



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

“DESARROLLO DE UN AMBIENTE DE SIMULACIÓN 3D DE ROBOTS MODULARES”

TESIS DE MAESTRÍA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

**PRESENTA
STIVALIS ANAHI MARTÍNEZ CUEVAS**

**ASESOR
DRA. ANGÉLICA MUÑOZ MELÉNDEZ
INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA**

**COASESOR
DR. ALEJANDRO RANGEL HUERTA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

PUEBLA, PUEBLA.

FEBRERO DE 2006

Dedico éste sencillo trabajo de tesis a mis padres y hermanas como parte de mi agradecimiento a todo el apoyo que recibí por parte de ellos y sin el cual no hubiera podido realizar estos estudios de posgrado. Como toda mujer de fé, también agradezco muy especialmente a Dios nuestro señor por concederme la dicha de tener unos padres comprensivos, una hermana de carácter difícil, pero que nos hace pasar momentos inigualables (Lety), también le agradezco a dios por prestarnos un angelito que conocimos y quisimos mucho, el cual ahora esta a su lado pero se que nos cuida y nos protege desde donde está (mi hermana Liliana).

INDICE

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes	7
1.2 Motivaciones y objetivos de la tesis	8
1.2.1 Objetivo general	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Justificación	10
1.4 Alcances	11
1.5 Limitaciones	12
1.6 Esquema de la tesis	13

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 Introducción	16
2.2 Inspiración biológica	16
2.2.1 Insectos sociales	17
2.2.2 Analogías biológicas	18
2.3 Robótica	19
2.3.1 Clasificación de la robótica	20
2.3.2 Reconfigurabilidad y auto-reconfigurabilidad	21
2.3.3 Aspectos a considerar en el diseño de sistemas multi-robot	22
2.3.3.1 Morfología del robot	22
2.3.3.2 Mecanismos de control	23
2.3.3.2.1 Enfoque situado o basado en comportamientos	23
2.3.3.2.2 Arquitectura basada en comportamientos	24
2.3.3.2.3 Mecanismos de coordinación centralizados y descentralizados	25
2.3.3.2.4 Tipos de comunicación	25
2.4 Trabajos relacionados	26
2.4.1 Robots modulares	26

2.4.2 Robots simulados	30
2.5 Recapitulativo	31

Capítulo 3. Sistema multi-robot

3.1 Introducción	34
3.1.1 Definición de entidades involucradas en el diseño del sistema multi-robot	34
3.2 Descripción de los robots	35
3.2.1 Equipamiento	37
3.2.2 Comunicación	37
3.2.3 Habilidades	39
3.2.3.1 Percepciones	39
3.2.3.2 Acciones	39
3.2.4 Comportamientos individuales	40
3.2.4.1 Buscar objetivo	41
3.2.4.2 Evadir obstáculo	42
3.2.4.3 Evadir robot	43
3.2.5 Comportamientos colectivos	44
3.2.5.1 Ensamblarse	45
3.2.5.2 Desplazarse ensamblados	46
3.2.5.3 Buscar una objeto ensamblados	47
3.2.5.4 Desensamblarse	47
3.2.5.5 Evadir obstáculos ensamblados	48
3.2.6 Mecanismos de auto-reconfiguración	49
3.3 Mecanismos de control	53
3.3.1 Arquitectura de subsumción	53
3.3.2 Coordinación de sistemas multi-robot	54
3.4 Descripción del ambiente de simulación	55
3.4.1 Requerimientos	56
3.4.2 Mundos artificiales	56
3.4.3 Arquitectura del simulador	58
3.5 Recapitulativo	60

Capítulo 4. Pruebas y resultados

4.1 Introducción	63
4.2 Pruebas de comportamientos individuales	64
4.2.1 Experimento A	64
4.2.2 Experimento B	66
4.2.3 Experimento C	67
4.3 Pruebas de comportamientos colectivos	69
4.3.1 Experimento D	69
4.3.2 Experimento E	71
4.4 Pruebas de auto-reconfiguración	73
4.4.1 Experimento F	73
4.4.2 Experimento G	76
4.5 Recapitulativo	81

Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas	86
--	-----------

Referencias	89
--------------------------	-----------

PREFACIO

Esta tesis está orientada al estudio de sistemas multi-robot, específicamente al diseño de mecanismos de control y coordinación que permitan la auto-reconfiguración dinámica de un grupo de robots modulares, aplicando un enfoque situado basado en comportamientos. El interés por este tipo de robots es comprender cómo a partir de reglas simples, un grupo de robots reactivos pueden navegar en un ambiente con obstáculos y realizar tareas en forma colectiva. Los robots están situados porque se encuentran inmersos en un mundo que no conocen previamente y pueden enfrentarlo por sus propios medios.

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en dos fases. La primera fue el estudio teórico sobre el proceso de la auto-reconfiguración en la naturaleza, i.e. investigamos qué organismos la presentan, por qué lo hacen, cómo lo logran, y sobre todo cómo se puede implementar este fenómeno en la robótica colectiva. La segunda fase estuvo enfocada al diseño de mecanismos auto-reconfigurables y la realización de un ambiente de simulación que permita implementar los algoritmos y métodos propuestos para ser probados en robots virtuales antes de implementarlos en robots físicos.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Los primeros robots que se diseñaron y desarrollaron fueron los robots industriales. Un robot industrial es un aparato especializado automático capaz de manipular objetos o de ejecutar una de varias operaciones según un programa establecido que puede ser modificado. Hasta estas fechas, estos robots son eficientes y por ello han sido utilizados en la realización de actividades que requieren mucha precisión o son tediosas para los trabajadores (e.g. soldaduras de tarjetas electrónicas, líneas de ensamble), hasta la realización de tareas militares que representan un peligro significativo para los hombres que las realizan (e.g. el proyecto Manhattan, realizado en 1942 por los Estados Unidos para construir una bomba nuclear, donde científicos e ingenieros se encontraron con el problema de manipulación y procesamiento del material radioactivo. Para resolver este problema, fue diseñado un robot manipulador teleoperado a través del cual los científicos podían manejar el material radioactivo de forma segura).

Existen aplicaciones como la exploración y la vigilancia de terreno que necesitan de la utilización de un grupo de robots menos especializados, capaces de exhibir un comportamiento más versátil y de adaptarse a una variedad de situaciones. Estos grupos de robots se conocen como sistemas multi-robot.

Los sistemas multi-robot, están formados por un grupo de robots que interactúan entre sí y realizan tareas que un robot especializado no es capaz de llevar a cabo, no por su incapacidad para resolver un problema, sino porque un simple robot está limitado a ejecutar la tarea para la que fue diseñado, además de que un robot especializado raramente tiene la capacidad física de ejecutar tareas en paralelo sin afectar el tiempo en que debe realizar su tarea principal (e.g. la exploración simultánea de terreno por los miembros del grupo del sistema multi-robot).

Estos sistemas multi-robot requieren el desarrollo de nuevas técnicas para el control y coordinación de un grupo de robots interactuando entre ellos y con su medio ambiente para resolver problemas en conjunto [Mataric, 1994]. Otro de los aspectos a los que se enfrenta el desarrollo de los sistemas multi-robot es la tecnología existente para su construcción física, por ejemplo en sistemas electro-

mecánicos a los que es necesario adaptarse [Cao et al, 1997] (e.g. capacidad de tarjetas electrónicas, memoria, sistemas de comunicación). Estos sistemas multi-robot o “colonias de robots” son estudiados en el área de robótica colectiva.

La robótica reconfigurable es una subclasificación de la robótica colectiva. Un robot reconfigurable es un artefacto compuesto de robots modulares simples, desde el punto de vista de su mecánica, de su funcionamiento y de su costo, capaz de modificar y reorganizar su estructura para adaptarse al entorno en el que se encuentra. Mark Yim [1994] ha propuesto conformar estos robots por módulos sencillos capaces de adaptarse al terreno en el que se encuentran modificando su forma y manera de desplazarse. El desarrollo de estos sistemas representa retos relativos al diseño físico y a los mecanismos de control que permitan la coordinación de los componentes del robot.

En la naturaleza existen diferentes organismos reconfigurables capaces de cambiar de forma pasando de un simple individuo, a diferentes estructuras compuestas por varios de estos individuos que se adaptan físicamente a nuevas situaciones y son capaces de integrarse y participar en actividades colectivas como la reconfiguración. Un ejemplo de estructuras reconfigurables se encuentra en las hormigas, ya que algunas especies de ellas pueden formar cadenas o puentes con sus cuerpos para salvar sus limitaciones individuales y lograr sus objetivos colectivamente.

La simulación por computadora puede usarse para simular estas situaciones complejas al modelar un comportamiento animal y su ambiente [Holland et McFarland, 2001].

La simulación de robots permite probar un diseño y modificarlo antes de su construcción. Esto puede mostrar que una idea es o no factible y así evitar la construcción de fases completas. Sin embargo, el buen desarrollo de estos simuladores depende de la disponibilidad de los modelos adecuados de los robots a simular y del ambiente en el que se desenvolverán.

1.2 Motivaciones y objetivos de la tesis

El diseño y construcción de un ambiente de simulación es importan-

te para estudiar y entender cualquier sistema antes de implementarlo físicamente. En éste trabajo de tesis se estudian los mecanismos de auto-reconfiguración para sistemas multi-robot. Nuestro principal interés es estudiar y proponer una serie de técnicas o métodos de control que permitan coordinar la movilidad de un grupo de robots, así como la reconfiguración de su estructura. Para esto, proponemos desarrollar un ambiente de simulación que permita probar los mecanismos de auto-reconfiguración diseñados y depurar aspectos conductuales para el diseño de robots modulares auto-reconfigurables.

El diseño y construcción de este tipo de robots es un tema nuevo en el área de robótica. A pesar de las aplicaciones y ventajas reales que presenta este tipo de robots sobre los sistemas mono-robot, son pocos los trabajos y avances que se tienen hasta la fecha, por lo que al estudiar este tipo de sistemas robóticos, se está contribuyendo de manera importante al avance del estado del arte en el área de robótica colectiva.

1.2.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un ambiente de simulación que permita la experimentación de mecanismos reconfigurables.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar mecanismos de auto-reconfiguración en la naturaleza y seleccionar aquellos que puedan ser reproducidos artificialmente con ayuda de un ambiente de simulación;
- Estudiar la morfología y el equipamiento necesarios en sensores y motores, de una unidad componente de un robot reconfigurable para un ambiente simulado;
- Definir un conjunto de comportamientos individuales y colectivos para controlar dicha unidad, que permita la

generación de las estructuras reconfigurables seleccionadas previamente;

- Diseñar e implementar un ambiente de simulación 3D que permita la definición de las unidades diseñadas previamente, así como su experimentación.

1.3 Justificación

La teoría de la auto-organización fue desarrollada originalmente en el contexto de la física y la química [Nicolas et Prigogine, 1977]. Esta teoría puede explicar aspectos conductuales de los insectos sociales, en particular para mostrar cómo la complejidad de los comportamientos colectivos de estos insectos pueden surgir de la interacción entre individuos que exhiben un comportamiento simple. Bonabeau y otros investigadores, afirman que el descubrimiento de la teoría de la auto-organización no sólo ha tenido consecuencias para el estudio de los insectos sociales, sino que también ha sido una gran herramienta para transferir los conocimientos sobre los insectos sociales al área de diseño de sistemas inteligentes. También sostienen que las colonias de insectos sociales son indudablemente un ejemplo de resolución descentralizada de problemas, por la forma en como estos insectos realizan tareas como encontrar comida, construir o ampliar sus nidos, dividir el trabajo, etc. Los mecanismos aplicados por los insectos sociales en la solución de problemas podrían ser implementados en la ingeniería y en las ciencias computacionales, pues estas colonias de insectos tienen otra característica importante y es que pueden resolver problemas de una forma muy flexible porque permiten la adaptación a cambios del medio ambiente de manera robusta pues la colonia está dotada de habilidades para realizar su tarea aún si algún individuo falla [Bonabeau et al., 1999]. Un área específica de aplicación de la teoría de la auto-organización es el diseño de sistemas artificiales distribuidos, en particular el diseño de algoritmos para la solución de problemas inspirados por los comportamientos colectivos de colonias de insectos sociales.

Una herramienta importante para el estudio y desarrollo de robots colectivos son los simuladores. Un programa de simulación de computadora es un conjunto de secuencias lógicas que representan procesos de sistemas [Howard et Odum, 2000]. Ahora bien, existen dos razones fundamentales para hacer estudios en un simulador: la rapidez y el costo, pues la construcción de robots físicos es lenta y costosa. Además, si las pruebas en simulación muestran que algunos aspectos del robot necesitan ser cambiados, la implementación de estos cambios pueden reducir las inversiones de tiempo y dinero.

Una de las ventajas más importantes de construir simuladores es que ofrecen la posibilidad de repetir, en condiciones idénticas y a partir de su modelación, procesos y fenómenos. Esto es difícil de lograr en condiciones reales y por tanto es posible estudiar y modificar sistemáticamente los comportamientos de un sistema hasta alcanzar los objetivos deseados.

En general un ambiente de simulación terminado puede apoyar la experimentación al permitir el diseño, la prueba y la depuración de sistemas antes de ser físicamente implementados.

En este contexto, nuestro trabajo de tesis propone desarrollar un ambiente de simulación que permita diseñar y experimentar mecanismos de auto-reconfiguración para robots colectivos dinámicamente reconfigurables antes de implementarse en robots físicos.

1.4 Alcances

Los alcances de la tesis se pueden dividir en dos vertientes como se indica a continuación:

- Alcances de los mecanismos para robots modulares auto-reconfigurables
 - Definir mecanismos de control para sistemas multi-robot,

- Proponer mecanismos de auto-reconfiguración que permitan la generación de diversas estructuras espaciales a un sistema multi-robot,
- Definir mecanismos de coordinación para robots modulares reconfigurables,
- Definir mecanismos de comunicación para sistemas multi-robot,

- Alcances de la simulación

- Desarrollar un ambiente de simulación con las herramientas que ofrezca el lenguaje de programación Java3D (e.g. creación de gráficos, emulación de sistemas de sensado, etc.),
- Realizar la simulación dinámica de un grupo de robots modulares,
- Reproducir los comportamientos individuales y colectivos robots modulares de nuestro sistema multi-robot
- Programar los mecanismos de control, coordinación y de auto-reconfiguración definidos en los alcances anteriores, a través de los cuales los robots del sistema podrán realizar tareas de manera individual y colectiva, a demás de poder cambiar su estructura física de forma autónoma

1.5 Limitaciones

Las limitaciones del simulador son básicamente dos:

- De la herramienta de programación, considerando que la emulación de los sensores de los robots móviles que se representan en nuestro ambiente de simulación se realiza a

través del método de detección de colisiones de Java3D, la simulación del grupo de robots estará limitada a sólo cuatro robots, debido a que el lenguaje de programación Java 3D sólo puede detectar la colisión de un objeto en un momento dado [Pratdepadua, 2003].

- De infraestructura física, porque la mayoría de los sistemas multimedia tri-dimensionales requieren ser ejecutados en computadoras con ciertos requerimientos físicos tales como tarjetas aceleradoras de gráficos, memoria RAM, capacidad de bus de datos, para su correcto desempeño. Este simulador no es la excepción, por lo que necesitará como mínimo una computadora con procesador Pentium III o equivalente, a una velocidad mínima de 760 Mhz y 500Mb de memoria RAM, para ejecutar y visualizar nuestro ambiente de simulación.

1.6 Esquema de la tesis

La tesis describe los lineamientos que se siguieron para diseñar e implementar mecanismos de control, comunicación, coordinación y auto-reconfiguración para un sistema multi-robot en un ambiente de simulación 3D de robots modulares y se encuentra estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1, se mencionan los antecedentes del problema, el por qué desarrollar un ambiente de simulación para estudiar mecanismos de robots modulares. Se mencionan igualmente los objetivos, alcances y limitaciones de trabajo.

