras para formar un cubo con una cavidad para alojar la tarjeta controladora empleada para esta versión. Debido al tamaño y forma de la tarjeta elegida, el robot era pesado y muy alto, lo cual redundaba en dificultad de desplazamiento. Su locomoción era realizada por 2 motores y 4 llantas en configuración diferencial. Cada par de llantas era controlada por un motor. Aunque la forma del robot era cúbica, el sensor de contacto que se encontraba ubicado alrededor del robot tenía forma circular. Tres microinterruptores estaban situados en cada uno de los lados y en la parte trasera del robot, unidos por canutillos del mismo *kit*. En la parte frontal, se encontraba un cuarto microinterruptor para la detección colisiones y evasión de obstáculos. El dispositivo de ensamble consistió de una especie de gancho alargado (aproximadamente 14 *cm* de largo) accionado por engranes y un servomotor. En la parte trasera e inferior del robot, fue ubicado un sensor de luz para detección de zonas objetivo, en este caso un círculo marcado en el piso.

4.2.1.2.3. Desempeño. Aunque esta versión presentó mejor desempeño que la versión anterior, tuvo dificultades en la detección y evasión de obstáculos debido a que los canutillos que unían los mismos interruptores eran muy flexibles, por lo que si el robot sufría una colisión en una de estas partes, el canutillo se flexionaba sin activar los interruptores. El dispositivo de ensamble no era robusto al realizar una sujeción, ya que las piezas se desensamblaban cuando la pinza se cerraba y se aplicaba alguna fuerza. La figura 4.2 muestra el prototipo correspondiente a la versión 1.1.

4.2.1.2.4. Conclusiones. Aunque el *kit* de LEGOMindstorms© ofrece ventajas para diseñar algunos tipos de robots, su capacidad de equipamiento sigue siendo limitada, las estructuras formadas con dichas piezas son poco robustas para ciertos diseños, por ejemplo en casos donde los robots requieren sujetar algo y aplicar una fuerza para empujar o jalar algún objeto. Esta falta de resistencia se debe a la facilidad de desensamble de sus piezas y a la dificultad de ajuste y acoplamiento de piezas y sensores distintos a los proporcionados

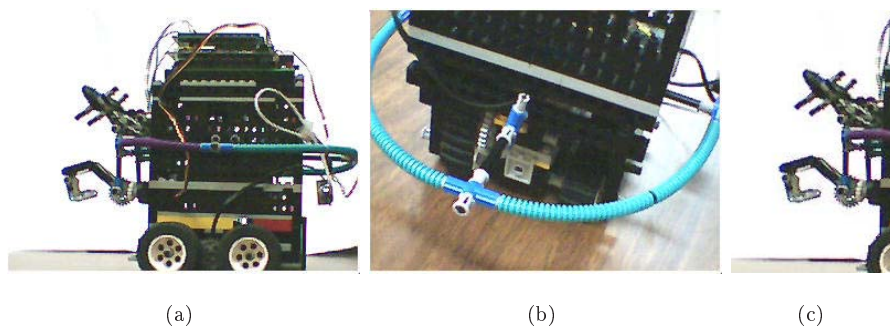


Figura 4.2: (a) Prototipo Mini-trans 1.1, (b) Sensor de contacto circular empleado por este prototipo, el cual era muy flexible y presentaba deficiente detección de colisiones en algunos puntos y (c) Dispositivo de ensamble en forma de gancho construido para este prototipo.

por el *kit* de LEGO Mindstorms®. La tarjeta controladora Handyboard® proporcionó mayores recursos en capacidad de cantidad de motores y actuadores en comparación con el Brick de LEGO Mindstorms®.

Las lecciones aprendidas de este prototipo se resumen a continuación:

1. Para construir un prototipo de sistema multi-robot, se requiere de un *kit* de desarrollo con capacidades acorde a las necesidades del sistema. Estas necesidades no son obvias al inicio del desarrollo de un proyecto.
2. Aunque se empleen *kits* de desarrollo para robots, es indispensable realizar adaptaciones a éstos conforme se van construyendo y probando los prototipos, lo cual puede ser complicado o imposible de realizar.
3. Construir un prototipo de robot puede ser tardado y complejo, pero proporciona flexibilidad de diseño.

4.2.1.3. Versión 2.0

El tercer prototipo consistió en un modelo de diseño y construcción propios, empleando material de fibracel y algunos elementos comerciales para su equipamiento como son la tarjeta controladora, llantas y motoreductores.

4.2.1.3.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis 1: Emplear *kits* de desarrollo para robots limita al diseñador a adaptar

su diseño de acuerdo a las capacidades de dicho *kit*. Para construir un robot con capacidades de auto-ensamblado y comportamientos colectivos, se requiere diseñar y construir un modelo propio, de acuerdo a los requerimientos establecidos.

Objetivos: Construir un módulo cilíndrico autónomo con capacidad de navegación y auto-ensamble; fácil de armar y desarmar, con locomoción omnidireccional.

4.2.1.3.2. Construcción. El tercer prototipo fue diseñado y construido por nosotros. El cuerpo del robot estaba compuesto por tres placas circulares, dos de 22 *cm* y una de 24 *cm* de diámetro. Estas placas fueron colocadas una sobre otra soportadas por tornillos (ver figura 4.3 (a)). Los elementos de locomoción fueron colocados entre la primera y segunda placas. Para su locomoción, se emplearon 3 motores y 3 llantas comerciales omnidireccionales de 4 *cm* de diámetro colocadas en forma de triciclo. Cabe mencionar que estas llantas se controlan diferencialmente para desplazamientos rectilíneos y curvilíneos, utilizando una de las llantas, no siempre la misma, como llanta loca. Para la rotación del robot sobre su propio eje, las llantas se controlan sincronizadamente, ajustando sus velocidades y direcciones simultáneamente (c.f. sección 1.3.1.1). Una pinza para ensamble en forma de tijeras fue colocada sobre la segunda placa. La tercera placa contenía un sensor de contacto circular y una tarjeta comercial Handyboard©. El sensor de contacto estaba compuesto por 6 microinterruptores de contacto y 2 semi-amarillos de madera conectados a 3 microinterruptores cada uno. El módulo tenía un diámetro de 24 *cm* considerando el sensor circular.

Para adaptar las llantas a los motores, se construyeron ejes de plástico del diámetro del centro de las llantas, así como un eje para el motor. Debido a que la tarjeta controladora proporciona un mayor voltaje que el empleado por los motores, se construyó una tarjeta de adaptación de voltaje para los motores (ver apéndice C). La figura 4.3, muestra el prototipo 2.0.

4.2.1.3.3. Desempeño. Este robot fue capaz de desplazarse en forma omnidireccional, siendo su desplazamiento más versátil que el de las versiones anteriores debido también a su estructura cilíndrica, la cual permite mayor facilidad para la evasión de obstáculos. Sin embargo, presentó dificultad de desplazamiento sobre superficies no planas debido a las pequeñas dimensiones de sus llantas. Su sensibilidad en algunos puntos del sensor de contacto circular aún era deficiente. La pinza era poco robusta y requería una forma de ensamble muy puntual, es decir, mayor precisión en la localización y forma de ensamble (ver figura 4.3 (c)).

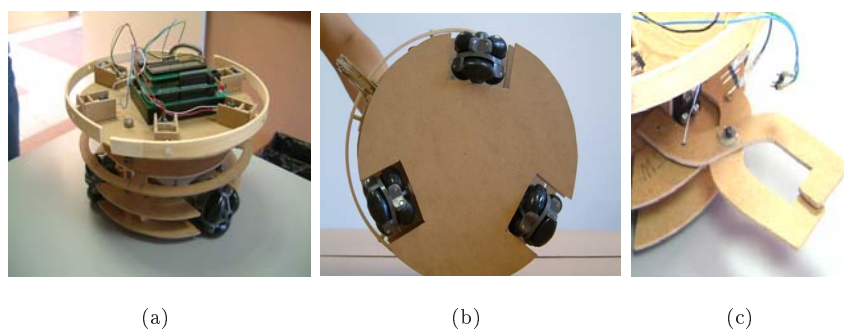


Figura 4.3: (a) Prototipo Mini-trans 2.0, construido a base de fibracel, (b) Locomoción omnidireccional del prototipo y (c) Dispositivo de ensamble en forma de tijeras.

4.2.1.3.4. Conclusión. El prototipo presentó mayores ventajas en comparación con las versiones construidas con material de LEGO Mindstorms®. La estructura del robot es en sí misma modular, debido a la construcción del cuerpo con placas circulares dispuestas en capas y a su forma de sujeción empleando tornillos, lo cual facilitó el armado y desarmado del robot. El empleo de material de fibracel ofreció ventajas en el manejo, corte y construcción del cuerpo del robot. El desplazamiento omnidireccional proporcionó al robot ventajas considerables como desplazamientos laterales, diagonales y sobre su propio eje. Sin embargo, estos módulos no disponían aún de un medio físico que les permitiera ensamblarse.

Diseñar y construir el cuerpo del robot a partir de partes fabricadas por nosotros mismos, nos permitió mayor flexibilidad y adaptación en el diseño del robot. Sin embargo, la fabricación de las piezas no es tarea fácil, ya que requiere gran precisión de corte y ajustes. Por otra parte, caracterizar y acceder a material para equipar al robot fue difícil, tardado y costoso.

Las lecciones aprendidas de la construcción del prototipo 2.0 son las siguientes:

1. Para fabricar un robot, se requiere de un diseño previo, espacio, material y equipo de trabajo adecuado.
2. Para facilitar la modificación y reparación de un robot, es deseable construirlo en forma modular.

4.2.1.4. Versión 2.1

4.2.1.4.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Basta modificar el diseño y construcción de la pinza de ensamble, contar

con llantas más altas y ajustar el cinturón de contacto circular del la versión 2.0, para completar un módulo.

Objetivos: Construir un módulo que tenga una pinza de ensamble más robusta y un medio de ensamble para la conexión con otros robots en forma menos puntual al requerido en el prototipo 2.0. Mejorar el diseño del sensor de contacto circular para hacerlo más eficiente al del prototipo 2.0.

4.2.1.4.2. Construcción. Este prototipo se basó en el prototipo 2.0 construido con placas de fibracel circulares de 24 *cm* de diámetro organizadas en 4 capas: la primera y segunda contenían los sensores y actuadores para el desplazamiento, la tercera capa contenía el dispositivo y medio de ensamble y la cuarta capa contenía un sensor de contacto circular y la tarjeta de control Handyboard© (ver figura 4.4). Este prototipo empleaba 3 llantas omnidireccionales de 6 *cm* de diámetro, 1 cinturón de contacto circular integrado por 6 microinterruptores de contacto, ubicados aproximadamente a 60° de distancia uno del otro. La pinza para el ensamble fue diseñada de nuevo por nosotros y fue controlada por un servomotor. El medio de ensamble consistió de tres orificios perforados en la tercera capa de fibracel. La pinza se construyó en forma de dos dedos y los orificios en la capa de ensamble permitían un ensamble menos puntual que el del prototipo 2.0.

4.2.1.4.3. Desempeño. Este robot presentó mejor desempeño para navegar y evitar obstáculos que los anteriores. Su sensor de contacto circular fue más eficiente para tener mayor cobertura. Contó con un dispositivo y un medio de ensamble. La pinza fue más robusta que la anterior. Sin embargo, la pinza presentó problemas de ajuste en sus engranes, longitud corta y falta de sensado laterales para detectar colisiones. El módulo no contaba tampoco con la capacidad de comunicación con otros robots.

4.2.1.4.4. Conclusión. Se mejoró el diseño y desempeño del robot. Este prototipo contaba con llantas más altas y un cinturón de contacto más eficiente para detectar colisiones alrededor del robot. Sin embargo, se constató la dificultad de construir una pinza y un medio de ensamble, además de la necesidad de contar con mecanismos de comunicación. Se observa que no es fácil la construcción de una pinza para ensamble de robots auto-ensamblables, ya que se requiere de mucha precisión en la posición de las piezas que conforman la pinza.

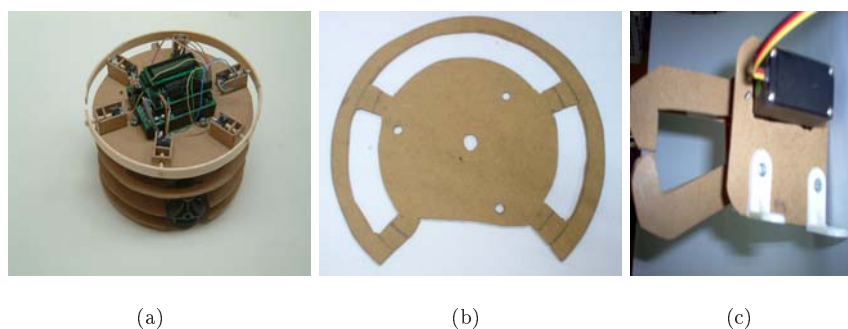


Figura 4.4: (a) Prototipo Mini-trans 2.1, (b) Placa con tres orificios para el ensamble y (c) Pinza construida con material de fibracel y 2 engranes.

Las lecciones aprendidas de la construcción de esta versión se resumen a continuación:

1. Para fabricar una pinza de ensamble se requiere de precisión y ajuste de sus engranes. Es importante considerar la forma de adaptación de la pinza al motor o servomotor que la accionará, así como el espacio y lugar que ocupará en el robot. Otro aspecto a considerar es la capacidad de apertura de la pinza, la cual debe ser adecuada al medio donde será ensamblada.
2. La construcción de un sensor de contacto en forma circular como el empleado en este prototipo, el cual emplea 6 microinterruptores de contacto, requiere que el medio físico que conecta a dos o más sensores cuente con cierta holgura. Con ello, el anillo podrá desplazarse cuando es presionado activando así algún microinterruptor de contacto. De no ser así, el anillo quedará rígido y no tendrá suficiente sensibilidad ante las colisiones.

4.2.1.5. Versión 2.2

4.2.1.5.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis: La comunicación entre robots es indispensable no sólo en la interacción de los sistemas multi-robot (Munoz et Drogoul, 2004), sino también en la interacción de sistemas auto-reconfigurables, por lo que se requiere equipar a los módulos del sistema con mecanismos de comunicación.

Objetivos: Mejorar la pinza para ensamble del robot, dotarlo con la capacidad de

comunicación, crear un segundo módulo y definir comportamientos de auto-ensamble, auto-desensamble y desplazamiento en forma ensamblada en ambos módulos.

4.2.1.5.2. Construcción. Este prototipo estuvo basado en el prototipo 2.1, se construyó con placas cilíndricas de 26 *cm* de diámetro. La pinza contaba con un sensor de contacto que indicaba si el ensamble había sido realizado o no. Este prototipo contaba también con capacidades de comunicación infrarroja, locomoción omnidireccional, ensamble y detección y evasión de colisiones. El emisor y receptor IR fueron colocados en la parte frontal del robot. El alcance de recepción de señales IR fue de aproximadamente 1.20 *m*. Se estableció un protocolo de comunicación con 17 tipos de mensajes de dos *bytes* cada uno, los cuales eran enviados y recibidos por los robots. Se establecieron igualmente ID diferentes para cada robot. La pinza del robot fue muy parecida a la empleada en el prototipo 2.0, pero usaba dos engranes más que aquella.

4.2.1.5.3. Desempeño. Este robot presentó mejor desempeño para navegar, evitar obstáculos, ensamblarse y comunicarse con otros robots que las versiones anteriores. Sin embargo, el alcance de recepción de señales IR de aproximadamente 1.20 *m* en un ángulo de 15° limitó el establecimiento de comunicación entre los robots. Se presentaron complicaciones en la forma de comunicación debido a que algunos de los códigos empleados no eran adecuados a los tipos de códigos que empleaba la librería usada para transmitir y recibir información por medio de IR, así como a la necesidad de tener una alineación entre el emisor y receptor IR de cada robot para poder establecer la comunicación. Los sensores IR fueron además muy sensibles a la luz artificial. El robot no fue capaz de distinguir los objetos de la pared. La pinza presentó aún problemas de ajuste en sus engranes, es decir, en ocasiones los engranes se aflojaban debido al constante movimiento.

4.2.1.5.4. Conclusión. La comunicación por medio de sensores IR permitió a los robots tener una mejor interacción y coordinación, a pesar de que se presentaron complicaciones para establecer la comunicación. Se reafirma la complejidad de construcción de una pinza de ensamble para robots auto-ensamblables, principalmente por el ajuste de los engranes. Sin embargo, se obtuvieron mejoras en el diseño y desempeño del robot, logrando capacidades de navegación, evasión de obstáculos, auto-ensamble y auto-desensamble, así como de establecimiento de comunicación con otros robots, con las limitaciones anteriormente mencionadas (resultados de estos

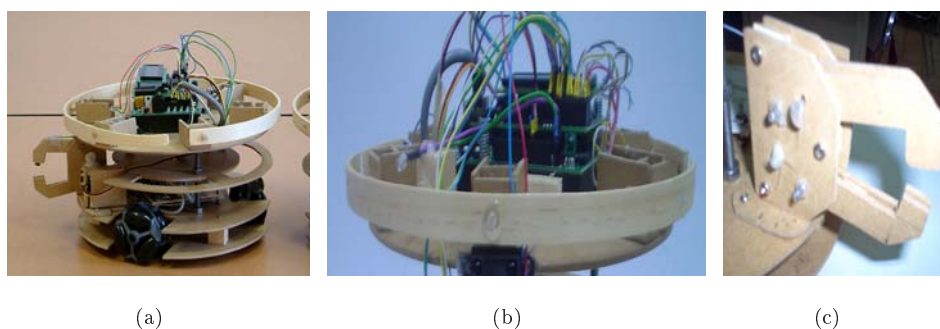


Figura 4.5: (a) Prototipo Mini-trans 2.2, (b) Cinturón de contacto en la placa superior del robot y (c) Pinza construida con material de fibracel y 4 engranes.

experimentos se reportaron en (Jiménez et Muñoz, 2005)).

Estas fueron las lecciones aprendidas en la construcción de esta versión:

1. Para fabricar una pinza para robots auto-ensamblables, se requiere considerar el tipo de ensamble que se desea obtener, si es flexible o rígido, así como la distancia a la que deberá situarse un robot con respecto a otro al momento de ensamblarse.
2. Para equipar un robot con sensores y actuadores, se requiere caracterizarlos, es decir, conocer sus especificaciones de desempeño y empleo, probarlos y clasificarlos. Elegir el material que más se adecúe a nuestras necesidades y capacidad de adquisición.
3. La comunicación por medio de sensores IR es sensible a ruido, provocado por la iluminación del ambiente, además de que requiere de una alineación precisa entre el emisor y el receptor para lograr la comunicación.

4.2.1.6. Versión 2.3

4.2.1.6.1. Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Las modificaciones sustanciales en el control de un robot, requieren también modificaciones de su estructura física¹.

¹En términos de McFarland et Bosser (1993, p. 1) "[...] el comportamiento necesita un cuerpo. El comportamiento desincorporado no es posible. Tanto los animales como los robots tienen cuerpos capaces de comportamiento inteligente, y pueden influir el mundo que los rodea. Una computadora inteligente que no tiene cuerpo y que no puede influir su ambiente, no es capaz de comportamiento inteligente". Algunos roboticistas (Brooks et

Objetivos: Mejorar la pinza para ensamble del robot, incrementar el equipamiento del robot, corregir el problema de envío y recepción de código por IR, crear un tercer y último módulo y completar la definición y codificación de los comportamientos individuales y colectivos de los robots del sistema.

4.2.1.6.2. Construcción. Este prototipo estuvo basado en el prototipo 2.2. La pinza fue montada sobre una base más alta, ubicada en la placa de ensamble (ver figura 4.6). El espacio entre cada placa fue mayor al del prototipo anterior. Un sensor de rotación fue colocado en cada llanta. Se equipó el prototipo con tres fotoresistores para detectar intensidad de luz, ubicados al frente del robot y a los lados izquierdo y derecho del robot. Dos sensores de contacto fueron ubicados en la parte frontal de la pinza para detección de colisiones. Se ubicaron dos sensores optorefectivos sobre la pinza para detectar colisiones en las partes laterales de la pinza, así como un fotoresistor y un *led* para transmitir y recibir señales de luz. Tres fotoresistores y dos *leds* fueron así mismo ubicados en la parte trasera del robot, sobre la placa de ensamble para detección y emisión de señales de luz. Fueron colocadas barreras entre cada orificio de ensamble, para que al girar el robot se active el sensor de la pinza e identifique el giro realizado. El equipamiento con sensores IR y de luz (fotoresistores y *leds*) ampliaba la capacidad de comunicación inter-robots. Para esta versión se construyó un modelo de pinza similar al de la versión anterior, empleando sólo dos engranes de mayor tamaño a los empleados en las otras versiones de pinzas realizadas. Las dimensiones de la pinza cambiaron a $5.5\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ del mecanismo y a 6.5 cm de largo de los dedos. Esta pinza fue colocada en la parte frontal del robot, a 2 cm de altura de la segunda placa. El protocolo de comunicación empleado se redujo a 8 tipos de mensajes (c.f. sección 4.3.3.2), empleando un ID diferente para cada módulo.

4.2.1.6.3. Desempeño. La pinza presentó mayor firmeza en el ensamble con otro robot. Esto redundó en un mejor desempeño de los Mini-trans pues la pinza presentó mayor soporte en la sujeción. Para incrementar la altura de los robots, se emplearon tornillos de mayor altura y espesor, incrementando con ello el peso de los robots y en consecuencia dificultando la capacidad y velocidad de desplazamiento. Es difícil tener una lectura precisa de la intensidad de luz que reflejan los colores de los objetos y del ambiente, debido al ruido de los sensores y a causa

Stein, 1993) han reportado experimentos en donde el control de un robot se define a partir de sus experiencias en el mundo y viceversa.

también de la luz natural o artificial. Finalmente, los sensores de rotación permitieron al robot un desplazamiento más preciso y uniforme.

4.2.1.6.4. Conclusión. Aunque esta versión presenta aún algunas desventajas, fue seleccionado para formar el sistema Mini-trans, debido a que presenta capacidades de navegación, evasión de obstáculos, comunicación directa y auto-ensamble, requeridas para los propósitos de esta tesis. Se confirma que un cambio en el control, en particular en los aspectos de precisión y forma de ensamble, requiere la modificación en la estructura física del robot, i.e. la redefinición de los comportamientos de nuestros módulos no redundaron en un mejor desempeño, hasta que no se soportaron con modificaciones en sus estructuras físicas.

Las lecciones aprendidas en la construcción de esta última versión se presentan a continuación:

1. Para fabricar la pinza, se requiere que la forma, dimensiones y apertura máxima de la pinza, sean adecuadas al espacio y medio donde se realizará el ensamble. Es importante considerar que la pinza deberá tener alguna forma de detección de colisión, por lo que el tipo, tamaño, cantidad y ubicación de los sensores que se monten sobre la pinza requieren también ser considerados en el diseño y construcción de ésta. Si se desea que el ensamble sea flexible, se requiere que la pinza cierre lo suficiente para no soltar al robot que sujeta, pero que al mismo tiempo permita a los robots desplazarse con soltura, evitando sujetarse con rigidez e incapacitarse para desplazarse.
2. En el diseño y construcción del módulo de locomoción, se requiere considerar el peso del robot, así como diseñar y construir una base para los motores que permita sujetarlo y que provea espacio suficiente para la adaptación de sensores de rotación.
3. Es importante considerar en la selección del emisor IR, el alcance y el ángulo de su campo de acción. En esta tesis empleamos el sensor IR integrado en la Handyboard©.

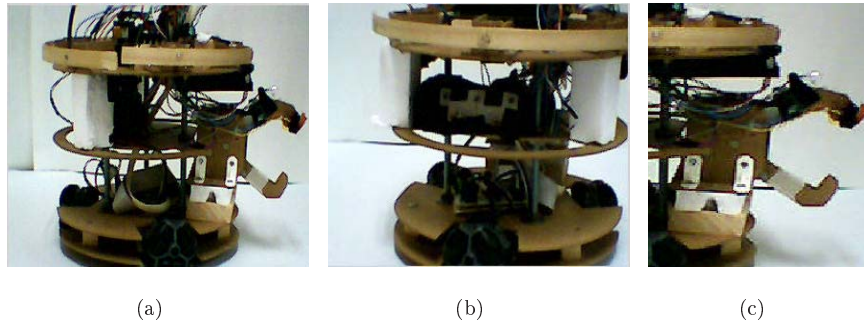


Figura 4.6: (a) Prototipo Mini-trans 2.3, (b) Parte trasera del robot donde se encuentra el medio de ensamble y los *leds* y fotosensores, ubicados en la tercera placa del robot y (c) Pinza construida con material de fibracel y 2 engranes.

4.2.2. Otros aspectos de la construcción del prototipo

Cada módulo fue equipado con una tarjeta controladora Handyboard©, una pinza para ensamble colocada en la parte frontal del robot, un sistema de locomoción con tres llantas omnidireccionales, un cinturón de contacto, fotoresistores, *leds* de luz blanca, emisor IR y transmisor IR. En este apartado se describen las características de la construcción de la pinza, el cinturón de contacto, la fase de locomoción y las características de la tarjeta controladora; elementos que equiparon a cada módulo, así como los detalles de construcción de los elementos que fueron diseñados y construidos por nosotros.

4.2.2.1. Pinzas

La construcción de la pinza requirió una inversión considerable de tiempo, pues fue muy difícil lograr la precisión requerida por la dificultad de corte de piezas pequeñas y ajustes en sus engranes. Siete tipos de pinzas fueron diseñados y construidos para equipar a los módulos Mini-trans, las cuales se muestran en la figura 4.7. La primera pinza ((a) y (b)) fue muy larga (aproximadamente 19 *cm* de largo), débil y difícil de controlar con un servomotor. La segunda (c) fue muy difícil de construir debido a que sus piezas eran pequeñas y difícil de detallar con las herramientas que se tenían. Esta segunda pinza fue débil y tenía corta apertura (aproximadamente 4 *cm* de apertura). La tercera pinza (d) tenía forma de tijeras y una apertura de 7 *cm*. Era débil, larga (aproximadamente 13 *cm*) y difícil de adaptar a un servomotor para su control. La cuarta pinza (e) consistió en dos dedos manejados por hilos y resortes. Su operación

fue deficiente y compleja debido a la coordinación requerida de los hilos. La quinta pinza (f) estuvo basada en el prototipo anterior, pero fue controlada por dos engranes. La sexta pinza (g) fue similar a la quinta, pero con 4 engranes dispuestos de tal forma que permitieron una mayor apertura de la pinza (aproximadamente 17 *cm* de apertura). Las pinzas (f) y (g) presentaron dificultad en el ajuste de los engranes, quedando flojas o muy ajustadas al momento de accionar, proveyendo una sujeción deficiente. La séptima y última pinza (h) fue elaborada empleando ejes y engranes de un equipo de videograbadora. Un engrane fue ajustado al servomotor y al dedo superior de la pinza y el otro engrane fue ajustado al dedo inferior de la pinza. La firmeza y precisión entre engranes y ejes evitaron el desajuste de los engranes y un mejor desempeño de la pinza al sujetar. Su espacio de apertura es de aproximadamente 13 *cm*. Sin embargo, al ser colocada sobre la placa de ensamble en el robot, su espacio de apertura se redujo a 6 *cm*, siendo aún un espacio suficiente para las operaciones de ensamble y desensamble.

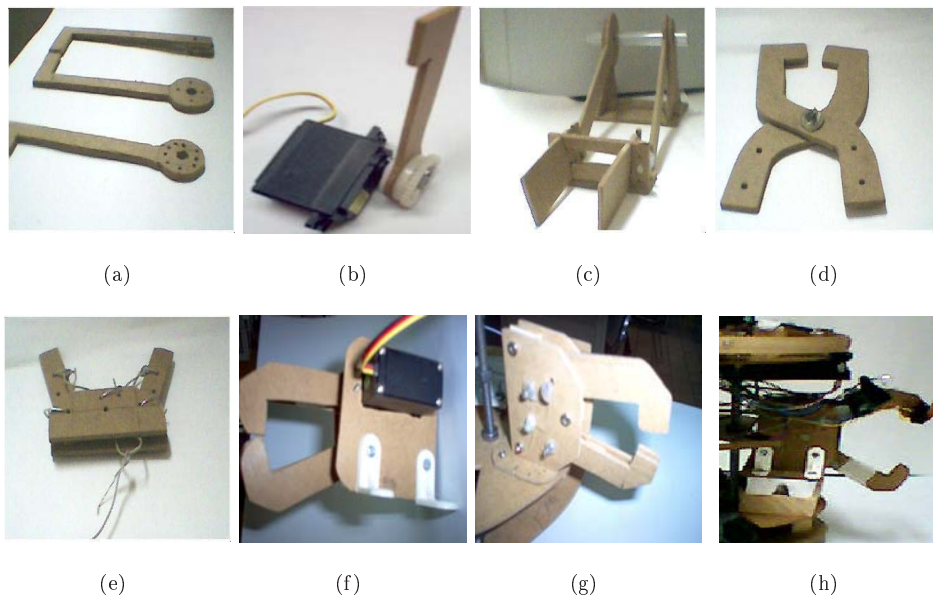


Figura 4.7: Diferentes prototipos de pinzas fueron realizados y probados para ser empleados en los módulos del Mini-trans. Dichos prototipos fueron descartados debido a su poca resistencia, su tamaño inapropiado, sus problemas para ser ajustados y controlados por el servomotor y por la longitud de apertura. La última versión (h) fue elegida para equipar los módulos del Mini-trans debido a su tamaño y firmeza (5.5 *cm* de mecanismo más 6 *cm* específicamente de la pinza) y a la apertura de la pinza (6 *cm*).

4.2.2.2. Cinturón de contacto

Se diseñó y construyó un cinturón de contacto con 6 microinterruptores. Los microinterruptores fueron colocados aproximadamente a 60° sobre la cuarta placa del robot. Para poder percibir una colisión alrededor del robot, cada microinterruptor fue colocado en una pequeña caja de fibracel, la cual contiene un eje de madera. Los ejes de madera están conectados a un cinturón de madera plano que conecta a más de un microinterruptor de tal forma que si una colisión se produce entre dos microinterruptores, uno de los dos sensores se activa. La figura 4.8 ilustra el cinturón de contacto.

4.2.2.3. Locomoción

El sistema de locomoción se ubicó entre las capas 1 y 2 de cada robot. Se emplearon tres llantas comerciales colocadas en forma simétrica, permitiendo un desplazamiento omnidireccional al robot. Se emplearon tres motores, uno para cada llanta. Para adaptar las llantas a los motores, se colocaron ejes de nailon. A cada motor le fue adaptado también un *shaft encoder* construido por nosotros, el cual emplea un opto-interruptor IR. El esquema del arreglo de llantas se ilustra en la figura 4.9. La figura 4.10 ilustra el proceso de construcción del arreglo de llantas en cada robot.

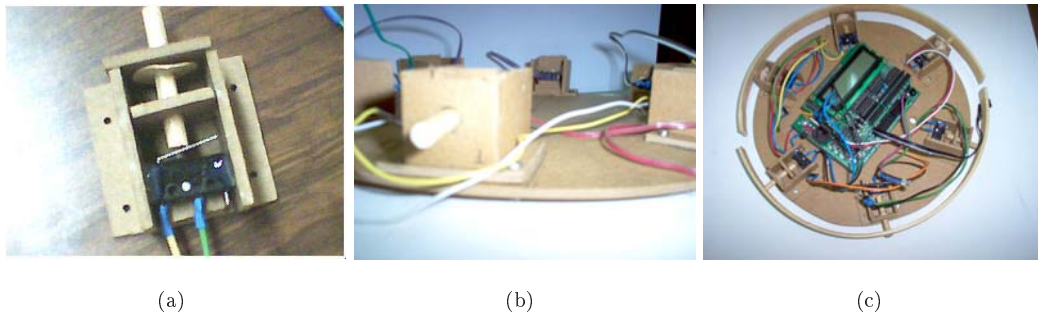


Figura 4.8: (a) Microinterruptor de contacto. (b) Colocación del sensor de contacto sobre la placa de fibracel. (c) Conexión de los microinterruptores en el cinturón de madera alrededor de la placa de fibracel.