En el capítulo 2 se definen conceptos, clasificaciones principales de la robótica móvil y sistemas robóticos auto-reconfigurables. Se revisan los trabajos más representativos del área a consideración nuestra y se puntualizan los aspectos más importantes a considerar para el diseño de estos sistemas multi-robot.

En el capítulo 3 se describen los comportamientos individuales y colectivos definidos para controlar una unidad móvil y un grupo de robots de un sistema multi-robot y se muestran los autómatas de dichos comportamientos, también se presentan los mecanismos de

coordinación y comunicación propuestos para robots auto-reconfigurables y se detallan las estructuras o formaciones generadas por estos. Se describen también las herramientas utilizadas en el desarrollo del ambiente de simulación y se especifican sus requerimientos funcionales, y se muestra la arquitectura general del diseño del simulador.

En el capítulo 4, se describen los experimentos realizados en el ambiente de simulación desarrollado para probar los mecanismos de control, coordinación, comunicación y auto-reconfiguración propuestos.

Finalmente en el capítulo 5, se concluye con las observaciones principales derivadas del desarrollo de esta tesis y se mencionan los posibles trabajos que podrían derivarse a futuro de esta tesis.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Introducción

En este capítulo se hace una breve descripción del origen de las ideas o influencias que se tienen en la robótica colectiva para el diseño de los sistemas multi-robot, se definen algunos conceptos y se presentan dos clasificaciones de la robótica móvil. Además, se revisan los trabajos más representativos a nuestro juicio del área y los aspectos más importantes a considerar para el diseño de sistemas multi-robot.

2.2 Inspiración biológica

El estudio del comportamiento animal es un área muy activa en la investigación biológica, la cual involucra a científicos de una gran variedad de disciplinas. La etología se encarga del estudio del comportamiento de los animales en su ambiente natural, con énfasis particular en los patrones de comportamiento específicos de cada especie. Los comportamientos son la mayoría de las veces, el resultado de las interacciones de un gran número de genes, cuya influencia es modificada por las interacciones del individuo con su ambiente [Calderón, 2004], pues los genes predisponen el desarrollo de capacidades comportamentales que se activarán como el resultado de las experiencias del individuo. Otros comportamientos son el resultado de la adaptación al medio ambiente donde los animales se encuentran.

Los animales que viven en sociedades, son grupos de individuos de la misma especie que conviven de una manera organizada, con división de los recursos y del trabajo y con dependencia mutua, e.g. las hormigas tienen una misma madre, la reina, lo cual implica que la colonia comparte aproximadamente el 75% de la información genética, lo que le permite sobrevivir de una manera eficiente y proteger a las generaciones futuras al compartir tareas comunes entre varios individuos. Estas sociedades de animales presentan una conducta social que sólo se presenta si los individuos pueden comunicarse o reconocerse entre sí y pueden modificar sus conductas individuales como consecuencia de tal comunicación o reconocimiento.

En la siguiente sección abundaremos más sobre ejemplos específicos de animales que presentan dichas conductas.

2.2.1 Insectos sociales

En la naturaleza existen diferentes tipos de insectos que presentan un comportamiento social como las abejas, hormigas, avispas y termitas que viven en colonias, formando sociedades organizadas en tres castas básicas: obreras, soldados y reinas. Las sociedades de insectos se basan en la existencia de unidades sociales que interactúan y dan lugar a una conducta colectiva.

La conducta social, tanto de los insectos como de cualquier otro organismo incluyendo a los humanos, es un fenómeno de auto-organización. Las sociedades de insectos se basan en la existencia de unidades sociales, los individuos, que interactúan produciendo una conducta colectiva, global y emergente, la dinámica del grupo. Es claro que la conducta social no puede ser reducida a la suma de las conductas individuales de los participantes, porque los individuos en aislamiento no la producen. La conducta social es por lo tanto un comportamiento combinado de diversas acciones que tienden a lograr un efecto único y sólo puede ser producida por la interacción entre varios individuos y por la interacción de ellos con el ambiente. La conducta social tiene mucho que ver con expresiones de cooperación en el sentido que uno o más organismos sociales pueden hacer algo en conjunto, es decir, si dos o más individuos pueden mantenerse reaccionando unos frente a los otros realizando alguna tarea con un fin común [Miramontes, 2004].

Ejemplos de insectos sociales son ciertas especies de hormigas. Lo que la mayoría de estas especies de hormigas tienen en común al buscar y transportar alimento a la colonia, es que dejan el nido y exploran las áreas alrededor del mismo, dando vueltas en un patrón aleatorio hasta encontrar alimento, momento en el cual regresan al nido, marcando el camino de vuelta con feromonas características de cada colonia [ins_soc, 2004]. Por su naturaleza cooperativa, al ser requeridas por otras hormigas para realizar alguna actividad, e.g. trasladar una presa grande a su nido, las hormigas toman como

prioridad lo que se requiere hacer en conjunto y suspenden por un momento sus actividades individuales.

2.2.2 Analogías biológicas

Las analogías e influencias biológicas abundan en el área de robótica colectiva. Diversos trabajos existentes en esta área han citado a los sistemas biológicos como inspiración o justificación. Ahora bien, los comportamientos colectivos de las hormigas, abejas y otros organismos eusociales¹ proveen evidencia de que los sistemas formados por agentes simples, pueden realizar tareas complejas en el mundo real. Es sabido que las capacidades cognitivas de estos insectos son muy limitadas y que los comportamientos complejos emergen de las interacciones entre una multitud de insectos obedeciendo reglas simples. Los trabajos basados sobre las analogías de colonias de insectos incluyen la generación de patrones donde cada robot es diseñado como un agente muy simple, el cual sigue un conjunto de reglas específicas para realizar una tarea [Cao et al., 1997].

Algunas hormigas que presentan mecanismos de reconfiguración (e.g. *Oecophylla*) pueden ser de inspiración para nuestros robots colectivos reconfigurables. Estas hormigas tienen por ejemplo, la cualidad de activar e inhibir sus mecanismos de auto-reconfiguración (orientados al cumplimiento de las necesidades de su colonia) a través de la interacción directa entre ellas mismas, lo cual les permite construir estructuras espaciales complejas con sus cuerpos, característica de su organización social (ver figura 1). Nuestro trabajo está dirigido principalmente a diseñar e implementar mecanismos de reconfiguración para un sistema multi-robot en un ambiente de simulación, siendo las estructuras de cadenas o puentes que forman las hormigas, el tipo de estructuras que nos interesa reproducir en un sistema multi-robot.

¹La eusocialidad es el fenómeno de la especialización reproductiva encontrada en algunas especies de insectos. Cooperan en la reproducción y tienen división en el aspecto reproductor [Wikipedia, 2005].



Figura 2.1. Estructuras formadas por hormigas para apoyar el trabajo de otras hormigas en la colonia.

Otra analogía del área de la física son las ideas de la auto-reproducción formuladas por L. Penrose en los años cincuentas. Penrose analiza cómo podría fabricarse una máquina auto-reproductora. Penrose ideó una serie de experimentos con ayuda de una caja rectangular no muy profunda que funcionaba con la energía producida por agitación. En la caja él introdujo varias piezas de madera que él mismo construyó cortándolas de forma especial, unió un par de ellas y las consideró como patrón de la forma que se deseaba reproducir. El resultado de sus experimentos fue que al introducir en la caja un patrón de lo que se desea reproducir dentro de la caja, es posible que el resto de las piezas neutrales lleguen a adherirse a las demás piezas de madera [Penrose, 1959]. Actualmente, esta teoría de la auto-reproducción ha sido implementada en sistemas multi-robot como una nueva característica de auto-reconfigurabilidad, donde sistemas multi-robot pueden dividirse en varios módulos más pequeños y realizar tareas en forma rápida o eficiente [Butler et al., 2002].

2.3 Robótica

La colección de dos o más robots móviles trabajando juntos son a menudo referidos como equipos o sociedades de robots móviles

múltiples, también conocidos como sistemas multi-robot [Murphy, 2000].

Los sistemas multi-robot son deseables por varias razones:

- Existen tareas que pueden ser demasiado complejas de realizar por un solo robot, como las tareas que requieren acción en paralelo e.g. la exploración de un área determinada [Cao et al, 1997].
- La robótica móvil colectiva puede posiblemente producir ideas para explicar o resolver problemas fundamentales en las ciencias sociales e.g. teoría organizacional, economía, psicología cognitiva y en ciencias naturales, e.g. teoría biológica, etología animal. [Hollanad et McFarland, 2001].

2.3.1 Clasificación de la robótica

En la robótica existen dos grandes áreas: manipulación y locomoción. La manipulación es la capacidad de actuar sobre los objetos, trasladándolos o modificándolos. Esta área se centra en la construcción de manipuladores y brazos robóticos. La locomoción es la facultad de un robot para poder desplazarse de un lugar a otro. Los robots con capacidad locomotiva se llaman robots móviles [González, 2004].

La robótica móvil puede ser clasificada desde varios puntos de vista, e.g. estructura básica, aplicación, movilidad. En la figura 2.2, se presenta la clasificación más común para este tipo de robots.

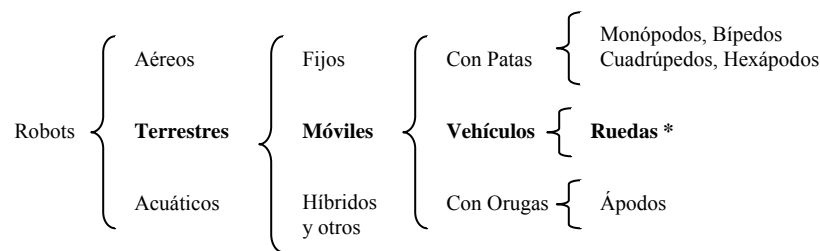


Figura 2.2 Clasificación de robots según su movilidad

De acuerdo a esta clasificación, el sistema multi-robot que simularemos está formado por robots terrestres tipo vehículo, equipados con ruedas (indicados con * en la figura 2.2) omnidireccionales, los cuales por simplicidad podrán girar con un grado de desplazamiento de 45°.

Otra clasificación de robots puede ser de acuerdo al número de sus componentes o de individuos que componen el sistema robótico y por la forma en como pueden realizar ciertas tareas. En la figura 2.3, se ilustra esta clasificación.

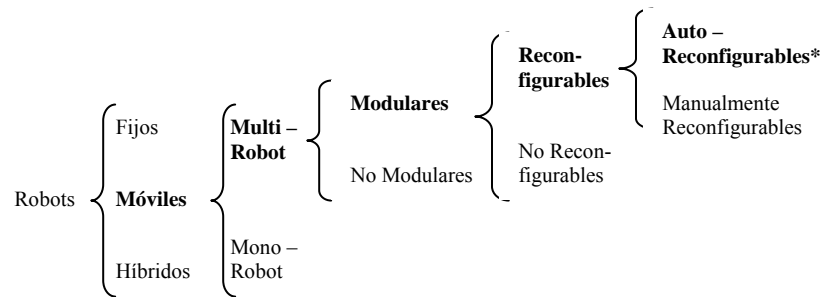


Figura 2.3. Clasificación de robots por su número de componentes o individuos

Un robot auto-reconfigurable (indicado con * en la figura 2.3) es un artefacto compuesto de robots simples, capaz de modificar y de reorganizar su estructura para adaptarse al entorno en el que está inmerso, sin intervención humana [Muñoz, 2004].

Dentro de las ventajas que presentan los sistemas multi-robot reconfigurables, se puede mencionar la capacidad para distribuir sus módulos en la posición que se requiera, o la capacidad de integración de nuevos módulos a la estructura para formar un robot más grande que pueda cumplir con distintos objetivos.

2.3.2 Reconfigurabilidad y auto-reconfigurabilidad

Mark Yim [1994], define la **reconfigurabilidad**, como la habilidad de un robot para cambiar su estructura física por sus propios medios o mediante la intervención humana o de otro robot. La **auto-**

reconfigurabilidad se refiere a la habilidad que el robot tiene para reconfigurarse a sí mismo en tiempo de operación.

Características principales de los robots auto-reconfigurables:

- **Homogeneidad**, que poseen las mismas características como pueden ser movilidad, equipamiento, sistemas de adquisición y de salida de información.
- **Robustez**, si un robot llega a fallar, la tarea a realizar puede ser concluida por los demás robots del sistema, aunque posiblemente no en el tiempo y con la eficacia esperada.
- **Facilidad de diseño**, si se tiene el diseño adecuado respecto a la morfología y equipamiento de un primer módulo del robot, los demás se pueden fabricar de forma seriada.

2.3.3 Aspectos a considerar en el diseño de sistemas multi-robot

La robótica colectiva se interesa por diseñar grupos de robots autónomos, capaces de resolver en conjunto problemas como la exploración de terreno, la búsqueda, la recolección y el transporte de objetos [Muñoz, 2004]. Para lograr lo anterior es necesario tener en consideración ciertos aspectos que hacen posible que un sistema multi-robot pueda ser colectivo. En esta sección se mencionan los aspectos de mayor relevancia como la morfología del robot, mecanismos de control, o la comunicación inter-robot para el desarrollo de estos sistemas y por supuesto para el desarrollo de nuestro trabajo.

2.3.3.1 Morfología del robot

Encontrar el diseño adecuado de los módulos de un sistema multi-robot no es trivial, por lo que es necesario tomar en cuenta diferentes aspectos para el estudio de los sistemas colectivos. Entre los

aspectos más importantes se encuentra el definir si nuestros módulos serán homogéneos o heterogéneos, esto se refiere al grado de similitud que existe entre robots individuales que forman parte del sistema multi-robot. Los sistemas heterogéneos tienen al menos dos miembros con diferentes capacidades en hardware y/o software. Los sistemas homogéneos están formados por miembros que son totalmente idénticos [Cao et al., 1997]. Por otra parte, Murphy [2000] menciona que los miembros del grupo pueden ser homogéneos en una fracción de una tarea por ejecutar idénticamente un comportamiento, y se hacen heterogéneos si los miembros del equipo cambian el comportamiento o mezclan las tareas realizadas. Un sistema multi-robot puede formarse de componentes homogéneos o heterogéneos.

2.3.3.2 Mecanismos de control

Uno de los problemas mencionados constantemente en los trabajos relacionados con la robótica colectiva, es precisamente cómo controlar y coordinar un grupo de robots. Para esto se ha desarrollado una serie de métodos y técnicas apropiadas para el tipo de tarea a resolver o al equipo de hardware con el que están equipados los robots.

Los métodos de control y coordinación propuestos van desde el manejo de la información local o global en arquitecturas centralizadas, descentralizadas y basadas en comportamientos; hasta el desarrollo de nuevos métodos apoyados en las capacidades de sensado de cada robot y en el manejo de los estados internos de los mismos. A continuación se abordarán algunos métodos para el control y coordinación de sistemas multi-robot.

2.3.3.2.1 Enfoque situado o basado en comportamientos

En 1991, Rodney Brooks publicó un artículo relacionado con los trabajos sobre Inteligencia Artificial en los últimos 30 años, en el cual comenta que dichos trabajos tuvieron una fuerte influencia sobre aspectos de arquitecturas de computadoras, mencionando que

el modelo de computación Von Neumann había marcado la dirección de la investigación en inteligencia artificial, puntualizando posteriormente que la inteligencia en sistemas biológicos es completamente diferente. Brooks define los trabajos recientes en inteligencia artificial basada en comportamientos como un nuevo enfoque para modelar la inteligencia [Brooks, 1991].