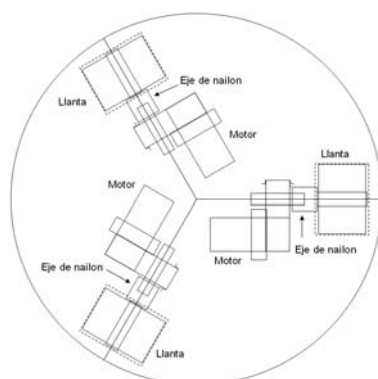


Figura 4.9: Arreglo de llantas de un módulo Mini-trans.

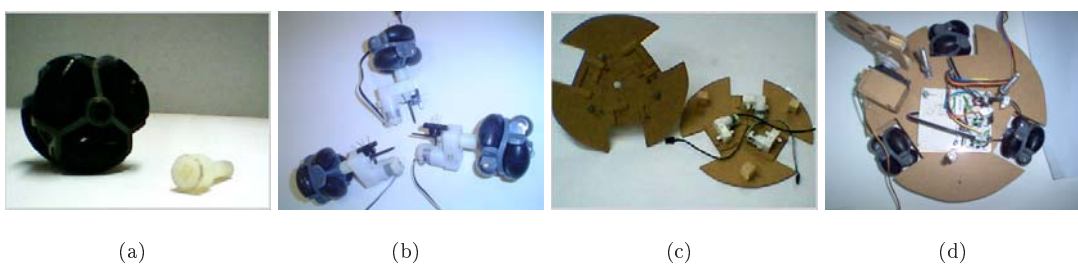


Figura 4.10: (a) Llanta omnidireccional y un eje. (b) Llantas adaptadas al motor por medio de ejes de nailon, así como sensor de rotación sobre el motor. (c) Forma en que fueron colocadas las llantas en la placa. (d) Elementos de locomoción y tarjeta de adaptación de voltaje para los motores en el centro de la placa. Los elementos de la locomoción de cada módulo se colocaron entre dos capas de fibracel.

4.2.2.4. Tarjeta de adaptación de voltaje para motores

Debido a que el voltaje de la Handyboard© (apéndice B) es de 9.6 V en los puertos de salidas para los motores y el voltaje requerido para cada motor es de 5.0 V , se construyó una tarjeta de adaptación de voltaje para los motores, la cual reduce los 9.6 V a 5.0 V . Esta tarjeta tiene una fase de regulación de voltaje y tres puentes H , uno para cada motor. Los diagramas de construcción de esta tarjeta se incluyen en el apéndice C.

4.3. Control

En esta sección se establecen especificaciones de un sistema multi-robot, se presenta la arquitectura de control empleada por el sistema Mini-trans, así como sus características de percepción, acciones simples y comportamientos.

4.3.1. Especificación general

En este apartado se caracteriza de manera genérica un sistema multi-robot.

Definimos a una colonia C como un sistema compuesto por una tupla de robots SMR que se encuentran inmersos en un ambiente físico A .

$$C = \langle SMR, A \rangle$$

Un SMR es un conjunto de robots que tienen capacidades específicas y exhiben comportamientos.

$$SMR = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\} \text{ y } \mathbf{R}_i = \{\mathbf{Ca}, \mathbf{Co}\},$$

en donde:

\mathbf{R}_i representa el conjunto de robots que conforman el sistema, donde $i = 1, 2, \dots, n$.

\mathbf{Ca} representa el conjunto de habilidades que un robot del conjunto es apto de realizar, por ejemplo, percibir su ambiente o comunicarse.

\mathbf{Co} representa el conjunto de comportamientos que un robot puede realizar de manera individual o colectiva, por ejemplo *avanzar*, *evitar obstáculos*, *solicitar ayuda*. Estos comportamientos se conforman a partir de los elementos de \mathbf{Ca} . Los comportamientos pueden ser básicos \mathbf{CoB} o compuestos \mathbf{CoC} . \mathbf{CoB} está integrado por \mathbf{Ca} y percepción del ambiente. \mathbf{CoC} está conformado por \mathbf{Ca} , percepción del ambiente y por otros \mathbf{CoC} .

El ambiente A se define por los siguientes elementos y sus valores:

Dimensión (D): área en metros cuadrados.

Superficie (S): plana, inclinada, irregular o extrema.

Forma (F) : circular o poligonal (cuadrada, rectangular, triangular, etc.).

Tipo (T) : cerrado o abierto.

Iluminación (I) : medidas en lúmenes (lux).

Objeto (Obj): elemento a ser trasladado por el SMR.

Un **Obj** se define por las siguientes características:

F_{obj} : forma poligonal, cilíndrica, esférica.

V_{obj} : volumen en centímetros cúbicos.

P_{obj} : peso en kilogramos.

4.3.2. Especificación del sistema Mini-trans

$\mathbf{C} = \langle \text{SMR}, \mathbf{A} \rangle$, donde

$\text{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$,

$\mathbf{R}_i = \{\text{Ca}, \text{Co}\}$,

$\mathbf{Ca} = \{$ Detección de colisiones,
 Percepción de señales infrarrojas (IR),
 Percepción de señales luminosas,
 Detección de intensidades de luz en la parte frontal, izquierda y derecha del robot,
 Detección de un obstáculo entre la pinza, cuando ésta está cerrada,
 Emisión de señales IR,
 Emisión de señales luminosas,
 Activación y desactivación de motores (1,2,3),
 Activación y desactivación servomotor,
 Espera. }

La comunicación IR entre los robots es realizada empleando 7 tipos de mensajes diferentes descritos en la sección 4.3.3.2.

$\mathbf{Co} = \{$ evadir obstáculos, buscar objeto, recibir liderazgo, ceder liderazgo, ajustar posición, ensamblarse, desensamblarse, alinearse, consensar, desafiar, jerarquizar, acercarse, tocar objeto, empujar, navegar, identificar obstáculo, seguir pared, reclutar robots, establecer líder, seguir líder, desplazarse en forma ensamblada, cambiar de dirección, empujar un objeto de interés }

En la sección 4.3.4, las **Ca** y los **Co** se integrarán en la arquitectura de control del sistema multi-robot Mini-trans.

Las propiedades del ambiente en que se desenvuelve el sistema Mini-trans se describen en el capítulo 5, donde se reportan los experimentos realizados.

4.3.3. Capacidades del sistema

En este apartado, se describen cada una de las capacidades individuales y colectivas de los módulos que conforman el sistema Mini-trans.

4.3.3.1. Percepción

La percepción del ambiente por cada uno de los robots está limitada a las capacidades de sus sensores, los cuales proporcionan información pertinente del ambiente que puede ser empleada para tomar decisiones. Como se estableció en los requerimientos, los robots deben ser capaces de reconocer un objeto a través de intensidades de luz, dichas percepciones se detallan en esta sección.

A continuación se presentan las capacidades de percepción de cada uno de los robots del sistema Mini-trans.

- Detección de intensidad de luz en la parte frontal, izquierda y derecha del robot.
- Detección de intensidad de luz en la parte trasera y delantera del robot.
- Detección de colisiones del robot con algún obstáculo.
- Detección de un obstáculo entre la pinza, cuando ésta está cerrada.
- Percepción de señales IR.

La percepción permite al robot:

- Orientarse hacia la mayor intensidad de luz captada
- Identificar señales de luz intermitentes, las cuales representan diferentes mensajes, tales como: `aproximarse en forma lateral`, `alejarse en forma lateral`, `retroceder`, `desensamblarse`.
- Saber cuándo y en qué zona de su cuerpo ha colisionado, de tal forma que pueda evadirlo.
- Saber si el ensamble se ha realizado o no.

- Recibir mensajes enviados por otro robot (ver sección 4.3.3.2).

En el apéndice D.1 se presentan las funciones de percepción empleadas en el control del sistema Mini-trans.

A continuación se presentan los tipos de comunicación por IR y señales luminosas.

4.3.3.2. Comunicación IR

Aunque existen protocolos de comunicación establecidos como son *KQML (Knowledge Query and Manipulation Language)* (KQML-url) y *FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)* (FIPA-url), éstos protocolos no eran adecuados a las condiciones de nuestro sistema debido al conocimiento requerido por los robots para su uso, por lo que se prefirió definir un protocolo propio, el cual consiste principalmente en una comunicación de bajo nivel.

Cada robot está equipado con un emisor IR y un receptor IR. La comunicación entre robots se establece cuando dos robots han recibido señales mutuamente. La comunicación entre los robots se lleva a cabo de forma directa e indirecta, síncrona y puntual. Directa, cuando un robot transmite una señal IR a un robot específico. Indirecta, cuando un robot envía una señal IR sin especificar un robot destinatario. Síncrona, debido a que después de que un robot envía una señal, espera una respuesta de otro robot. En este caso, la espera de la respuesta es realizada durante un tiempo específico. Y puntual, debido a que los robots tienen que estar alineados en forma precisa uno frente al otro debido a que el receptor IR se encuentra ubicado en la parte frontal de la Handyboard©. Los robots pueden emitir o recibir información pero no pueden realizar ambas acciones a la vez. Cuando la emisión se realiza, se bloquea la recepción y viceversa.

Los mensajes que pueden enviarse o recibirse constan de dos *bytes b1b2*. Los 4 *bits* más significativos de *b1* representan el ID del robot origen (*robot_o*), el cual envía el mensaje, mientras los 4 *bits* menos significativos de *b1* representan el ID del robot destino (*robot_d*), al cual va dirigido el mensaje. Algunos mensajes requieren precisar detalles, lo cual se hace con el byte *b2*. *b2* representa lo que llamamos código del mensaje que se desea transmitir. El mensaje completo tiene la forma [*robot_o*][*robot_d*][código].

A continuación se describen los 7 tipos de mensajes con los diferentes códigos que pueden transmitir o percibir los robots.

1. *Solicitud de unión*: Se emplea para solicitar a cualquier robot que perciba su señal que se unan en forma ensamblada. Este tipo de mensaje no requiere mayores

- precisiones y emplea el código número 1.
2. *Notificación de mensaje recibido*: Se emplea para notificar a un robot que se ha recibido su mensaje y que se está solicitando lo mismo. Este tipo de mensaje requiere mayores precisiones, que indiquen el mensaje específico al cual se responde. Para ello se le suma 1 al código del mensaje recibido. Por ejemplo, si un robot desea contestar una solicitud de unión a otro robot, envía un mensaje con código 2.
 3. *Notificación de listo*: Se emplea para notificar a otro robot que se está listo para iniciar un comportamiento, por ejemplo, el ensamble. Este tipo de mensaje no requiere mayores precisiones y emplea el código número 3.
 4. *Desafío*: Se emplea para solicitar a otro robot que genere un número aleatorio y que lo notifique, para establecer cuál de los dos será el robot líder y cuál será el robot seguidor. Este tipo de mensaje no requiere mayores precisiones y emplea el código número 17.
 5. *Notificación de número aleatorio*: Se emplea para notificar a un robot desafiado el número aleatorio que se ha generado. Este tipo de mensaje requiere mayores precisiones, por lo que se basa en el procedimiento descrito para notificación de mensajes recibidos (tipo de mensaje 2). Debido a que el mensaje recibido fue *Desafío*, la notificación a este mensaje es 18. A este valor se le suma un número aleatorio generado entre 1 al 10. Por ejemplo, si el número aleatorio generado es 8 entonces el código del mensaje que se enviará es 26.
 6. *Consenso*: Se emplea para solicitar el número de robots reclutados por otro robot con el cual se está comunicando, para decidir cuál de los dos será establecido como líder y cuál cambiará su estado de robot líder, a robot seguidor. Este mensaje emplea el número de código 29.
 7. *Notificación del número de robots reclutados*: Se emplea para notificar a un robot con el cual se quiere llegar a un consenso, el número de robots reclutados. Este mensaje requiere mayores precisiones, por lo que se basa en el procedimiento descrito para notificación de mensajes recibidos (tipo de mensaje 2). Debido a que el mensaje recibido fue *Consenso*, la notificación a este mensaje es 30. A este valor se le suma un número de robots reclutados. Por ejemplo, si el número de

robots reclutados es 2, entonces el código del mensaje que se enviará es 32.

Ejemplo: R1 desea desafiar al robot R2, entonces R1 envía el siguiente mensaje [R1][R2][código]. Si el código de desafío es 17, el ID de R1 es 1 y el ID de R2 es 2, entonces el mensaje a enviar es: [1][2][17], el cual es transformado en *bits* como: [0001][0010][00010001].

Las funciones empleadas para establecer comunicación entre los robots, es decir, envío y recepción de mensajes, se presentan en el apéndice D.2.

4.3.3.3. Comunicación con señales luminosas

Cada robot está equipado con *leds* que emiten señales luminosas y con fotoresistores para captar dichas señales. Un *led* y un fotoresistor fueron colocados en la parte superior de la pinza. Dos *leds* y tres fotoresistores fueron colocados en la parte trasera del robot. La comunicación con señales luminosas se emplea cuando los robots están ensamblados, quedando posicionados los *leds* y la pinza uno frente al otro. Cuando el robot delantero quiere transmitir un mensaje al robot ensamblado a él, emite señales luminosas a diferentes frecuencias activando y desactivando el *led*. El tiempo de emisión de la señal es realizado durante un tiempo establecido de 10 *segundos*. Cuando un robot desea leer una señal transmitida por el robot trasero empleando un *led* sobre su pinza, activa sus fotoresistores para detectar cambios de intensidades de luz durante un tiempo establecido 10 *segundos*. Las frecuencias establecidas para cada tipo de mensaje fueron elegidas de acuerdo a una serie de pruebas realizadas, para evitar en lo posible confusión de una señal con otra.

A continuación se presentan los 7 tipos de mensajes empleados por un robot para emitir y leer un mensaje en la forma de señales luminosas.

1. Ordenar retroceso: Se activa y desactiva el *led* cada 3.5 *segundos* durante 10 *segundos*.
2. Ordenar acercamiento: Se activa y desactiva el *led* cada 1.6 *segundos* durante 10 *segundos*.
3. Ordenar alejamiento: Se activa y desactiva el *led* cada 1.0 *segundos* durante 10 *segundos*.
4. Ordenar giro: Se activa y desactiva el *led* cada 0.5 *segundos* durante 10 *segundos*.
5. Ordenar cambio de dirección: Se activa y desactiva el *led* cada 0.2 *segundos* durante 10 *segundos*.

6. **Notificar ensamble realizado:** Se activa y desactiva el *led* cada 1.0 *segundos* durante un tiempo máximo de 10 *segundos*.
7. **Notificar desensamble realizado:** Se activa y desactiva el *led* cada 1.5 *segundos* durante un tiempo máximo de 10 *segundos*.

Durante un lapso de 10 *segundos*, se contabiliza el número de cambios de intensidad de luz percibidos, y de acuerdo a este número se identifica el mensaje transmitido. Como podrá apreciarse, hay un par de mensajes con códigos repetidos, el robot distingue entre ellos de acuerdo a la situación en la que se encuentra. Las órdenes son emitidas por un robot a otro robot que se encuentre conectado a él. Las notificaciones en cambio, son empleadas por el robot conectado a otro robot para notificarle alguna acción realizada, en este caso, el ensamble o desensamble realizado. Por ejemplo, si R2 se encuentra conectado a R1 y R1 ordena a R2 que lo desensamble, R2 notifica a R1 cuando el desensamble se ha realizado.

Cuando los robots se encuentran ensamblados, el sistema multi-robot emplea un método de comunicación por **propagación** empleando la emisión de señales luminosas y la lectura de intensidades de luz con los fotoresistores. Este método consiste en la transmisión de un mensaje del robot líder al robot seguidor ensamblado a él, y de éste a su vez al robot seguidor conectado a él y así sucesivamente.

Para que la comunicación logre darse, se requiere que los robots se sincronicen en la transmisión y recepción de información. En este trabajo empleamos dos formas de realizar esta tarea, que se describen en la sección 4.3.5.2.

4.3.3.4. Capacidades específicas o acciones simples (Ca)

Las capacidades específicas o acciones simples (**Ca**) del robot, son aquellos comandos directos a los actuadores del robot. Cada robot del sistema Mini-trans es capaz de realizar 5 acciones simples, las cuales se describen a continuación.

1. **avanzar:** Envía órdenes a los motores para accionar las llantas correspondientes y permitir que el robot avance un tiempo t específico. El robot avanza hacia alguna dirección dependiendo de los parámetros recibidos. La dirección de avance puede ser hacia adelante, hacia atrás, hacia la derecha, hacia la izquierda y en forma diagonal.

2. **girar**: Envía órdenes a los motores para que el robot gire un número de grados. El robot gira hacia alguna dirección dependiendo de los parámetros recibidos. La dirección de giro puede ser a la derecha o a la izquierda, sobre su eje central o sobre el eje de una de sus llantas.
3. **detenerse**: Ordena a los motores detenerse, desactivándolos.
4. **abrir_pinza**: Envía la orden al servomotor para que se abra la pinza.
5. **cerrar_pinza**: Envía la orden al servomotor para que se cierre la pinza.
6. **esperar**: El robot espera un tiempo t establecido antes de ejecutar la siguiente acción o comportamiento.

4.3.3.5. Comportamientos (Co)

A continuación presentamos los comportamientos de cada módulo, divididos en conductas básicas o comportamientos básicos (CoB) y comportamientos complejos (CoC) (c.f. sección 1.4.2.1). Los comportamientos más relevantes se acompañan de sus respectivos autómatas de control. Recordemos que un autómata es un conjunto de estados, unidos por transiciones que indican las condiciones que se deben cumplir para pasar de un estado a otro. En el caso de los autómatas que representan la actuación de un robot, los estados son los comportamientos del robot y las transiciones equivalen a condiciones que se verifican por medio de la percepción del robot, por ejemplo, si un microinterruptor está activado o desactivado, si se recibió o no un mensaje, etc.

4.3.3.5.1. Comportamientos básicos CoB Los comportamientos básicos (CoB), son conductas que el robot puede realizar a partir de los componentes de **Ca** y de las percepciones. A continuación se describen los comportamientos básicos que cada robot del sistema puede realizar.

1. **evadir_obstáculos**: Cuando el robot percibe un obstáculo o detecta una colisión, realiza un proceso de retroceso y giro, avanzando en sentido contrario a la colisión u obstáculo detectado. El retroceso se realiza principalmente para evitar la fricción de la pinza con el obstáculo.
2. **buscar_objeto**: Existen dos tipos de búsqueda de objeto:

- Cuando el robot está navegando, realiza n lecturas de intensidad de luz en el ambiente en su periferia, realizando procesos de detección, lecturas y giros de 0.5 *segundos*, hasta realizar un barrido mayor o igual a 360° . El robot se orienta hacia donde haya captado la mayor intensidad de luz.
 - Cuando el robot está ejecutando el comportamiento `empujar_objeto`, busca el objeto ejecutando el comportamiento de `acercarse` y las acciones simples de `avanzar (hacia atrás)`, `avanzar (hacia adelante)` y `detenerse`. Algunas veces, el proceso de `buscar_objeto` sólo emplea los comportamientos `acercarse` y `detenerse`, como se muestra en las pruebas realizadas presentadas en el capítulo 5.
3. `recibir_liderazgo`: Si el robot que ha ganado el liderazgo tiene otro robot ensamblado a él, le solicita que lo suelte y que espere para recibir posteriormente el liderazgo, realizando un proceso de cambio de dirección. Una vez que el robot trasero suelta al robot que ha ganado el liderazgo o éste se encuentra no sujetado por otro robot, el robot gira aproximadamente 180° y avanza hacia atrás hasta colisionar con el robot que le cederá el liderazgo, se detiene y permite que lo sujete (c.f. sección 5.2.6).
 4. `ceder_liderazgo`: El robot que se estableció como robot `seguidor` cede el liderazgo al robot que se estableció como robot `líder`, ensamblándose a él. Las acciones simples que comprende este comportamiento son `abrir_pinza`, `cerrar_pinza` y `detenerse`. Una vez que se ha cedido el liderazgo, se procede a ejecutar el comportamiento de `seguir_líder`. Este procedimiento se lleva a cabo por el autómata de la figura 4.12.
 5. `ajustar_posición`: Existe dos tipos de ajuste de posición:
 - Cuando el robot que está recibiendo el liderazgo de otro robot ha colisionado en su parte trasera con el robot que está cediendo el liderazgo, realiza una especie de ‘sacudida’ para asegurar que la pinza lo sujetará por completo.
 - Cuando el robot seguidor detecta que el robot líder ha girado, procede a posicionarse detrás del robot líder realizando movimientos curvilíneos

para quedar alineado detrás del robot al cual sujeta.

6. **ensamblarse**: El robot abre y cierra la pinza y verifica si se realizó el ensamble o no.
7. **desensamblarse**: El robot abre su pinza y espera a que el robot al cual sujeta se separe de él, cuando ya no percibe al robot que sujetaba, nuevamente cierra su pinza.
8. **alinearse**: El robot tratando de alinearse con otro robot, realiza giros pequeños de 10° aproximadamente y se detiene para enviar mensajes IR de solicitud de unión y espera recibir un mensaje IR de respuesta de otro robot. Si en el proceso de alinearse, se recibe una respuesta de otro robot, el robot se detiene y determina que ha logrado alinearse, de lo contrario, determina que no se logró el alineamiento. Este comportamiento comprende las acciones simples **girar** y **detenerse**.
9. **consensar**: El robot origen (**robot_o**) se detiene y envía mensajes IR al robot con el que se ha establecido comunicación (**robot_d**). El mensaje enviado tiene el propósito para consensar, solicitando al **robot_d** el número de robots que ha reclutado. Cuando el **robot_d** notifica que ha recibido su mensaje y el número de robots que ha reclutado, el **robot_o** compara los datos y si éstos son iguales, entonces se deben desafiar; si no es así, establecen como líder al robot que ha reclutado más robots.
10. **desafiar**: El **robot_o** se detiene y envía mensajes IR al **robot_d** para desafiarlo, solicitando al **robot_d** que genere un número aleatorio y lo notifique, a su vez, el robot que desafía notifica su número aleatorio generado. Cuando el **robot_d** notifica que ha recibido el mensaje y el número de robots que ha reclutado, el robot desafiante compara los datos y si éstos no son iguales, establecen como robot líder al robot que generó el número aleatorio mayor. En caso de que los números generados sean iguales, el establecimiento del robot líder se realizará por medio del comportamiento **jerarquizar**.
11. **jerarquizar**: El **robot_o** se detiene y compara su ID con el del **robot_d**. Si el ID del **robot_d** es mayor al ID del **robot_o**, entonces considera como líder al **robot_d** y el **robot_o** se establece como robot **seguidor**.
12. **acercarse**: El robot avanza un tiempo t en la dirección de búsqueda del objeto,

cuando aún no lo percibe.

13. **tocar_objeto**: El robot avanza hacia el objeto, mientras lo perciba y no lo toque. Se detiene cuando toca al objeto.
14. **empujar**: Una vez que el robot ha tocado al objeto procede a avanzar en una dirección específica, empujando el objeto.

4.3.3.5.2. Comportamientos compuestos (CoC) Los comportamientos compuestos **CoC** son conductas que el robot puede realizar empleando **CoB** y otros **CoC**. Inicialmente cada robot tiene categoría de **líder**. Cuando un robot encuentra a otro robot y ambos establecen comunicación, tratan de ponerse de acuerdo para ensamblarse, requiriendo determinar quién se ensamblará a quién. Para decidir el orden de ensamble, los robots tratan de establecer quién de los dos será el **líder** o robot que recibe el liderazgo y quién será el robot **seguidor** o robot que cede el liderazgo.

A continuación se describen los comportamientos compuestos de los robots Mini-trans.

1. **navegar**: El robot realiza repetidamente el comportamiento de **buscar objeto** y de **avanzar** un tiempo t en dirección en donde fue captada la mayor intensidad de luz. Si detecta algún obstáculo en algún momento, lo evade y repite las acciones **avanzar** y **detenerse** y los comportamientos **buscar_objeto** y **evadir_obstáculo** hasta llegar al objeto y detenerse cerca de él.
2. **identificar_obstáculo**: El robot que ha detectado una colisión en su área frontal, trata de identificar si el obstáculo con el que colisionó es un robot o no. El robot se aleja del objeto o robot con el que colisionó retrocediendo un poco y busca a otro robot en un radio frontal de aproximadamente 120° , tratando de alinearse con él. Si el alineamiento se logra y se logra recibir una señal de otro robot, el robot identifica al obstáculo como un robot, de lo contrario, lo identifica como obstáculo. Este comportamiento lo integran las acciones simples y comportamientos **avanzar (hacia atrás)**, **detenerse** y **alinearse**.
3. **seguir_pared**: El robot se desplaza en forma paralela al objeto, mientras lo perciba. Si el robot deja de percibir el objeto, realiza un máximo de tres acercamientos en dirección de donde debiera estar el objeto. Si después de los tres intentos no percibe el objeto, el robot realiza un giro de aproximadamente 20° y se detiene,

- repetiendo el proceso. Si el robot colisiona, trata de identificar el obstáculo. Si el obstáculo es un robot entonces retorna el ID del robot con el que colisionó, si no es así, continúa rodeando el objeto.
4. **reclutar_robots**: Se ejecuta el comportamiento `sigue pared` mientras no se establezca comunicación con otro robot. Cuando se ha establecido comunicación con otro robot, se procede a `establecer_líder` y si se logra establecer, entonces los robots proceden a auto-ensamblarse ejecutando los comportamientos de `ceder_liderazgo`, `recibir_liderazgo` y `seguir_líder`. Este procedimiento se lleva a cabo por el autómata de la figura 4.14. El ensamble de los robots se realiza alrededor del objeto por decisión nuestra.
 5. **establecer_lider**: Cuando se ha establecido comunicación con un robot, se trata de establecer un líder entre los dos para decidir si se ensamblarán o no, quién cederá el liderazgo y quién se quedará como líder. Este comportamiento comprende a su vez los comportamientos compuestos `consensar`, `desafiar` y `jerarquizar` si es necesario. Este procedimiento se lleva a cabo por el autómata de la figura 4.11.
 6. **seguir_lider**: El robot sigue al robot líder de acuerdo a los mensajes percibidos; sin embargo, de acuerdo a su percepción local, el robot es capaz de `evadir obstáculos` si detecta una colisión en forma lateral y de `avanzar` cuando no percibe al robot líder frente a él. Esto permite que el robot `seguidor` no dependa en su totalidad del robot líder para ejecutar algún comportamiento. Este procedimiento se lleva a cabo por el autómata de la figura 4.15.
 7. **desplazarse_en_forma_ensamblada**: Consiste en el desplazamiento coordinado de dos o más módulos del sistema cuando éstos se encuentran ensamblados. El robot líder dirige al sistema, de acuerdo al comportamiento ejecutado, por ejemplo, `reclutar_robots`, `explorar` o `empujar_objeto`. Los robots seguidores ejecutan el comportamiento de `seguir_lider` o `cambiar_dirección`. Este procedimiento se lleva a cabo por el autómata de la figura 4.16.
 8. **cambiar_dirección**: Este proceso puede ser realizado por un robot individual o por un sistema ensamblado, en particular cuando se encuentran alrededor de un objeto:

- Cuando un robot está reclutando robots alrededor del objeto y ha colisionado más de tres veces, decide cambiar de dirección para explorar en sentido contrario. Para cambiar de dirección, el robot retrocede y gira aproximadamente 180° para continuar el reclutamiento de robots alrededor del objeto.
- Cuando un sistema ensamblado se desplaza alrededor del objeto y el robot líder de todo el sistema ensamblado ha colisionado más de tres veces, entonces decide cambiar de dirección, pero para ello requiere que todos los módulos que conforman el sistema ensamblado cambien su dirección. Para lograr este cambio de dirección se emplea el mecanismo de coordinación denominado de transferencia, descrito con mayor detalle en la sección 4.3.5.2.

Las acciones simples y comportamientos que integran el procedimiento de cambio de dirección por dos o más robots ensamblados son `abrir_pinza`, `cerrar_pinza`, `detenerse`, `avanzar`, `girar`, `recibir_liderazgo` y `ceder_liderazgo`. El autó-mata de la figura 4.16 presenta este proceso de cambio.

9. `empujar_objeto`: El o los robots buscan un objeto en un dirección específica ejecutando el comportamiento `acercarse`. En caso de no percibir el objeto, abandonan la tarea y concluyen que no hay objeto; en caso contrario, se dirigen hacia él hasta tocarlo y posteriormente proceden a avanzar hacia una dirección específica, manteniendo el contacto con el objeto en todo momento. Si durante el proceso de empujado, los robots dejan de percibir el objeto, se detienen. Este comportamiento ejecuta la acción simple `abrir_pinza` para el robot líder, ya que se requiere que la pinza se encuentra abierta para que los sensores de contacto en ella se activen si hay una colisión frontal.

Este comportamiento puede realizarse empleando o no comunicación. Con comunicación, el robot líder dirige la acción de empujado del objeto, notificando a los robots seguidores hacia dónde deben de moverse. Sin comunicación, los robots se encuentran ensamblados, pero cada uno decide qué acción ejecutar de acuerdo a su percepción local.

Este procedimiento comprende los comportamientos `acercarse`, `tocar_objeto` y `empujar`.

Algunas funciones auxiliares para la implantación de **Ca**, **CoC** y **CoC** se presentan en el

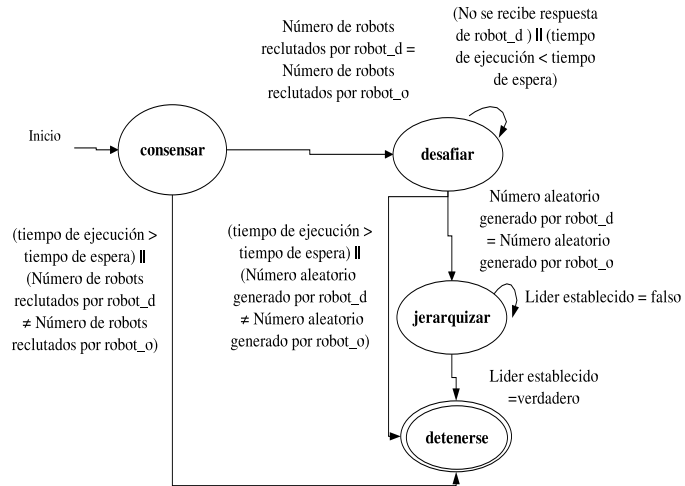


Figura 4.11: Establecimiento de un líder entre dos robots.

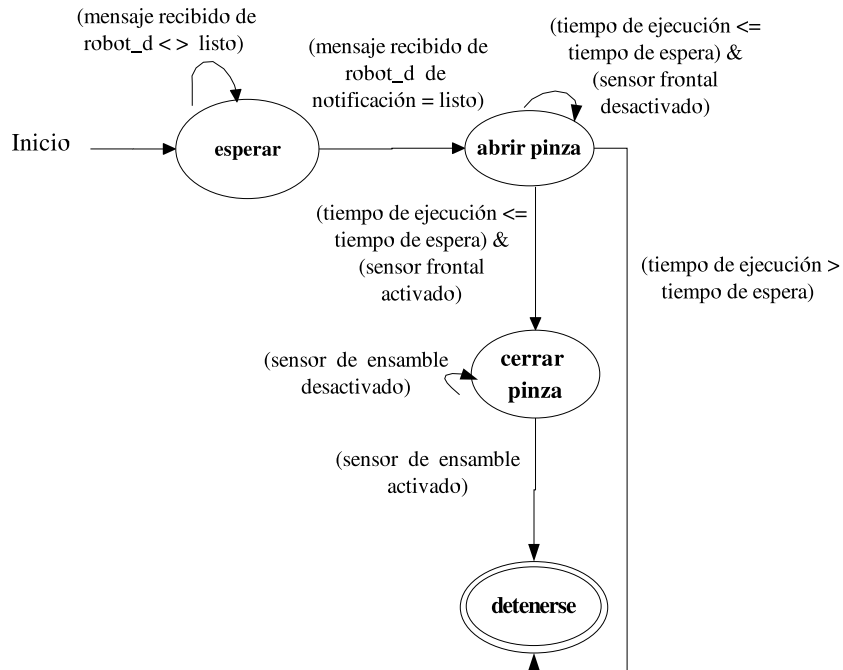


Figura 4.12: Cesión de liderazgo.

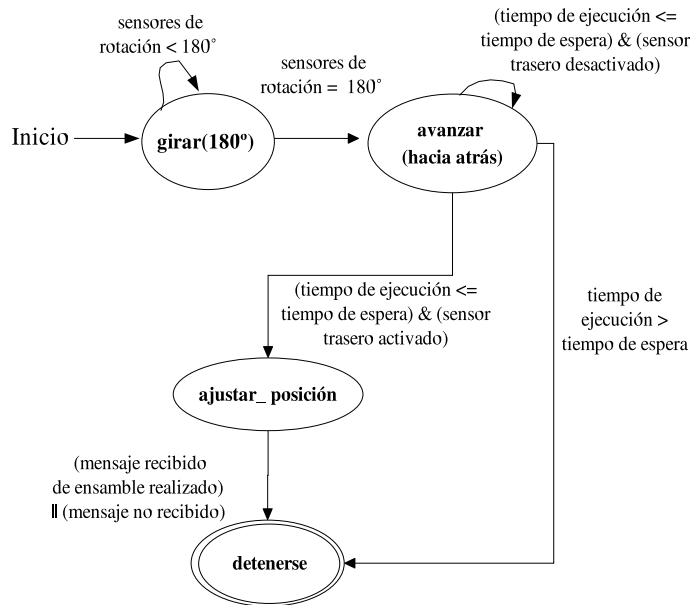


Figura 4.13: Recepción de liderazgo.

apéndice D.3.

4.3.4. Arquitectura de control

Los comportamientos individuales y colectivos de los módulos del sistema, fueron diseñados e implementados con base en la arquitectura Basada en el Comportamiento propuesta por Maja Mataric en 1994, debido a que esta arquitectura se basa en comportamientos integrados a partir de conductas básicas, para la realización de tareas globales. Se agregó un módulo de **memoria** a esta arquitectura de control para llevar registros de eventos anteriores que son importantes y retroalimentan al sistema. Estos registros consisten de variables globales que son actualizadas y consultadas por los comportamientos del sistema, para la toma de decisiones. Los comportamientos compuestos son los únicos que hacen uso de la memoria, teniendo la capacidad de escribir, borrar y leer de ella. En la figura 4.17 se muestra la arquitectura de control empleada para el sistema Mini-trans. En esta figura se presentan diferentes módulos por columnas como son de izquierda a derecha los **sensores**, las acciones simples (**Ca**), los comportamientos básicos (**CoB**), los comportamientos compuestos (**CoC**), los actuadores y un módulo de **memoria**. Las diferentes líneas continuas y punteadas presentadas en el esquema, representan las conexiones

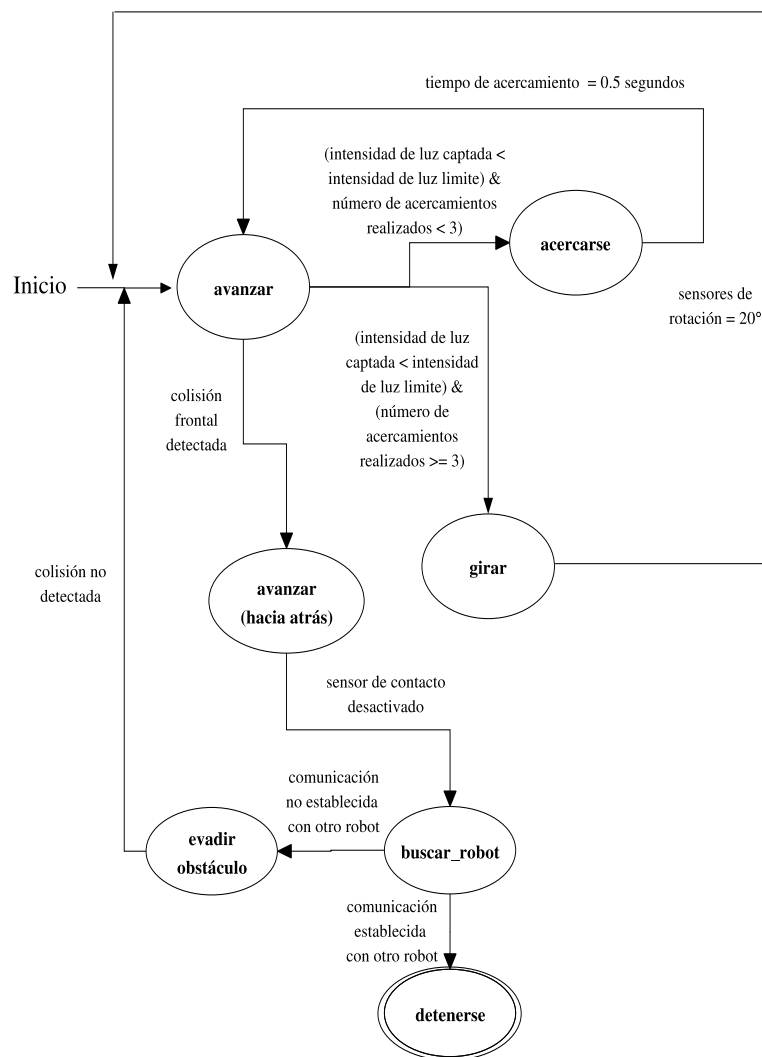


Figura 4.14: Reclutamiento de robots alrededor de un objeto.

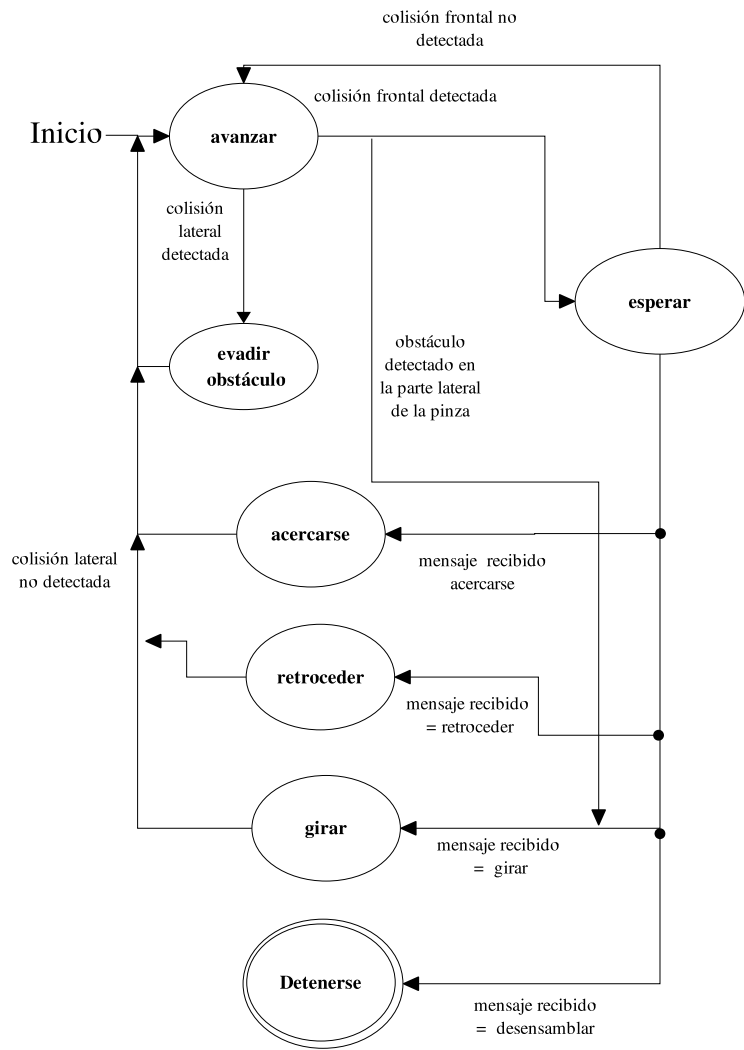


Figura 4.15: Seguimiento del robot líder.

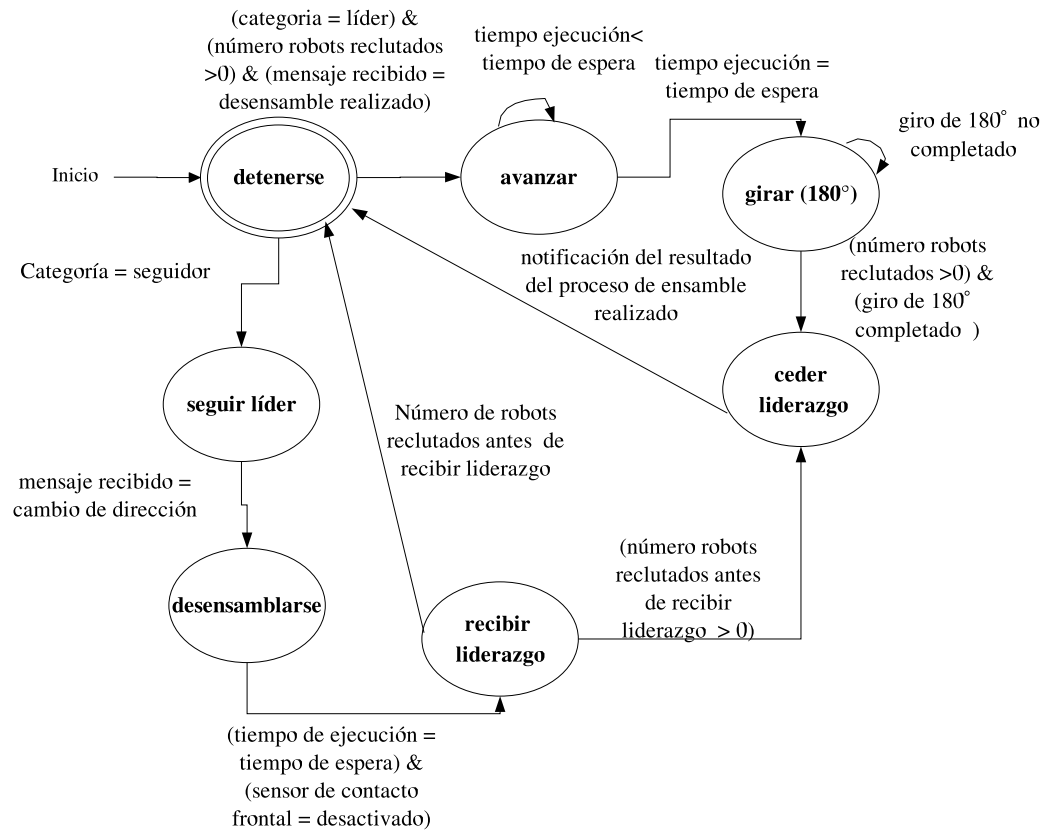


Figura 4.16: Cambio de dirección de un robot o un sistema ensamblado por dos o más robots.

entre los componentes de la arquitectura. Algunas de las líneas poseen un punto negro en el inicio de ella, indicando de qué módulo provienen, a diferencia de las puntas de flecha, que indican a dónde se conectan, es decir, qué módulo del esquema alimentan. El operador \otimes representa la combinación de múltiples acciones simples o comportamientos para integrar un comportamiento más complejo (c.f. 1.4.2.1), en este caso, para integrar **CoB** y **CoC**. Por ejemplo, la acción simple **abrir_pinza** hace uso de la información proporcionada por los fotoresistores. La acción simple **cerrar_pinza** hace uso de la información proporcionada por los sensores optoreflexivos. Por su parte, la información proporcionada por los fotoresistores, los sensores de rotación y la acción simple **avanzar** componen el comportamiento básico **empujar**. A su vez, el comportamiento **empujar** con los comportamientos básicos **tocar objeto** y **acercarse** componen el comportamiento compuesto **empujar objeto**. Este último comportamiento, activa los motores durante su ejecución, por lo que están conectados a él en el esquema. Las líneas más gruesas representan la conexión de los comportamientos con la memoria y viceversa.

4.3.5. Comunicación y coordinación

4.3.5.1. Formas de sincronizar la comunicación

En condiciones reales un mensaje se emite en un momento dado y no se guarda registro de él, por lo que los robots requieren sincronizarse para recibir los mensajes emitidos por otros robots y obtener información de ellos. Aunque los robots se encuentran equipados con elementos de comunicación, en este caso por señales IR y señales luminosas, no hay forma de sincronizar de forma externa los robots para establecer dicha comunicación. En esta tesis, se implementaron dos formas para lograr la sincronización de los robots y establecer comunicación, las cuales se describen a continuación.

Método de espera: El robot emisor espera que el robot que lo sujeta se detenga, para empezar a transmitir un mensaje con señales luminosas. El robot seguidor conectado al robot emisor no empieza a leer un mensaje mientras no perciba que se encuentra colisionando en forma frontal con el robot emisor. El tiempo t de emisión y recepción de un mensaje es el mismo empleado por los dos robots.

Método de ajuste: Si el robot seguidor empieza a recibir un mensaje durante en el tiempo t_1 , donde t_1 es menor a t , el tiempo de emisión y recepción de un mensaje empleado por los robots, el robot seguidor reinicializa su tiempo de espera para

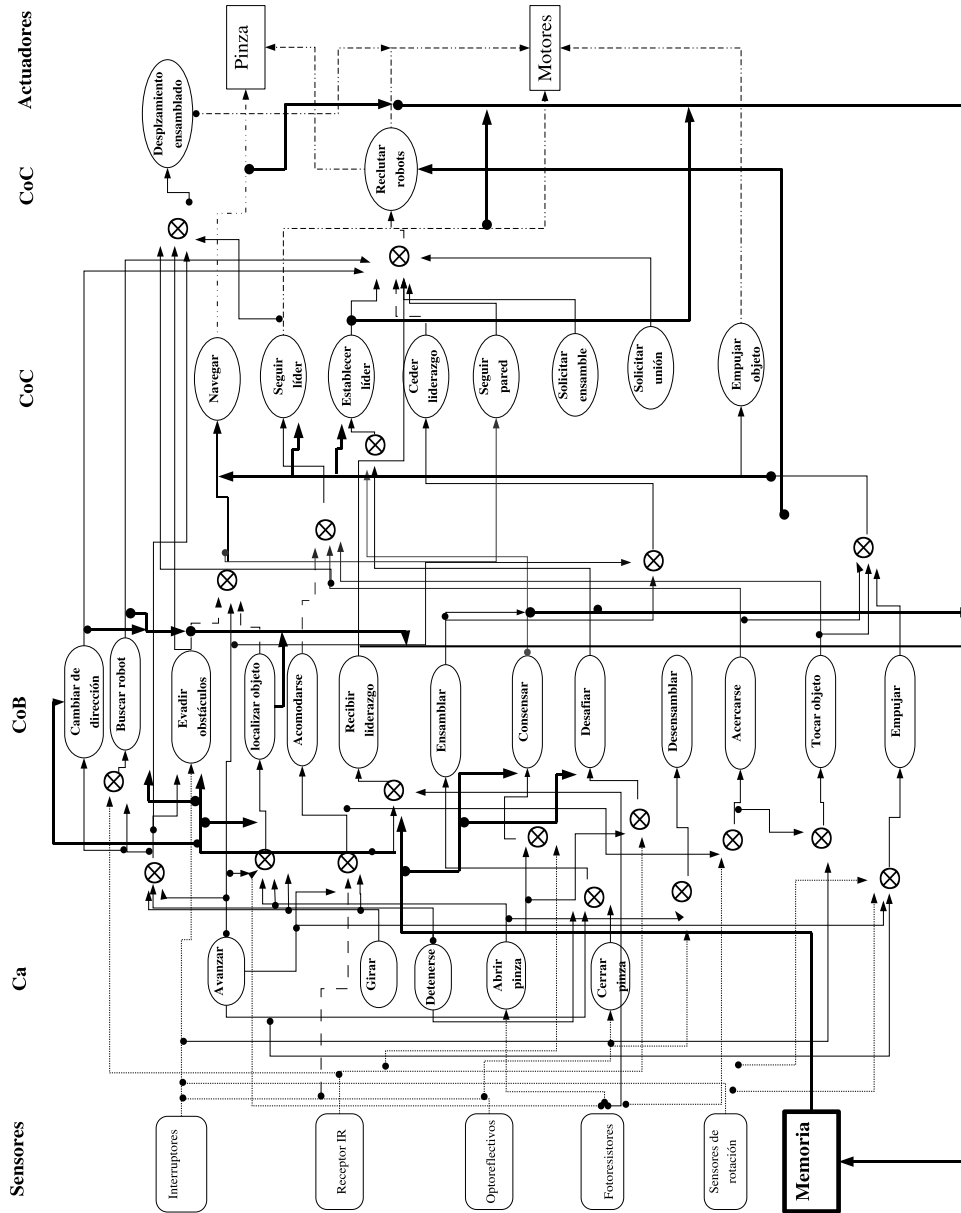


Figura 4.17: Arquitectura general de control empleada por el sistema Mini-trans basada en comportamientos de Mataric (2002) con una variante: una memoria que es consultada y actualizada por los comportamientos del sistema. **Ca** representa a las acciones simples, **CoB** representa los comportamientos básicos y **CoC** representa los comportamientos compuestos. El operador \otimes representa una combinación de acciones simples y comportamientos para integrar otro comportamiento (c.f. sección 1.4.2.1). La lectura del esquema se realiza de izquierda de derecha. Los diferentes estilos de línea fueron colocados para mayor legibilidad del esquema.

sincronizarse con el robot emisor.

4.3.5.2. Mecanismos de coordinación

La definición de comportamientos del sistema Mini-trans requiere del uso de mecanismos de coordinación entre los robots. A continuación se presentan los mecanismos de coordinación empleados para algunos comportamientos del sistema.

4.3.5.2.1. Mecanismos para el comportamiento auto-ensamblarse. Proponemos en esta tesis tres tipos de mecanismos para decidir la forma de ensamble entre los módulos de un sistema multi-robot reconfigurable tipo móvil.

Mecanismo de capas: Cuando dos módulos se encuentran posicionados uno frente al otro, el módulo que se ensamblará (aspirante) deberá orientarse respecto al módulo al cual se ensamblará (reclutador), desplazarse alrededor de él hasta localizar el punto de ensamble del reclutador y entonces ensamblarse. En caso de que el módulo reclutador tenga otro(s) módulo(s) ensamblado(s) a él, el módulo aspirante deberá desplazarse hasta el último módulo ensamblado en la formación y alinearse para ensamblarse a éste (ver figura 4.18 (a)).

Mecanismo de transferencia: Si dos o más módulos se encuentran posicionados uno frente al otro, el módulo aspirante puede posicionar su medio para ser ensamblado frente al dispositivo de ensamble del robot reclutador, y el módulo reclutador, al identificar el medio de ensamble del otro robot, proceder a ensamblarse (ver figura 4.18 (b)).

Mecanismo de absorción: Si dos módulos se encuentran uno frente al otro, y el módulo reclutador tiene módulos reclutados, es decir conectados a él, el primer módulo conectado al módulo reclutador, puede desconectarse de éste y permitir que el módulo aspirante se conecte al módulo reclutador. El módulo que se desconectó, procede a conectarse al nuevo módulo del sistema (ver figura 4.18 (c)).

El mecanismo de coordinación implementado en esta tesis fue el de **transferencia**.

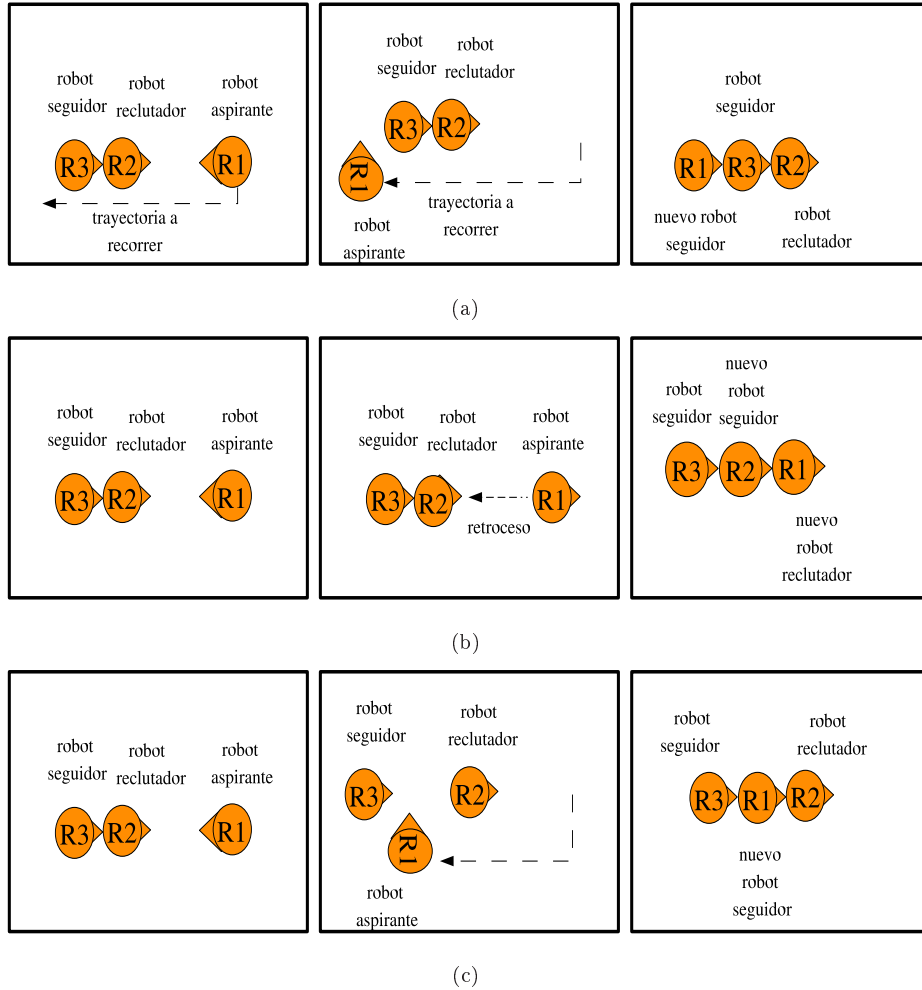


Figura 4.18: Mecanismo de auto-ensamble de los robots de acuerdo a la posición del robot aspirante a formar parte del sistema ensamblado, ante un robot reclutador de robots: (a) por capas, (b) por transferencia y (c) por absorción.

4.3.5.2.2. Mecanismos para el comportamiento desplazarse_en_forma_ensamblada.

En este trabajo se implementó el mecanismo de coordinación denominado **líder-seguidor** para realizar el desplazamiento de un sistema multi-robot ensamblado en forma de columna. Con este mecanismo, uno de los robots del sistema adopta el papel de líder y los robots ensamblados en la formación de columna detrás de él adoptan el papel de seguidores. El robot líder dirige a los robots seguidores notificando la acción a realizar en determinado momento. Sin embargo, los

robots seguidores pueden realizar algunas acciones por decisión propia de acuerdo a su percepción local, como son **evadir un obstáculo** cuando se detecta en forma lateral y **avanzar** el robot no detecta colisión frontal. Este mecanismo de coordinación emplea la forma de comunicación por **propagación** descrito en la sección 4.3.3.3. Este mecanismo lo emplean los robots en la ejecución del comportamiento **empujar_objeto**.

4.3.5.2.3. Mecanismos para el comportamiento empujar_objeto. Se proponen dos mecanismos de coordinación para **empujar un objeto**, además del mecanismo **líder-seguidor** empleado para **desplazarse_en_forma_ensamblada**, los cuales se describen a continuación.

Mecanismo de propagación disyuntiva: En este mecanismo, los módulos del sistema emplean percepción local y comunicación con señales luminosas. En este método también se emplea el mecanismo de **líder-seguidor**. Cada uno de los módulos **seguidores** del sistema, empezando por el módulo seguidor al final de la columna de robots ensamblados comunica al módulo al cual sujeta si percibe o no al objeto. El módulo que recibe la información del módulo seguidor trasero con la percepción compara esta información con la percepción propia y si uno de los dos percibe al objeto, comunica al robot delantero, es decir al que sujeta, que se percibe al objeto, y así sucesivamente, propagándose la información de atrás hacia adelante. Basta que uno de los módulos del sistema notifique que percibe el objeto, para que el sistema lo acepte y decida empezar o seguir empujando el objeto. El primero en comunicar el resultado de la percepción realizada es el módulo *seguidor* que está conectado al final de la formación del sistema. Para decidir cuándo terminar de empujar, los módulos pueden aplicar este mismo método para que se decida si continúan empujando o no, y de esta manera evitar que uno de los módulos se detenga y por consecuencia ‘anclen’ a todo el sistema ensamblado.

4.3.5.2.4. Mecanismos para el comportamiento cambiar_dirección. Para este comportamiento se implementó un mecanismo de coordinación el cual denominamos **inversión**. El sistema empleó la forma de comunicación de propagación con un mecanismo de coordinación **líder-seguidor**. El mecanismo de **inversión** consiste en el cambio de dirección en 180° de cada uno de los módulos. El módulo seguidor se desensambla del módulo al cual sujeta para que éste avance, gire y se posicione para sujetarlo posteriormente. Al final de la inversión total

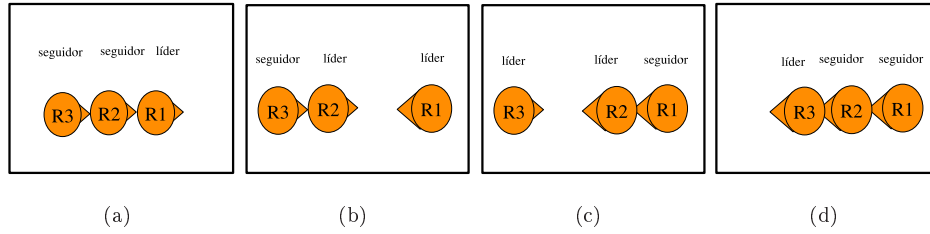


Figura 4.19: (a) Los tres robots R1, R2 y R3 se encuentran ensamblados. (b) R1 es desensamblado por R2 y avanza hacia el frente una distancia suficiente para poder realizar la inversión de los módulos. (c) R2 es desensamblado por R3 y avanza hacia R1, después gira y orienta su medio de ensamble hacia la pinza de R1, el cual lo ensambla. R2 recibe entonces el liderazgo de R1. (d) Finalmente, R3 gira y orienta su medio de ensamble hacia la pinza de R2, el cual lo ensambla. R3 recibe el liderazgo de R2.

del sistema, los módulos quedan ensamblados de tal forma que el módulo líder desempeña la categoría de seguidor y el último de los módulos seguidores antes de la inversión, adopta la categoría de líder. Este mecanismo puede ser empleado para realizar el cambio de dirección del sistema cuando se desplaza en forma ensamblada y cuando un sistema de módulos ensamblados se añadirá a otro sistema ensamblado. El autómata de la figura 4.16 y la figura 4.19 presentan este mecanismo.

4.4. Conclusiones generales

Se construyeron tres módulos del sistema Mini-trans versión 2.3. El diseño y la selección de equipamiento de los módulos del sistema Mini-trans no han sido tareas fáciles. Aunque los *kits* comerciales como LEGOMindstorms© ofrecen ventajas debido al conjunto de piezas y sensores que poseen, no fueron eficientes y por lo tanto resultaron inadecuados para la construcción de este tipo de sistemas, como hemos mencionado anteriormente en este capítulo.

Se ha realizado un diseño propio de acuerdo a los objetivos a alcanzar, así como a las condiciones de acceso a material y equipo para su construcción. Construir los robots ha sido difícil, pues como gran parte del trabajo en robótica, se requiere de abundante experimentación sobre materiales físicos en condiciones realistas, las cuales no admiten el control que sí permite la simulación.

Finalmente, concluimos que por muy inteligente que sea el control, por sí mismo no asegura el adecuado funcionamiento del robot. El comportamiento inteligente es una combinación del control y del diseño, que juntos evolucionan dando forma al robot.

Capítulo 5

Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan 3 experimentos individuales y 6 experimentos colectivos. Estos experimentos se diseñaron de manera que permitan evaluar constructivamente el desempeño de los robots. Por un lado se evalúan habilidades individuales seguidas de la habilidades colectivas. Por otro lado, las habilidades colectivas se evalúan como las piezas separadas de un experimento global, cuyo objetivo era el traslado no dirigido de un objeto por un sistema multi-robot ensamblado. Se registraran imágenes para ilustrar el desarrollo de todos los experimentos. Se registraron y graficaron también los comportamientos ejecutados por los robots participantes en cada experimento, así como los eventos que influyeron en sus acciones. Estas gráficas de comportamientos tiene la intención de evidenciar la utilidad de los mecanismos de coordinación y las formas de comunicación que presentamos en el capítulo anterior.

Debido a la capacidad limitada de 16 *kb* de memoria en la tarjeta controladora, los experimentos se probaron y analizaron de forma individual. Se realizaron experimentos que involucran los comportamientos de `navegar`, `desplazarse en forma ensamblada`, `seguir_pared`, `alinearse`, `auto-ensamblarse`, `empujar_objeto` y `cambiar_dirección`. También se presentan en este capítulo los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas. Cabe mencionar, que el tiempo de realización no fue un criterio prioritario para nosotros, sino la realización misma de los comportamientos. Algunos de los experimentos se realizaron con los robots conectados a una fuente de energía, ya que los robots requieren un tiempo mínimo de tres horas para cargar sus baterías, por lo que algunas de las imágenes muestran a los robots con un cable conectado. Sin embargo, el comportamiento de los robots sigue siendo autónomo.

A continuación se especifican las características del ambiente empleado en donde se realizaron todos los experimentos aquí descritos.

A= { **D**= 2.23 m × 2.12 m, **S** =plana,
F= poligonal, **T**= abierto,
I= 874 - 1245 lux, **Obj**= 1 }

Los objetos (**Obj**) pueden ser de dos tipos:

Características de *Obj*₁:

*F*_{Obj}= cúbica,
*V*_{Obj}= 39.5 cm de ancho × 66.7 cm de largo
× 30 cm de alto,
*P*_{Obj₁} = 1.5 kilogramos aproximadamente. }

Características de *Obj*₂:

*F*_{Obj}= cúbica,
*V*_{Obj}= 39.5 cm de ancho × 66.7 cm de largo
× 30 cm de alto,
*P*_{Obj₂} = 10 kilogramos aproximadamente. }

5.1. Experimentos individuales

Los experimentos individuales realizados fueron dos: **navegar** y **empujar un objeto** en diferentes casos éste último. Estos experimentos son individuales debido a que son ejecutados por un solo robot en el ambiente. En esta sección se presentan las especificaciones de cada uno de los experimentos realizados, así como los resultados obtenidos.

5.1.1. Experimento no. 1: navegar

Especificaciones:

SMR= {*R*₁}

R1= {Ca, Co}

Ca= {avanzar, girar, detenerse, abrir_pinza}

Co= {evadir_obstáculos, buscar_objeto, navegar}

5.1.1.1. Caso único: navegación exitosa

Descripción: Esta prueba consistió en probar la habilidad de un robot para encontrar el objeto Obj_2 en el ambiente y posicionarse cerca de él. El robot debía buscar a su alrededor la mayor intensidad de luz y dirigirse hacia ella un tiempo determinado, luego detenerse y volver a hacer la búsqueda de mayor intensidad de luz alrededor para orientarse y dirigirse a ella. El objeto fue colocado en una esquina del ambiente. El robot fue colocado a una distancia de 143 *cm* del objeto, en el extremo opuesto del ambiente.

Resultado esperado: El robot encuentra el objeto y se detiene cerca de él.

Resultado obtenido: navegación exitosa. El resultado esperado fue cumplido. La figura 5.1 muestra una secuencia de imágenes de este experimento. La figura 5.2 presenta los comportamientos ejecutados a lo largo de este experimento. El robot localizó al objeto y se dirigió a él corroborando cada determinado tiempo, su orientación con respecto al objeto. La gráfica nos muestra que en tres ocasiones el robot realizó la búsqueda del objeto y dos veces avanzó. En la tercera búsqueda realizada, el robot encontró el objeto, posicionándose cerca de él. El robot no ejecutó el comportamiento de evasión de obstáculos, debido a que no detectó colisión alguna.

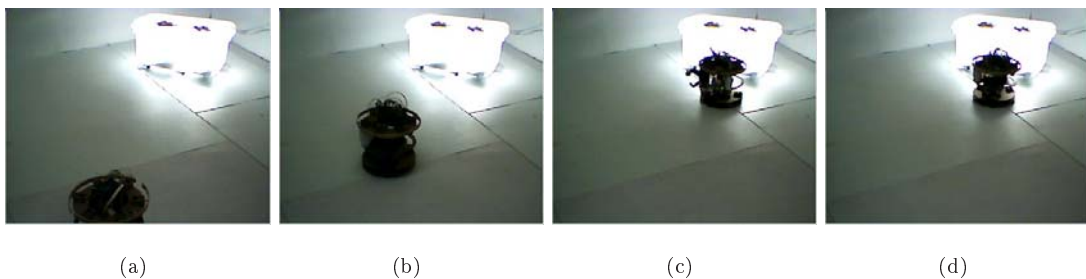


Figura 5.1: Experimento individual no. 1, caso único. (a) Robot colocado en un extremo de **A** a una distancia de 143 *cm* de **Obj**. (b) y (c) El robot ejecutando los comportamientos de `buscar_objeto` y `evadir_obstáculo` y las acciones simples `avanzar` y `detenerse`. (d) Robot posicionado cerca del objeto una vez que lo ha encontrado.