2.3.3.2.2 **Arquitectura basada en comportamientos**

Brooks [1986] propuso un tratamiento radicalmente nuevo para construir sistemas inteligentes inspirados en consideraciones biológicas, más que descomponer un sistema inteligente en líneas funcionales, Brooks adopta la estrategia de dividir estos sistemas en un número de subsistemas que producen comportamientos, cada uno conectado independientemente a los sensores del robot para alcanzar alguna habilidad particular. Subsistemas típicos de comportamiento en este esquema son evitar obstáculos, vagar cambiando de dirección frecuentemente y explorar buscando los caminos más adecuados y libres. Los subsistemas trabajan esencialmente en paralelo y puede pensarse que forman una estructura de capas. Los sistemas se desarrollan incrementalmente para que las capas más bajas se construyan y depuren antes que la siguiente sea agregada. La idea es que una capa una vez trabajando adecuadamente sea “congelada” para asegurar que los comportamientos sean siempre accesibles aún si las capas superiores llegan a fallar.

Los trabajos en inteligencia artificial basada en comportamientos han dado origen a nuevos modelos de inteligencia. Mataric por ejemplo, propone una arquitectura basada en comportamientos para la síntesis de comportamientos colectivos como son las agrupaciones, búsquedas, y rodeos. Su arquitectura se basa en la composición directa y temporal de primitivas básicas de comportamiento. Ella propone un método para construir automáticamente comportamientos compuestos basados en aprendizaje por refuerzo [Mataric, 1994].

2.3.3.2.3 Mecanismos de coordinación multi-robot centralizados y descentralizados

Los mecanismos centralizados son caracterizados porque el control del sistema mono-robot o multi-robot está a cargo de un solo robot [Cao et al, 1997]. La ventaja de estos mecanismos es su simplicidad, ya que el acceso a los datos y el mantenimiento de su consistencia es sencilla, porque todos los datos se manejan centralizadamente. Su principal desventaja es la no tolerancia a fallas cuando el robot que tiene el control del sistema no responde.

Los mecanismos descentralizados son caracterizados porque el control no radica en un solo robot. Dentro de estos mecanismos existen dos tipos: 1) distribuidos, en el cual los robots son iguales con respecto al control y 2) jerárquicos, en donde la información es eventualmente centralizada por uno de los robots que constantemente la cambia, lo que puede influir sobre las acciones de los demás robots del sistema. Este mecanismo se usa principalmente en el control de sistemas homogéneos [Cao et al., 1997].

2.3.3.2.4 Tipos de comunicación

Otro de los aspectos importantes en el diseño de los sistemas multi-robot es la determinación del tipo de comunicación entre robots, ya que ésta determina las posibles formas de interacción y coordinación entre ellos.

La comunicación se puede realizar básicamente de dos formas:

1. *Directa*: Esta involucra la comunicación explícita entre los robots, la comunicación se establece mediante mensajes intencionales que tienen como objetivo transmitir información a uno o varios robots, donde el robot que recibe el mensaje tiene la capacidad de interpretar dicho mensaje. La comunicación directa también puede establecerse a través del envío de mensajes tipo *broadcast* parecida a la comunicación de una red ya que se puede incluir el diseño de protocolos de comunicación.

2. *Indirecta*: Es la interacción más limitada, ocurre cuando el propio medio ambiente es el medio de comunicación, es decir, el ambiente es modificado e interpretado por los robots, quienes dejan señales en el ambiente.

2.4 Trabajos relacionados

En esta sección se analizan brevemente los principales trabajos relacionados con la construcción de robots modulares y trabajos de simulación de robots reconfigurables.

2.4.1 Robots modulares

Los componentes de un robot modular por lo general poseen las mismas características de movilidad, equipamiento, sistemas de adquisición y transmisión de información. Cada uno de estos robots modulares es capaz de realizar tareas individualmente y también puede realizar tareas trabajando en conjunto con otros robots.

El desarrollo de este tipo de sistemas multi-robot ha sido de gran interés por sus múltiples aplicaciones. A continuación hacemos un recuento de los trabajos más importantes en esta área a nuestro juicio.

Cao et al. [1997] hacen una revisión de los trabajos en el área de robótica colectiva. En su descripción, los autores clasifican los trabajos más representativos para ellos en diferentes áreas, de las cuales nos interesaron por la semejanza y relación con nuestro trabajo, las arquitecturas jerárquicas descentralizadas, e.g. *CEBOT*, y los sistemas de robots autónomos distribuidos, e.g. *Swarm*, sobre los cuales abundaremos posteriormente. Los autores también hacen una distinción entre comportamiento colectivo y cooperativo, para ellos el término **comportamiento colectivo** denota generalmente el comportamiento en un sistema que tiene más de un robot, y **comportamiento cooperativo**, es para ellos una subclase de los comportamientos colectivos, donde es necesaria la colaboración de más de un robot para lograr un objetivo.

En un reporte intitulado “Rápido, barato y fuera de control” Brooks [1989] propone desarrollar un grupo de varios robots pequeños, baratos y reactivos, que podrían ser enviados a Marte, pues sostiene que si se envía un grupo de robots, la misión no presentaría riesgos considerables, en caso de que alguno de estos robots sea destruido durante el aterrizaje o tránsito de la exploración porque si alguno de estos robots falla el resto de los robots puede continuar con la misión, lo que no sucedería si se envía a un solo robot especializado. *CEBOT* (*CELLular roBOTics system*), es un sistema multi-robot con una estructura jerárquica descentralizada, inspirada en la organización celular de entidades biológicas. El sistema es dinámicamente reconfigurable, las ‘células’ básicas autónomas o robots, pueden ser físicamente acopladas a otras células. Sus estructuras son dinámicamente reconfigurables en una configuración óptima, en repuesta a cambios del medio ambiente. En la arquitectura *CEBOT* se definen algunos robots como células maestras, los cuales coordinan las subtareas del resto de los robots. Los requerimientos de comunicación de la arquitectura *CEBOT* han sido cuidadosamente estudiados y varios métodos se han propuesto para reducir los requerimientos de comunicación que permitan diseñar células individuales más inteligentes e.g. capaces de modelar los comportamientos de otras células. Fukuda, el director de éste proyecto, estudió el problema del modelado de comportamiento de otras células, y presentó un método de control que calcula el objetivo de las células basado en los objetivos previos y en los objetivos globales. El autor define una heurística para encontrar las células maestras a través de un árbol binario de comunicación. Un nuevo mecanismo de selección de comportamientos basado en dos matrices usando algoritmos de aprendizaje es introducido para ajustar los valores de dichas matrices [Fukuda et al., 1990].



Figura 2.4. Manipulador *CEBOT*.

Un trabajo realizado con componentes auto-reconfigurables es el robot *Polypod* de Mark Yim [1994]. Él buscó explorar la versatilidad de los sistemas reconfigurables con el objetivo inicial de determinar qué tan versátil es este tipo de sistemas. Yim estableció que para construir un prototipo de robot ápodo, la mejor manera de proceder es construirlo a partir de átomos o módulos. Cada módulo se compone de un robot pequeño que realiza una o dos tareas. Al unir varios de estos módulos, se forma una estructura completa en un prototipo que suma las capacidades de sus componentes o módulos.

Utilizando módulos independientes, Yim logra construir robots muy diferentes por su capacidad de reconfiguración, tomando una u otra forma en función del terreno por el que se vayan desplazando. La figura 2.5 ilustra el sistema Polypod.

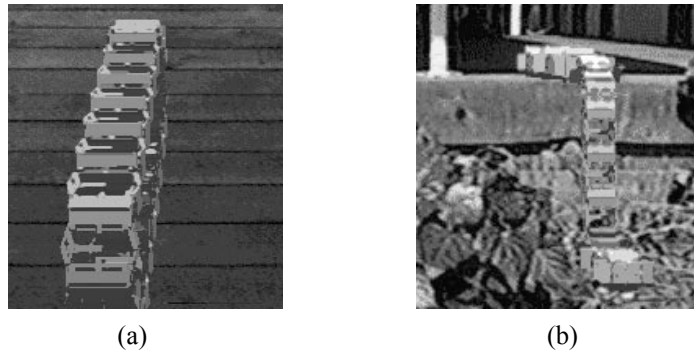


Figura 2.5. Polypod en configuración de rueda para desplazarse en un piso de madera(a). Y en la configuración de gusano-terrestre (*earthworm*) para evadir obstáculos (b).

Swarm es un sistema distribuido compuesto por robots autónomos que surgió como un trabajo sobre los *CEBOTS*, donde se utilizaron robots simples en ambientes de una o dos dimensiones. Estos robots fueron habilitados para hacer tareas como la generación de un patrón con auto-organización. La inteligencia colectiva es una propiedad de los sistemas de robots no inteligentes exhibiendo un comportamiento colectivo aparentemente inteligente. La auto-organización en un sistema multi-robot es la habilidad para distribuirse por ellos

mismos para ejecutar una tarea dada (e.g. formaciones de patrones geométricos). *Swarm* se basa en una arquitectura distribuida, integrada con miembros homogéneos. La interacción se lleva a cabo cuando cada célula reacciona al estado de sus vecinos más cercanos [Cao et al., 1997].

M. Yim y su grupo de colaboradores del *Palo Alto Research Center*, diseñaron *Polybot*, un sistema de robots modulares con más de doce grados de libertad, el cual tiene la capacidad de reconfigurarse en diferentes topologías basadas en cadenas. La reconfiguración del sistema *Polybot* requiere del desprendimiento de módulos desde un punto en el sistema y la incorporación de otros. El diseño de este sistema representó varios problemas para sus creadores, referentes sobre todo al número de módulos a controlar y a la determinación de los movimientos exactos de las cadenas finales requeridos para el ensamble de los módulos. Por ello, los autores vieron la necesidad de planificar varios aspectos, como la secuencia de los cambios de conectividad, la libre colisión de movimientos de los módulos y el ensamblado y desensamblado de los módulos del sistema [Yim et al., 2002].

Un trabajo relacionado con la robótica modular desarrollado en México, es el robot ápodo *Henry I* realizado por Enrique Alarcón como trabajo de tesis de maestría [Alarcón, 2005]. El proyecto comprende la definición de diferentes comportamientos para controlar un robot modular ápodo, partiendo de componentes básicos como son la movilidad de los módulos que componen el robot. En la figura 2.6 se ilustra el robot *Henry I*.



Figura 2.6. Robot apodo *Henry I*.

Otro trabajo en robótica modular desarrollado en México, es el sistema multi-robot *Mini-trans* realizado por Guadalupe Jiménez

como trabajo de tesis de maestría [Jiménez, 2006]. Ella diseñó y construyó un sistema multi-robot compuesto de tres robots homogéneos y autónomos. Los robots tienen una forma cilíndrica y poseen una pinza en la parte frontal y un hueco o arillo en la parte trasera para su ensamble. Los robots tienen capacidades individuales y colectivas. Entre estas últimas se encuentran la reunión, el auto-ordenamiento, el auto-ensamble, el desplazamiento en forma ensamblada, la reorganización de su estructura y la realización de tareas colectivas como empujar una caja (ver figura 2.7).

Los dos últimos trabajos mencionados se desarrollaron dentro del marco del proyecto: Estudio teórico y experimental sobre mecanismos auto-reconfigurables dirigido por la Dra. Angélica Muñoz del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, del cual nuestro trabajo también forma parte.

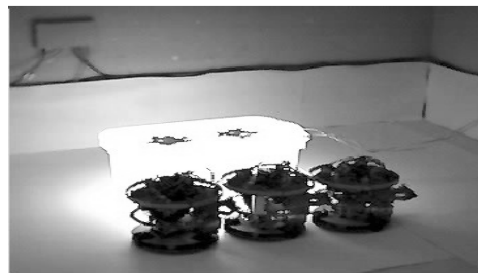


Figura 2.7. Robots modulares auto-reconfigurables *Min-itans*.

2.4.2 Robots simulados

Un trabajo relacionado con la simulación de sistemas multi-robot es el realizado por Ünsal y Bay [1994]. Ellos proponen un método distribuido para lograr una distribución espacial de poblaciones grandes de robots móviles, donde cada robot usa únicamente información obtenida por sus propios sensores. Los algoritmos propuestos por ellos son definidos básicamente sobre funciones de atracción/repulsión para formar figuras de círculos. Los robots simulados tienen capacidades de sensado para el reconocimiento de

diferentes objetos como son otros robots y lámparas de luz utilizadas para indicar a los robots dónde se ubican sus puntos de reunión.

Marco Dorigo y su equipo examinaron el desempeño de un simple robot y de un grupo de robots *Swarm-bots* que pueden auto-ensamblarse entre ellos o ensamblarse a otro objeto. Los autores evaluaron la robustez del sistema sobre diferentes tipos de terreno, hostil y plano, primeramente en un simulador, y posteriormente evaluaron el desempeño de 16 robots físicos. En los resultados de las pruebas en terreno plano, los autores examinaron la habilidad de un simple robot para ensamblarse a un objeto con características similares a las de los robots. Todos los experimentos concluyeron con el ensamble del robot al objeto o con otro robot, pero los resultados en el terreno hostil no tuvieron el mismo éxito [Grob et al., 2006].

McGray y Rus [1998] desarrollaron un sistema auto-reconfigurable tri-dimensional, que es capaz de reconfigurarse planificadamente en un tiempo polinomial. Los módulos simulados en este sistema son llamados robots moléculas y tienen una forma cúbica. Los autores construyeron un meta-módulo formado por 16 robots moléculas que pueden ser conectados entre sí y realizar transiciones para cruzar en forma continua algunas superficies con una configuración dada. Esto se logra usando algoritmos que determinan la reconfiguración de estructuras compuestas por sus módulos tridimensionales.

2.5 Recapitulativo

En este capítulo hemos presentado diferentes trabajos relacionados al nuestro a través de los cuales, se han revisado también algunos conceptos y clasificaciones. Se puntualizaron además los aspectos más importantes a considerar para el diseño de un sistema multi-robot. También se expuso que los comportamientos colectivos de organismos eusociales como las hormigas y las abejas, son una prueba de que los sistemas basados en individuos simples pueden realizar tareas complejas en el mundo real a partir de interacciones definidas en forma de reglas simples. Nuestro proyecto de investigación está basado en analogías de colonias de insectos que

incluyen la generación de diversas estructuras por medio de la auto-reconfiguración.

Capítulo 3

Diseño del sistema multi-robot

3.1 Introducción

En este capítulo se hace una descripción de la terminología a utilizar, se describe el diseño de los módulos o robots así como el enfoque utilizado, se muestran también los autómatas de comportamientos individuales y colectivos. Se definen así mismo los mecanismos de coordinación y comunicación para nuestro sistema multi-robot auto-reconfigurable y las formas o estructuras generadas por los robots. Se describen finalmente las herramientas utilizadas en el desarrollo del sistema y la arquitectura general del ambiente de simulación.

3.1.1 Definición de entidades involucradas en el diseño del sistema multi-robot.

A continuación definimos formalmente las entidades involucradas tanto en el desarrollo del simulador, como en la implementación de los algoritmos y métodos propuestos para la auto-reconfigurabilidad en nuestro sistema multi-robot.

- Ambiente de los robots: Es el mundo en el cual un grupo de robots desarrollará una tarea definida. El ambiente de los robots puede contener, obstáculos, marcas, metas y paredes.
- Marca: Es una señal que los robots reconocen como un punto de reunión, o como un punto donde ellos determinan que ciertos mecanismos o comportamientos específicos pueden ejecutarse.
- Meta: Es un punto en el ambiente al que tienen que llegar todos los robots de forma ensamblada.
- Mecanismos: Es un principio o técnica para generar un comportamiento en particular, por ejemplo, buscar una marca, realizar una formación, coordinar varios robots, etc..

- Componentes: Es un proceso o representación gráfica usado para implementar un mecanismo. Un ejemplo de componente podría ser un robot que forma parte del sistema multi-robot o una estructura de datos.
- Habilidades: Son las capacidades de sensado y actuación con las que fueron equipados los robots y se descomponen en acciones y percepciones las cuales se describen en los apartados correspondientes.
- Acciones: Son las funciones que permiten que un robot pueda avanzar, retroceder, girar, transmitir mensajes.
- Percepciones: Es todo lo que el robot puede reconocer a través de sus sensores.
- Comportamiento individual: Es una regla de control de un robot que agrupa un conjunto de acciones que se activan en respuesta a un estímulo procedente de su medio interno o del medio externo y que le permitirán alcanzar y mantener al robot un objetivo.
- Comportamiento colectivo: Es un tipo de comportamiento que sólo se genera por la combinación de múltiples conductas que se pueden ejecutar simultánea o secuencialmente, producto de la interacción entre los robots y con el medio ambiente, para la realización de una tarea en común.

3.2 Descripción de los robots

Debido a que el diseño de los módulos de un sistema multi-robot simulado o físico auto-reconfigurable no es trivial, antes de iniciar con su construcción física o para nuestro caso antes de iniciar la programación, es importante definir y diseñar la morfología de los robots, así como sus capacidades de sensado y ensamblado, con base en el número de módulos que conformarán el sistema multi-robot y

las tareas que realizarán, además de considerar el ambiente en el que estarán situados.

Nuestros robots son situados, porque son capaces de experimentar el ambiente en el que se encuentran por sus propios medios, lo cual logran reaccionando de manera inmediata a los eventos que ellos perciben a través de sus sensores. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo representativo del paradigma reactivo.

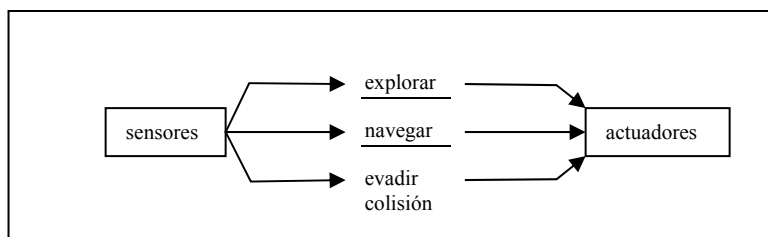


Figura 3.1 Esquema representativo de paradigma reactivo. Se muestran tres comportamientos de un robot, cada comportamiento tiene como entrada de información lo que el robot percibe con sus sensores y las salidas son las acciones que realizarán sus actuadores. Cada salida depende también al comportamiento que el robot este ejecutando en ese momento.

Los robots que componen nuestro sistema multi-robot tienen en común la morfología, objetivos y comportamientos.

Considerando que uno de los objetivos principales que deberán realizar los robots en forma colectiva es navegar en una superficie plana de forma ensamblada, y auto-reconfigurarse para evadir los obstáculos, se diseñarán los módulos del sistema multi-robot como robots cúbicos de tipo vehículo, con una movilidad omnidireccional en el plano XY de 45° por paso, que les permite desplazarse en las ocho direcciones de los puntos cardinales, esto es moverse hacia el norte, noroeste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste.

Cada robot está marcado con un identificador único (id) que les permite reconocerse entre ellos.

3.2.1 Equipamiento

Cada robot fue dotado con capacidades de sensado, ensamblado y estructuras de datos que permiten la comunicación con otros robots.

Para emular el sensado de cada robot, se diseñó una clase llamada *ObjectCollision* en Java3D que utiliza el método de detección de colisiones de la clase *Behavior*. Esta clase permite a los robots detectar e identificar qué tipo de objeto está colisionando con ellos. También se programaron funciones que permiten a los robots desplazarse en una de las ocho direcciones de los puntos cardinales o detenerse. Para el ensamblado, se asume que cada robot cuenta con un cinturón electro-magnético alrededor de su cuerpo a través del cual se puede conectar y desconectar con otros robots ver figura 3.3.

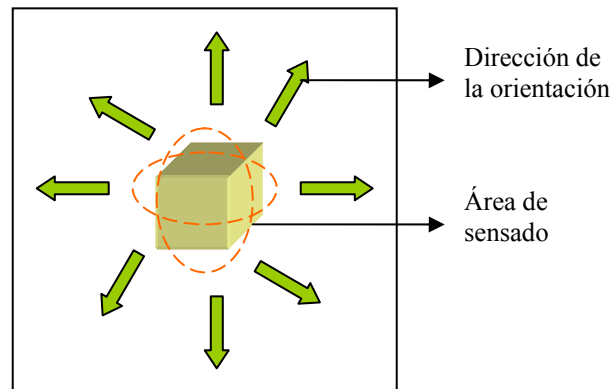


Figura 3.3 Morfología de los robots, con capacidad de desplazamiento en ocho puntos cardinales y de sensado alrededor del robot.

3.2.2 Comunicación

En nuestro sistema, la comunicación es una forma de interacción entre los robots, que surge por la necesidad de comunicar entre ellos. Los robots pueden enviar información a otro robot que tiene la capacidad de recibir la información que le fue comunicada.

La comunicación en los sistemas multi-robot es muy importante tanto para el desarrollo de comportamientos colectivos, cómo para la coordinación del grupo de robots.

Nosotros proponemos una comunicación descentralizada tipo *broadcast* para la coordinación del sistema multi-robot simulado. Esta comunicación se logra a través de la implementación de

estructuras de datos que permiten el intercambio de información entre los robots. Dichas estructuras de datos están formadas por varios vectores de memoria para cada robot, en los cuales cada robot tiene reservada un área específica donde puede escribir y leer datos como direcciones de desplazamiento, orden de formación, nivel de comportamiento, líder de grupo, posición de localización. Todos los robots tienen acceso para leer los datos de los demás robots, pero sólo pueden modificar la parte del vector que les corresponde. En la figura 3.4 se muestra un esquema con la representación de las estructuras de comunicación.

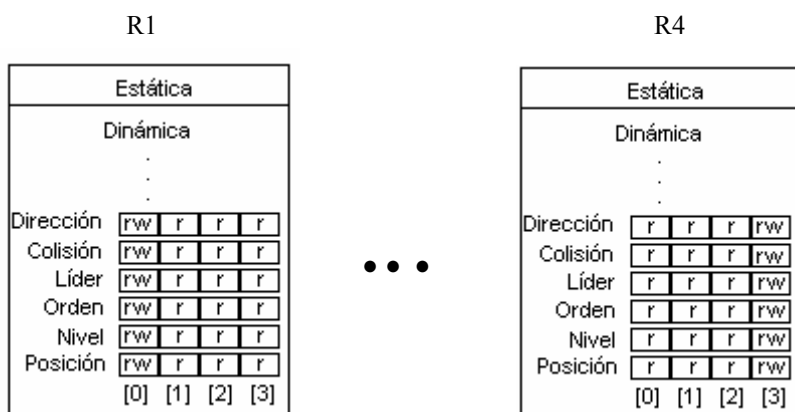


Figura 3.4 Vectores que los robots utilizan para enviar y recibir información. La posición 0 de todos los vectores se utiliza para almacenar la información del robot 1, la posición 1 de todos los vectores se utiliza para almacenar la información del robot 2, la posición 2 de todos los vectores se utiliza para almacenar la información del robot 3 y la posición 3 de todos los vectores se utiliza para almacenar la información del robot 4.

3.2.3 Habilidades

Las habilidades de los robots son las destrezas de las cuales ellos se valen para desenvolverse en el ambiente donde se encuentran e.g. la habilidad que tienen los robots para comunicarse entre ellos. Dichas habilidades se determinan con base en sus capacidades de sentido o percepciones y en las acciones que pueden realizar. Estas capacidades se describen en los siguientes dos apartados.

3.2.3.1 Percepciones

En la tabla 3.4 se muestran los objetos que un robot puede percibir a través de la función *ObjectCollision*, la cual hace posible que los robots puedan reconocer el objeto con el que han colisionado, estos objetos pueden ser paredes, obstáculos, marcas, metas y otros robots. En la última sección de este capítulo se describen los identificadores de cada objeto.

PERCEPCIONES
Módulos del sistema multi-robot
Obstáculos en el ambiente
Marcas en el ambiente
Paredes en el ambiente
Mensajes transmitidos por otros robots

Tabla 3.4 Percepciones de los robots

3.2.3.2 Acciones

Las acciones son los comandos mínimos que al ser ejecutados por los robots modifican el ambiente o la forma en cómo es percibido por los demás robots, e.g. cuando un robot se desplaza en el ambiente va modificando su posición, lo que hace que un segundo robot pueda detectarlo o no. Las acciones que los robots pueden realizar se muestran en la tabla 3.5

ACCIONES
Desplazarse
Detenerse
Acoplarse
Desacoplarse
Cambiar de dirección
Transmitir mensajes

Tabla 3.5 Acciones que pueden ejecutar los robots

3.2.4 Comportamientos individuales

Los comportamientos individuales generalmente se generan a partir de la interacción entre los robots y su medio ambiente. La realización de los comportamientos de cada robot se logra con base en sus habilidades y un conjunto de sencillas reglas locales definidas por el diseñador. La idea de formar los comportamientos de los robots sólo utilizando la información obtenida a través de sus sensores y utilizando un conjunto de reglas de acción es que éstos deben ser tan simples como sea posible.

Los comportamientos individuales implementados son los siguientes:

- **Buscar objetivo:** Secuencia de acciones que involucra también la percepción del robot para buscar una marca o meta en el medio ambiente,
- **Evadir obstáculo:** Secuencia de acciones que involucra también la percepción del robot para cambiar su dirección de desplazamiento cuando identifica que el objeto con el que hizo colisión es un obstáculo,
- **Evadir robot:** Secuencia de acciones que involucra la percepción del robot para cambiar su dirección de desplazamiento cuando ha detectado una colisión con un robot,

En la figura 3.6 se muestra un esquema donde se ejemplifican los comportamientos que los robots pueden ejecutar de forma individual.

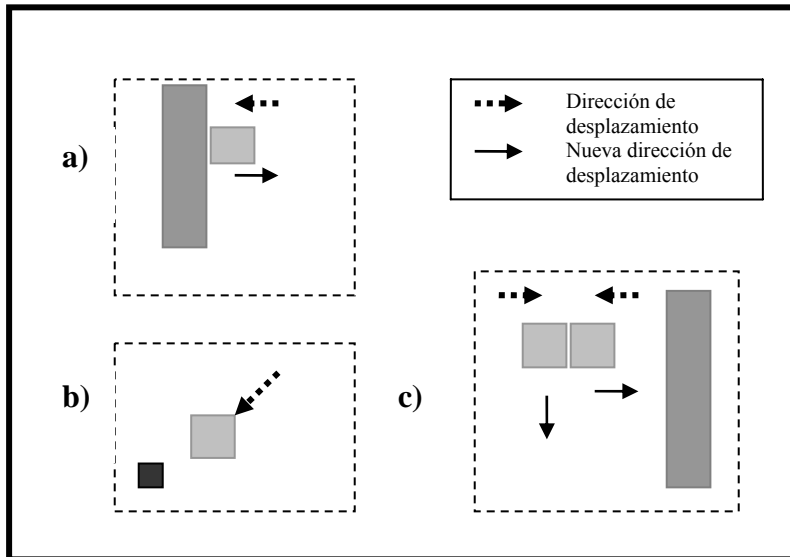


Tabla 3.6 Representación de comportamientos individuales de los robots. a) Robot evadiendo un obstáculo, b) Robot buscando una meta, c) Robots evadiéndose.

Es importante recordar que los sistemas formados por robots simples pueden realizar tareas complejas en el mundo real. Los comportamientos individuales emergen de las interacciones entre los robots con el medio ambiente, los cuales se generan a partir de reglas simples. A continuación se muestran los autómatas de comportamiento individual.

3.2.4.1 Buscar objetivo

Este es uno de los comportamientos que permite a un robot encontrar una marca en el ambiente. En el caso de que el robot se encuentre ejecutando comportamientos individuales, esta señal puede indicarle qué acción o acciones diferentes debe realizar cuando encuentra su objetivo.

El autómata ilustrado en la figura 3.7 muestra la secuencia de acciones que un robot realiza para buscar un objetivo. Primero, una vez que el robot se encuentra en el estado avanzar en una dirección

en forma continua, al momento de colisionar con un objeto, verifica si éste es el objetivo que está buscando, si la respuesta es afirmativa, pasa al estado de detenerse y termina este comportamiento. En caso contrario, lo que el robot hace es evadir el objeto, y continúa avanzando hasta encontrar su objetivo.

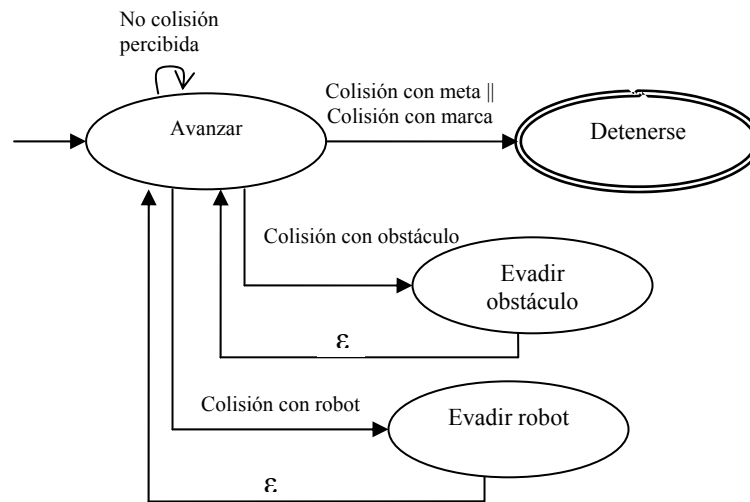
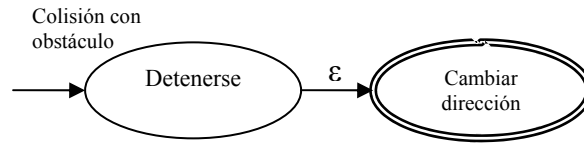


Figura 3.7 Autómata de comportamiento buscar objetivo.

3.2.4.2 Evadir obstáculo

Este comportamiento cambia la dirección de navegación del robot una vez que ya conoce con qué tipo de objeto está colisionando, en este caso el robot ya reconoció que se trata de un obstáculo. Este comportamiento se presenta cuando el robot se encuentra ejecutando buscar objetivo y detecta una colisión por lo que procede a la identificación del objeto que percibió, posteriormente pasa al estado detenerse, y genera de forma aleatoria una dirección, por lo que pasa al estado de cambiar dirección el cual produce un cambio en la dirección de desplazamiento del robot. La transición ϵ indica el paso libre hacia el siguiente estado. El autómata se ilustra en la figura 3.8.

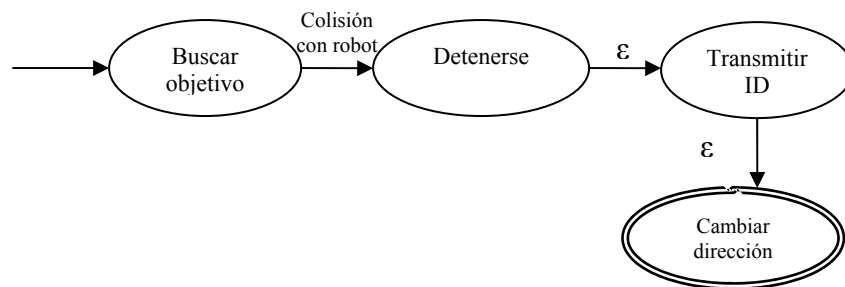


3.8 Autómata para evadir un obstáculo.

3.2.4.3 Evadir robot

El comportamiento evadir robot, cambia la dirección de desplazamiento del robot cuando reconoce que el objeto con el que está colisionando es otro robot del sistema.

Este comportamiento se presenta cuando el robot está buscando objetivo y se desplaza en una dirección determinada por él mismo, cuando detecta una colisión procede a la identificación del objeto que percibió, posteriormente pasa al estado detenerse, transmite su identificador al robot con el que colisionó y pasa al estado cambiar dirección el cual produce un cambio en la dirección de desplazamiento del robot. La transición ϵ indica el paso libre hacia el siguiente estado. El autómata se ilustra en la figura 3.9.