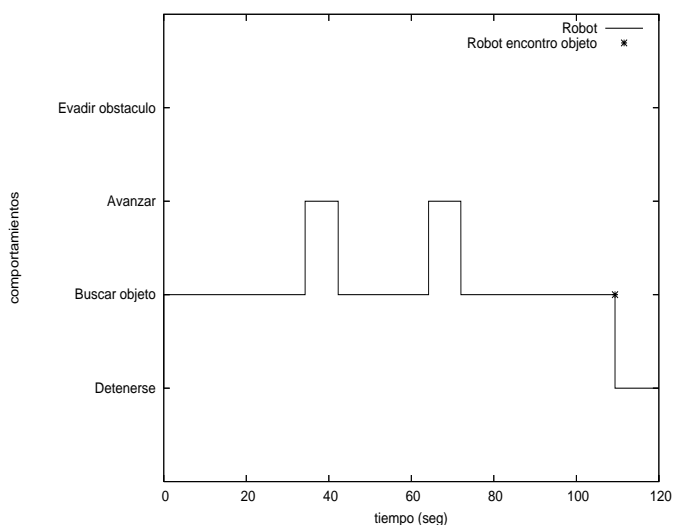


Figura 5.2: Experimento individual no. 1, caso único. Comportamientos del robot R1 durante el experimento a lo largo de 120 *secs*.

5.1.2. Experimento no. 2: seguir pared, alinearse e identificar obstáculo

Especificaciones:

SMR= $\{R_1\}$

R1= $\{Ca, Co\}$

Ca= $\{\text{avanzar, girar, detenerse, acercarse, abrir_pinza}\}$

Co= $\{\text{evadir_obstáculos, identificar_obstáculo, seguir_pared, alinearse}\}$

Los comportamientos *seguir_pared*, *alinearse* e *identificar_obstáculo* son bases para lograr *reclutar_robots* alrededor de un objeto.

5.1.2.1. Caso único: seguimiento de pared exitoso, alineamiento e identificación de obstáculos no realizados.

Descripción: Esta prueba consistió en el desplazamiento de un robot alrededor de un *Obj₂*, siguiendo sus paredes. Si el robot colisionaba, retrocedía y trataba de identificar si el obstáculo era otro robot. Si el robot colisionaba con otro robot y no lograba establecer comunicación con él, la identificación se consideraba no exitosa, en caso contrario, exitosa. Si el robot colisionaba con un obstáculo distinto a un robot y no lo identificaba como robot, la identificación se consideraba

exitosa, en caso contrario, no exitosa. Si durante el experimento no existían colisiones, y el robot no identificaba a ningún otro robot, la identificación se consideraba exitosa, en caso contrario, no exitosa. El robot fue colocado en el ambiente a una distancia de 14 *cm* del objeto. La figura 5.3 muestra una secuencia de imágenes registradas durante este experimento en la realización de una vuelta alrededor del objeto.

Resultado esperado: El robot logra seguir la pared del objeto y no identifica a ningún otro robot, ya que no existe otro robot alrededor del objeto con el cual establecer comunicación.

Resultado obtenido: El robot logró desplazarse alrededor del objeto siguiendo sus paredes y no logró identificar a otro robot, por lo que consideramos la prueba como exitosa. La figura 5.4 presenta el comportamiento del robot durante el proceso de seguir la pared y tratar de alinearse con otro robot. Sin embargo, debido a que sólo un robot fue colocado alrededor del objeto, éste no pudo alinearse con otro robot, desplazándose únicamente alrededor del objeto.

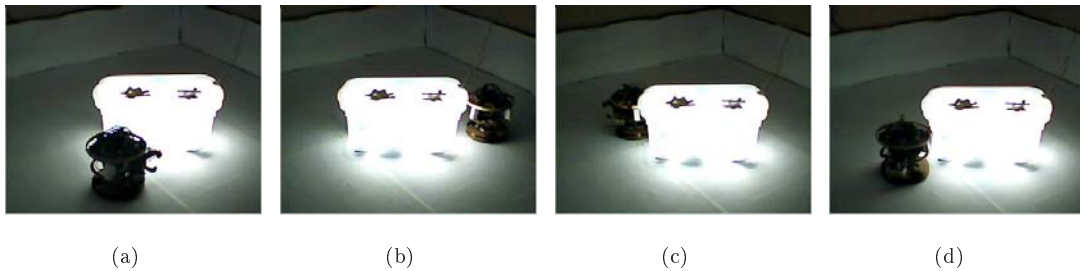


Figura 5.3: Experimento individual no. 2, caso único. (a) El robot es colocado en uno de los extremos del objeto a una distancia de 14 *cm*. (b) y (c) El robots se desplaza alrededor del objeto, detectando las esquinas, girando y siguiendo las paredes del objeto. (d) Conclusión del desplazamiento del robot al realizar una vuelta completa alrededor del objeto.

5.1.3. Experimento no. 3: empujar un objeto

Las especificaciones de este experimento individual en todos sus casos se presentan a continuación.

SMR= { R_1 }

R1= {Ca, Co}

Ca= {avanzar, girar, detenerse}

Co= {acercarse, buscar_objeto, tocar_objeto, empujar, empujar_objeto}

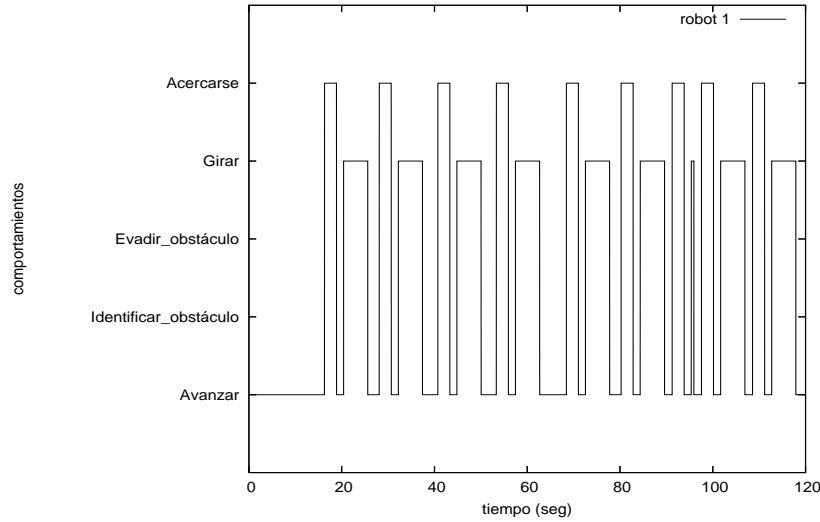


Figura 5.4: Experimento individual no. 2, caso: único. El robot se desplaza alrededor del objeto, siguiendo sus paredes, ejecutando avances repetitivos mientras localiza al objeto. Cuando el objeto no es detectado, el robot realiza acercamientos; en caso de seguir sin detectar al objeto, gira. En este caso, el robot no detectó ninguna colisión, ni detectó tampoco ningún robot durante el seguimiento de pared del objeto, por lo que no se realizó ningún intento de identificación de obstáculo.

5.1.3.1. Caso no. 1: búsqueda no exitosa, verificación de éxito durante el tiempo de empuje y abandono de la tarea por factores internos.

Descripción: La primera prueba consistió en colocar el robot R_1 a una distancia de 80 cm de un objeto Obj_1 , el cual se ubicó en uno de los extremos del ambiente. El robot debía buscar el objeto en caso de no percibirlo y abandonar la tarea si no lo encontraba después de algunos intentos. Si el objeto era encontrado el robot debía acercarse a él hasta tocarlo y empujarlo mientras sus sensores de rotación percibirían que las llantas avanzaban y que los sensores de luz percibían al objeto, de no ser así, el robot dejaría de empujar y terminar el comportamiento.

Resultado esperado: Robot abandona el comportamiento debido a que no encuentra el objeto.

Resultado obtenido: El robot R_1 no encontró el objeto y abandonó la tarea. El resultado esperado se cumplió. La figura 5.5 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.6 presenta los comportamientos ejecutados por el robot R_1 cuya tarea era empujar el objeto. Podemos observar que el robot realiza diversos intentos de búsqueda del objeto avanzando

hacia atrás y hacia adelante, todos sin éxito. R1 termina por abandonar la tarea, al no tener éxito en su búsqueda.

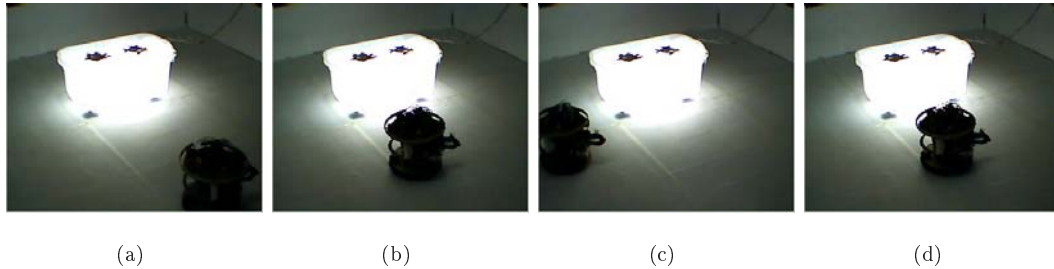


Figura 5.5: Experimento individual no. 3, caso no. 1. Inicialmente el robot es posicionado a 80 cm del objeto (a). El robot busca el objeto (b), debido a que no lo localiza, reinicia la búsqueda (c) fracasando nuevamente en su búsqueda. Finalmente el robot avanza nuevamente hacia adelante buscando el objeto, al no encontrarlo, se detiene asumiendo que el objeto no se encuentra (d).

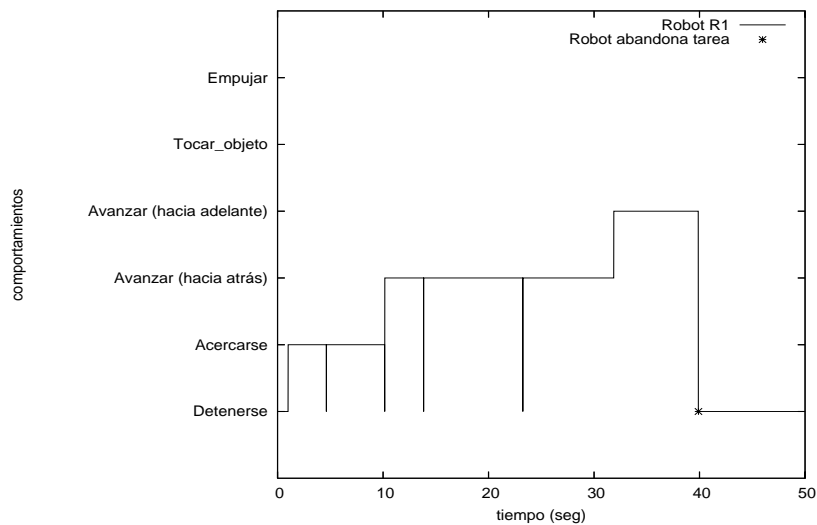


Figura 5.6: Experimento individual no. 3, caso no. 1. Debido a que el robot inicialmente no localiza el objeto, trata de acercarse desplazándose hacia la derecha, avanzar hacia atrás y avanzar hacia adelante, pero no lo logra. Debido a que el robot no encuentra el objeto después de varios intentos, decide abandonar la tarea.

5.1.3.2. Caso no. 2: búsqueda exitosa, verificación de éxito durante el tiempo de empuje y abandono de la tarea por factores internos.

Descripción: La segunda prueba consistió en colocar el robot a una distancia de 45 *cm* de un objeto *Obj₁*, el cual se colocó en uno de los extremos del ambiente. El robot debía empujar el objeto mientras sus sensores de rotación registraran avances en las llantas y los sensores de luz percibieran al objeto, en caso contrario, terminar el comportamiento. Se consideraba como exitosa la prueba si el robot lograba empujar el objeto una distancia mayor o igual a 7 *cm*. Si el robot lograba empujar el objeto una distancia menor a 7 *cm* y mayor a 4 *cm* la prueba se consideraba parcialmente exitosa. Finalmente, si el robot lograba empujar el objeto menor a 4 *cm* la prueba se consideraba no exitosa. Estas distancias fueron elegidas arbitrariamente, debido a que se consideró que dadas las proporciones del ambiente una distancia de 7 *cm* podría ser considerada como una distancia aceptable para ser determinada como una prueba exitosa.

Resultado esperado: Robot no logra empujar el objeto una distancia mayor o igual a 7 *cm* debido al peso del objeto y a que el robot intentó empujar el objeto por el centro de uno de sus lados más amplios.

Resultado obtenido: El robot empujó el objeto una distancia escasa de 5 *cm* aproximadamente, siendo muy pequeña a nuestro criterio, por lo que asumimos que el resultado fue parcialmente exitoso. La figura 5.7 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.8 presenta los comportamientos ejecutados por el robot durante la tarea de empujar el objeto. Observamos que después de realizar una búsqueda del objeto el robot lo encuentra y trata de empujarlo, pero debido a que sus sensores de rotación no registran avance y a que se sigue detectando al objeto, el robot se detiene, asumiendo que intentó realizar el empuje, pero que no lo logró.

5.1.3.3. Caso no. 3: búsqueda exitosa, verificación de éxito al final del tiempo de empuje y abandono de la tarea por factores internos.

Descripción: La tercera prueba consistió en colocar el robot a una distancia de 15 *cm* de un objeto *Obj₁*, el cual se colocó en uno de los extremos del ambiente. El robot debía empujar durante 14 *segundos*, y después debía verificar si había registro de avance de sus llantas. Si no había avance, se detenía y terminaba la tarea, en caso contrario, repetía el proceso de empuje y verificación.

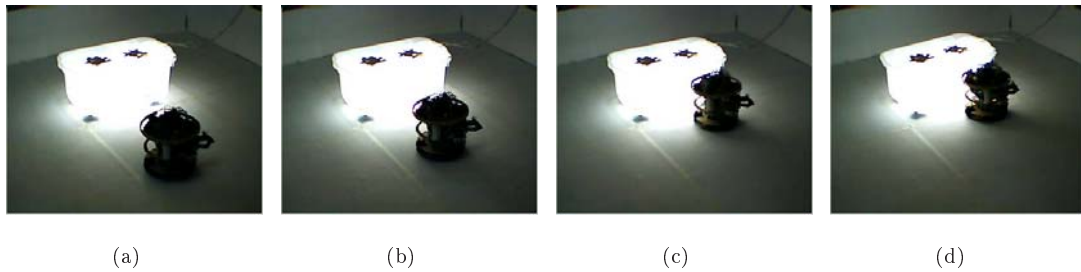


Figura 5.7: Experimento individual no. 3, caso no. 2. (a) El robot se encuentra a 45 *cm* del objeto. (b) Realiza la búsqueda del objeto y se acerca a él. (c) Una vez localizado el objeto, el robot se acerca a él hasta tocarlo e intenta empujarlo. (d) El robot intenta empujar el objeto mientras sus sensores de rotación no indiquen que no hay avance en las llantas.

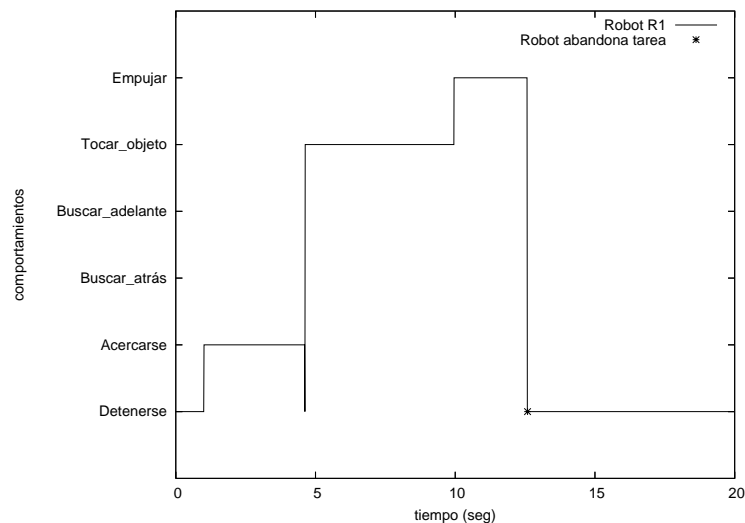


Figura 5.8: Experimento individual no. 3, caso no. 2. El robot busca al objeto acercándose y cuando éste es localizado, se aproxima a él hasta tocarlo e intenta empujarlo. Sin embargo, solo logra empujarlo una distancia aproximada de 5 *cm*, debido a que sus sensores de rotación se detienen, y el robot asume que ha empujado el objeto hasta la pared, es decir, al punto en donde ya no puede empujar más.

Resultado esperado: El robot no logra empujar el objeto más de 7 *cm*.

Resultado obtenido: El robot no logró empujar el objeto una distancia igual o mayor a 7 *cm*. El resultado esperado fue cumplido. La figura 5.9 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.10 presenta los comportamientos del robot durante el empuje del objeto.

El robot encontró al objeto e intentó empujarlo durante 14 *segs.*, pero no lo logró, ya que no pudo avanzar mientras empujaba el objeto, por lo que finalmente abandonó el comportamiento. El resultado esperado fue cumplido.

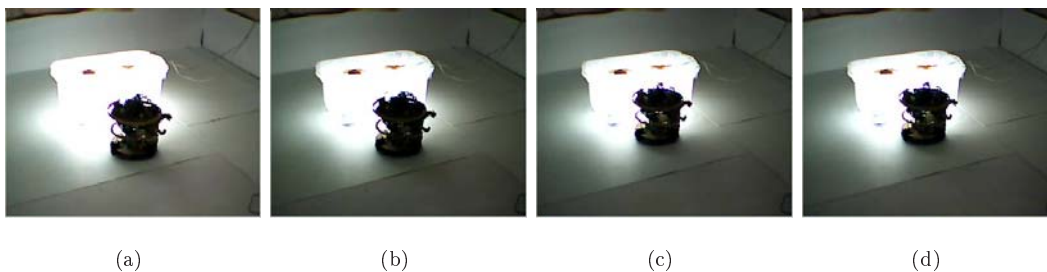


Figura 5.9: Experimento individual no. 3, caso no. 3. (a) Un robot del sistema es colocado a 15 *cm* del objeto. (b) El robot percibe, encuentra al objeto y se dirige hacia él. (c) El robot se detiene cuando llega hasta el objeto y lo toca. (d) Finalmente, intenta empujar el objeto, pero no lo logra. Se detiene y termina el comportamiento, no logrando el objetivo, ya que no puede avanzar al intentar empujar el objeto.

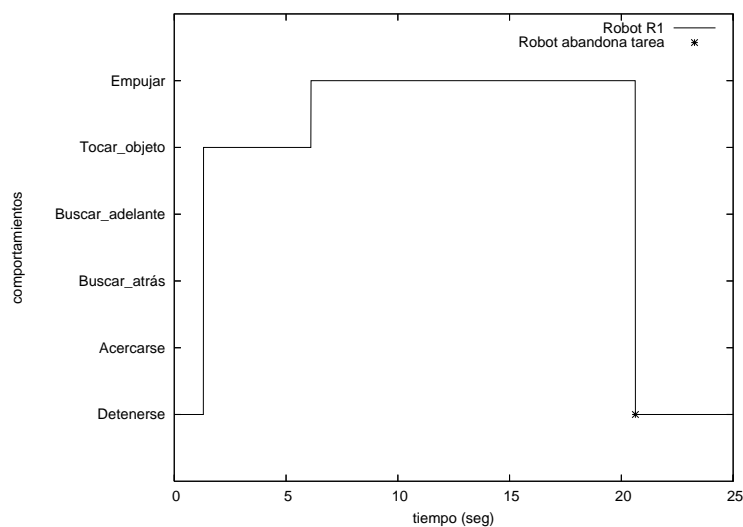


Figura 5.10: Experimento individual no. 3, caso no. 3. El robot localiza el objeto y avanza hacia él hasta tocarlo. Cuando toca el objeto se detiene e intenta empujarlo. Sin embargo, no logra empujarlo y termina la tarea, no logrando el objetivo.

5.2. Experimentos colectivos

Los experimentos colectivos fueron realizados empleando uno, dos y tres robots. Los experimentos consistieron en navegar, seguir pared, identificar obstáculos, ensamblarse, empujar un objeto y cambiar de dirección. En esta sección se presentan las especificaciones de cada uno de los experimentos realizados, así como los resultados obtenidos.

5.2.1. Experimento no. 1: navegar

Los tres robots Mini-trans en forma individual y por separado, debían localizar un objeto colocado en el ambiente y detenerse cerca de él. A continuación se presentan las especificaciones de este experimento y los resultados obtenidos en tres diferentes casos.

SMR= $\{R_1, R_2, R_3\}$

R1= $\{Ca, Co\}$

Ca= $\{\text{avanzar, girar, detenerse, abrir_pinza}\}$

Co= $\{\text{evadir_obstáculos, buscar_objeto, navegar}\}$

5.2.1.1. Caso no. 1: navegación exitosa de tres robots a partir de posiciones iniciales repartidas y orientaciones no dirigidas, en un ambiente sin restricciones de espacio.

Descripción: La primera prueba consistió en colocar los tres robots Mini-trans R_1 , R_2 y R_3 a diferentes distancias de un objeto Obj_2 , en diferentes extremos de **A** en forma no dirigida hacia el objeto, es decir, el frente del robot no apuntaba hacia el objeto. El objeto fue ubicado en el centro de **A**, por lo que consideramos que los robots no tenían restricciones de espacio, ya que cada uno de los robots estaba colocado en diferentes extremos con respecto al objeto con poca posibilidad de que converjan cerca del objeto. Los robots debían buscar el objeto y detenerse cerca de él cuando lo encontraban.

Resultado esperado: Los tres robots encuentran el objeto y se detienen cerca de él.

Resultado obtenido: Los tres robots encontraron el objeto y se posicionaron cerca de él. La figura 5.11 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. Con respecto al objeto llamaremos al robot de la izquierda **R3**, al de la derecha **R2** y al de atrás del objeto **R1**. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 5.12. Esta gráfica indica los comportamientos ejecutados por cada robot durante la prueba realizada. Observamos que el robot **R2** fue el

primero en encontrar al objeto y posicionarse cerca de él. El segundo en encontrar el objeto y posicionarse fue el robot R3. Sin embargo, al momento de terminar de posicionarse y detenerse, el robot R1 colisiona con R3, por lo que nuevamente R3 realiza el proceso de búsqueda y posicionamiento cerca del objeto. Durante este tiempo, el robot R1 logra encontrar el objeto y posicionarse, pero colisiona con el robot R3, requiriendo la repetición del proceso. Finalmente, los tres robots lograron encontrar el objeto y posicionarse cerca de él.

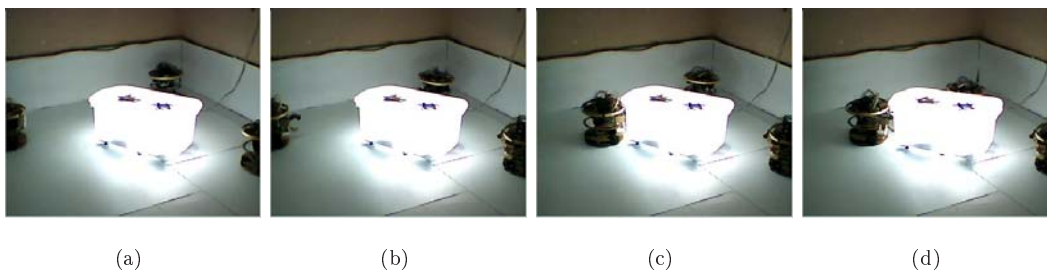


Figura 5.11: Experimento colectivo no. 1, caso no. 1. Tres robots, R1, R3 y R2 de izquierda a derecha, con respecto al robot, fueron colocados de forma no dirigida al objeto, el cual fue colocado en el centro del ambiente (a). R1 en su proceso de búsqueda del objeto colisionó con el robot R3 que se encontraba posicionado con respecto al objeto (b). Este segundo robot en su proceso de buscar al objeto nuevamente y posicionarse con respecto a él, interrumpe a su vez, al robot R1 que se encontraba también posicionado con respecto al objeto (c). Finalmente, los tres robots lograron encontrar al objeto y posicionarse.

5.2.1.2. Caso no. 2: navegación exitosa de tres robots alrededor de un objeto a partir de posiciones iniciales repartidas y orientaciones no dirigidas, en un ambiente con restricciones de espacio.

Descripción: La segunda prueba consistió en colocar los robots Mini-trans R_1 , R_2 y R_3 a diferentes distancias de un objeto Obj_2 , en diferentes extremos del ambiente en forma no dirigida hacia el objeto. El objeto fue ubicado en una esquina del ambiente. Los robots debían buscar el objeto y detenerse cerca de él cuando lo encontrarán. En este experimento los robots presentan restricciones de espacio debido a que convergen cuando están cerca del objeto, por estar éste posicionado en una esquina del ambiente, siendo el ambiente en este caso casi cuadrado.

Resultado esperado: Los tres robots encuentran al objeto y se detienen cerca de él.

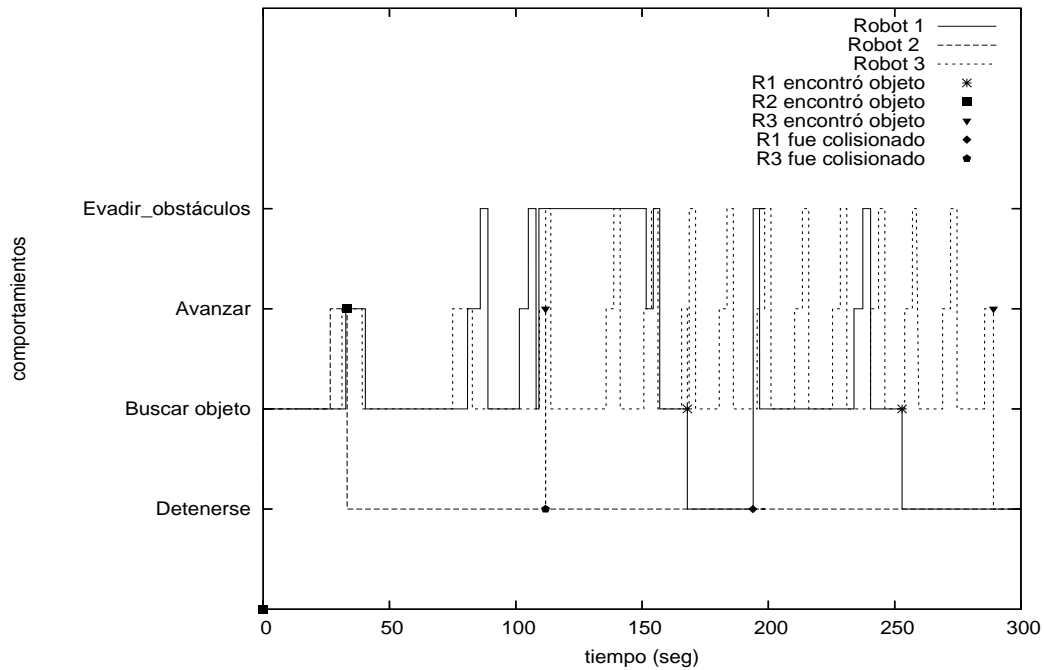


Figura 5.12: Experimento colectivo no. 1, caso no. 1. Observamos que el robot 2 fue el primero en encontrar al objeto y posicionarse cerca de él. Sin embargo los robots 1 y 3 colisionan mutuamente en diferentes tiempos, durante el proceso de búsqueda del objeto o de posicionamiento cerca de él.

Resultado obtenido: Los tres robots lograron encontrar el objeto y se detuvieron cerca de él, por lo que consideramos la prueba como exitosa. La figura 5.13 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. Identificamos a R1 como el robot de la derecha, R2 al robot ubicado en la esquina izquierda y R3 al robot ubicado al fondo a la izquierda. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 5.14. Esta gráfica ilustra los comportamientos ejecutados de cada robot durante la prueba. Debido a la forma en que está posicionado el objeto en el ambiente, los robots convergen en un lugar cerca del objeto al intentar posicionarse cerca de él. Esta convergencia, ocasiona que exista mayor cantidad de colisiones entre ellos, en comparación con las colisiones que se produjeron en el caso anterior, dificultando el avance hacia el objeto y el mantenimiento de la posición cerca de él, ya que cuando un robot ha encontrado el objeto y se ha posicionado cerca de éste, si es colisionado por otro robot, reacciona y nuevamente debe localizar al objeto y buscar posicionarse cerca de él. Sin embargo, el hecho de que los robots

que se encuentren posicionados cerca del objeto reaccionen a las colisiones provocadas por otros robots, asegura que se abrirá espacio al robot que intenta posicionarse cerca del objeto.

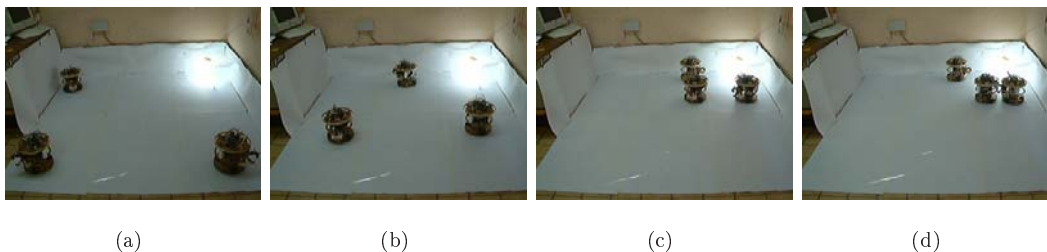


Figura 5.13: Experimento colectivo no. 1, caso no. 2. (a) Los tres robots fueron colocados en diferentes extremos del ambiente y el objeto en una de sus esquinas. (b) y (c) Los robots convergieron en una misma zona de posicionamiento cerca del objeto, colisionando entre ellos e impidiendo su acomodo cerca de éste. (d) A pesar de las colisiones entre los robots, de la distancia que los separaba del objeto y de no estar inicialmente apuntando hacia el objeto, los robots lograron encontrar el objeto y posicionarse alrededor de él.

5.2.1.3. Caso no. 3: búsqueda de un objeto por tres robots a partir de posiciones iniciales repartidas y orientaciones no dirigidas, en un ambiente con fuertes restricciones de espacio.

Descripción: La tercera prueba consistió en colocar a los robots Mini-trans en una misma zona de partida. El objeto fue colocado en un extremo lateral de **A**. R_1 , R_2 y R_3 fueron colocados a una distancia de 90 *cm* del objeto y a 6 *cm* de distancia entre ellos. Los robots debían buscar un objeto y detenerse cerca de él cuando lo encontraran. En este experimento, los robots tuvieron fuertes restricciones de espacio, debido al hecho de partir de un mismo punto, ya que convergen inicialmente y el espacio entre un robot y otro es pequeño, permitiendo que haya mayor frecuencia de colisiones entre ellos al tratar de hacer la búsqueda del objeto.

Resultado esperado: Tres robots encuentran el objeto y se detienen cerca de él.