3.9 Autómata para evadir módulo.

3.2.5 Comportamientos colectivos

La conducta social es un comportamiento combinado de diversos comportamientos individuales que tienden a lograr un efecto único y sólo puede ser producida por la interacción entre varios robots. Dichos comportamientos sólo se presentan si los robots son capaces de establecer algún tipo de comunicación entre ellos y de modificar sus conductas individuales como consecuencia de tal comunicación. La complejidad de los comportamientos colectivos surge por la interacción entre los individuos que exhiben un comportamiento dinámico. Los comportamientos colectivos implementados en los robots de nuestro sistema son los siguientes:

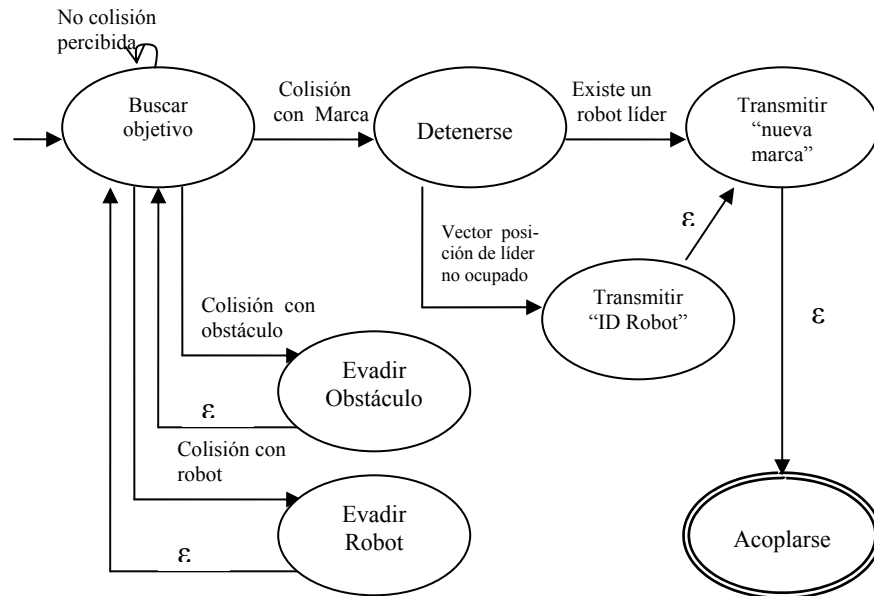
- Ensamblarse: Permite mantener a un grupo de robots unidos o ensamblados en una estructura específica.
- Desplazarse ensamblados: Permite a los robots avanzar unidos en forma coordinada.
- Buscar un objetivo ensamblados: Permite a los robots formados en una estructura específica, realizar una búsqueda en el ambiente de un objeto que ellos reconocen como marca o meta.
- Desensamblarse: Permite a los robots desconectarse y dispersarse nuevamente en el ambiente.
- Evadir obstáculos ensamblados: Permite a los robots evadir un obstáculo cuando se encuentran ensamblados.

A continuación se muestran los autómatas de comportamientos colectivos de nuestro sistema multi-robot.

3.2.5.1 Ensamblarse

Este comportamiento permite la asociación física de los robots para construir estructuras diferentes con sus cuerpos. Dichas estructuras son figuras geométricas formadas por el enlace entre los robots de tipo cadena sobre el plano XY.

Este comportamiento se presenta cuando un robot se encuentra en estado buscar objetivo y colisiona con un objeto, si reconoce el objeto como una marca, entra al estado de detenerse y posteriormente verifica si su vector de comunicación en su posición líder está vacío, registra su ID en el vector y transmite el mensaje a los demás robots para que éstos lo reconozcan como líder eventual del grupo. Posteriormente comunica al resto de los robots que deberán encontrarlo a él para ensamblarse por lo que los demás robots deberán acoplarse a su lado, pues ahora él es la nueva marca que los robots deberán encontrar para ensamblarse. El autómata de este comportamiento se ilustra en la figura 3.10.

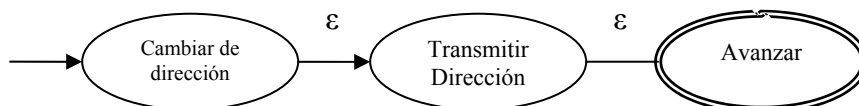


3.10 Autómata para auto-ensamble de los robots.

3.2.5.2 Desplazarse ensamblados

El comportamiento de desplazamiento ensamblados, permite a los robots moverse en forma coordinada de modo que la estructura formada con sus cuerpos puede mantenerse sin alteraciones.

Este comportamiento se presenta cuando todos los robots se han auto-ensamblado, por lo que el líder del grupo genera una dirección aleatoria de desplazamiento en el estado cambiar dirección, posteriormente transmite la dirección a los demás miembros del grupo. Una vez que todos los robots conocen la dirección de desplazamiento empiezan a avanzar, y se quedan en ese estado hasta que un robot detecta una colisión. El autómata de éste comportamiento se ilustra en la figura 3.11.



3.11 Autómata para el desplazamiento de los robots ensamblados

3.2.5.3 Buscar un objetivo ensamblados

Este comportamiento consiste en la búsqueda de una meta o marca que les sirve de señalización a los robots para que a partir de allí cambien directamente su comportamiento o reconfiguración. El autómata de comportamiento se ilustra en la figura 3.12.

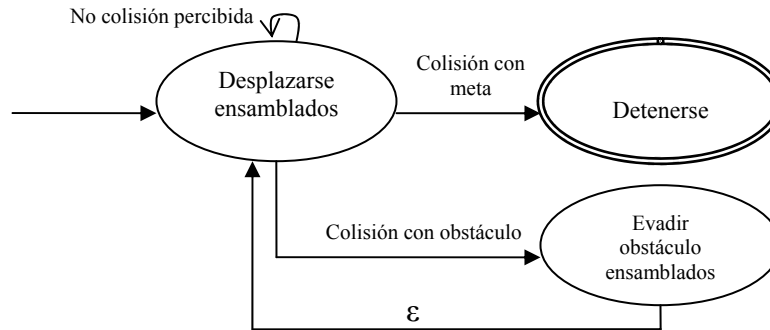


Figura 3.12 Autómata buscar meta ensamblados

3.2.5.4 Desensamblarse

Este es el comportamiento para deshacer la estructura que formaron los robots con sus cuerpos, está diseñado para activarse sólo cuando los robots están ensamblados y explorando el ambiente, i.e. en el estado de desplazamiento ensamblados. Cuando alguno de los robots percibe una marca comunica al resto del grupo el identificador del objeto con el que ha colisionado, por lo que todos los robots se detienen y se orientan en la dirección contraria a la que tenían antes de encontrar dicha marca y se desplazan en esa dirección. El autómata de comportamiento se ilustra en la figura 3.13.

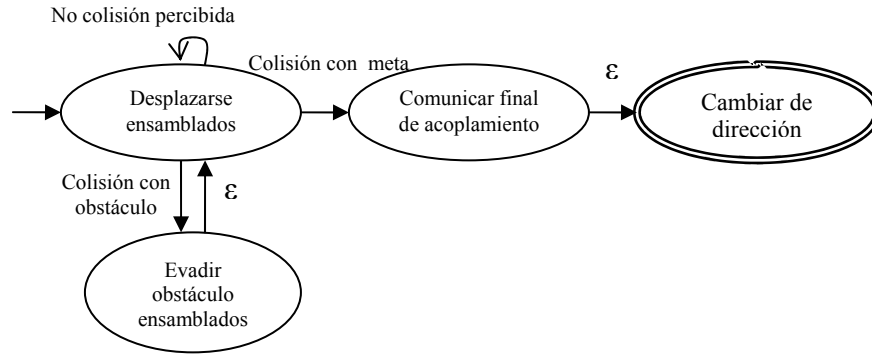


Figura 3.13 Autómata de comportamiento desensamblarse

3.2.5.5 Evadir obstáculo ensamblados

Este comportamiento permite a los robots evadir un obstáculo en forma coordinada de modo que la estructura formada con sus cuerpos puede mantenerse sin alteraciones. Dicho comportamiento se activa cuando uno de los robots detecta un obstáculo, por lo que proceden todos los robots a detenerse, posteriormente el robot que detectó la colisión genera una nueva dirección de desplazamiento aleatoria, i.e. cambia su dirección y transmite esa dirección a los demás robots, después los robots pasan al estado de desplazarse ensamblados en la nueva dirección. El autómata de dicho comportamiento se ilustra en la figura 3.14.

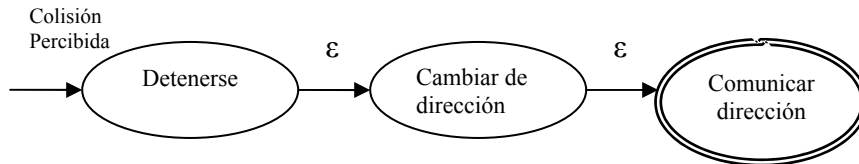


Figura 3.14 Autómata de comportamiento para evadir obstáculos ensamblados.

3.2.6 Mecanismo de auto-reconfiguración

En los mecanismos anteriores, los robots avanzan y evaden obstáculos como un solo cuerpo. En esta sección se discuten los mecanismos propuestos para la reorganización de la estructura de los robots. Estos mecanismos permiten a los robots buscar un objeto ensamblados en un medio ambiente regular con dos o tres obstáculos, e irregular semejante a un laberinto, evadiendo obstáculos reorganizando su estructura.

Tomando en consideración que el número de robots que conforman nuestro sistema multi-robot es cuatro, las estructuras que identificamos que nuestros robots pueden formar con sus cuerpos son estrella, cubo, línea horizontal o fila y línea vertical o columna ver figura 3.15.

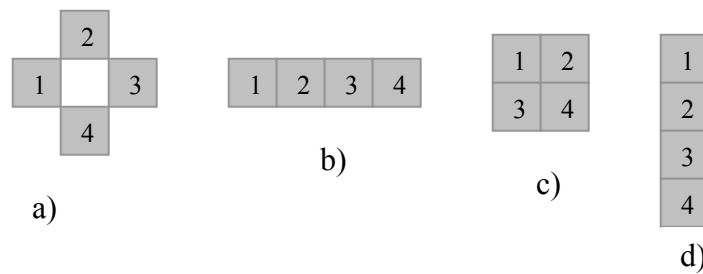


Figura 3.15 Estructuras formadas por los robots. a) Formación de estrella, b) Formación en fila, c) Formación en cubo, d) Formación en columna.

Para lograr la auto-reconfiguración diseñamos un **método de reconfiguración por referencia**, este método les permite generar a los robots las estructuras antes mencionadas, con la única restricción del espacio en el ambiente, i.e. los robots necesitan tener disponible aproximadamente el equivalente al espacio ocupado por los robots ensamblados en forma horizontal, para la implementación del mecanismo.

Dicho método consiste en una secuencia de movimientos que cada robot determina basado en su posición absoluta del plano XY y en la posición de otro robot que toma como guía o referencia para calcular el punto a donde se desplazará. Esta guía o referencia es el robot que le antecede en formación, i.e. cada robot toma como guía la

transmisión de coordenadas actualizadas del último robot que se integró a la nueva estructura que desean realizar. El robot líder de la formación es el único robot que no utiliza una referencia para formarse, el sólo transmite su posición en el plano XY para que el resto de los robots se reconfiguren junto a él.

El método de reconfiguración por referencia inicia con el retroceso de los tres últimos robots que llegaron a la formación para ensamblarse, posteriormente quedan en estado de detenerse, esto con la finalidad de evitar colisiones entre ellos o se obstaculicen durante el proceso de reconfiguración; posteriormente, el robot líder del grupo, i.e. el robot que llegó primero a la formación, calcula la posición XY a donde él debe moverse en caso de ser necesario y comunica a los demás robots la posición XY en la que finalmente quedó. Posteriormente, el siguiente robot a reconfigurarse, i.e. el segundo robot que se ensambló, calcula su posición XY a la que deberá desplazarse tomando como referencia la posición del robot antecesor en la formación, en este caso el robot líder. Cuando el segundo robot llega a su nueva posición, comunica a los demás robots su posición XY actual. Este proceso es repetido sucesivamente por el tercer y cuarto robot, ver figura 3.16. El desplazamiento de cada robot en la formación se lleva a cabo paso a paso, avanzando primero en el plano de las X's y posteriormente en el plano de las Y's para los robots dos y tres mientras que el robot cuatro se desplaza primero en el plano de las Y's y luego en el plano de las X's, siendo éste el robot que más distancia recorre para llegar a su nueva posición en la formación.

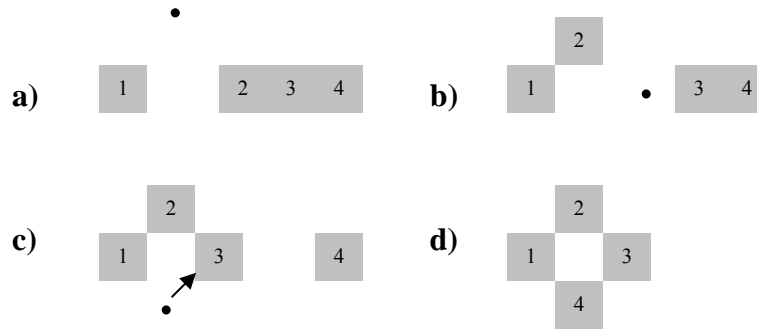


Figura 3.16 Ejemplo de posición de formación determinada por referencia. Los números en los cuadros indican el orden en que los robots fueron integrándose a la formación. Los puntos negros de cada figura representan la posición de formación de cada robot a formarse, las fechas indican el robot que toman como referencia para formarse. El robot número 1 es el líder. El robot líder no se mueve y el resto de los robots retroceden. a) Posición de formación del robot 2 basada sobre la posición XY del robot 1, b) Posición de formación del robot 3 basada sobre la posición XY del robot 2, c) Posición de formación del robot 4 basada sobre la posición XY del robot 3, d) Estructura final de estrella que los robots formaron con sus cuerpos.

Establecimos una secuencia en la transformación de las estructuras que los robots pueden formar por dos razones, la primera porque es necesario considerar el espacio que los robots necesitan para reconfigurarse y la segunda porque los robots necesitan saber cuál es la siguiente estructura que pueden formar con sus cuerpos por lo que es necesario definir un orden en las estructuras que van formando, ver figura 3.17.

Definimos la estructura de estrella como la primera forma a realizar porque ésta es la que ocupa más espacio para explorar el ambiente. Esto da la ventaja a los robots de recorrer un área grande del ambiente en un tiempo menor en comparación con el tiempo invertido en hacer el mismo recorrido en una estructura compacta como el cubo. La segunda estructura que los robots pueden formar es la fila, pues ésta estructura les implica un menor número de movimientos para desplazarse y reconfigurarse en relación a la estructura de estrella. La tercera figura que los robots forman es el cubo, ésta es la estructura más compacta que ellos pueden formar

con sus cuerpos, ésta reconfiguración permite a los robots recorrer una distancia menor para reconfigurarse después de la formación en línea. Finalmente, la estructura que los robots intentarán formar para evadir un obstáculo es la columna porque es la estructura que menos se utiliza para los ambientes que diseñamos.

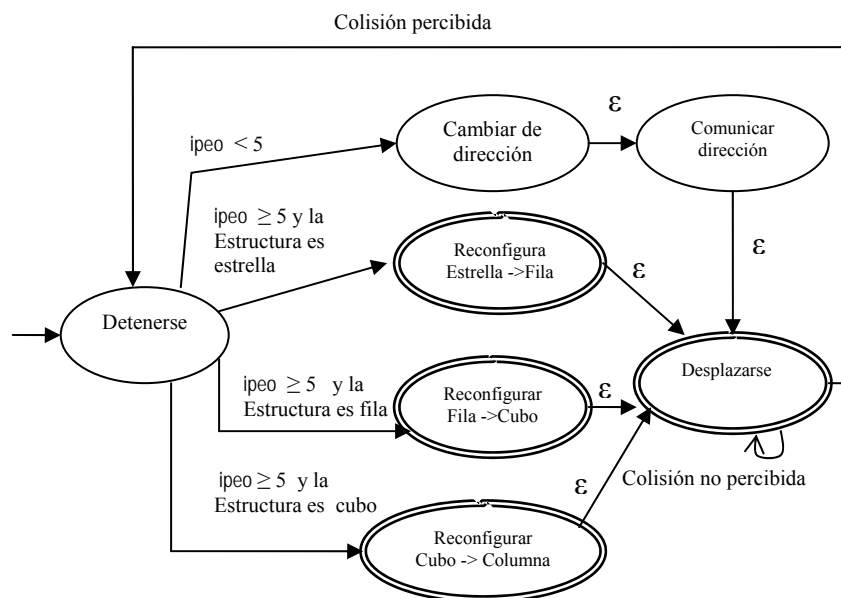


Figura 3.17 Autómata de auto-reconfiguración que les permite a los robots evadir obstáculos en un ambiente irregular a través de reconfiguraciones. La variable ipeo significa intentos para evadir un obstáculo.

Las diferentes estructuras que los robots pueden formar se logran a través de los mecanismos de auto-reconfiguración que pueden usar los robots por sus capacidades de sensado, ensamblado y de comunicación. La realización de una tarea de grupo (e.g. buscar una meta ensamblados) se logra a través de la activación e inhibición de los comportamientos individuales y colectivos organizados en la arquitectura de subsumción del sistema multi-robot (c.f. sección 3.1.1.).

3.3 Mecanismos de control

Implementamos diferentes métodos para el control y la coordinación de nuestro sistema multi-robot. El primero es la implementación de la arquitectura de subsumción para la realización de tareas individuales y como se verá en la siguiente sección, para la realización de tareas colectivas se agregaron dos capas más a dicha arquitectura. El segundo es un método de selección de líder, utilizado para coordinar al grupo de robots que integran nuestro sistema multi-robot.

3.3.1 Arquitectura de subsumción

Para el proceso de organización de comportamientos de los robots se utilizó la arquitectura de subsumción. Esta arquitectura está compuesta por tres niveles conceptuales que agrupan los comportamientos que cada robot puede realizar cuando se encuentra interactuando con su medio ambiente. El nivel 1 comprende los comportamientos individuales, el nivel 2 los comportamientos colectivos y el nivel 3 los comportamientos de auto-reconfiguración de los robots, ver figura 3.18.

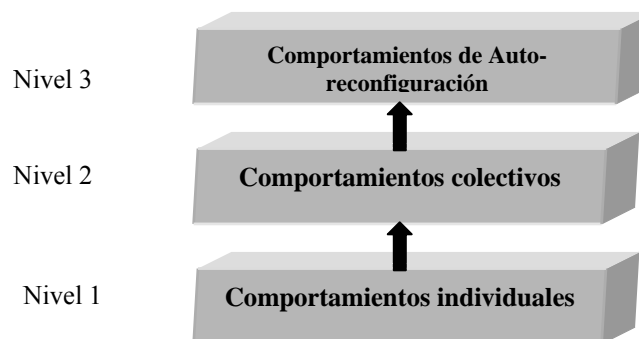


Figura 3.18 Arquitectura de subsumción para control de un sistema multi-robot auto-reconfigurable.

En el nivel 1 los comportamientos que los robots ejecutan son los individuales, por lo que sólo podrán desplazarse en forma aleatoria, evitando las colisiones entre sus semejantes y evadiendo obstáculos para buscar un punto de reunión específico en el ambiente donde podrán empezar su proceso de auto-ensamble.

El número de robots que forman parte de su colonia es información que los robots de nuestro sistema conocen desde el momento de su creación. Con esta información, un robot puede determinar si es o no el último robot del grupo en formarse, lo cual es importante porque el último robot de la formación es quien indica a los demás robots que deben hacer un cambio de nivel en la jerarquía de comportamientos, pasando del primer al segundo nivel de la arquitectura de subsumción.

En el nivel 2, se inhiben los comportamientos ejecutados en el nivel 1 y se activan los comportamientos que les permiten navegar en el ambiente, manteniendo la primera estructura que los robots han generado, además de buscar un objetivo y evadir obstáculos colectivamente.

El nivel 3 de la arquitectura comprende los mecanismos de auto-reconfiguración. Los mecanismos de reconfiguración sólo se activan cuando los robots no pueden evadir un obstáculo con la estructura inicial que formaron, por lo que proceden a cambiar de estructura. Para ello, se ejecutan los comportamientos colectivos para desplazarse y mantener dicha estructura.

Los mecanismos de auto-reconfiguración propuestos junto con los comportamientos individuales y colectivos, fueron implementados y probados en una herramienta de simulación que nosotros desarrollamos. En la sección 3.4 de este capítulo hacemos una breve descripción de dicha herramienta.

3.3.2 Coordinación de sistemas multi-robot

Los robots simulados utilizan la arquitectura de control jerárquica descentralizada para el proceso de coordinación que permite la generación de líderes emergentes que evitan la existencia de conflictos entre los robots para obtener el control.

Para lograr la coordinación de nuestros robots, diseñamos un método de selección de líder emergente del grupo al que llamamos **PFPL-PCCD** que significa “Primero en Formarse Primero en ser Líder-Primero que Colisiona Cambia la Dirección”. Este método está basado en la filosofía de la estructura de datos de una cola, de modo que el primer robot que llega a la formación es el líder del grupo para guiar el proceso de todas las reconfiguraciones (estrella, cubo, fila y columna), y el primer robot que detecta una colisión es el nuevo líder emergente del grupo y el que define la nueva dirección de desplazamiento del grupo de robots. Se les llama robots líderes porque de cierta manera estos robots influyen sobre las acciones del resto del grupo, e.g. la posición o el lugar en donde forman las estructuras en el ambiente, se determinan con base en la formación del robot antecesor en la formación, por lo que el robot líder es el que define sobre qué área del ambiente los robots formarán dicha estructura. El robot líder es también quien determina la ruta de desplazamiento de los demás robots.

3.4 Descripción del ambiente de simulación

La simulación de sistemas robóticos tiene la finalidad de familiarizarnos y entender un problema bajo estudio. En nuestro caso, el ambiente de simulación terminado está orientado a apoyar la experimentación al permitir el diseño, la prueba y la depuración de los mecanismos de coordinación multi-robot que nos interesan, antes de ser físicamente implementados.

Algunas de las ventajas más importantes de construir simuladores, es que eliminan los riesgos que siempre se presentan en la interacción con la realidad, tanto para los diseñadores como para los dispositivos electromecánicos. Para los diseñadores, porque si las pruebas realizadas en el ambiente de simulación muestran que algunos aspectos del robot necesitan ser cambiados, se reducen las inversiones en tiempo y dinero del diseñador. En los dispositivos electromecánicos porque durante el traslado o pruebas continuas sobre los robots físicos se pudieran deteriorar dichos dispositivos, inclusive antes de terminar su construcción. Otra de las ventajas de los simuladores es que nos ofrecen la posibilidad de repetir, en

condiciones idénticas procesos y fenómenos que son difíciles de lograr en condiciones reales. Esta propiedad es importante para estudiar y modificar sistemáticamente los comportamientos del sistema hasta alcanzar los objetivos deseados.

3.4.1 Requerimientos

Para el desarrollo de este simulador utilizamos el lenguaje de programación *Java3D* sobre un sistema operativo *Windows XP*, ya que este lenguaje, aunque no es de dominio público, se puede adquirir en forma libre, además de permitir el diseño de gráficos tridimensionales y de contar con métodos para la detección de colisiones entre objetos. Otra de las ventajas de este lenguaje es que permite la compilación y ejecución de sus programas en sistemas operativos diferentes como *Linux* o *Unix* sin mayores problemas (dependiendo del sistema operativo, a veces es necesario especificar rutas de las librerías utilizadas, o en algunos casos es necesario anexar el prefijo *J* antes del nombre de la función). El ambiente de simulación desarrollado nos permite observar a través de gráficos tridimensionales, los comportamientos que genera un grupo robots cuando sus interactúan entre sí, al igual que el proceso de auto-reconfiguración que ejecutan para librar un obstáculo o para alcanzar una meta.

3.4.2 Mundos artificiales

En nuestro ambiente de simulación se diseñaron dos tipos de mundos para la navegación de los robots. Ambos mundos tienen una superficie lisa y plana. La elección de esto último responde a un criterio donde se busca ir de lo más simple a lo más complejo constructivísticamente hablando. Decidimos pues empezar a abordar ambientes con superficies planas, que de por sí ya son difíciles de enfrentar por nuestros robots por el hecho de ser auto-reconfigurables.

El primer mundo o ambiente está delimitado por paredes y contiene objetos que los robots reconocen como marcas o metas que les

indican que deben realizar alguna acción como detenerse, ensamblarse o cambiar de estructura (c.f. sección 3.1.1) ver figura 3.19.

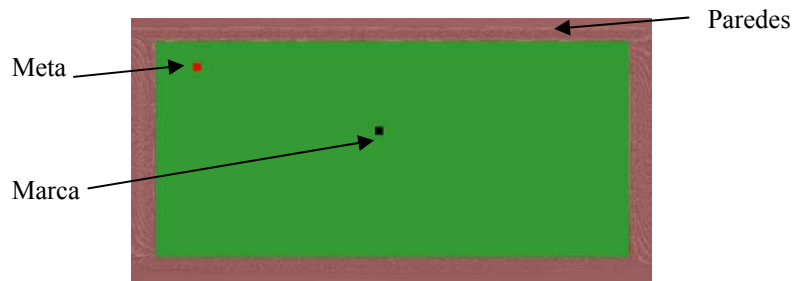


Figura 3.19. Ejemplo de ambiente del simulador sin obstáculos.

El segundo ambiente está delimitado por paredes, contiene al menos un obstáculo que impide el paso libre de los robots. Tiene también implementado el método de señalización del ambiente que indica a los robots realizar alguna acción ver figura 3.20.

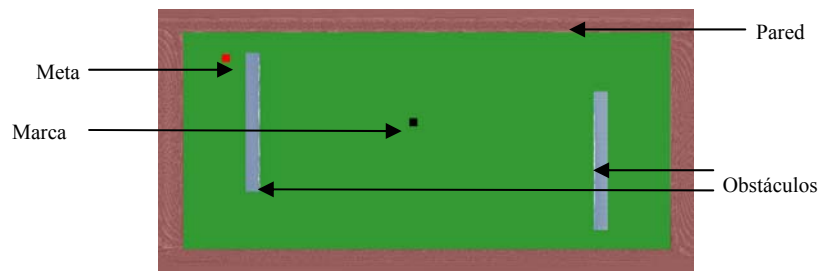


Figura 3.20 Ejemplo de ambiente del simulador con obstáculos.

Los objetos que están ubicados en el ambiente son marcados con unas etiquetas para su identificación. Los identificadores de los objetos se encuentran descritos en la tabla 3.21. Los identificadores de cada robot se describen en la tabla 3.22.

Identificador (ID)	Objeto	Descripción
1	Pared	Objeto delimitador del espacio a explorar
2	Obstáculo	Objeto que impide el paso continuo de los robots
3	Marca	Objeto que puede indicar un punto de reunión, formación o reconfiguración para los robots
4	Meta	Objeto que indica a los robots han cumplido su objetivo

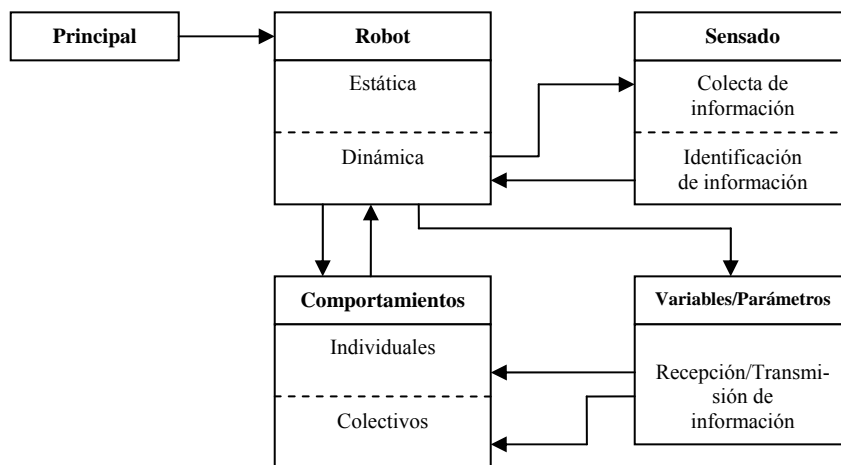
Tabla 3.21 Identificadores de los objetos del medio ambiente.

Número de robot	Identificador (ID)
0	41
1	42
2	43
3	44

Tabla 3.22 Identificadores de los robots

3.4.3 Arquitectura del simulador

La arquitectura general del simulador se compone por cinco módulos principales, aunque cada uno de estos módulos tiene una función específica, son mutuamente dependientes de los módulos que los acceden, porque necesitan ser activados por un módulo que les solicita un servicio, generalmente procesar o comunicar información. Estos módulos son Principal, Robot, Sensado, Variables/Parámetros y Comportamientos (ver figura 3.23).



3.23 Arquitectura general del simulador.

A continuación se hace una breve descripción funcional de cada uno de los módulos de la arquitectura del simulador.

El módulo Principal define los distintos tipos de objetos que componen nuestro ambiente de simulación e.g. geometrías, apariencias, iluminaciones, que crean y caracterizan el medio ambiente donde estarán situados nuestros robots.

El módulo Robot está formado por dos submódulos que contienen la parte estática y dinámica de cada robot, a través de los cuales se les caracteriza y “da vida”. La parte estática es el submódulo que contiene los datos que no cambian del robot durante la simulación, como su tamaño, forma y color. La parte dinámica es el submódulo que contiene los datos del robot que pueden ser modificados durante la simulación, como su posición XY, estado en el que se encuentra e.g. avanzando, colisionado, nivel de comportamiento. El módulo Robot fue programado con reglas que permiten activar o desactivar los comportamientos definidos en la arquitectura de subsumción, combinando la información local del robot con la información que le fue transmitida por otros robots.

El módulo de Comportamientos, está compuesto por la secuencia de acciones que puede ejecutar cada robot de manera individual o

colectiva, ya que en dichas secuencias se encuentran clasificados los tipos de comportamientos. En nuestra herramienta de simulación, los mecanismos de auto-reconfiguración son integrados como otro tipo de comportamiento colectivo y son activados cuando los robots no pueden evadir un obstáculo colectivamente.

El módulo de Sensado contiene las funciones diseñadas para detectar y reconocer los objetos con los que el robot ha colisionado. Este módulo es uno de los que activa la parte dinámica del módulo Robot.

El módulo de Variables/Parámetros, es el que recibe y transmite la información del módulo Robot al módulo de Comportamientos para que los robots puedan interactuar con el medio ambiente en forma individual o colectiva.

3.5 Recapitulativo

En este capítulo se presentaron los diferentes métodos y mecanismos propuestos para un sistema multi-robot reconfigurable, también vimos que cada robot es diseñado como un módulo simple dotado con capacidades perceptivas utilizando funciones que emulan técnicas de sensado y que permiten a los robots interactuar con su medio ambiente, reconociendo diferentes objetos como paredes, obstáculos y otros robots, sin la utilización de mapas o modelos explícitos previamente establecidos.

Para el control de los robots se utilizó la arquitectura de subsumción propuesta por Brooks [1986], redefinida por nosotros en tres niveles jerárquicos. El primer nivel se compone de una secuencia de reglas simples que permiten la interacción de los robots entre ellos y con su medio ambiente i.e. comportamientos individuales. El segundo nivel está formado por la combinación de conductas que pueden ejecutar los robots simultáneamente, cuando interactúan entre ellos y con el medio ambiente, i.e. comportamientos colectivos, que les permiten realizar tareas en común como la exploración o la búsqueda de un objeto en el ambiente. El tercer nivel comprende el método de formación por referencia que es el mecanismo propuesto por nosotros para cambiar su forma o estructura de un sistema multi-robot ensamblado.