Resultado obtenido: Los tres robots lograron encontrar el objeto y posicionarse cerca de él, por lo que la prueba se consideró exitosa. La figura 5.15 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. Identificamos a R_1 , R_2 y R_3 de izquierda a derecha con respecto a imagen 5.15 (a). Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 5.16. Se observa que debido a que los tres robots fueron colocados inicialmente en una misma zona de partida, cerca uno de otro,

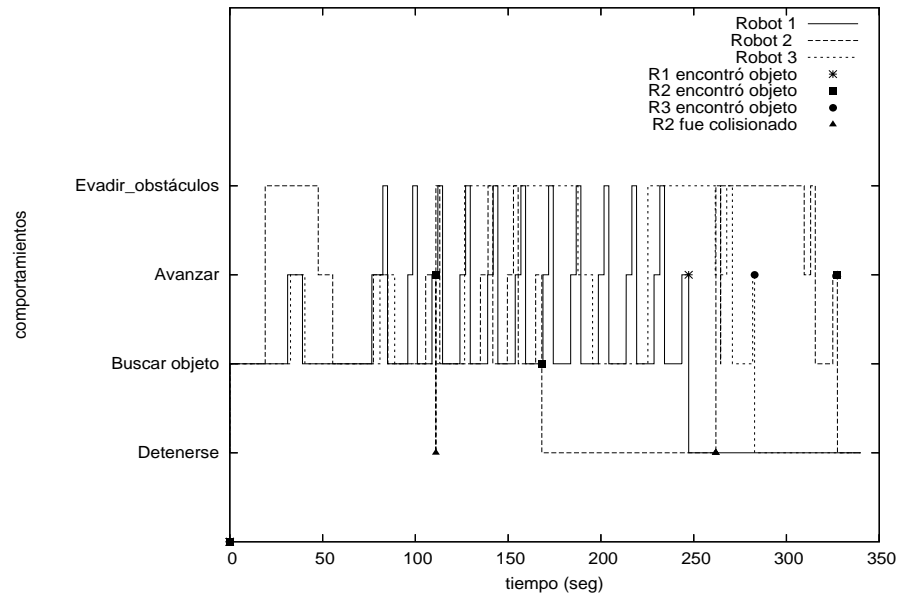


Figura 5.14: Experimento colectivo no. 1, caso no. 2. Se observa que el robot R2 fue el primero en encontrar al objeto y posicionarse cerca de él, pero debido a que en distintas ocasiones los otros dos robots colisionaron con él, R2 requirió repetir su proceso de búsqueda y posicionamiento cerca del objeto, siendo también el último de los robots en posicionarse cerca del objeto.

las colisiones entre los robots fueron más frecuentes, dificultando la realización de la tarea, ya que los robots se obstaculizaban frecuentemente unos a otros, por lo que el tiempo de realización de la tarea fue mayor en comparación al tiempo de las pruebas anteriores. A pesar de ello, la tarea pudo concretarse.

5.2.2. Experimento no. 2: seguir pared, alinearse e identificar_obstáculo

El segundo experimento consistió buscar robots alrededor del objeto. Los tres robots Mini-trans fueron colocados alrededor del objeto, debiendo desplazarse alrededor de las paredes de un objeto Obj_2 , buscando a otros robots. Los experimentos reportados en esta sección emplearon la forma de **propagación** para comunicar, con el método de **espera** para sincronizarse, así como el mecanismo de coordinación **líder-seguidor** descritos en las secciones 4.3.5.1 y 4.3.5.2. Estos experimentos emplearon comunicación IR y comunicación con señales luminosas. En esta

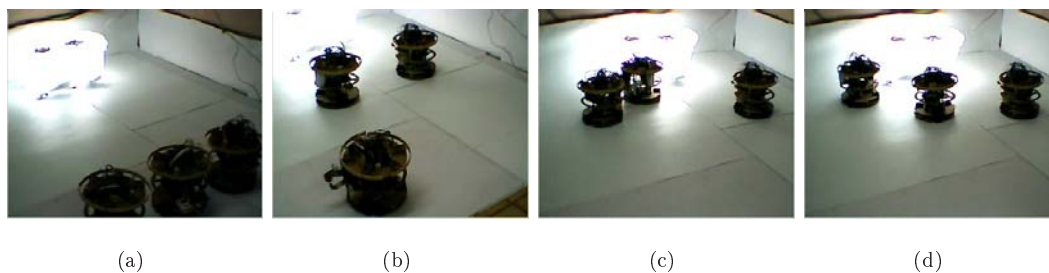


Figura 5.15: Experimento colectivo, caso no. 3. (a) Tres robots agrupados en una misma zona de partida, a una distancia de 90 cm del objeto. (b) y (c) Debido a las constantes colisiones entre los robots, el desplazamiento hacia el objeto es más tardado y complicado. (d) A pesar de las múltiples colisiones, los tres robots logran encontrar el objeto y posicionarse a su alrededor.

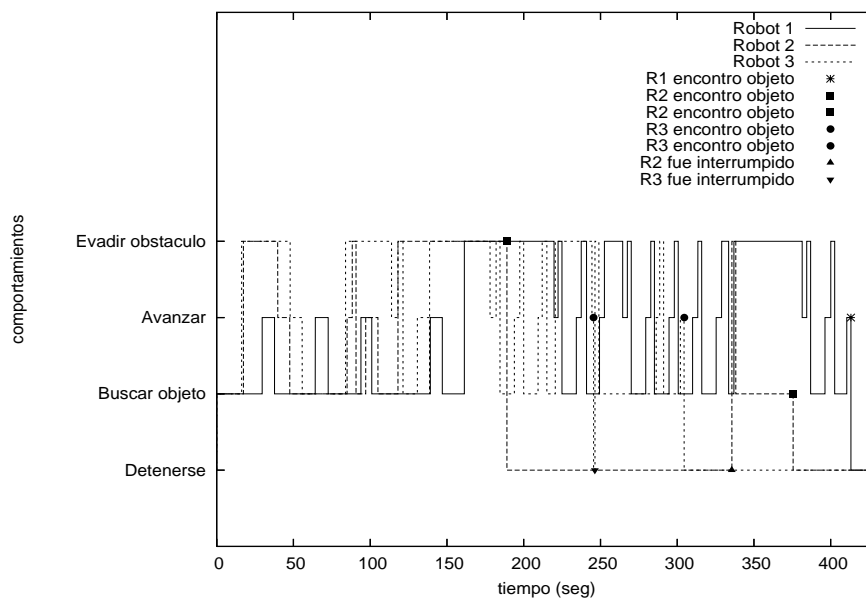


Figura 5.16: Experimento colectivo no. 1, caso no. 3. Se observa que los tres robots colisionaron con mayor frecuencia en comparación a las pruebas anteriores, debido a la cercanía entre ellos desde un inicio, dificultando la realización de la tarea.

sección se presentan tres casos estudiados de este experimento, así como sus especificaciones y los resultados obtenidos.

$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$
 $\mathbf{R}_i = \{Ca, Co\}$
 $\mathbf{Ca} = \{\text{avanzar, girar, detenerse, abrir_pinza, esperar}\}$
 $\mathbf{Co} = \{\text{evadir_obstáculos, identificar_obstáculo, seguir_pared, acercarse, alinearse, seguir_líder, cambiar_dirección}\}$

5.2.2.1. Caso no. 1: seguimiento exitoso de pared por dos robots ensamblados e identificación de obstáculos realizados.

Descripción: Esta prueba consistió en el desplazamiento de dos robots ensamblados alrededor de un *Obj₂*, siguiendo sus paredes. Si el robot colisionaba, retrocedía y trataba de identificar si el obstáculo era otro robot. Si el robot colisionaba con otro robot y no lograba establecer comunicación con él, la identificación se consideraba no exitosa, en caso contrario, exitosa. Si el robot colisionaba con un obstáculo distinto a un robot y no lo identificaba como robot, la identificación se consideraba exitosa, en caso contrario, no exitosa. Si durante el experimento no existían colisiones, y el robot no identificaba a ningún otro robot, la identificación se consideraba exitosa. Los robots fueron colocados en el ambiente a una distancia de 10 *cm* del objeto.

Resultado esperado: Los robots ensamblados se desplazan alrededor del objeto siguiendo las paredes de éste y si hay colisiones con otro robot, identifican al robot.

Resultado obtenido: Los robots R_1 y R_2 ensamblados se desplazaron alrededor del objeto siguiendo las paredes de éste. Aunque se produjeron colisiones, ninguna fue con otro robot, por lo que el sistema ensamblado no identificó o encontró a otro robot. Esta prueba es considerada como exitosa. La figura 5.17 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada en una vuelta alrededor del objeto aproximadamente. La gráfica 5.18 presenta los comportamientos de cada uno de los robots del sistema durante la prueba. Sin embargo, debido a que no se colocó un tercer robot alrededor del objeto, el sistema ensamblado no logró encontrar a otro robot. Se observó la dificultad que presentó su desplazamiento, a diferencia del realizado por un solo robot, especialmente en las esquinas del objeto.

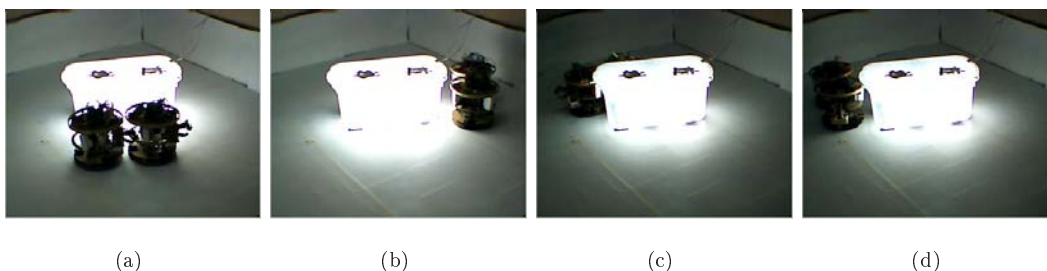


Figura 5.17: Experimento colectivo no. 2, caso no. 1. (a) Condiciones iniciales de la prueba. (b) y (c) Desplazamiento del sistema ensamblado alrededor del objeto. (d) Condiciones finales de la prueba.

5.2.2.2. Caso no. 2: seguimiento de pared exitoso por tres robots, alineamiento exitoso e identificación de obstáculos exitoso.

Descripción: Tres robots Mini-trans R_1 , R_2 y R_3 fueron colocados a una distancia de 14 cm de un objeto Obj_2 , en diferentes extremos de éste. Dos robots estaban orientados hacia una misma dirección de exploración, a diferencia del tercer robot. Si dos robots colisionaban y no lograban alinearse e identificarse se consideraba la prueba como no exitosa. Si los dos robots colisionaban y se alineaban, pero no se identificaban, se consideraba la prueba como parcialmente exitosa. Finalmente, si dos robots colisionaban, se alineaban y se identificaban, se consideraba la prueba como exitosa.

Resultado esperado: Los tres robots logran desplazarse alrededor del objeto, siguiendo las paredes de éste, en busca de otros robots. Al menos dos robots colisionan, logran alinearse y se identifican.

Resultado obtenido: Los robots lograron seguir las paredes del robot, dos robots colisionaron, lograron alinearse y se identificaron mutuamente como robots, por lo que se consideró la prueba como exitosa. El tercer robot colisionó con el objeto e identificó al objeto como un obstáculo distinto a un robot. La figura 5.19 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.20 presenta el comportamiento de los tres robots Mini-trans durante el proceso de reclutamiento de robots alrededor del objeto. Cuando dos de los robots colisionaron, iniciaron el proceso de búsqueda del otro robot para identificarse, tratando de alinearse uno al otro y de establecer comunicación entre ellos. Observamos que dos robots lograron alinearse y establecer comunicación, identificando al otro como robot, mientras el tercer robot exploraba. El tercer

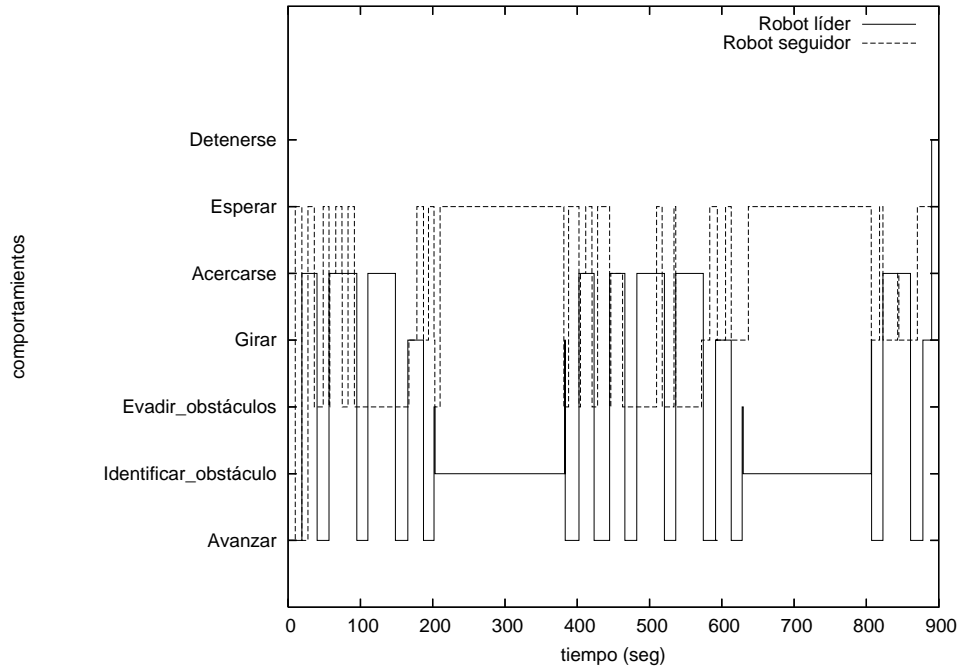


Figura 5.18: Experimento colectivo no. 2, caso no. 1. Se reportan los comportamientos del robot líder y del robot seguidor. Debido a que no todos los datos correspondientes al comportamiento **avanzar** del robot seguidor se lograron registrar, por la capacidad de memoria limitada de la tarjeta controladora, sólo se presentan los datos resgistrados correspondientes al comportamiento **avanzar** hasta los 44.15 *secs.*, por lo que posteriormente no se registran datos de ésta acción. Los datos de los comportamientos **identificar_obstáculos**, **girar** y **acercarse** son presentados completos. A pesar de que algunos de los mensajes enviados por el robot líder no los percibió el robot seguidor, los dos robots lograron coordinarse para desplazarse alrededor del objeto.

robot no presentó mucho avance en su desplazamiento y reclutamiento, ya que colisionó tres veces con el objeto y terminó cambiando de dirección.

5.2.2.3. Caso no. 3: seguimiento de pared exitoso por tres robots, alineamiento no exitoso e identificación de obstáculos no exitoso.

Descripción: En esta prueba tres robots R_1 , R_2 y R_3 fueron colocados en distintos lados de un objeto Obj_2 , a una distancia de 14 *cm* de éste. Dos robots estaban orientados hacia la misma dirección, el tercer robot estaba orientado hacia una dirección opuesta. Los robots

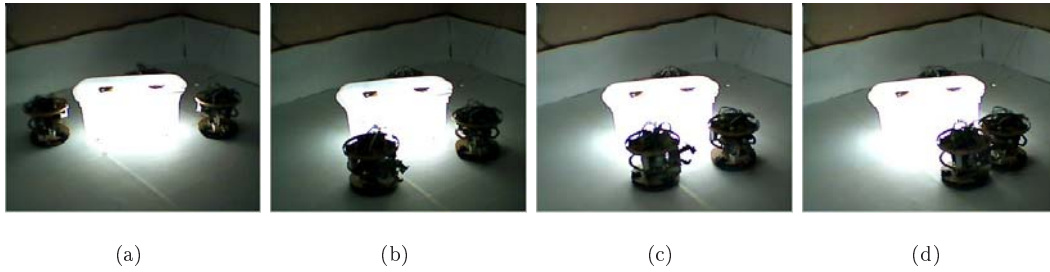


Figura 5.19: Experimento colectivo no. 2, caso no. 2. (a) Condiciones iniciales de la prueba, donde cada robot en inicia en forma individual la exploración alrededor del objeto a partir de diferentes extremos del objeto. (b) y (c) Encuentro de dos robots, los cuales logran alinearse e identificarse mutuamente como robots. (d) Dos robots alineados y un tercer robot que solo colisionó con el objeto y que finalmente decide cambiar de dirección de búsqueda.

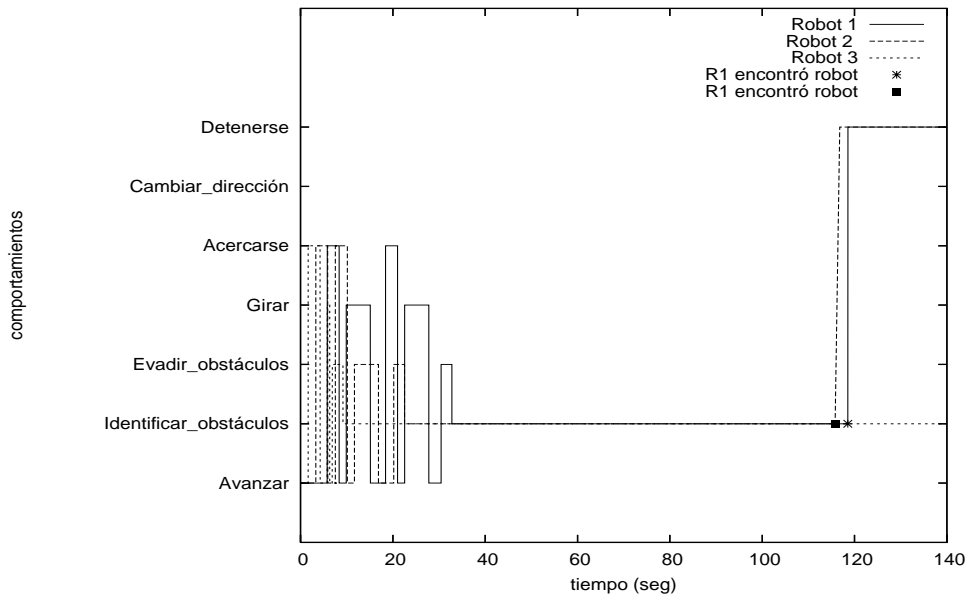


Figura 5.20: Experimento colectivo no. 2, caso no. 2. Se observa que los robots R_1 y R_2 colisionaron y empezaron a tratar de alinearse a otro robot. Aunque los dos robots no iniciaron el proceso de identificación del obstáculo al mismo tiempo, los dos lograron alinearse, establecer comunicación e identificarse mutuamente después de 100 *secs*.

debían desplazarse alrededor del objeto, buscando otros robots alrededor del objeto, realizando un seguimiento de sus paredes, alinearse y establecer comunicación con otro robot.

Resultado esperado: Los tres robots logran desplazarse alrededor del objeto, siguiendo sus paredes e logran alinearse con otro robot e identificar si colisionan con un robot.

Resultado obtenido: Los tres robots lograron desplazarse alrededor del objeto, siguiendo las paredes. Dos robots colisionaron entre sí, pero no lograron alinearse; sólo uno de los robots logró percibir la información del otro robot. Esta prueba es considerada no exitosa. La figura 5.21 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. Con respecto a esta figura, R_1 se encuentra a la derecha del objeto, R_3 se encuentra a la izquierda del objeto y R_2 se encuentra detrás del objeto. La figura 5.22 presenta los comportamientos de los tres robots durante la prueba. Las figuras 5.23, 5.24 y 5.25 presentan acercamientos de las zonas con mayor registro de los comportamientos graficados en la figura 5.22, izquierda, centro y derecha respectivamente. Dos robots colisionaron durante la búsqueda de otro robot, un robot percibió la señal del otro robot, pero el segundo robot no recibió señal del primer robot, por lo que el primer robot asumió que había encontrado a otro robot, pero el segundo robot no, por lo que continuó buscando a otros robots alrededor del objeto. El tercer robot realizó la búsqueda de otros robots y decidió cambiar de dirección.

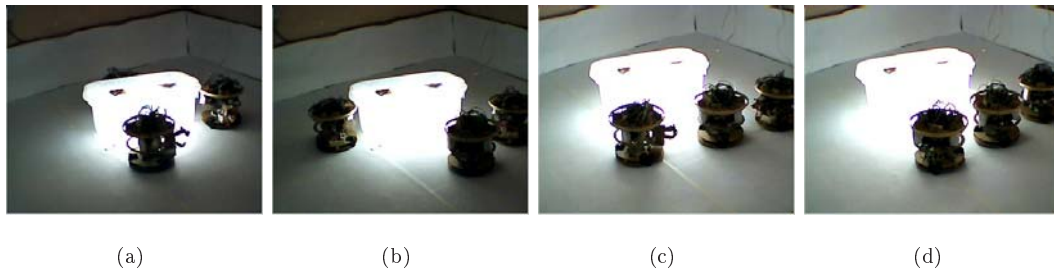


Figura 5.21: Experimento colectivo no. 2, caso no. 3. (a) Los robots fueron colocados en diferentes extremos del objeto. (b) Dos de los robots colisionaron y empezaron a realizar el proceso de alineación para establecer comunicación, mientras el tercer robot exploraba. (c) Sólo uno de los robots logró identificar al otro robot, por lo que se detiene, mientras el otro robot decide continuar su exploración y búsqueda. (d) El robot que no logró identificar al otro robot después de la colisión, decide cambiar de dirección al igual que el tercer robot del experimento.

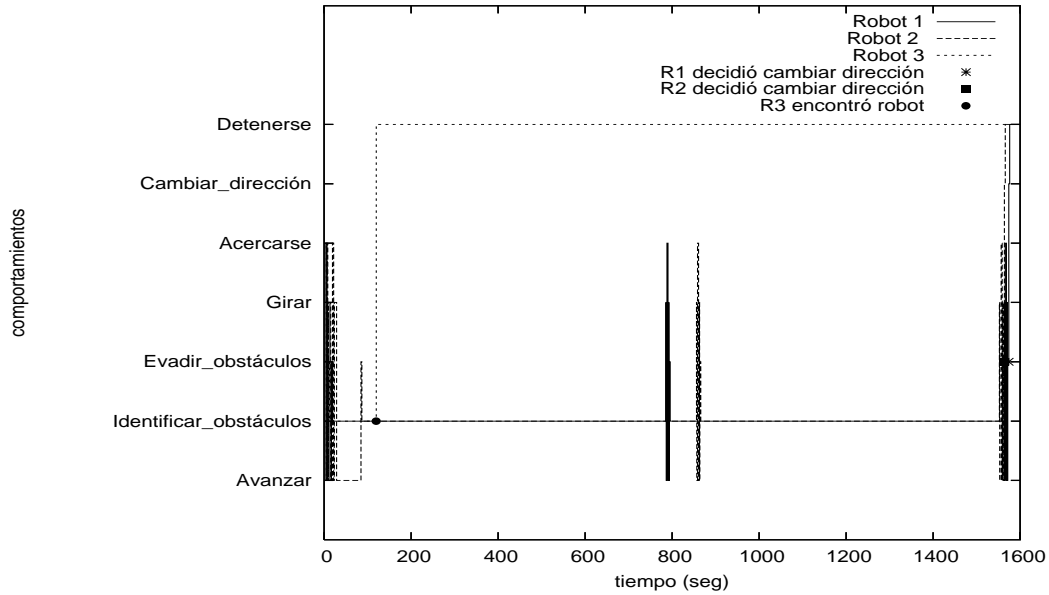


Figura 5.22: Experimento colectivo no. 2, caso no. 3. Las gráficas 5.23, 5.24 y 5.25 muestran con mayor detalle los comportamientos ejecutados respectivamente entre 0 y 140 *secs.*, 750 y 850 *secs.* y 1500 y 1600 *secs.*

5.2.3. Experimento no. 3: auto-ensamblarse

El tercer experimento colectivo consistió en realizar el ensamble entre los robots que se encuentran alineados y que han establecido comunicación. Se estudiaron dos casos de este experimento, los cuales emplean comunicación IR y comunicación con señales luminosas. El método empleado para sincronizarse en la comunicación fue el de **espera**. Las especificaciones del experimento se describen a continuación.

$$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$$

$$\mathbf{R}_i = \{\mathbf{Ca}, \mathbf{Co}\}$$

$$\mathbf{Ca} = \{\text{avanzar, girar, detenerse, acercarse, abrir_pinza, cerrar_pinza, esperar}\}$$

$$\mathbf{Co} = \{\text{evadir_obstáculos, establecer_lider, \\ \text{consensar, desafiar, jerarquizar, cambiar_dirección, \\ \text{seguir_líder, auto-ensamblarse, ceder_liderazgo, \\ \text{recibir_liderazgo, ajustar_posición}\}$$

El **auto-ensamble** es un comportamiento que complementa al comportamiento **reclutar_robots**, conjuntamente con los comportamientos del experimento anterior.

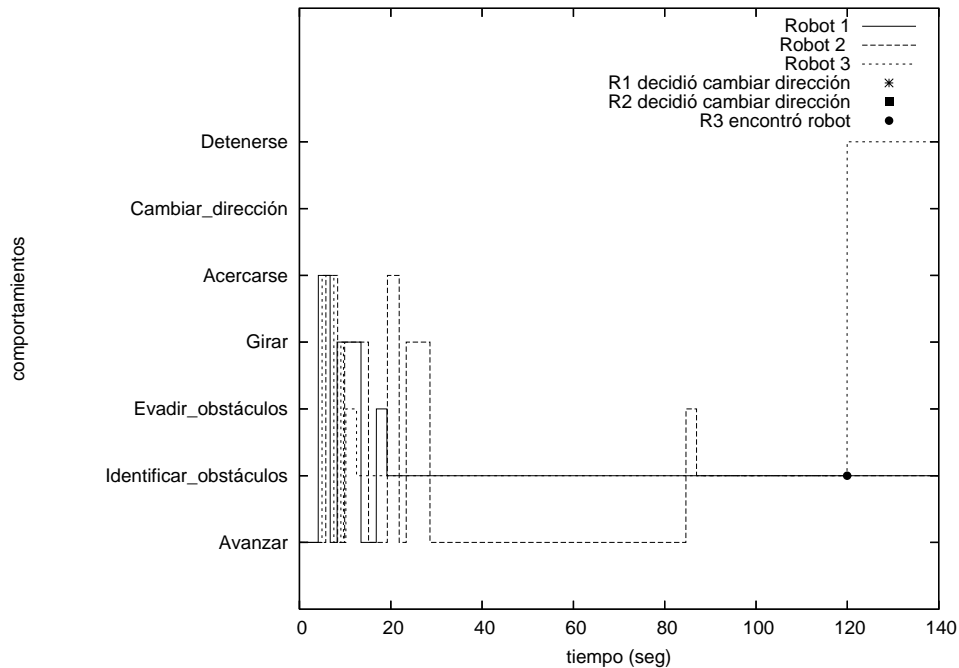


Figura 5.23: Detalle de los comportamientos ejecutados entre 0 y 140 *secs.* durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.

5.2.3.1. Caso no. 1: auto-ensamblado de dos robots en la esquina de un objeto.

Descripción: El primer caso estudiado consistió en el auto-ensamble de dos robots alineados en una de las esquinas de un objeto Obj_2 y un tercer robot buscando otros robots alrededor del objeto, siguiendo sus paredes. Los robots alineados debían establecer al líder y al robot seguidor y auto-ensamblarse.

Resultado esperado: Al menos los dos robots alineados establecen líder y se auto-ensamblan. El tercer robot se desplaza alrededor del objeto siguiendo sus paredes y buscando a otros robots.

Resultado obtenido: Los dos robots alineados lograron establecer al robot líder y auto-ensamblarse, mientras el tercer robot seguía las paredes del objeto en búsqueda de otros robots. Esta prueba se consideró exitosa. La figura 5.26 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.27 presenta los comportamientos ejecutados por los tres robots Mini-trans durante la prueba. Observamos que los robots lograron establecer la comunicación y lograron desafiarse, elegir al robot líder y al robot seguidor, procediendo a realizar el auto-ensamble. El tercer robot, realizó la exploración alrededor del objeto siguiendo las paredes del objeto, sin

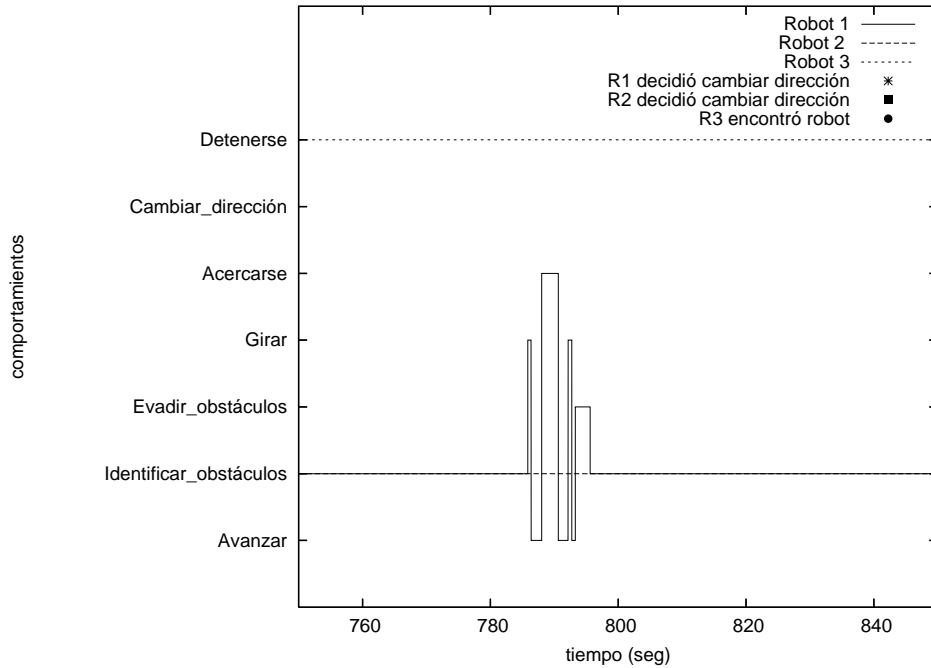


Figura 5.24: Detalle de los comportamientos ejecutados entre 750 y 850 *secs.* durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.

evitar que los otros robots se auto-ensamblaran, a pesar de que colisionó con el robot `seguidor`.

5.2.3.2. Caso no. 2: auto-ensamblado de dos robots en un lado del objeto.

Descripción: El segundo caso de estudio consistió en realizar el ensamble de dos robots alineados en uno de los extremos laterales de un objeto Obj_2 , mientras un tercer robot buscaba otros robots alrededor del objeto, siguiendo sus paredes.

Resultado esperado: Al menos los dos robots alineados logran establecer al robot líder y auto-ensamblarse. El tercer robot se desplaza alrededor del objeto, siguiendo sus paredes y tratando de encontrar a otros robots.

Resultado obtenido: Los dos robots alineados lograron establecer al robot líder y auto-ensamblarse, mientras el tercer robot buscaba otros robots alrededor del objeto. El resultado esperado se cumplió por lo que esta prueba se consideró exitosa. La figura 5.28 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.29 presenta los comportamientos ejecutados de los tres robots durante el proceso de auto-ensamble. Observamos que al igual

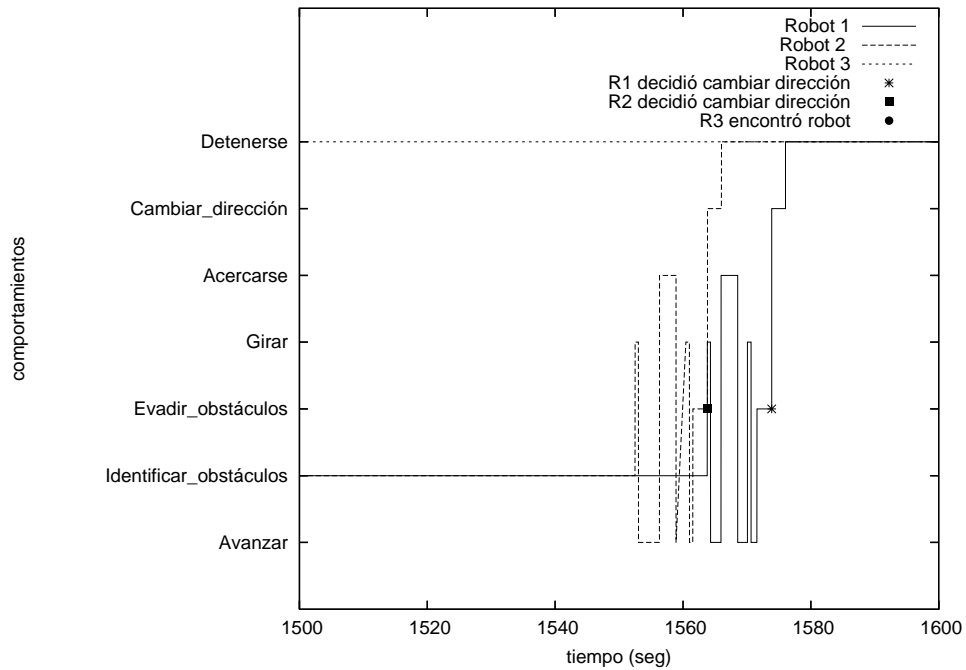


Figura 5.25: Detalle de los comportamientos ejecutados entre 1500 y 1600 *secs.* durante el experimento colectivo no. 2, caso no. 3, mostrado en la figura 5.22.

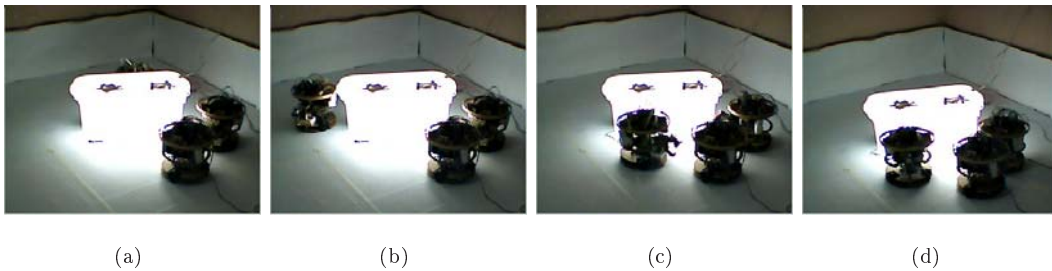


Figura 5.26: Experimento colectivo no. 3, caso no. 1. (a) Condiciones iniciales de la prueba, donde dos robots se encuentran alineados en una de las esquinas del objeto y un tercer robot se encuentra ubicado en otro extremo del objeto. (b) Proceso de establecimiento del robot líder y del robot seguidor. (c) El robot seguidor cediendo el liderazgo, mientras el robot líder lo asume, dirigiéndose hacia el robot seguidor para ser ensamblado. (d) Finalmente, robot seguidor ensamblado al robot líder comunica que el ensamble ha sido realizado.

que los resultados obtenidos en el caso anterior, los robots lograron establecer la comunicación y lograron determinar al robot líder y al robot seguidor, procediendo a realizar el auto-

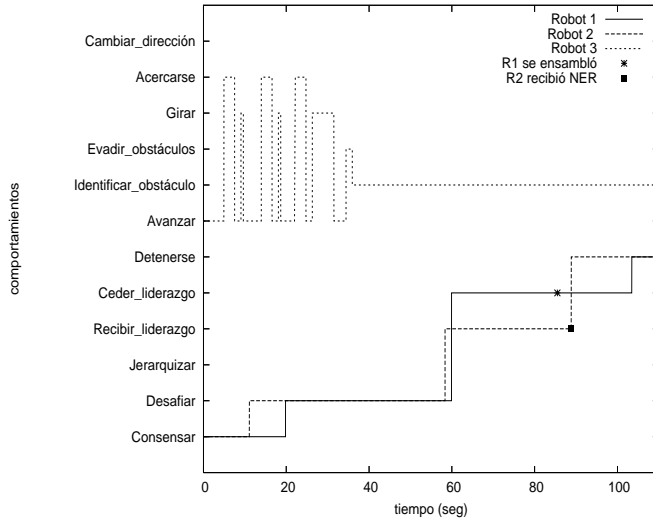


Figura 5.27: Experimento colectivo no. 3, caso no. 1. Los robots R_1 y R_2 establecieron comunicación y consensaron. Sin embargo, no pudieron establecer al líder hasta que se desafiaron. Después de que el robot seguidor se ensambló al robot líder, **notificó** a éste que el **ensamble** se había realizado (NER). El robot R_3 se mantuvo desplazándose alrededor del objeto y tratando de encontrar a otros robots.

ensamble. El tercer robot realizó su búsqueda alrededor del objeto sin evitar que los otros robots se auto-ensamblaran, a pesar de que colisionó con el robot **seguidor**. En este caso, los resultados obtenidos fueron muy parecidos a los obtenidos en el caso anterior.

5.2.4. Experimento no. 4: desplazarse_en_forma_ensamblada

Especificaciones:

$SMR = \{R_1, R_2, R_3\}$

$R_i = \{Ca, Co\}$

$Ca = \{\text{avanzar, girar, detenerse, acercarse, abrir_pinza, esperar}\}$

$Co = \{\text{evadir_obstáculos, seguir_lider, desplazarse_en_forma_ensamblada}\}$

5.2.4.1. Caso único: desplazamiento en forma ensamblada de tres robots.

Descripción: Esta prueba consistió en el desplazamiento en forma ensamblada de tres robots R_1 , R_2 y R_3 , en un ambiente sin objetos. En este caso los robots emplearon comunicación con

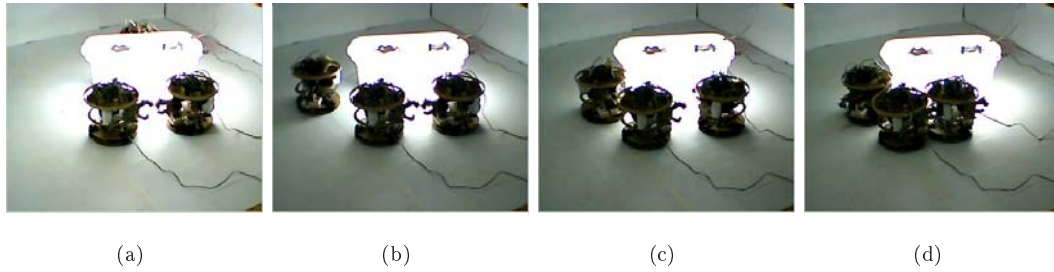


Figura 5.28: Experimento colectivo no. 3, caso no. 2. (a) Dos robots se encuentran alineados en un extremo lateral del objeto. (b) Proceso de establecimiento del robot líder y del robot seguidor. (c) Momento en que uno de los robots se orienta para ser ensamblado por otro robot, mientras el tercero busca otros robots alrededor del objeto. (d) Finalmente, condiciones finales del experimento, donde dos robots están ensamblados y el tercer robot decidió cambiar de dirección después de detectar tres colisiones y no lograr identificar ningún obstáculo como robot.

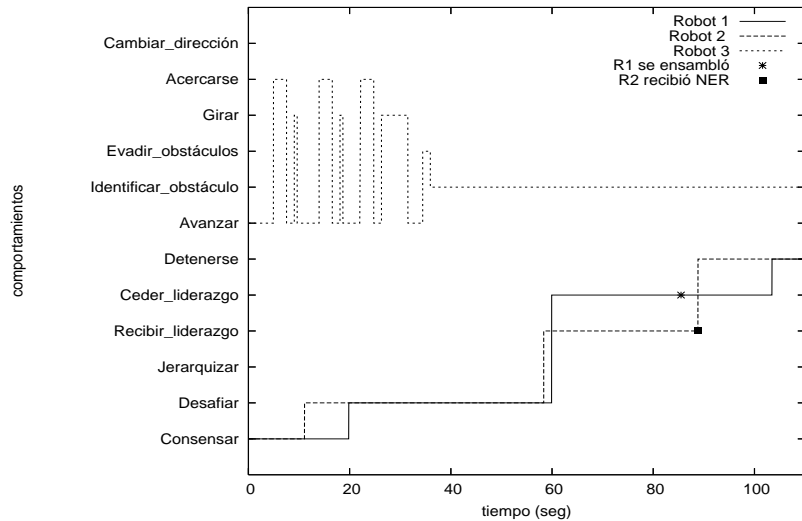


Figura 5.29: Experimento colectivo no. 3, caso no. 2. Se ilustra cómo se lleva a cabo la coordinación entre dos robots para auto-ensamblarse, mientras un tercer robot busca otros robots desplazándose alrededor del objeto, siguiendo sus paredes. NER significa notificación de ensamblaje realizado.

señales luminosas y el mecanismo líder-seguidor, propagando la información entre ellos.

Resultado esperado: Los robots logran coordinarse y desplazarse en forma ensamblada, evi-

tando obstáculos.

Resultado obtenido: Los tres robots lograron coordinarse y desplazarse en forma ensamblada, evitando obstáculos. La prueba fue considerada como exitosa. La figura 5.30 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.31 presenta los comportamientos ejecutados por los robots durante la prueba.

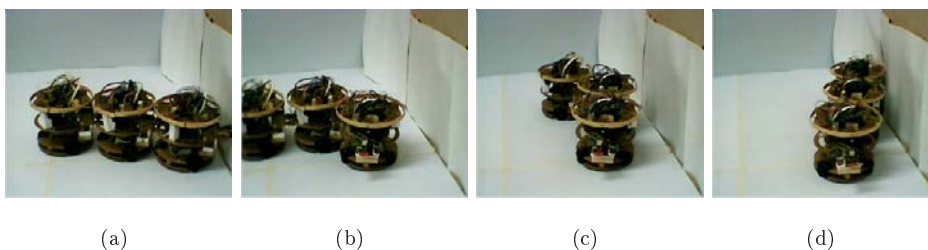


Figura 5.30: Experimento colectivo no. 4, caso único. (a) Los robots están inicialmente ensamblados formando una columna. El sistema ensamblado avanza al frente hasta que el robot líder colisiona con una pared del ambiente. El robot líder se detiene, solicita al robot conectado a él que retrocede y éste robot hace lo mismo con el robot que está al final de la formación ensamblada. Una vez que el robot líder siente que se desactiva su sensor trasero, retrocede. (b) El robot líder gira para evadir el obstáculo. El robot seguidor del centro percibe el giro del líder y trata de girar también, acción que logra con mayor dificultad, ya que el tercer y último robot aún no percibe el giro y se encuentra estacionado. (c) Cuando el tercer robot percibe el giro, también gira, facilitando de esta manera el giro del robot seguidor central. (d) Los robots seguidores finalmente terminan de alinearse y el sistema completo continúa desplazándose en el ambiente.

5.2.5. Experimento no. 5: empujar objeto

La cuarta serie de experimentos colectivos consistió en empujar un objeto en el ambiente. Los robots ensamblados se colocaron a una distancia d del objeto que debían empujar. Se realizaron dos tipos de pruebas en este experimento: con comunicación empleando señales luminosas y sin comunicación entre los robots, las cuales se presentan en esta sección. Las especificaciones del experimento se presentan a continuación.

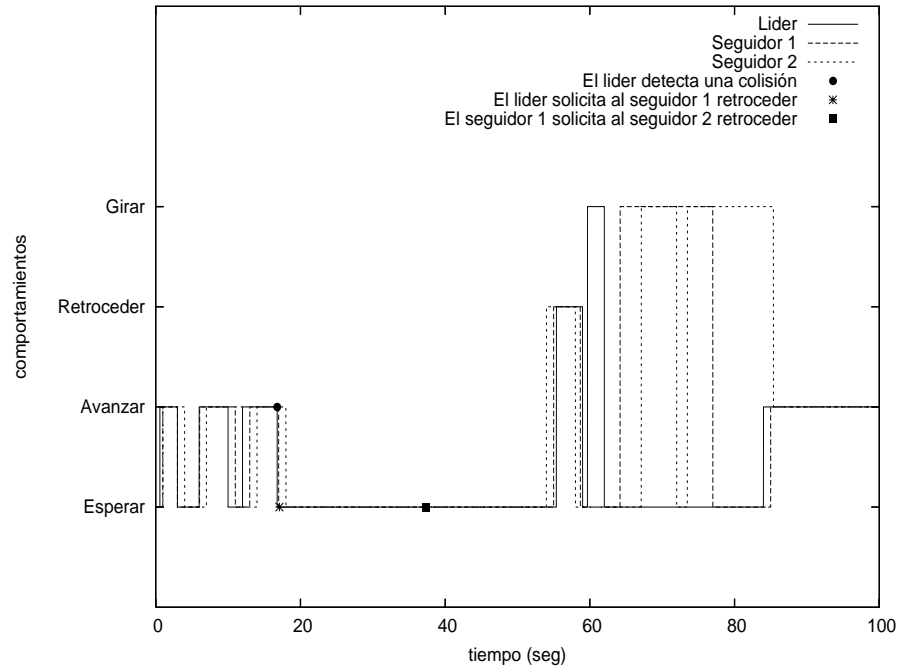


Figura 5.31: Experimento colectivo no. 4, caso único. Los robots avanzaron en forma ensamblada hasta que el robot líder colisionó. Los tres robots retrocedieron. Cuando el robot líder giró el robot seguidor 1 giró. Cuando el robot seguidor 1 giró, el robot seguidor 2 también giró. Una vez recuperada la alineación en columna de los tres robots, continuaron avanzando y explorando el ambiente.

$$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$$

$$\mathbf{R}_i = \{C_a, C_o\}$$

$$\mathbf{C}_a = \{\text{avanzar, girar, detenerse}\}$$

$$\mathbf{C}_o = \{\text{evadir_obstáculos, seguir_líder, acercarse, tocar_objeto, empujar, empujar_objeto}\}$$

5.2.5.1. a. Con comunicación

En esta sección se presentan dos de casos con comunicación. Estos casos emplean el mecanismo **líder-seguidor**, comunicación con señales luminosas que se propaga entre ellos. Los robots también emplearon sincronización por **espera**.

$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$
 $\mathbf{R}_i = \{Ca, Co\}$
 $\mathbf{Ca} = \{\text{avanzar, girar, detenerse}\}$
 $\mathbf{Co} = \{\text{evadir_obstáculos, seguir_líder, acercarse}$
 $\text{tocar_objeto, empujar, empujar_objeto}\}$

5.2.5.1.1. Caso no. 1: empuje exitoso de un objeto por tres robots ensamblados, en uno de sus lados más anchos.

Descripción: La primera prueba consistió en colocar a R_1 , R_2 y R_3 en forma ensamblada a una distancia de 10 *cm* de un objeto Obj_1 . R_3 fue el líder del sistema ensamblado, R_2 el robot seguidor conectado a él y R_1 el robot seguidor conectado a R_2 . El robot líder debía localizar el objeto y dirigir al sistema ensamblado para empujar junto con él el objeto. El empuje se realizaría mientras el robot líder detectara avance en las llantas, de lo contrario, se detendría. El empuje del objeto se realizó por uno de sus lados más anchos.

Resultado esperado: Todo el sistema ensamblado empuja el objeto más de 7 *cm*.

Resultado obtenido: Todo el sistema ensamblado empujó el objeto más de 15 *cm*. Esta prueba fue considerada exitosa. La figura 5.32 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.33 presenta los comportamientos ejecutados durante la prueba. El robot líder logró localizar el objeto, acercarse a él y empujarlo, todo ello dirigiendo y conjuntamente con el sistema ensamblado. Los robots lograron coordinar sus movimientos para empujar el objeto. El sistema terminó la tarea deteniéndose cuando el robot líder no detectó avance en las llantas, asumiendo que ya no se podía empujar más y decidiendo detener al sistema.

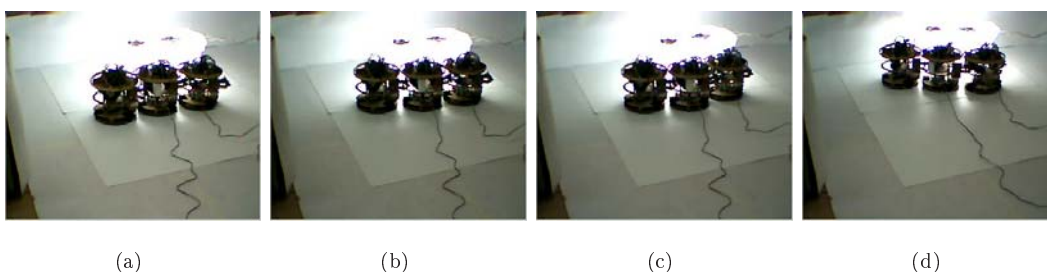


Figura 5.32: Experimento colectivo no. 5, caso no. 1. (a) Condiciones iniciales del experimento. (b) y (c) Objeto empujado por el sistema ensamblado. (d) Condiciones finales de la prueba, después de la recuperación de la alineación de los robots.

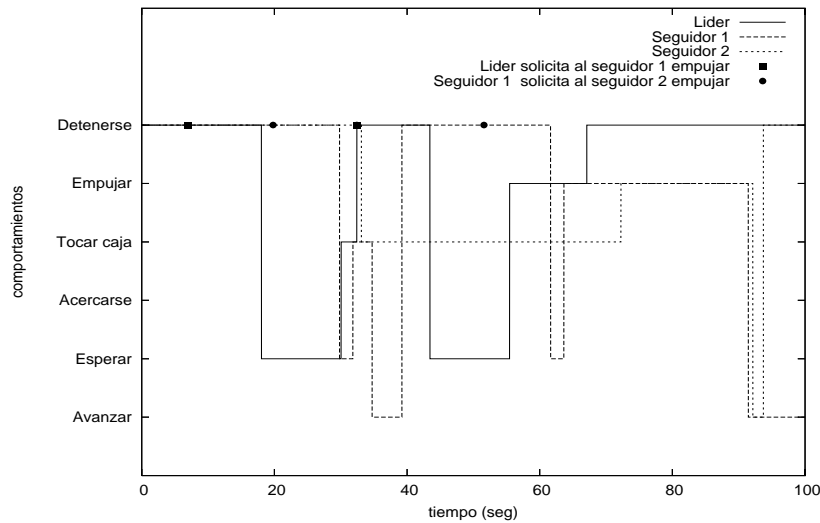


Figura 5.33: Experimento colectivo no. 5a, caso no. 1. En la gráfica observamos que el robot líder R3 percibe el objeto y se comunica con el robot seguidor 1 (R2) para notificar un mensaje. R2 recibe el mensaje y notifica al robot seguidor 2 (R1) el mensaje recibido de R3. Los tres robots logran acercarse al objeto hasta tocarlo y posteriormente empujarlo.

5.2.5.1.2. Caso no. 2: empuje no exitoso de un objeto por tres robots ensamblados, en uno de sus lados más angostos.

Descripción: La segunda prueba se realizó bajo las mismas condiciones de la prueba anterior, excepto que el sistema ensamblado de los tres robots debía empujar el objeto por uno de sus lados más angosto. R_3 establecido como robot líder, R_2 establecido como robot seguidor conectado a R_3 y R_1 establecido como robot seguidor conectado a R_2 . El robot líder debía localizar al objeto y empujarlo por un tiempo de 10 *segundos*, después de transcurrido este tiempo, el robot verificaba la presencia del objeto y el avance de las llantas. Si las llantas no se habían detenido y aún se percibía el objeto, nuevamente se repetía el proceso de empujar por un tiempo de 10 *segundos* y se verificaba el estado de avance y la percepción del objeto; en caso contrario, el robot y el sistema ensamblado se detenían. El robot líder guía a los robots seguidores en el desplazamiento.

Resultado esperado: Los tres robots logran coordinarse y empujar el objeto más de 7 *cm*.

Resultado obtenido: Los robots no lograron coordinarse en la comunicación y tiempo de ejecución de las acciones. Aunque R_3 comunicó de forma exitosa a R_2 y R_2 comunicó de forma

exitosa a R_1 , éste último ejecutó la acción de acercarse al objeto antes que los otros dos robots, provocando la desalineación del sistema en la formación, lo cual no le permitió percibir los siguientes mensajes enviados por el robot líder. Por otro lado, cuando los robots R_3 y R_2 intentaron seguir empujando el objeto, sólo lo lograron por poco tiempo, ya que el robot R_1 estaba detenido e impedía el desplazamiento total del sistema. Consideramos el resultado de esta prueba como no exitosa. La figura 5.34 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.35 presenta los comportamientos ejecutados durante la prueba.

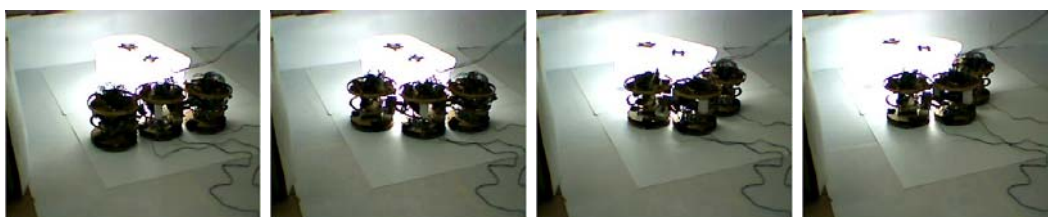


Figura 5.34: Experimento colectivo no. 5a, caso no. 2. (a) Condiciones iniciales de la prueba, donde los tres robots fueron colocados en forma ensamblada en uno de los extremos más angosto del objeto. (b) y (c) Proceso de empuje y (c) Condiciones finales de la prueba, donde se muestra que el objeto fue empujado.

5.2.5.2. b. Sin comunicación

En esta sección se presentan 4 pruebas realizadas no empleando comunicación. Los robots empujan el objeto de acuerdo a lo que perciben. No existe un robot líder, ni robots seguidores. Las especificaciones de estas pruebas se presentan a continuación.

$$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$$

$$\mathbf{R}_i = \{\text{Ca}, \text{Co}\}$$

$$\mathbf{Ca} = \{\text{avanzar, girar, detenerse}\}$$

$$\mathbf{Co} = \{\text{evadir_obstáculos, acercarse, tocar_objeto, empujar, empujar_objeto}\}$$

5.2.5.2.1. Caso no. 1: empuje exitoso de un objeto en una forma lateral por tres robots ensamblados.

Descripción: En esta prueba, cada robot debía percibir si el objeto se encontraba cerca de él o no. Si el objeto era percibido por el robot, entonces se acercaba hasta él y procedían a empujarlo; en caso contrario lo buscaban y si no lo encontraban, se detenían concluyendo que

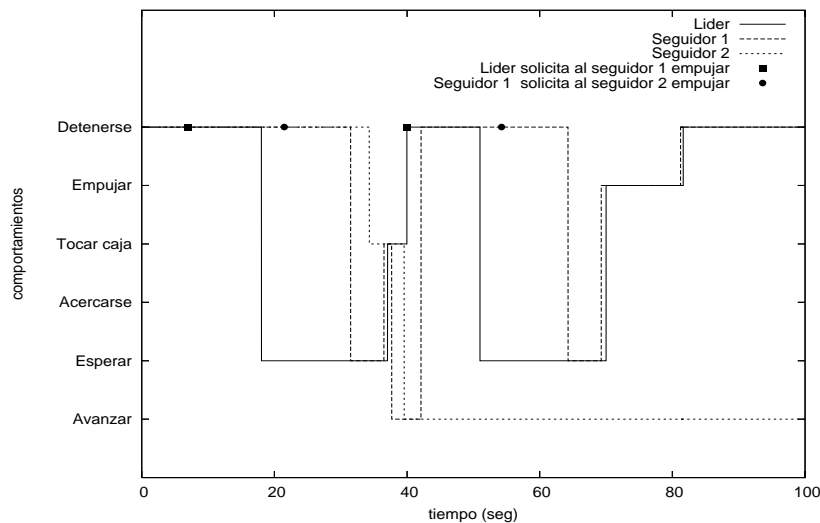


Figura 5.35: Experimento colectivo no. 5a, caso no. 2. La gráfica muestra el comportamiento de cada robot durante el proceso de empuje del objeto. Los robots coordinaron sus acciones de acuerdo a la comunicación que realizaron.

no había objeto que empujar, abandonando la tarea.

Resultado esperado: Cada uno de los robots logra percibir el objeto, acercarse a él, tocarlo y empujarlo más de 7 *cm*.

Resultado obtenido: Los robots lograron percibir el objeto, se acercaron y lo tocaron casi al mismo tiempo, por lo que los robots se desplazaron en forma sincronizada y empujaron el objeto. Se detuvieron después de 13 *secs.* de empuje, cuando percibieron que ya no avanzaban. El resultado de esta prueba se consideró exitosa. La figura 5.36 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.37 presenta los comportamientos ejecutados durante la prueba.

5.2.5.2.2. Caso no. 2: búsqueda no exitosa del objeto a empujar.

Descripción: En este caso, los robots fueron colocados en forma ensamblada a una distancia de 47 *cm* de un objeto *Obj₁*, el cuál debían localizar y empujar. Cada robot debía buscar el objeto, realizando pequeños acercamientos en la dirección de búsqueda del objeto. El robot debía abandonar el comportamiento en caso de no encontrar al objeto.

Resultado esperado: Los robots abandonan el comportamiento, debido a que no encuentran el objeto.

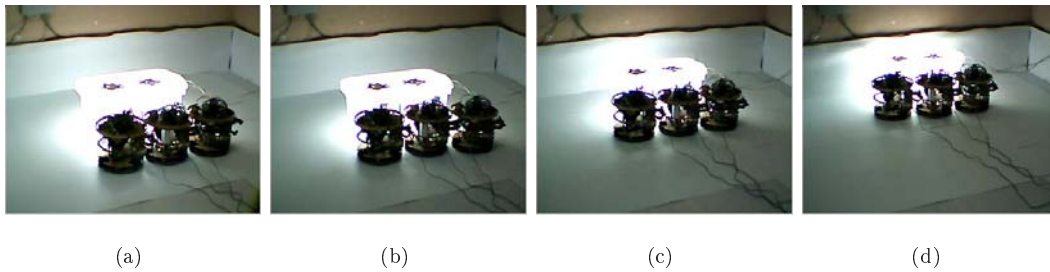


Figura 5.36: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 1. (a) Los tres robots detectaron el objeto al mismo tiempo. (b) y (c) Los robots se acercaron al objeto y empujaron un tiempo de 13 segs., (d) el sistema se detiene después de haber empujado y de no detectar avance de las llantas.

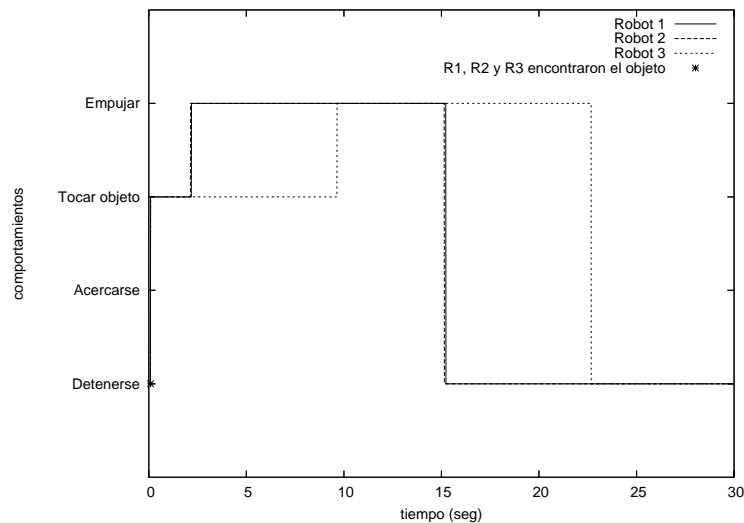


Figura 5.37: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 1. Los tres robots detectaron el objeto, se aproximaron al objeto hasta tocarlo y empujarlo.

Resultado obtenido: Los robots abandonaron el comportamiento, debido a que no encontraron el objeto a empujar. El resultado esperado se cumplió por lo que consideramos esta prueba como exitosa. A pesar de que los robots realizan desplazamientos tratando de encontrar el objeto, no tienen éxito y terminan por abandonar el comportamiento, todo esto, debido a que el objeto colocado en el ambiente se encontraba fuera del alcance de su percepción. La figura 5.38 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.39 presenta los comportamientos ejecutados durante la prueba.

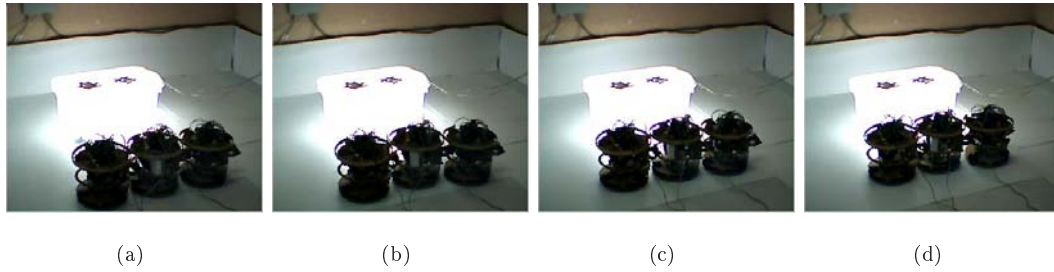


Figura 5.38: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 2. (a) Los robots se encuentran inicialmente a una distancia de 47 cm del objeto. (b) y (c) Los tres robots realizan un acercamiento hacia la izquierda, tratando de localizar al objeto, (d) pero no lo localizan, por lo que deciden detenerse y abandonar el comportamiento.

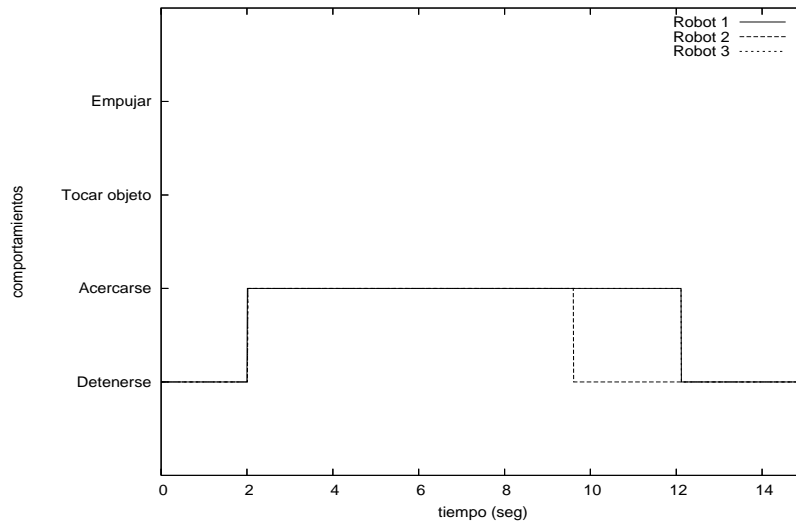


Figura 5.39: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 2. Los tres robots buscan el objeto acercándose a la izquierda. La gráfica muestra la sincronización de los comportamientos de los tres robots. Sin embargo, el robot R_2 decide detenerse y abandonar el comportamiento, antes que los otros dos robots, R_1 y R_3 .

5.2.5.2.3. Caso no. 3: empuje no exitoso de un objeto en forma lateral por tres robots ensamblados.

Descripción: En este caso, tres robots se colocaron en forma ensamblada a una distancia de 25 cm de un objeto Obj_1 . Cada robot debía buscar el objeto. Si los robots localizaban el objeto, debían acercarse hasta tocar el objeto y empujarlo. Los robots debían verificar la presencia del

objeto cada tres segundos de empuje. En caso de que los robots no detectaran el objeto, se detenían y terminaban el comportamiento. Si los robots no encontraban el objeto después de 4 intentos de búsqueda, procedían a detenerse y abandonar el comportamiento.

Resultado esperado: El objeto es empujado por los tres robots más de 7 cm.

Resultado obtenido: Aunque físicamente el objeto fue desplazado, los robots fueron abandonando el comportamiento uno a uno, debido a que el robot R_1 inicialmente no localizó el objeto y se detuvo abandonándolo, pasando lo mismo con el robot R_2 y el robot R_3 posteriormente, ya que el hecho de que se encuentren ensamblando y no se comuniquen imposibilita a los robots a coordinarse para concluir el comportamiento. Por ello, el resultado de la prueba se considera no exitosa. La figura 5.40 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 5.41 presenta los comportamientos ejecutados por el sistema ensamblado.

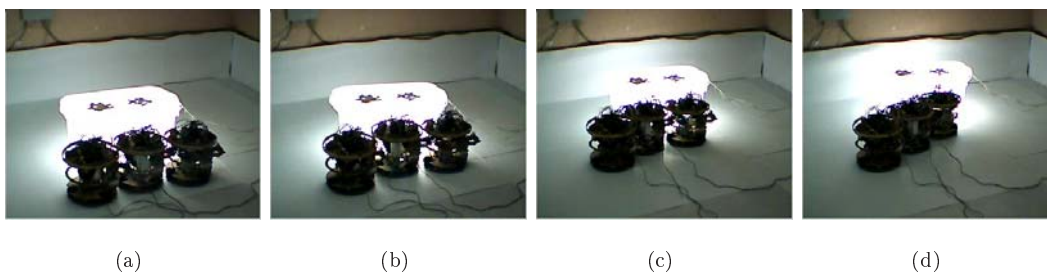


Figura 5.40: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 3. (a) Los tres robots se mueven hacia el objeto. (b) Sin embargo el robot 1 no lo encuentra y se detienen abandonando el comportamiento, (c) mientras los robots R_2 y R_3 empujan. (d) El robot R_2 se detiene, debido a que pierde el objeto, ya que el robot R_1 al detenerse dificulta el avance en el empuje del robot R_2 , ocasionando éste el mismo efecto en el robot R_3 .