Un mecanismo para la coordinación del sistema multi-robot simulado diseñado fue el método PFPL-PCCD el cual a través de la capacidad de comunicación de los robots, permite la generación de líderes emergentes que se ocupan de coordinar el grupo de robots en un momento dado. El establecimiento de líderes temporales es importante para evitar conflictos entre los miembros de un sistema multi-robot cuyo funcionamiento se basa en esquemas del control descentralizado, sin líderes designados ni jerarquías pre-establecidas.

Capítulo 4

Pruebas y resultados

4.1 Introducción

En este capítulo, se presenta una serie de experimentos realizados que ilustran los comportamientos individuales y colectivos de los robots enlistados, respectivamente en las tablas 4.1 y 4.2. Se presentan también los resultados de los mecanismos de auto-reconfiguración que fueron implementados en nuestro sistema multi-robot.

Los resultados de los experimentos se presentan en gráficas de comportamiento al final de cada experimento.

Experimento	Ambiente	Descripción
A	Sin Obstáculos	Reunión de robots en un punto específico del ambiente, con exploración libre.
B	Con Obstáculos	Reunión de robots en un punto específico del ambiente, con exploración libre.
C	Sin Obstáculos	Formación lineal en un punto específico del ambiente con exploración libre.

Tabla 4.1 Experimentos de comportamientos individuales.

Experimento	Ambiente	Descripción
D	Sin obstáculos	Cambio de una formación lineal a una formación de estrella.
E	Sin obstáculos	Exploración de los robots en configuración de estrella.
F	Con obstáculos	Exploración en un ambiente regular con reconfiguración dinámica de estrella a estructura en fila
G	Con obstáculos	Exploración en un ambiente regular con reconfiguración dinámica. Estructuras formadas: estrella, fila, cubo y columna para encontrar una meta.

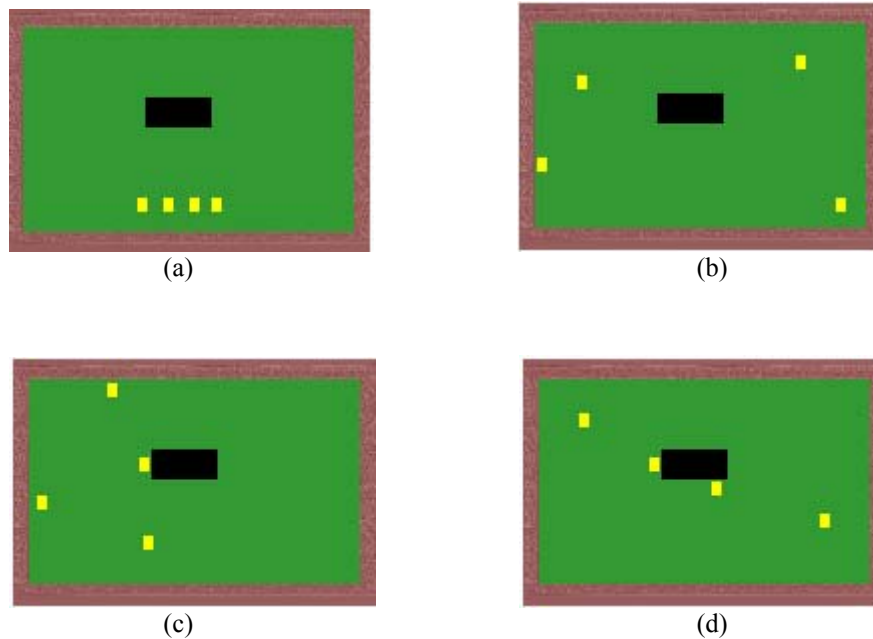
Tabla 4.2 Experimentos de comportamientos colectivos

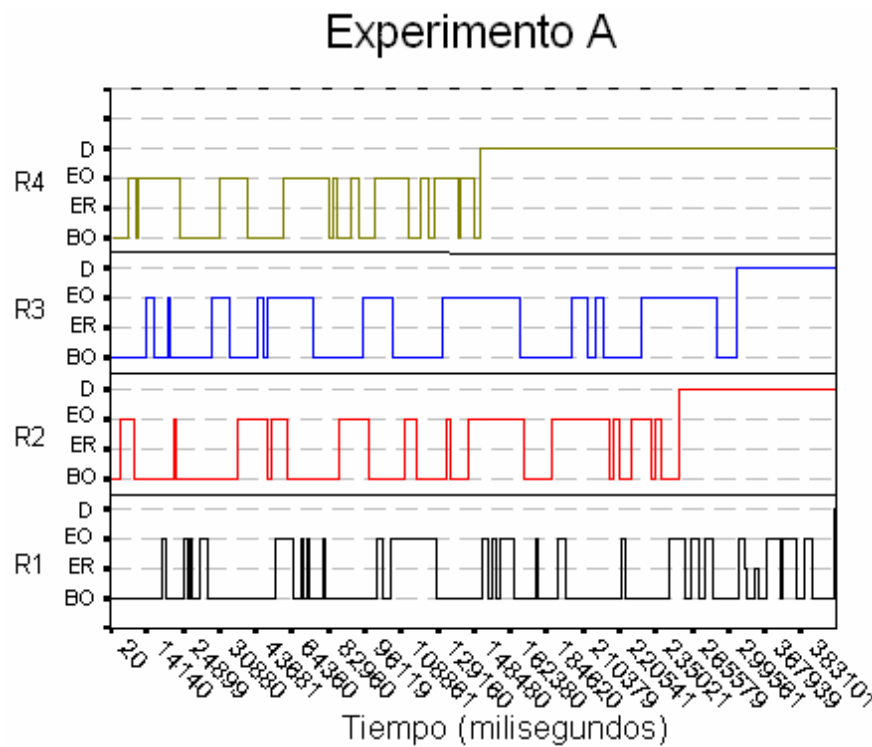
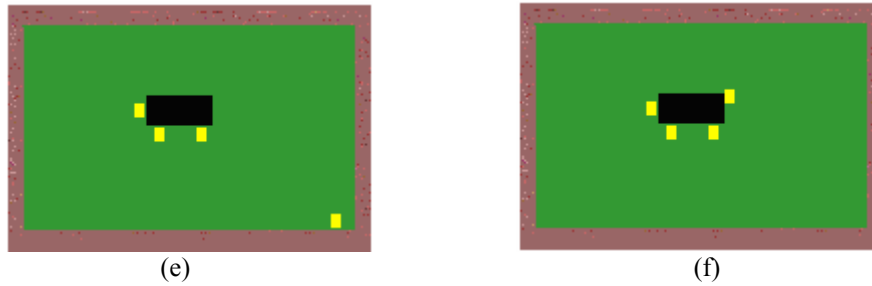
4.2 Pruebas de comportamientos individuales

En ésta sección mostramos tres experimentos, donde probamos los comportamientos que los robots pueden ejecutar de manera individual, en ambientes sin obstáculos y posteriormente en ambientes con obstáculos.

4.2.1 Experimento A

El experimento A tiene por objetivo que todos los robots encuentren un punto de reunión en el ambiente. Dicho ambiente se encuentra libre de obstáculos. A continuación se presenta una secuencia de imágenes que muestra cómo se fue dando este proceso en nuestro simulador (ver figura 4.3). Los comportamientos ejecutados por los robots se ilustran en la gráfica 1.





Gráfica 1. Comportamientos de los robots en el experimento A. Los comportamientos son buscar objeto, evadir robot, evadir obstáculo y detenerse, etiquetados como BO, ER, EO, D respectivamente.

4.2.2 Experimento B

El experimento B tiene por objeto que todos los robots encuentren un punto de reunión, el cual se encuentra en el centro del ambiente. Este ambiente tiene dos obstáculos que los robots deberán evadir en su búsqueda de la marca. En la figura 4.4 se presenta una secuencia de imágenes que muestra cómo se van reuniendo uno a uno los robots. La gráfica 2 ilustra los comportamientos ejecutados por los robots durante este comportamiento.

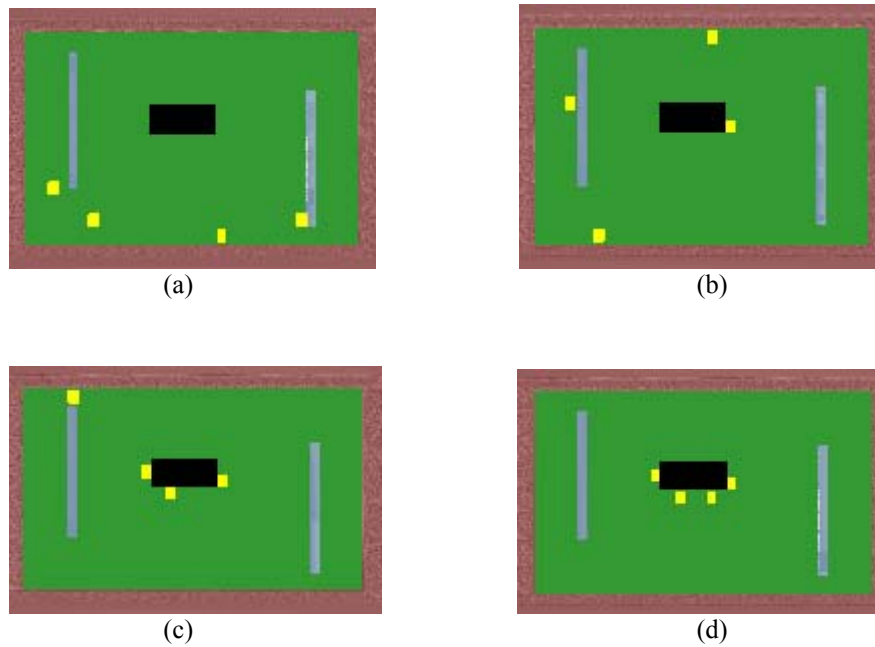


Fig. 4.4. Experimento B. (a) Robots explorando y evadiendo obstáculos. (b) Primer robot que llegó al punto de reunión, el resto de los robots continúa explorando. (c) Tres robots han encontrado el punto de reunión. (d) Todos los robots encontraron el punto de reunión.

formarnos en la fila de un banco. En la figura 4.5 se ilustra cómo es éste proceso de formación. En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de los robots. Dicha gráfica se encuentra al final del experimento E (c.f. 4.3.2), el cual agrupa a los experimentos C, D, y E.

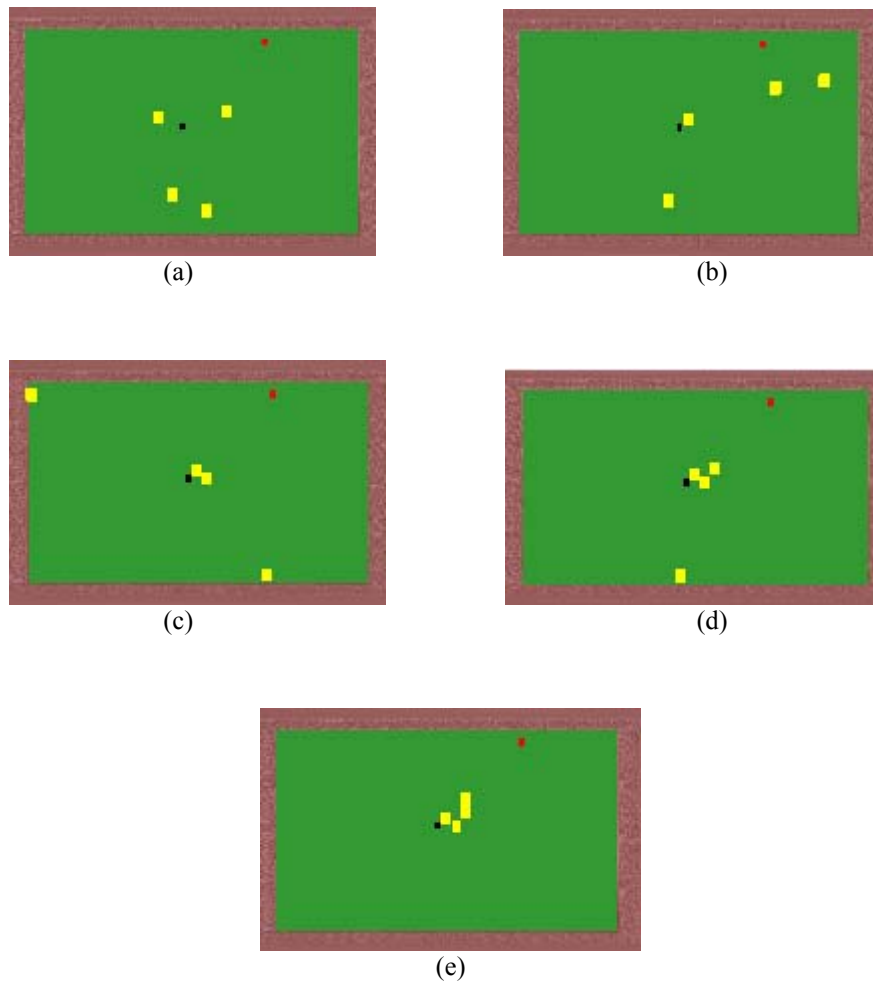


Fig. 4.5 Experimento C. (a) Exploración aleatoria de los robots. (b) El robot que ha llegado a la marca se establece como líder del grupo, éste comunica al resto de los robots su ID, para que lo identifiquen como punta de la formación y se registra

en el vector orden. (c) Se muestra un segundo robot formado, este transmite su ID al resto de los robots para que se formen junto a él, y se registra en vector orden. (d) Se ilustra la formación de tres robots respetando el orden de llegada. (e) Formación final de los cuatro robots.

El último robot formado es el que indica a los demás robots que deben cambiar el nivel en la jerarquía de comportamientos, pasando entonces del nivel 1 de comportamientos individuales, al nivel 2 de comportamientos colectivos.

4.3 Pruebas de comportamientos colectivos

A continuación se muestran los comportamientos colectivos de los robots. Para la ejecución de estos comportamientos, los robots hacen uso de sus capacidades de sensado, comunicación y ensamblado.

4.3.1 Experimento D

Este experimento parte de la formación generada en el experimento C (c.f. sección 4.2.3), posteriormente se muestra el proceso de reconfiguración inicial, que es la formación de una estructura en forma de estrella, que como hemos mencionado es la estructura que definimos como inicial porque con dicha estructura los robots ocupan un área más grande para la exploración colectiva del grupo.



Fig. 4.6. Formación de los robots a partir de la cual se inicia el proceso de reconfiguración inicial para este experimento.

En la figura 4.6 se ilustra la secuencia de los robots en retroceso. Los robots retroceden en la dirección contraria a la que llegaron y en orden descendente de su llegada a la formación (y no de acuerdo al ID de cada robot), con la finalidad de que no se obstaculicen durante la reconfiguración. La gráfica 3 muestra el comportamiento de los robots.