5.2.5.2.4. Caso no. 4: empuje no exitoso de un objeto en una de sus esquinas por tres robots ensamblados.

Descripción: Esta prueba consistió en colocar a los tres robots R_1 , R_2 y R_3 en una de sus esquinas tratando de ‘abrazar’ un objeto Obj_1 para empujarlo en forma diagonal, hacia el noroeste. Los tres robots debían detenerse cuando no percibieran avance en sus llantas.

Resultado esperado: Los tres robots debían empujar más de 7 cm el objeto en forma diagonal.

Resultado obtenido: Los tres robots percibieron el objeto y lo empujaron, terminando el comportamiento cuando ya no detectaron más el avance de las llantas. El resultado de esta

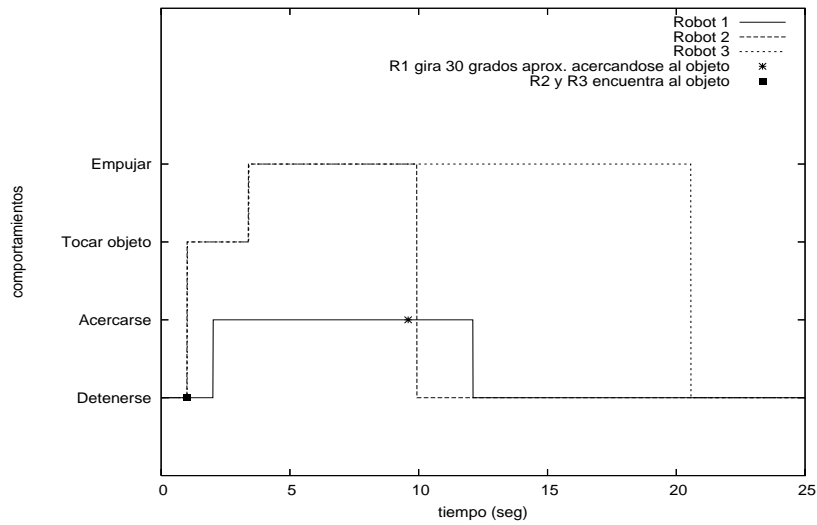


Figura 5.41: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 3. Mientras el robot R_1 no encuentra el objeto y termina la tarea, los robots R_2 y R_3 encuentran el objeto y lo empujan. Debido a que el robot R_2 se encuentra ensamblado al robot R_1 , no puede avanzar en forma recta en dirección del objeto, por lo que abandona la tarea también al no percibir el objeto nuevamente, sucediéndose lo mismo al robot R_3 con el robot R_1 .

prueba se consideró exitoso. La figura 5.42 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La gráfica 5.43 presenta los comportamientos ejecutados durante la prueba.

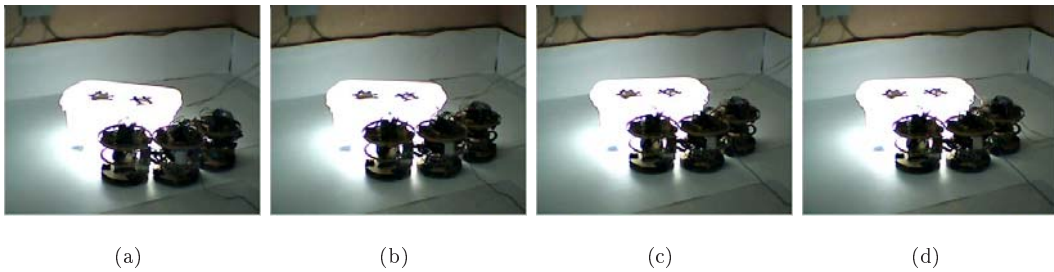


Figura 5.42: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 4. (a) Los tres robots fueron colocados en forma ensamblada en una de las esquinas del objeto. (b) y (c) Los robots percibieron al objeto y lo empujaron. (d) Condiciones finales de la prueba.

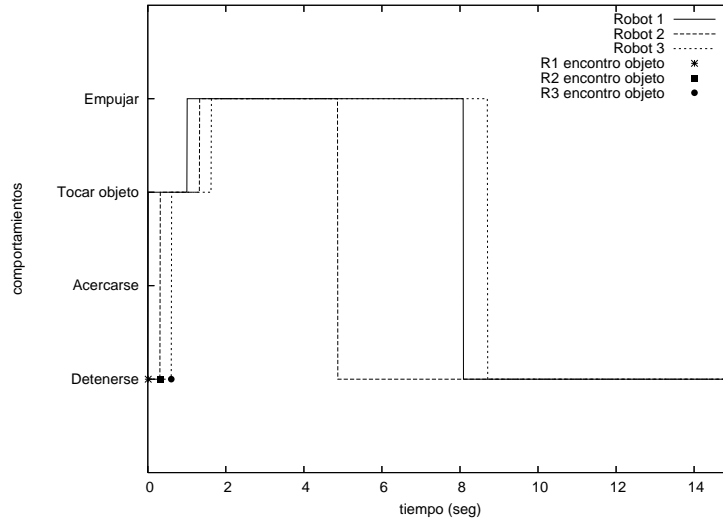


Figura 5.43: Experimento colectivo no. 5b, caso no. 4. Los tres robots encontraron al objeto y lo empujaron. Terminaron el comportamiento cuando ya no percibieron avance en sus llantas.

5.2.6. Experimento colectivo No. 6: cambiar de dirección

Este experimento consiste en un sistema ensamblado de tres robots, que cambian su dirección de desplazamiento en 180° . Solo se reporta un solo caso. Las especificaciones del experimento se presentan a continuación.

$$\mathbf{SMR} = \{R_1, R_2, R_3\}$$

$$\mathbf{R}_i = \{Ca, Co\}$$

$$\mathbf{Ca} = \{\text{avanzar, girar, detenerse, abrir_pinza, cerrar_pinza}\}$$

$$\mathbf{Co} = \{\text{seguir_líder, ceder_liderazgo, recibir_liderazgo, cambiar_dirección}\}$$

5.2.6.1. Caso único: Cambio de dirección exitoso de una formación en columna de tres robots ensamblados.

Descripción: El último experimento consistió en cambiar la dirección y el orden de ensamble de tres robots formados en columna. R_1 inicialmente con categoría de líder, R_2 con categoría de seguidor ensamblado a R_1 y R_3 con categoría de seguidor ensamblado a R_2 . Cada uno de los robots debía cambiar su dirección uno por uno, desensamblándose, avanzando al frente, girando 180° para orientarse y ceder el liderazgo a otro robot, o recibir el liderazgo de otro robot. El último robot seguidor ensamblado en la formación de columna, debía terminar ensamblado a

la punta de la formación con categoría de líder, mientras el robot líder inicial debía terminar ensamblado como el último robot seguidor ensamblado en la formación de columna.

Resultado esperado: El sistema logra cambiar la dirección de la formación en columna de los tres robots.

Resultado obtenido: El sistema logró cambiar la dirección de la formación en columna de los tres robots. El resultado de esta prueba fue considerado como exitoso. La figura 5.44 presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. Se puede observar, que cada uno de los robots cambia su categoría de líder o seguidor y se posiciona para ceder o recibir el liderazgo de otro robot empleando el mecanismo de transferencia descrito en la sección 4.3.5.2. Los tres robots lograron coordinarse y cambiar la dirección del sistema ensamblado. Lograr este comportamiento es sumamente difícil, debido a que hay que sincronizar la actuación de los robots, lograr el envío y recepción de mensajes en forma adecuada por los robots y lograr que los robots se posicionen en forma alineada uno a otro. La figura 5.45 presenta los comportamientos ejecutados por los robots durante la prueba.

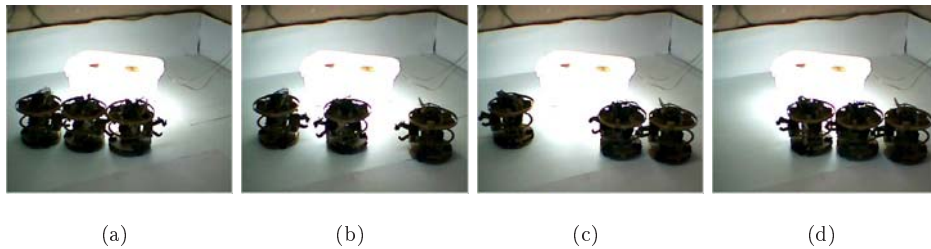


Figura 5.44: Experimento colectivo no. 6, caso único. (a) El sistema se encuentra inicialmente ensamblado en dirección al Este, de izquierda a derecha R_3 , R_2 y R_1 , siendo este último el robot líder. (b) El robot R_1 solicita a R_2 que se desensamble. Una vez desensamblado, R_1 avanza, y gira 180° para posicionarse y ceder su liderazgo a R_2 . (c) El robot R_2 solicita a R_3 que se desensamble, avanza y se orienta con respecto a R_1 para que lo ensamble y asuma el liderazgo. (d) Por último, R_3 gira y se orienta hacia R_2 para recibir el liderazgo, asumiendo la categoría de líder.

5.2.7. Conclusiones

La dificultad y el tiempo para encontrar un objeto por parte de los robots en un ambiente dependen en gran medida de las condiciones iniciales de cada uno de ellos. Cuando los robots

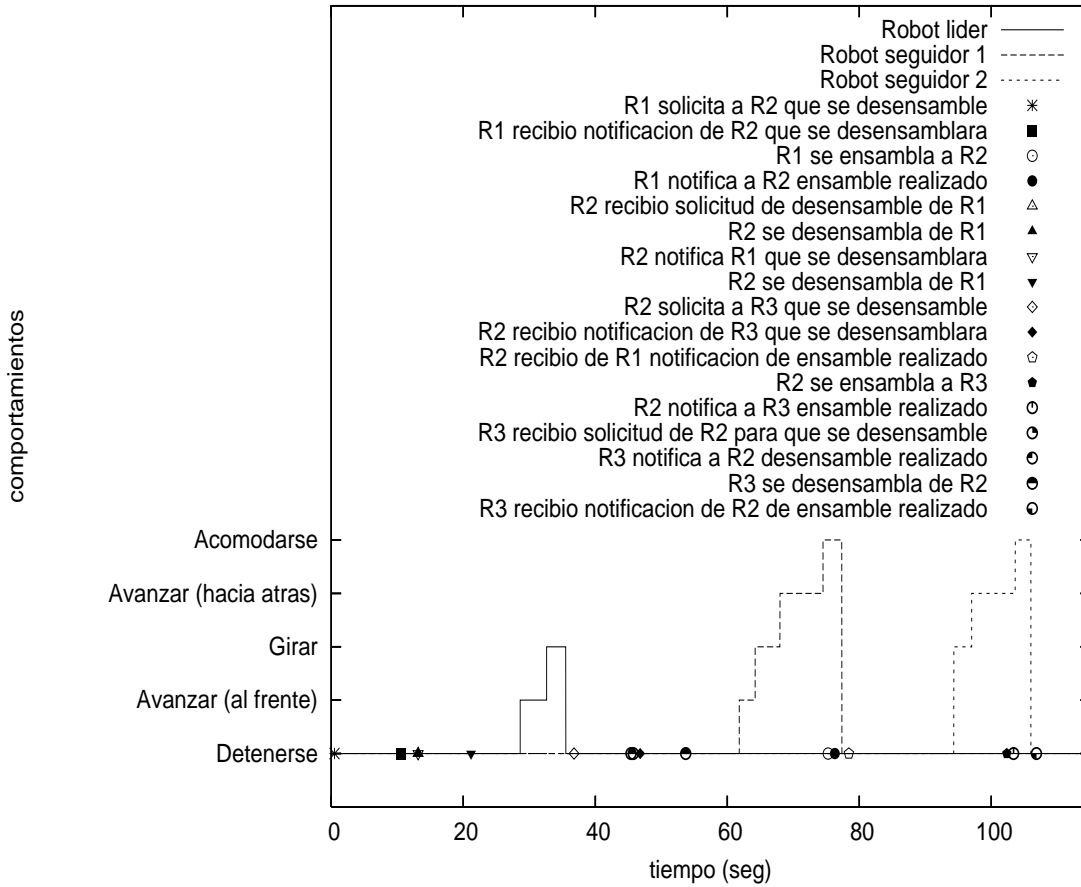


Figura 5.45: Experimento colectivo no. 6 caso único. Los robots se coordinan para desensamblarse uno por uno y posicionarse en forma invertida. Para ello, cada robot debía desensamblarse de un robot, invertir su posición y reensamblarse, con la consecuente modificación de su categoría de líder o seguidor.

parten de diferentes extremos del ambiente, es decir, cuando se desplazan sin fuertes restricciones de espacio, los robots tienen menor dificultad de realizar un comportamiento, como sucedió en el caso no. 1 del experimento colectivo no. 1. Sin embargo, cuando los robots convergen en un punto o se encuentran muy cerca uno del otro, es decir, cuando se desplazan con fuertes restricciones de espacio, existe mayor posibilidad de colisión entre ellos y mayor dificultad para completar el comportamiento, por ejemplo, los casos no. 2 y no. 3 del experimento colectivo no. 1.

Cuando la comunicación entre los robots no se estableció de forma adecuada, el sistema presentó problemas para terminar sus comportamientos, siendo además tardado el proceso de comunicación. La comunicación con señales luminosas requiere también de cierta alineación entre el receptor y el emisor, ya que de no ser así puede equivocarse el mensaje recibido o no recibirse. En el caso de las pruebas donde no se empleó comunicación, la decisión de ejecución de los comportamientos fue más rápida y los robots lograron concretar el comportamiento siempre y cuando logaran percibir el ambiente y sus movimientos los realizaran casi al mismo tiempo, ya que cuando uno de los robots terminaba por abandonar un comportamiento, provocaba el mismo efecto en el resto del sistema ensamblado. Creemos que es necesario que cada robot adecúe su velocidad y dirección de empuje, de acuerdo a la posición en que se encuentre en un tiempo específico. Sin embargo, esa tarea no es fácil, ya que para el robot percibir e identificar la forma y posición en que se encuentra posicionado con respecto a los otros robots y al objeto mismo, requiere de mayor equipamiento sensorial y métodos de coordinación más complejos.

Empujar un objeto colectivamente no es tarea fácil. El hecho de que los robots se encuentren ensamblados ofrece ventajas en comparación con los sistemas multi-robot no ensamblados, tales como estar reunidos todos los módulos del sistema. No obstante, el ensamblado puede volverse una desventaja si la comunicación y la coordinación no son efectivas.

Como muchos de los trabajos de robótica, esta tesis tiene un carácter experimental y está orientada a demostrar en ambientes físicos semi-controlados, mecanismos de coordinación simples y eficientes para sistemas multi-robot con capacidades de auto-ensamblado. Como pudo apreciarse en la exposición de experimentos, se han reportado tanto experimentos no exitosos como exitosos. En efecto, el espíritu de la tesis no es reportar sólo los experimentos y casos que funcionan sino también aquellos que contribuyan a diseñar los primeros, indicando los casos que requieran especial cuidado, así como los aspectos de la coordinación y la comunicación que debieran ser redefinidos.

Capítulo 6

Evaluación del sistema

Como se describió en la sección 2.4 del capítulo 2, existen diversos parámetros para evaluar el desempeño de un sistema multi-robot. En esta tesis, se empleó el parámetro **resultado** para evaluar el desempeño del sistema Mini-trans, por lo que fue de nuestro principal interés saber las condiciones y los requerimientos en que el sistema multi-robot realizaba la tarea propuesta. En este capítulo presentamos un análisis cualitativo de los resultados obtenidos de los experimentos realizados y una comparación de nuestro sistema con otros sistemas auto-reconfigurables presentados en el capítulo 3.

6.1. Desempeño del sistema Mini-trans

En las tablas 6.1 y 6.2 se muestran los resultados obtenidos por el sistema Mini-trans de un total de 3 experimentos individuales y 6 experimentos colectivos, con 5 y 16 casos respectivamente. Los porcentajes de éxito reportados en estas tablas corresponden a la proporción de casos exitosos (ver capítulo 5) del total de casos estudiados.

De acuerdo a las tablas 6.1 y 6.2, observamos que el tiempo de realización de todos los comportamientos probados con un solo robot, fue menor en comparación al tiempo involucrado en la ejecución de comportamientos por el sistema integrado por más de un robot. En los experimentos individuales, los dos primeros experimentos realizados pudieron concretarse por los robots. Sin embargo, el empujado de un objeto no pudo ser realizado por un solo robot. En los experimentos colectivos, se presentó mayor dificultad para concluir los comportamien-

tos por parte de los robots, debido a que a diferencia de los experimentos individuales, los robots tuvieron que interactuar con otros robots además de interactuar con el ambiente. El experimento colectivo `seguir_pared`, `alinearse`, e `identificar_obstáculos` se realizó con un porcentaje de éxito de 67%, la principal causa de fracaso identificada fue la imprecisión en la alineación de los robots para comunicarse. El comportamiento `auto-ensamblarse` tuvo el 100% de éxito en los dos casos estudiados, debido a que los robots ya se encontraban alineados. El comportamiento `desplazarse_en_forma_ensamblada` se pudo realizar con dos y tres módulos. La comunicación y el desplazamiento son lentos, pero se realizaron exitosamente. El comportamiento `empujar_objeto` se realizó en menor tiempo sin comunicación que con comunicación, con un 50% de éxito. Esto se debe a que en el proceso de comunicación se requiere sincronizar el tiempo de envío y recepción de información, además de que la comunicación entre los robots con el tipo de equipamiento sensorial es compleja y tardada, ya que para que se pueda realizar la comunicación adecuadamente, la pinza y el medio de ensamble de los robots que están comunicándose, deben tener cierta alineación. Es tardada debido a que se emplea un número de cambios de intensidades de luz en un tiempo t para indicar un mensaje. El tiempo de envío y recepción del mensaje son iguales y este mensaje tiene que ser transmitido por el método de **propagación**, si uno de los robots inicia el proceso de recepción o envío antes que el otro robot, el robot receptor puede equivocarse el mensaje que desea comunicar el robot transmisor. Por su parte, el comportamiento `empujar_objeto` con comunicación presentó un 75% de éxito. Sin embargo, pudo observarse en los experimentos que realizar este tipo de comportamiento sin comunicación también ocasiona que todo el sistema se detenga abandonando el comportamiento, cuando uno de los robots se detiene y abandona la tarea. Por último, el comportamiento `cambiar_dirección` fue realizado con éxito. Lograr la coordinación y sincronización entre los robots es difícil, debido a las limitantes sensoriales y de comunicación del sistema multi-robot. El mecanismo de cambio de dirección puede ser aplicado también para el auto-ensamble de dos o más robots ensamblados a otro robot. Sin embargo, cabe señalar que cuando las condiciones ideales se presentaron, todos los comportamientos se ejecutaron exitosamente.

A continuación presentamos una comparación del desempeño del sistema multi-robot Mini-trans con otros tres tipos de sistemas multi-robot, descritos en el capítulo 3.

Tabla 6.1: Resumen de los experimentos individuales

Experimentos individuales				
Experimento	No. de casos estudiados	No. de casos en los cuales todos los robots completaron el comportamiento	Porcentaje de éxito en la prueba realizada con respecto al resultado esperado	Promedio de tiempo de realización
Navegar	1	1	100 %	120 <i>segs.</i>
Seguir pared, alinearse e identificar obstáculos	1	1	100 %	120 <i>segs.</i>
Empujar un objeto	3	3	83.33 %	31.67 <i>segs.</i>

6.2. Comparación de cuatro sistemas multi-robot tipo móvil

Se realizó una clasificación de los tres sistemas multi-robot auto-reconfigurables de tipo móvil descritos en el capítulo 3. La tabla 6.3 presenta un resumen de las características consideradas para ésta clasificación. Las propiedades que se consideraron son forma, capacidades individuales por módulo, tipo de locomoción, tipo de ensamble, tipo de comunicación, forma de coordinación, arquitectura de control empleada y el tipo de terreno en el que los robots ensamblados se pueden desplazar.

En la figura 6.1 se presentan las gráficas que resumen las propiedades de los sistemas multi-robot auto-reconfigurables analizados. De acuerdo a estas gráficas, observamos que cada sistema tiene mayor cobertura de alguna de las características consideradas. Por ejemplo, los puntos fuertes de Millibot-trains y SMC rover son, respectivamente, el tipo de comunicación y el tipo de locomoción y modularidad (C.I.M.). Swarm-bots es el sistema que presenta mayor adaptatividad y mejor desempeño en comparación con los otros tres sistemas. Sin embargo, Mini-trans presenta características similares a los tres sistemas, presentando una capacidad de adaptación media.

Tabla 6.2: Resumen de los experimentos colectivos.

Experimentos colectivos				
Experimento	No. de casos estudiados	No. de casos en los cuales todos los robots completaron el comportamiento	Porcentaje de éxito en la prueba realizada con respecto al resultado esperado	Promedio del tiempo de realización
Navegación	3	3	100 %	360 <i>segs.</i>
Seguir pared, alinearse e identificar obstáculo	3	3	67 %	880 <i>segs.</i>
Auto-ensamblarse	2	2	100 %	125 <i>segs.</i>
Desplazamiento en forma ensamblada	1	1	100 %	100 <i>segs.</i>
Empujar un objeto c/comunicación	2	1	50 %	110 <i>segs.</i>
Empujar un objeto s/comunicación	4	2	50 %	18.75 <i>segs.</i>
Cambiar de dirección	1	1	100 %	115 <i>segs.</i>

Cabe remarcar que la principal característica del sistema es la autonomía de los módulos para ensamblarse.

Otras características consideradas para comparar nuestro sistema con los robots auto-reconfigurables anteriormente mencionados, son los mecanismos de coordinación empleados en cada sistema, el número de módulos que integran el sistema y los recursos empleados para el desarrollo de cada uno de estos proyectos.

Con respecto al auto-ensamble, el sistema Swarm-bot emplea un mecanismo que consiste en una atracción y repulsión local entre los S-bots. El sistema multi-robot tiene inicialmente establecido un robot como “semilla” el cual ilumina su arillo de color rojo. Los demás robots iluminan inicialmente sus arillos de color azul. Durante un proceso de búsqueda, los robots

Tabla 6.3: Criterios considerados en la clasificación de los sistemas auto-reconfigurables Swarm-bots, Millibot-trains, SMC rover y Mini-trans ilustrados en la figura 6.1.

Sistemas auto-reconfigurables				
Características	Valores			
	1	2	3	4
Autonomía	No autónomos	Principalmente teleoperados	Semi-autónomos	Autónomos
DOF por módulo	1	2	3	> 3
Capacidades individuales por módulo (C.I.M.)	Hardware y software homogéneos	Hardware homogéneos y software heterogéneos	Hardware y software heterogéneos complementarios	Hardware y software heterogéneos
Locomoción	Llantas	Orugas	Llantas omnidireccionales	Llantas y orugas
Conexión o ensamble	Rígido	Semi-rígido	Flexible	Rígido y flexible
Comunicación	Sin comunicación	Indirecta	Directa	Directa e indirecta
Arquitectura de control	Centralizada y fija	Centralizada basada en una jerarquía dinámica	Híbrida	Descentralizada
Tipo de terreno	Plano	Poco rugoso	Rugoso	Extremadamente rugoso

evitan a los robots de color azul, buscan y se conectan a algún robot con arillo de color rojo. Una vez conectados, los robots cambian el color de sus arillos de azul a rojo para atraer a otros robots (Groß et al., 2006). Los Millibot-trains y el sistema SMC rover no indican con detalle el mecanismo que emplean para realizar el ensamble. Sin embargo, se tiene reporte que algunos de sus comportamientos son teleoperados (Brown et al., 2002; Kawakami et al., 2003; Hirose, 2000). Se sabe que la segunda versión del sistema SMC rover se compone de módulos autónomos pero no se tiene mayor información hasta el momento con respecto a sus características (c.f. sección 3.3.3). Por su parte, Mini-trans, como se describe en el capítulo 4, realiza el auto-ensamble por un mecanismo denominado de **transferencia**, el cual consiste en el recibimiento y cesión de liderazgo entre robots. Cuando dos robots se encuentran se identifican, realizan un consenso, desafío o jerarquización para decidir qué robot será el líder y qué robot cederá el liderazgo ensamblándose al nuevo líder. Este mecanismo se detalla en la sección 4.3.5.2.1.

Los cuatro sistemas con los cuales comparamos el sistema Mini-trans emplean el mismo tipo de mecanismo de coordinación: descentralizado. Las tablas 6.4, 6.5 y 6.6 nos muestran que Swarm-bots es el sistema con mayor número de módulos involucrados, y Mini-trans el sistema con menor número de módulos. Sin embargo, el equipamiento mecánico y sensorial de los módulos del sistema Mini-trans, así como la cantidad de personal involucrado en el proyecto y el tiempo

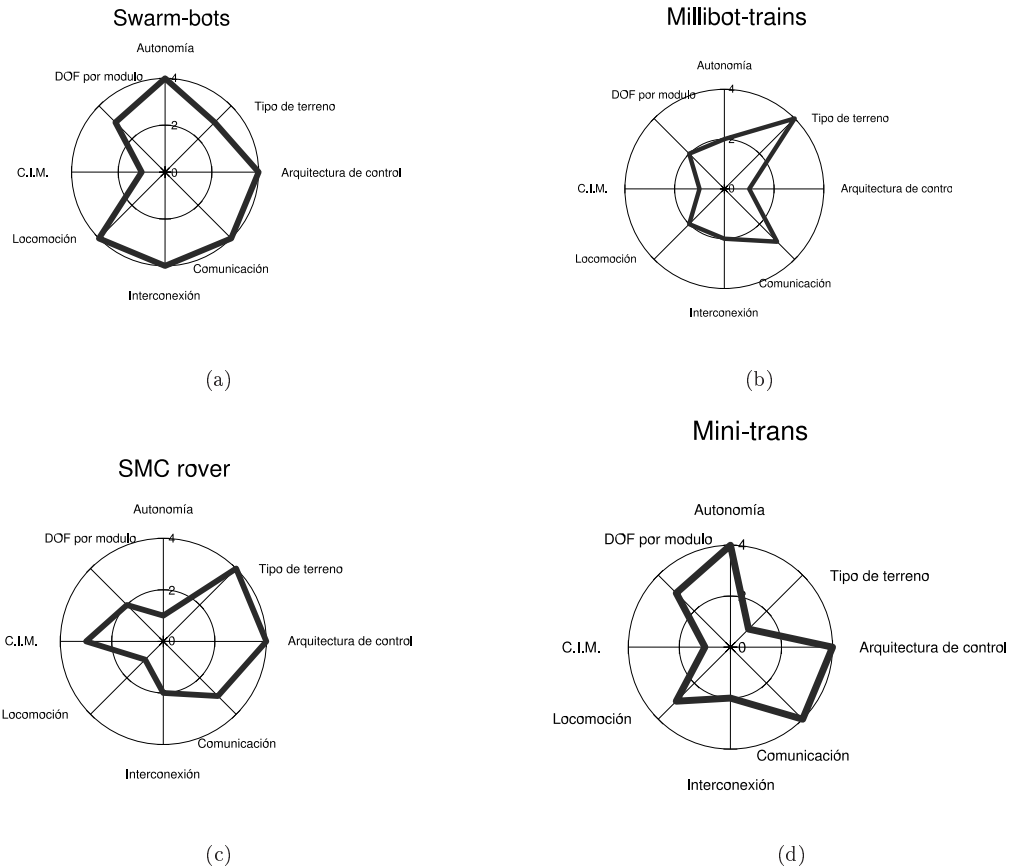


Figura 6.1: Comparación de las principales características de cuatro sistemas auto-reconfigurables: (a) Swarm-bots, (b) Millibot-trains, (c) SMC rover y (d) Mini-trans. Los valores más pequeños (1 y 2) representan baja adaptatividad, en contraste con los valores más altos (3 y 4), los cuales representan mayor adaptatividad. Como lo muestra en las gráficas, Swarm-bots es el sistema que presenta mejor adaptatividad y desempeño de acuerdo a la clasificación realizada. Los detalles de los valores y criterios de clasificación se encuentran en la tabla 6.3.

empleado para el desarrollo de cada uno de ellos es mucho menor al de los otros tres sistemas. Aunque no se tiene reporte del costo por módulo de esos sistemas, podemos estimar a partir del equipamiento con que cuentan, que el costo de cada módulo Mini-trans es mucho menor al de estos sistemas y a pesar de ello, Mini-trans presenta capacidades y características similares e incluso mejores comparado con algunos de esos prototipos.

Aunque los elementos de la tabla 6.6 no pueden tomarse como criterios determinantes de evaluación, sí son útiles para comparar los recursos tales como tiempo, personal, financiamiento y costo invertidos en el desarrollo de tres sistemas multi-robot y el sistema Mini-trans. Estos criterios se discutieron en la sección 2.4, al referirnos a las formas de evaluar un sistema multi-robot. Esta información se incluye como un indicativo de los alcances y de las limitaciones de nuestro sistema.

Tabla 6.4: Número de módulos que integran a cada sistema. Mini-trans, es el sistema con menor número de módulos y Swarm-bots, el sistema con mayor número de módulos.

Sistema multi-robot	Número de módulos o robots que componen el sistema
Swarm-bots	30-35 módulos homogéneos
Millibot-trains	7 módulos homogéneos
SMC rover	5 módulos heterogéneos, 2-modular
Mini-trans	3 módulos homogéneos

Tabla 6.5: Tareas para los cuales fueron diseñados y construidos cada uno de los sistemas auto-reconfigurables mencionados. Swarm-bots y Mini-trans realizaron tareas similares.

Sistema multi-robot	Tareas
Swarm-bots	Jalar un objeto, traslado de un objeto, exploración en forma ensamblada, auto-ensamble, búsqueda de un objeto.
Millibot-trains	Exploración en forma ensamblada, escalamiento no autónomo de una pared, auto-ensamble.
SMC rover	Exploración en forma ensamblada e individual
Mini-trans	Navegar (buscar un objeto y detenerse cerca de él), auto-ensamble, reclutamiento de robots (desplazarse alrededor de un objeto siguiendo sus paredes, alinearse e identificar el obstáculo cuando colisionan), desplazamiento en forma ensamblada, traslado de un objeto y cambio de dirección de la formación en columna de un sistema ensamblado.

6.3. Hacia una generalización de los mecanismos de coordinación para robots reconfigurables

El carácter esencialmente experimental de la robótica ha incidido en que se registren avances principalmente en el desarrollo de técnicas de control para robots, tanto individuales como sistemas multi-robot. Pocos trabajos se han registrado en lo que concierne la generalización y formalización de los principios de organización de sistemas robóticos (Cao et al., 1997). En esta tesis, donde también se ha privilegiado la experimentación, se espera al menos proporcionar indicios que pudieran servir para generalizar la organización de un sistema multi-robot de tipo móvil terrestre. Estos indicios se resumen en forma de principios generales de coordinación de sistemas multi-robot.

1. **Incorporación:** Como lo sugieren McFarland et Bosser (1993), la inteligencia no ocurre de manera desincorporada. En particular los sistemas multi-robot auto-reconfigurables no

son buenos candidatos a ser simulados, pues deben contar con cuerpos que experimenten el mundo por sí mismos, ya que existen factores que afectan el comportamiento del robot, los cuales en su mayoría no se consideran o son pobremente considerados en un ambiente simulado, como son el ruido del ambiente, el ruido de los sensores, el ajuste o desajuste de las piezas del robot, etc.

2. **Percepción local:** Los enfoques descentralizados aunque duros de trabajarse, parecen ser la opción para el control de sistemas multi-robot. Hay tantas restricciones en problemas de robótica reconfigurable, que sólo la percepción local asegura la autonomía del robot. La percepción local de un robot que pertenece a un robot auto-reconfigurable es básica para su autonomía, ya que un robot sin percepción local sería prácticamente insensible a todo estímulo de su ambiente y no podría desempeñarse por sí mismo.
3. **Modularidad:** Se requiere de una modularidad conceptual y de una modularidad física en la construcción de robots, especialmente reconfigurables. La modularidad física permite reparar o reemplazar una parte sin necesidad de modificar el resto del robot, así como diseñar e implementar cada una de sus partes por separado, lo cual puede ser beneficioso en costo y tiempo. Por su parte, la modularidad conceptual también nos facilita el diseño, codificación, reemplazo, corrección y prueba de los módulos de forma separada o grupal.
4. **Equilibrio individual y colectivo:** Un robot que forma parte de un sistema multi-robot tiene comportamientos individuales y colectivos. Como se trata de robots móviles, los módulos deben poder comportarse como robots individuales. Sin embargo, cuando los robots forman parte de un sistema ensamblado, sin perder su individualidad deben contribuir a la ejecución de comportamientos colectivos del sistema, es decir, integran un solo cuerpo, en este caso, el sistema ensamblado.
5. **Distribución espacio-temporal:** La actuación del sistema multi-robot requiere de reglas de distribución espacial y temporal precisas. Cada robot del sistema contendrá con el ambiente y con los demás miembros del sistema multi-robot reconfigurable, pudiendo encontrarse en uno de dos estados posibles, ensamblados o no ensamblados. En los dos casos, los módulos requieren de reglas que les indiquen la forma de distribuirse espacialmente, pasando por una serie de estados temporales para lograr la reconfiguración del sistema.
6. **Comunicación:** La falta de comunicación entre los módulos de un sistema multi-robot permite que se den situaciones insalvables en el sistema, por ejemplo que uno o más robots se

anclen e impidan o dificulten la realización de tareas colectivas. En cambio, la comunicación entre los robots puede apoyar la coordinación entre los robots del sistema. La comunicación no necesariamente tiene que ser de alto nivel, una comunicación de bajo nivel como la propuesta en esta tesis puede apoyar la coordinación entre los módulos.

7. **Coordinación diferenciada:** La coordinación requerida en el control de un sistema multi-robot no es genérica ni única. El comportamiento de los robots que forman parte de un sistema auto-reconfigurable requiere diversos tipos de coordinación orientada al cumplimiento de tareas específicas, como son asociación, auto-ordenamiento y auto-ensamble.

Los principios presentados anteriormente pueden ser así mismo indicadores de evaluación al comparar mecanismos de coordinación. Por ejemplo, en el principio 5 se plantea la distribución espacio-tiempo de los robots de un sistema. Si un mecanismo de coordinación requiere que el área ocupada por los robots sea estrictamente menor a la mitad del área del ambiente y otro mecanismo de coordinación de robots, requiere que el área ocupada por los robots sea menor o igual al área del ambiente, entonces el segundo mecanismo de coordinación es en principio mejor al primer mecanismo de coordinación.

Tabla 6.6: Recursos invertidos por módulo en cuatro sistemas auto-reconfigurables. Mini-trans es en cuanto a tiempo de realización y equipamiento utilizado, el más modesto de los cuatro proyectos.

Sistema multi-robot	Recursos			
	Tiempo	Colaboradores	equipamiento mecánico y sensorial por módulo	Costo por módulo
Swarm-bots	4 años	26 investigadores de 3 laboratorios de países diferentes	cámara omnidireccional de color, 20 sensores IR de proximidad, 24 sensores de luz, 3 acelerómetros, 2 sensores de humedad, sensores de rotación, sensores de torque, 11 procesadores PIC, 9 actuadores, dispositivos de comunicación, motores, 1 servomotor, orugas, dos tipos de pinza y una tarjeta de control comercial.	No reportado
Millibot-trains	Desde el año 2001	7 investigadores	locomoción con orugas, acoplamiento <i>pin-hole</i> , servomotor, motores, 6 baterías NiMH recargables, alambre flexinol, potenciómetros, piezas de polietileno y de metal, sensores de rotación ópticos, 1 procesador PIC, 1 radio modem, piezas de fibra de vidrio y de aluminio.	No reportado
SMC rover	Desde el año 1997	Al menos 5 investigadores	motores, celda solar, 5 brazos mecánicos	No reportado
Mini-trans	15 meses	2 investigadores	3 motoredutores, 1 servomotor, una pinza de ensamble, 3 sensores de rotación, una tarjeta comercial de control, 8 microinterruptores, 6 <i>leds</i> , 6 fotoresistores, 3 sensores ópticos reflectivos, 3 llantas omnidireccionales comerciales, 1 receptor infrarrojo	6334.65 pesos.

Capítulo 7

Conclusiones y perspectivas

7.1. Recapitulativo

Esta investigación consistió en el diseño y construcción de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, compuesto por tres robots homogéneos. Los robots fueron diseñados y construidos por nosotros mismos, su equipamiento sensorial fue limitado y estuvo basado principalmente en microinterruptores, sensores de luz e IR. Para determinar la forma y equipamiento del robot que conformaría el sistema Mini-trans, se realizaron 6 diferentes prototipos. Se empleó la arquitectura Basada en Comportamientos (Mataric, 2002) a la cual se le adicionó un módulo de memoria. Esta memoria permitió a los robots tomar decisiones y realizar acciones de acuerdo a la información almacenada sobre eventos pasados.

Se propusieron e implementaron mecanismos de coordinación para un sistema multi-robot para desplazarse en forma ensamblada, reclutar robots, auto-ensamblarse, empujar un objeto y cambiar de dirección. Se realizaron principalmente 2 tipos de experimentos, individuales y colectivos, con diferentes pruebas de comportamientos como navegación, reclutamiento de robots, desplazamiento ensamblado, auto-ensamble, empujado de un objeto y cambio de dirección. La navegación en todos los casos colectivos fue exitosa aunque los robots tuvieron dificultades para concluirla, debido a las constantes colisiones entre los robots cuando convergían cerca del objeto, requiriendo volver a localizar al objeto y posicionarse cerca de él. La búsqueda de otros robots alrededor del objeto para alinearse con ellos se presentó con el experimento seguir_pared-alinearse-identificar_obstáculos, el cual pudo realizarse con

un 67 % de acierto. El auto-ensamble pudo realizarse siempre y cuando los sensores IR pudieran alinearse, teniendo un 100 % de éxito en los dos casos estudiados. El traslado de un objeto con comunicación tuvo un 50 % de éxito, mientras el traslado del objeto sin comunicación tuvo un 50 % de éxito de las pruebas realizadas, debido al tiempo necesario para transmitir mensajes, y a la degradación que puede sufrir un mensaje al ser enviado o recibido por los robots del sistema durante el proceso de comunicación. Finalmente, el comportamiento `cambiar_dirección` se realizó con un 100 % de éxito, empleando comunicación con señales luminosas. Aunque la mayoría de las tareas pudieron realizarse como se esperaba, algunas de las tareas presentaron dificultades, debido a la complejidad para coordinar las acciones de los robots y para sincronizar el proceso de envío y recepción de mensajes. Aunque los experimentos sin comunicación en la tarea `empujar objeto` tuvieron mayor éxito que los experimentos con comunicación, creemos que es importante considerar la comunicación entre los robots de un sistema auto-reconfigurable, para lograr una mejor coordinación de sus acciones, ya que si uno de los robots realiza una acción diferente a los otros, podría obstaculizar o detener al sistema completo sin posibilidad de notificación. El porcentaje de éxito reportado se refiere al número de pruebas que se realizaron alcanzando el objetivo esperado planteado en cada uno de los casos descritos en el capítulo 5.

Si se desea reproducir o incrementar el sistema Mini-trans de acuerdo al diseño actual, se requiere de capacidad de envío y recepción de señales infrarrojas en la parte frontal del robot y señales luminosas en la parte frontal y trasera del robot, locomoción omnidireccional, morfología cilíndrica, ensamble en la parte trasera de los robots y detección de obstáculos alrededor del robot. Los Mini-trans requieren, así mismo las capacidades de localizar un objeto iluminado interiormente con luz blanca y de empujar un objeto.

7.2. Aportaciones

A continuación se resumen las principales aportaciones de esta tesis.

7.2.1. Materiales

1. Se diseñó un prototipo físico de un módulo para integrar un sistema-multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, a partir de abundante experimentación y comparación de distintos prototipos realizados.

2. Se construyó un sistema multi-robot compuesto por tres módulos homogéneos, autónomos, móviles y con capacidades de auto-ensamblado, el sistema Mini-trans, el cual se integrará al acervo del Laboratorio de Robótica de la Coordinación de Ciencias Computacionales del INAOE.

7.2.2. Conceptuales

1. Se propusieron los mecanismos de sincronización **espera** y **ajuste** para el proceso de comunicación de dos robots (c.f. 4.3.5.2) empleando señales luminosas, así como protocolos para comunicación de bajo nivel empleando señales luminosas e IR.
2. Se propusieron tres mecanismos de coordinación espacial para sistemas multi-robot auto-ensamblables: **capas**, **transferencia** y de **absorción**, no empleados por ningún otro sistema multi-robot existente, del que se tenga conocimiento. El mecanismo de **capas** fue implementado y probado en el sistema Mini-trans.
3. Se sintetizó una serie de lecciones aprendidas con base en la experiencia obtenida durante el proceso de diseño y construcción del sistema Mini-trans, las cuales son importantes de considerar en el diseño e implementación de este tipo de sistemas.
4. Se implementó el mecanismo **líder-seguidor** diferente al propuesto por otros proyectos reportados, basado en la **propagación** de la información en el sistema ensamblado, empleando comunicación de bajo nivel y percepción local.
5. Se propuso e implementó un método novedoso, no reportado hasta donde tenemos conocimiento, para el cambio de dirección de un sistema multi-robot ensamblado, cambiando el orden y la orientación de ensamble de los módulos ensamblados en forma de columna.
6. Se propuso e implementó un método de navegación de los robots en forma individual en un ambiente cerrado para lograr encontrar un objeto y posicionarse cerca de él, guiándose principalmente por las intensidades de luz captadas.
7. Se propuso e implementó un método de reclutamiento de robots alrededor de un objeto, el cual consiste de desplazamiento de los robots individuales o ensamblados alrededor del objeto, identificación de robots, auto-ensamble y cambio de dirección.
8. Se implementaron los métodos de **consenso**, **desafío** y **jerarquización** para resolver el conflicto entre robots para obtener el liderazgo de un sistema multi-robot ensamblado.

9. Se propuso el mecanismo de **propagación disyuntiva** para coordinar los movimientos de un sistema multi-robot ensamblado en forma de columna.
10. Se delinearon algunos principios que pueden dar indicios hacia una generalización de mecanismos de coordinación para la organización de sistemas robóticos, especialmente auto-reconfigurables de tipo móvil.

7.3. Conclusiones

La locomoción omnidireccional permitió a los robots desplazarse de forma lateral y diagonal al empujar un objeto, así como mayor libertad al seguir a un robot líder. Sin embargo, se requiere un control más preciso y variable en las velocidades de sus llantas.

El cinturón de contacto circular permitió la detección de colisiones alrededor del robot. El medio de ensamble fue lo suficientemente flexible para permitir a los robots desplazarse en forma ensamblada. Sin embargo, requirió de mayor equipamiento sensorial en la pinza y en la placa de ensamble para detección de la posición de la pinza con respecto a la placa de ensamble.

El diseño y construcción de una pinza fue un reto para la construcción del sistema Mini-trans debido a la precisión requerida en un servomotor para abrir y cerrar la pinza. Concluimos que, para diseñar y construir una pinza eficiente para robots modulares, es necesario considerar los objetos que el robot sujetará, la forma y el tamaño de los dispositivos de ensamble, la longitud de apertura, la resistencia y posición donde la pinza se fijará, la cantidad y tipo de sensores de la pinza, la forma de detección o evasión de colisiones en la pinza, así como la precisión de apertura y cierre de la misma.

Se implementó el sistema de comunicación a través del envío de señales luminosas e IR. Sin embargo, la comunicación basada en estas señales presentó dificultades de sincronización de emisión y lectura de las señales, por requerir una alineación precisa entre los robots para la emisión y recepción de señales luminosas e IR. Si el equipamiento de comunicación entre los robots modulares con capacidades de auto-ensamblado es simple o muy limitado, la coordinación entre los robots es más difícil de lograr, requiere del uso de la percepción local del robot, y mayor equipamiento sensorial.

La morfología cilíndrica del robot y su equipamiento sensorial y de actuadores, lo dotaron de capacidades de percepción, desplazamiento omnidireccional, desplazamiento en forma individual y ensamblada, navegación, ensamble, desensamble, evasión de obstáculos, traslado de un objeto

y cambio de dirección en la forma de ensamble. Aunque ésta morfología fue adecuada para el desempeño de los módulos en forma individual, no podemos decir aún que es óptima para permitir la capacidad de auto-ensamblado, ya que presenta algunas limitantes descritas en el capítulo 4. La forma cilíndrica probablemente no sea la mejor morfología para módulos de un sistema auto-reconfigurable.

Los mecanismos de coordinación para el reclutamiento de robots alrededor de un objeto iluminado en su interior, para el desplazamiento de forma ensamblada de dos o más robots, auto-ensamble y cambio de dirección propuestos e implementados son novedosos, ya que ningún sistema auto-reconfigurable de tipo móvil ha presentado hasta donde sabemos, algo similar. Estos métodos fueron probados en nuestro sistema y funcionaron para que dos o más robots se auto-ensamblaran y para que tres robots cambiaran de dirección invirtiendo el sentido de conexión de los módulos del sistema. Estos mecanismos pueden emplearse inclusive para hacer que el sistema completo se invierta, es decir, cambie de sentido y explore en sentido contrario. Estos métodos están orientados a robots limitados de equipamiento, por lo que creemos que pueden también ser implementados en robots mejor equipados mecánica y sensorialmente, siempre y cuando se cumplan las características propuestas.

El empujado de un objeto con un sistema multi-robot ensamblado no es tarea menos difícil que la que ofrece un sistema no ensamblado, ya que también requiere de una coordinación adecuada entre los módulos para empujar con distintas orientaciones, fuerza e inclusive velocidad, además de que el número de robots ensamblados que empujen deben ser adecuado al tamaño y dimensiones del robot.

La homogeneidad de los módulos del sistema multi-robot ofrece ventajas considerables en cuanto al control del sistema, ya que todos los módulos saben que los demás módulos del sistema tienen características y comportamientos iguales a los de ellos.

En el diseño y construcción de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, es necesario considerar las capacidades que debe tener cada módulo y las capacidades del sistema ya ensamblado, así como el medio en el cual se desempeñará el sistema y los criterios de evaluación del desempeño del sistema. La capacidad de ensamble de los módulos de un sistema auto-reconfigurable ofrece ventajas en comparación con los sistemas multi-robot no ensamblados, tales como estar reunidos todos los módulos del sistema. No obstante, el ensamblado puede convertirse una desventaja si la comunicación y la coordinación entre los módulos no son efectivas.

El diseño y construcción del sistema multi-robot presentó muchos retos, tales como seleccionar, adquirir y caracterizar los sensores, cortar el material con la precisión requerida y lograr la comunicación por medio de IR. El presupuesto disponible fue limitado, por lo que el equipamiento del robot debió ajustarse a éste, así como a la disponibilidad en nuestro país de la mayor parte del material requerido. Aunque no se contaba con lineamientos para la construcción de un robot que conformaría un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, fue posible diseñar y construir un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, como se estableció en los objetivos de la tesis. Se concluye que el presupuesto y medios disponibles para la construcción de un prototipo como el nuestro es importante. Sin embargo, no siempre se requiere de grandes presupuestos para llevar a cabo un proyecto como el que se presenta en esta tesis, ya que se pudo obtener un prototipo con comportamientos comparables al de otros proyectos con mayores recursos (c.f. sección 6.6).

Dada la poca experiencia que se tiene en el diseño de este tipo de sistemas en el mundo y en particular en México, nuestro trabajo se centró en el diseño y construcción de nuestras herramientas de trabajo, y en la propuesta e implementación de mecanismos simples y factibles de coordinación. Esta manera de proceder se sustentó en la evidencia propia de que para el diseño de nuestro sistema multi-robot no era recomendable el uso de *kits* comerciales de desarrollo para posteriormente programarlos para actuar de manera inteligente, sino que fue indispensable para nosotros evolucionar la estructura y el control de un robot de manera conjunta y constructivista.

7.4. Perspectivas

A futuro, se espera mejorar el diseño, equipamiento y programación del sistema Mini-trans para mejorar e incrementar algunas de las capacidades del sistema e incrementar el número de comportamientos del mismo. En cuanto al diseño y equipamiento, se pretende realizar algunos cambios en el sistema de locomoción, equiparlo con motores más potentes, mejorar el sistema de sujeción de los motores y de los ejes para las llantas, incrementar el número de fotoresistencias y ubicarlas a lo largo del medio de ensamble en cada robot para reducir la necesidad de alineación de éstos, disminuir el peso de los módulos empleando tornillos más delgados, cambiar e integrar algunos sensores que permitan ampliar el equipamiento sensorial del robot, que refuercen la parte de comunicación y percepción local, así como hacer el diseño de cada robot más modular. Para agregar nuevas funcionalidades al sistema, se propone ampliar el equipamiento sensorial de los

módulos con cámaras, tarjetas de comunicación y tarjetas de control con mayores recursos para incrementar el espacio de memoria y la capacidad de comunicación no puntual entre los robots. El diseño de la pinza se mejorará, así como el sistema de comunicación. Con el incremento de memoria se permitirá realizar experimentos donde se muestre toda la funcionalidad del robot hasta ahora implementada, ya que como se mencionó en el capítulo 5, los experimentos fueron realizadas por separado debido a la capacidad limitada de la memoria.

Se plantea implementar y probar otros mecanismos de coordinación y formas de sincronización en la comunicación propuestos en esta tesis, como son los mecanismos de **capas**, **absorción** y **propagación disyuntiva** propuestos en la sección 4.3.5.2 y las formas de sincronización de **ajuste**.

Las perspectivas que este trabajo ha motivado son muchas, pero la más importante es el interés por continuar sobre esta línea de investigación, la cual representa un enfoque novedoso para el diseño y control de sistemas robóticos.

Bibliografía

- Agre P. E. et Chapman D. (1987). Pengi: an implementation of a theory of activity. En Kaufmann M. editores, *Proceedings of AAAI-87*, páginas 286–272.
- Alarcón E. (2005). Diseño y construcción de una tarjeta electrónica y su aplicación en el control de un robot ápodo. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP.
- Balch T. et Parker L. E. (2002). *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*. A K Peters Ltd.
- Bonabeau E., Dorigo M., et Theraulaz G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Santa Fe Institute - Oxford University Press, New York.
- Brooks R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2(1):14–23.
- Brooks R. A. et Stein L. A. (1993). Building brains for bodies. Reporte Técnico AIM-1439, MIT.
- Brown H., Weghe N. V., Bererton C., et Khosla P. (2002). Millibot trains for enhanced mobility. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7(4):452–461.
- Cao Y. U., Fukunaga A. S., et Khang A. B. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robot*, 4(1):7–27.
- Castano A., Behar A., et Will P. M. (2002). The Conro modules for reconfigurable robots. *IEEE/ASME Transactions and Mechatronics*, 7(4):403–409.
- Dudek G. et Jenkin M. (2000). *Computational principles of mobile robotics*. Cambridge University Press.

- Fukuda T., Ikemoto Y., Arai F., et Higashi T. (2002). Graduated spatial pattern formation of micro robot group. En *Distributed Autonomous Robotic Systems*, number 5, páginas 340–349, Tokyo. Springer-Verlag.
- Gerkey B. et Matarić M. (2002). Pusher-watcher: An approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination. En *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2002*, páginas 464–469, Washington, DC.
- Goldberg D. et Matarić M. J. (2002). Design and evaluation of robust behavior-based controllers for distributed multi-robot collection tasks. En Balch T. et Parker L. E. editores, *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*. AK Peters.
- Groß R., Bonani M., Mondada F., et Dorigo M. (2006). Autonomous self-assembly in a swarm-bot. En Murase K., Sekiyama K., Kubota N., Naniwa T., et Sitte J. editores, *Proceedings of the Third International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment*, páginas 314–322, Berlin. Springer-Verlag.
- Gross R. et Dorigo M. (2004). Cooperative transport of objects of different shapes and sizes.
- Hayes A. T. (2002). How many robots? group size and efficiency in collective search tasks. En *Proceedings of the 6th International Symposium On Distributed Autonomous Robotic Systems*, páginas 289–298, Fukuoka, Japan. Springer-Verlag.
- Hemelrijk C. editores (2002). *SWARM-BOT: A Swarm of Autonomous Mobile Robots with Self-Assembling Capabilities*, Zurich Switzerland.
- Hirose S. (2000). Super mechano-system: New perspective for versatile robotic system. En *Lecture Notes in Control and Information Sciences, Experimental Robotics VII*, volumen 271, páginas 249–258, London, UK. Springer-Verlag.
- Jiménez M. G. et Muñoz A. (2005). Mini-trans: A multi-robot system with self-assembling capabilities. En Gelbukh A. et Monroy R. editores, *Research on Computing Science. Advances in Artificial Intelligence Applications*, volumen 17, páginas 233–242. IPN.
- Jones J. L. et Flynn A. M. (1993). *Mobile Robots Inspiration to Implementation*. A. K. Peters Wellesley, Ltd.

- Kaelbling L. et Rosenschein S. J. (1991). Action and planning in embedded agents. En Maes P. editores, *Designing Autonomous Agents*, páginas 35–48. MIT Press.
- Kamimura A., Yoshida E., Kurokawa H., Tomita K., et Kokaji S. (2002). A self-reconfigurable modular robot (MTRAN) - hardware and motion planning software-. En *Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS2002)*, volumen 5, páginas 17–26, Fukuoka, Japan. Springer-Verlag.
- Kawakami A., Torii A., Motomura K., et Hirose S. (2003). SMC rover: Planetary rover with transformable wheels. En Siliciano B. et Dario P. editores, *Experimental Robotics VIII*, volumen 5 de *Advanced Robotic Series*, páginas 498–506. Springer-Verlag.
- Krotkov E., Simmons R., et Whittaker W. L. (1995). Ambler: Performance of a six-legged planetary. *Acta Astronáutica*, 35(1):75–81.
- Kube C. R. et Bonabeau E. (2000). Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(1/2):85–101.
- Kube C. R. et Zhang H. (1996). The use of perceptual cues in multi-robot box-pushing. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, páginas 2085–2090.
- Maes P. (1990). *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*. MIT/Elsevier Press.
- Matarić M. (1994). *Interaction and Intelligent Behavior*. Tesis Doctoral, MIT EECS, MIT AI Lab Tech Report AITR-1495.
- Matarić M. (2002). Situated robotics. *Encyclopedia of Cognitive Science*, Nature Publishers Group.
- McFarland D. et Bossert T. (1993). *Intelligent Behavior in Animals and Robots*. MIT Press.
- Muller J. P. (1996). *The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach*, volumen 1177 de *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag.
- Munoz A. (2003). *Coopération Située: une approche constructiviste de la conception de colonies de robots*. Tesis Doctoral, Université Pierre et Marie Curie de Paris VI.

- Munoz A. et Drogoul A. (2004). Analyzing multi-robot box-pushing. En Estrada M. A. et Gelbukh A. editores, *Avances en la Ciencia de la Computación*, páginas 530–539.
- Murphy R. (2000). *Introduction to AI Robotics*. MIT Press.
- Newell A. et Simon H. A. (1976). Computer science as empirical enquiry: symbols and search. En *Communications of the ACM*, volumen 19, páginas 113–126.
- Pereira G., Pimentel B., Chaimowicz L., et Campos M. F. (2002). Coordination of multiple mobile robots in an object carrying task using implicit communication. En *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, páginas 281–286, Washington-DC, EUA.
- RAE (2001). *Diccionario de la lengua Española*. Espasa Calpe. editor, 22 edición.
- Rosenfeld A., Kaminka G. A., et Kraus S. (2004). Adaptative robot coordination using interference metrics. En *Proceedings of the AAMAS-04 Workshop on Learning and Evolution in Agent Based Systems*, páginas 910–916.
- Stentz A., Dias M. B., Zlot R. M., et Kalra N. (2004). Market-based approaches for coordination of multi-robot teams at different granularities of interaction. En *Proceedings of the ANS 10th International Conference on Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*.
- Trianni V. (2003). Evolution of coordinated motion behaviors in a group of self-assembled robots. Tesis de maestría, Université Libre de Bruxelles, Faculté de Sciences Appliquées, Brussels, Belgium.
- Trianni V., Labella T. H., Gross R., Sahin E., Dorigo M., et Deneubourg J.-L. (2002). Modelling pattern formation in a swarm of self-assembling robots. Reporte Técnico TR/IRIDIA/2002-12, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium.
- Williams S. et Mahon I. (2004). Simultaneous localisation and mapping on the great barrier reef. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Yim M. (1994). *Locomotion with a Unit- Modular Reconfigurable robot*. Tesis Doctoral, Department of Computer Science, Stanford University, Stanford.

- Yim M., Roufas K., Duff D., Eldershaw C., et Homans S. (2003). Modular reconfigurable robots in space applicatios. *Autonomouos Robot Journal, special issue for Robots in Space*, 14(2):225–237.
- Yim M., Zhang Y., Roufas K., Duff D., et Eldershaw C. (2002). Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with polybot. En *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, volumen 7, páginas 1083–4435.

Referencias en línea

[Shakey-url] SRI International, <http://www.sri.com/about/timeline/shakey.html>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Handy_board-url] Handy Board Infrared Remote Control I/O Routines, <http://www3.sympatico.ca/pmdavies/hb/ir.htm>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Pioneer-url] Mobile robots Activmedia Robotics, <http://www.activrobots.com/ROBOTS/p2dx.html>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Puma-url] Human body dynamic simulation, <http://www.kuffner.org/james/anim/dynamics.html>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[KUKA-url] Robot Special Purpose: KL1500, http://www.kuka.co.uk/NewFiles/rob_sp.html. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Robot_espacial-url] NASA Space Telerobotics Program, http://ranier.hq.nasa.gov/telerobotics_page/photos.html. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Swarm-url] Swarm Intelligence, <http://coro.caltech.edu/Courses/EE141/course.html>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Robot_aereo-url] Diario La Flecha, tu diario de Ciencia y Tecnología, <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/200408191/>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[Khepera-url] K-team corporation, Robot Khepera II, <http://www.k-team.com/robots/khepera/>. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2005.

[KQML-url] UMBC KQML Web, <http://www.cs.umbc.edu/kqml/papers/>. Fecha de consulta:

9 de diciembre de 2005.

[FIPA-url] FIPA, <http://www.fipa.org/>. Fecha de consulta: 7 de enero de 2006.

Apéndice A

LEGO Mindstorms®

El *kit* de LEGO Mindstorms® contiene un controlador RCX y aproximadamente 700 elementos que permiten ensamblar sus piezas para construir robots, como son sensores, motores y engranes entre otros.

El contenido de *LEGO Mindstorms® Robotics Invention System 2.0* es:

- Controlador RCXTM
- Software en CD-ROM
- Folleto de diseños de robotsTM
- Torre de transmisión infrarroja USB
- 718 piezas, incluyendo: 2 motores, 2 sensores de contacto, 1 sensor de luz

Para mayor información consultar la dirección <http://mindstorms.lego.com/eng/products/ris/risdetails.asp>

Apéndice B

Handyboard©

La Handyboard© [Handy_board-url] es una tarjeta controladora comercial que mide 4.25×3.15 pulgadas, su suministro de energía es a base de baterías recargables de Nicad de $9.6V$, emplea un microprocesador 68HC11 de Motorola, incluye 32K de RAM estática, cuatro salidas de motores DC, una pantalla LCD de 16×2 caracteres, un *knob* y un piezo beeper programables por el usuario, 7 entradas analógicas y 9 entradas digitales para uso de sensores, entradas para una variedad de sensores, 1 emisor infrarrojo de $38KHz$ y la base para colocar un receptor infrarrojo de $38KHz$, puertos de conexión para colocar una tarjeta de expansión de puertos I/O. La Handyboard se programa con un lenguaje de programación interactivo multi-tarea llamado Interactive C (IC).

La Handyboard© también cuenta con una tarjeta de expansión que provee las siguientes características:

- 10 entradas adicionales para sensores análogos
- 4 entradas para activar sensores de LEGOMindstorms© (sensores reflectivos y sensores de rotación),
- 9 salidas digitales,
- 6 señales de control de servomotores con suministro de poder de la batería interna de la Handyboard©,
- poder externo opcional para servomotores,
- espacio para conectar un sistema ultrasónico Polaroid 6500



Figura B.1: Tarjeta de control Handyboard©.

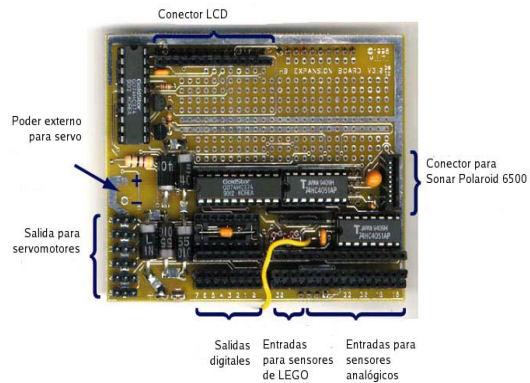


Figura B.2: Tarjeta de expansión de la Handyboard©.

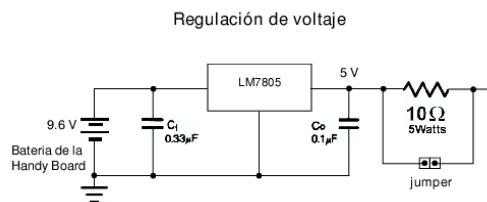
- área de propósito general,
- conectores para conectar la pantalla LCD de la Handyboard©.

Las figuras B.1 y B.2 muestra una tarjeta Handyboard© y su módulo de expansión.
Para mayor información consultar la dirección <http://handyboard.com/> en internet.

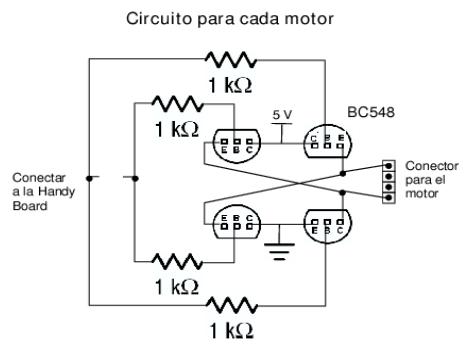
Apéndice C

Tarjeta de adaptación de voltaje para motores

Diagrama de la tarjeta de adaptación de voltaje de 9.6V de salida de la Handyboard© a 5.0V requeridos por cada motor.



Puente H para conectar un motor.



Apéndice D

Funciones

D.1. Funciones empleadas en la percepción de los Minitrans

Las funciones de percepción son descritas a continuación:

1. `verifica_sensor`: Retorna el número de sensor que ha sido activado.
2. `encoders`: Cuenta el número de vueltas de la llanta a la cual está conectado el *encoder* especificado.
3. `leer_led`: Durante un tiempo t lee el número de cambio de intensidades de luz captadas por el fotoreistor conectado al puerto especificado.
4. `percibir_luz`: Lee la intensidad de luz percibida por el fotoreistor conectado al puerto especificado.

D.2. Funciones de comunicación

Las funciones empleadas para establecer comunicación están basadas en librerías de software libre, aunque fueron modificadas para este proyecto. Estas son:

1. *envia_mensaje*: El robot envía un mensaje un número máximo de veces establecido, mientras no reciba señal de respuesta.

2. *recibe_mensaje*: El robot espera percibir una señal en un lapso de tiempo establecido.
3. *ini_recepción*: Esta función es empleada para inicializar las variables requeridas para la recepción de mensajes.
4. *busca_IR*: Esta función realiza una búsqueda de señal en el campo de acción, es decir, rastrea una señal en el campo de acción un tiempo establecido.

D.3. Funciones empleadas con los Ca y Co que complementa el control del sistema Mini-trans

1. *cambiar_categoria*: Si la categoría del robot es líder, la función cambia su categoría a *seguidor* y viceversa.
2. *desglosa_mensaje*: Convierte el mensaje recibido de decimal a binario y lo desglosa en los campos *robot_o*, *robot_d* y *mensaje*, convirtiendo cada uno de estos campos nuevamente a decimal.
3. *formar_mensaje*: Recibe todos los campos del mensaje a enviar y los concatena, es decir, si el mensaje recibo es: [0001][0010][00010011], la función retorna [0001001000010011].
4. *conv_binario*: Convierte el campo recibido de binario a decimal.
5. *conv_num*: Convierte el campo recibido de decimal a binario.
6. *init_código_binario*: Inicializa el arreglo que contiene el mensaje en binario.
7. *gen_tiempo_real*: Genera un número real.
8. *gen_tiempo_ent*: Genera un número entero.
9. *gen_número*: Genera un número aleatorio.
10. *ini_encoders*: Inicializa las variables de conteo de los *encoders*.
11. *solicitar_unión*: El robot que busca a otro cuando ha colisionado, envía mensaje de solicitud de unión al robot que perciba su mensaje. Si percibe respuesta de otro robot, le notifica a éste que ha recibido su mensaje y obtiene el ID del robot que le respondió.