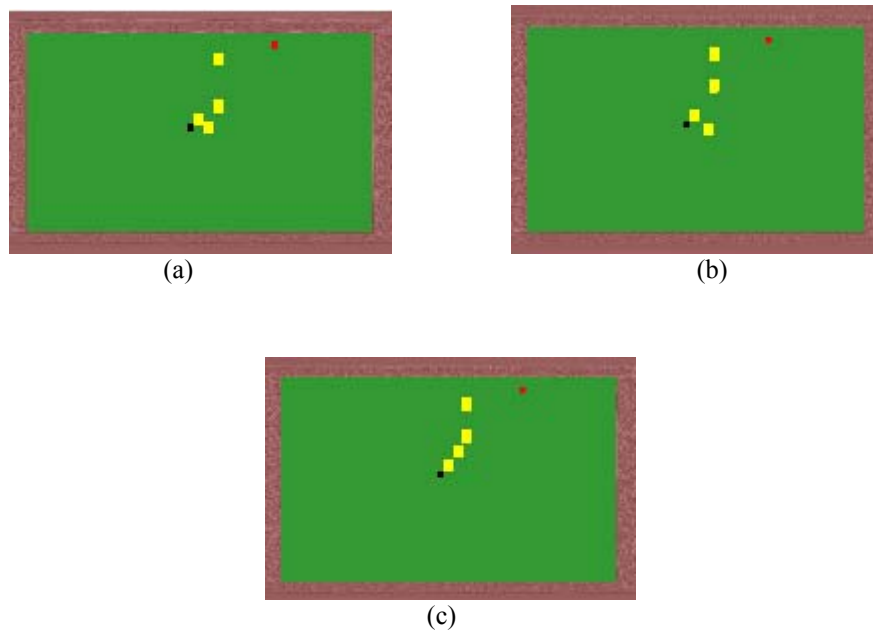


Figura 4.6 Experimento D. (a) Retroceso del robot 4. (b) Retroceso del robot 3. (c) Retroceso del robot 2

Una vez que los robots han retrocedido, proceden a calcular la nueva posición que ocuparán en la estructura de estrella utilizando el método de posicionamiento por referencia (c.f. sección 3.2.8). Este método se realiza en orden ascendente de llegada a la formación, en la figura 4.7 se ilustra dicho proceso.

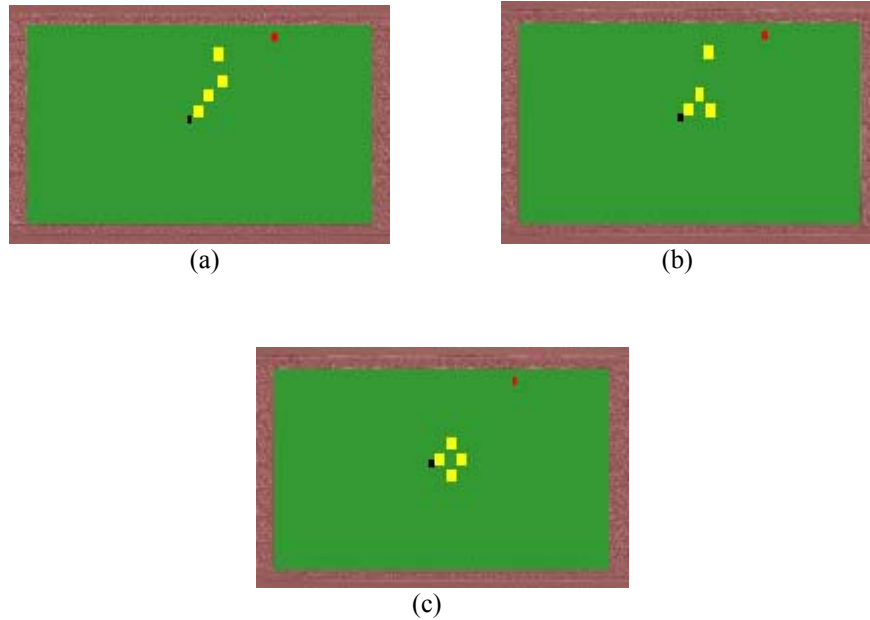


Fig. 4.7 Experimento D. (a) Posicionamiento del robot 2 basado en las coordenadas de líder del grupo. (b) Posicionamiento del robot 3 basado en las coordenadas del robot 2. (c) Posicionamiento del robot 4 basado en las coordenadas del robot 3.

Con el posicionamiento del robot 4 se completa la estructura de estrella, y se concluye la auto-reconfiguración. Al igual que en el proceso de formación, cuando el último robot llega a su posición, envía un mensaje al resto de los robots indicando que pueden iniciar su proceso de búsqueda de la meta ensamblados.

4.3.2 Experimento E

La figura 4.8 muestra una secuencia de imágenes que ilustran cómo los robots pueden explorar su ambiente de manera coordinada y manteniendo la estructura que formaron con sus cuerpos. El experimento termina cuando los robots encuentran la meta en el ambiente. En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de los robots durante este experimento.

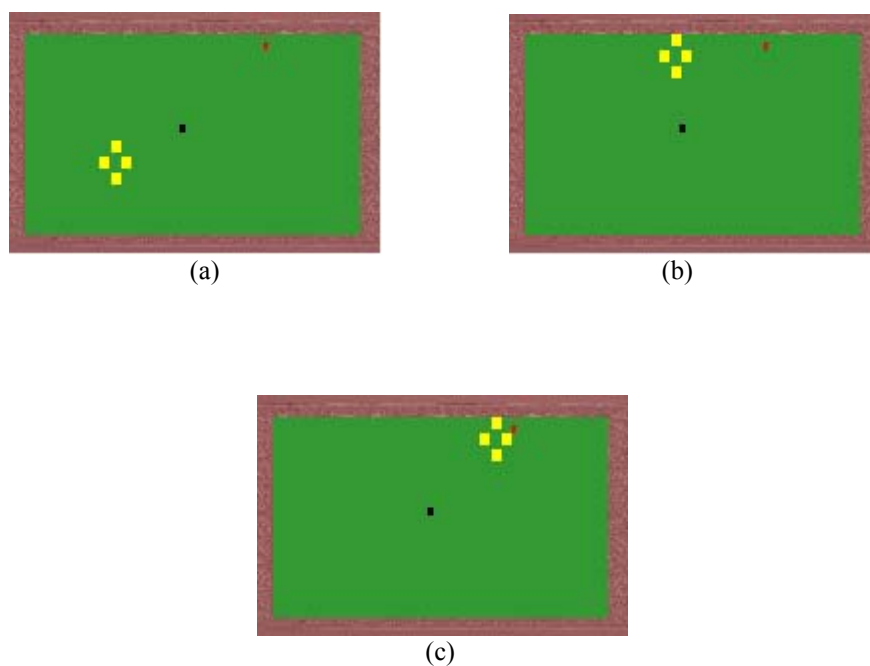
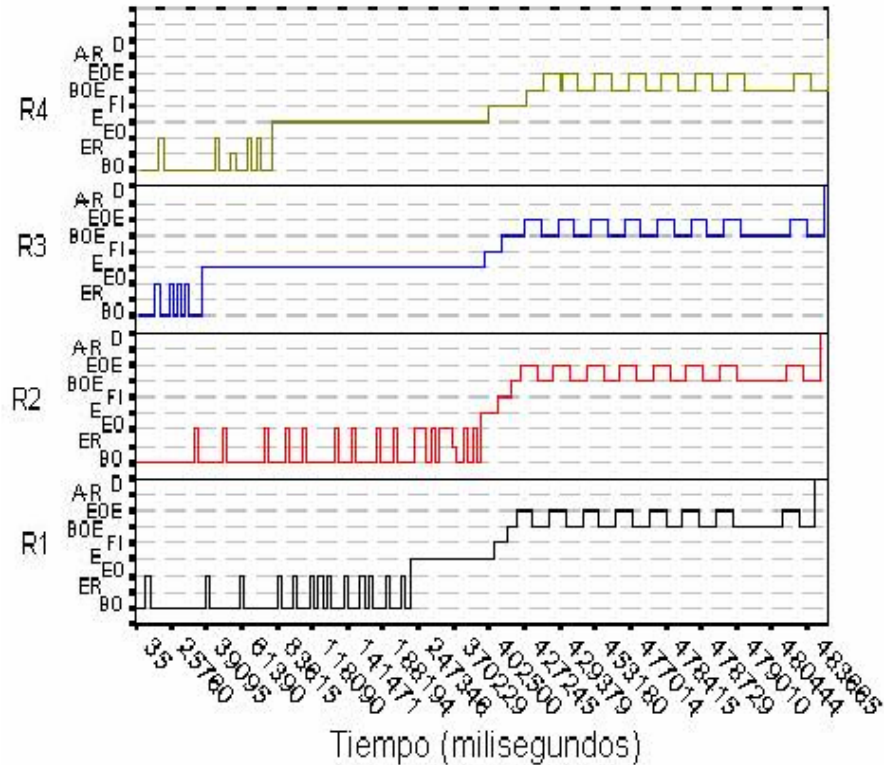


Figura 4.8 Experimento D. (a) Desplazamiento ensamblados. (b) Exploración colectiva manteniendo la estructura formada. (c) Robots en configuración de estrella encontraron la meta.

Experimentos C, D y E



Gráfica 3. Comportamientos de los robots en el experimento C, D y E. Los comportamientos individuales son buscar objeto, evadir robot, evadir obstáculo y detenerse, etiquetados como BO, ER, EO, D respectivamente, y como colectivos ensamblarse, formación inicial, buscar objeto ensamblados, evadir obstáculos ensamblados, auto-reconfigurarse y detenerse, etiquetados como E, FI, BOE, EOE, AR y D respectivamente.

4.4 Pruebas de auto-reconfiguración

En estos experimentos se observa el proceso de auto-reconfiguración de los robots para evadir obstáculos.

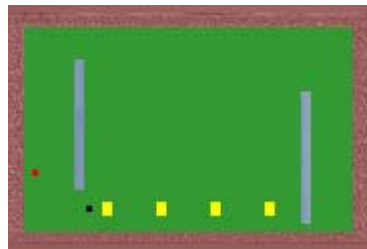
El primer experimento de auto-reconfiguración, experimento F, se desarrolló en un ambiente con dos obstáculos, en el cual no es posible para los robots llegar a la meta sin cambiar su estructura, como lo vimos en el experimento anterior.

En el segundo experimento, experimento G, los robots pueden resolver el problema de la exploración ensamblados en un ambiente irregular siempre y cuando reorganicen su estructura.

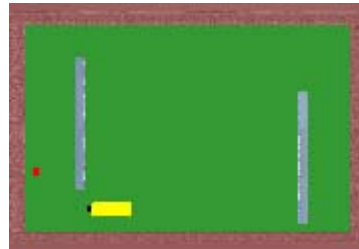
4.4.1 Experimento F

Este experimento tiene como objetivo mostrar el proceso de auto-reconfiguración de los robots ensamblados para librar obstáculos en un ambiente regular.

En la figuras 4.9 se muestra la secuencia del proceso de auto-reconfiguración de este experimento. En dicha secuencia se muestra la posición inicial de los robots, posteriormente todos los robots avanzan hacia el oeste i.e. a la izquierda, de modo que encuentran el punto definido en el ambiente para su formación lineal en el primer intento de su búsqueda, ver figura (b). El siguiente paso es iniciar el proceso de reconfiguración inicial, que es la estructura de estrella (c) y posteriormente se inicia la búsqueda de la meta de los robots ensamblados (d), el proceso de formación lineal y reconfiguración inicial se describieron en los experimentos D y E respectivamente.



(a)



(b)

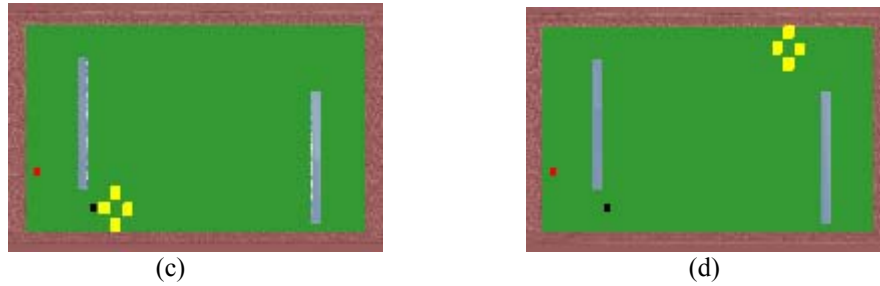
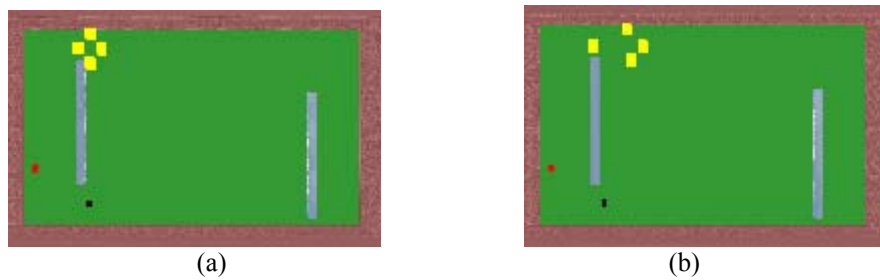


Figura 4.9 Experimento F. (a) Posición inicial de los robots. (b) Formación de los robots. (c) Configuración inicial en forma de estrella. (d) Exploración del ambiente.

En la figura 4.10 se muestra la secuencia de imágenes del proceso de auto-reconfiguración y búsqueda de un objeto en el ambiente, en la secuencia (a) se muestra que la estructura de estrella no es la más adecuada para la solución de este experimento porque la meta se encuentra en un lugar del ambiente que es inaccesible si los robots mantienen dicha estructura. Por ello los robots deben cambiar su estructura de estrella a una de fila y posteriormente continúan con la búsqueda del objeto. En la gráfica 4 se muestran los comportamientos ejecutados por los robots durante este experimento.



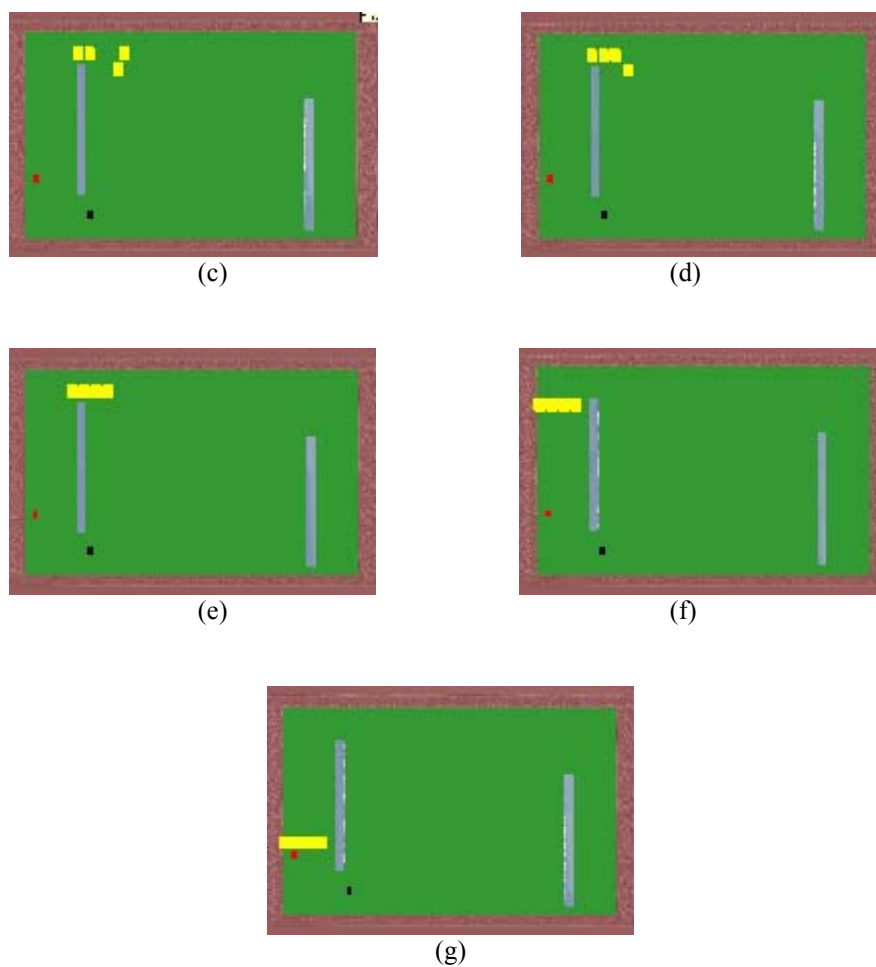
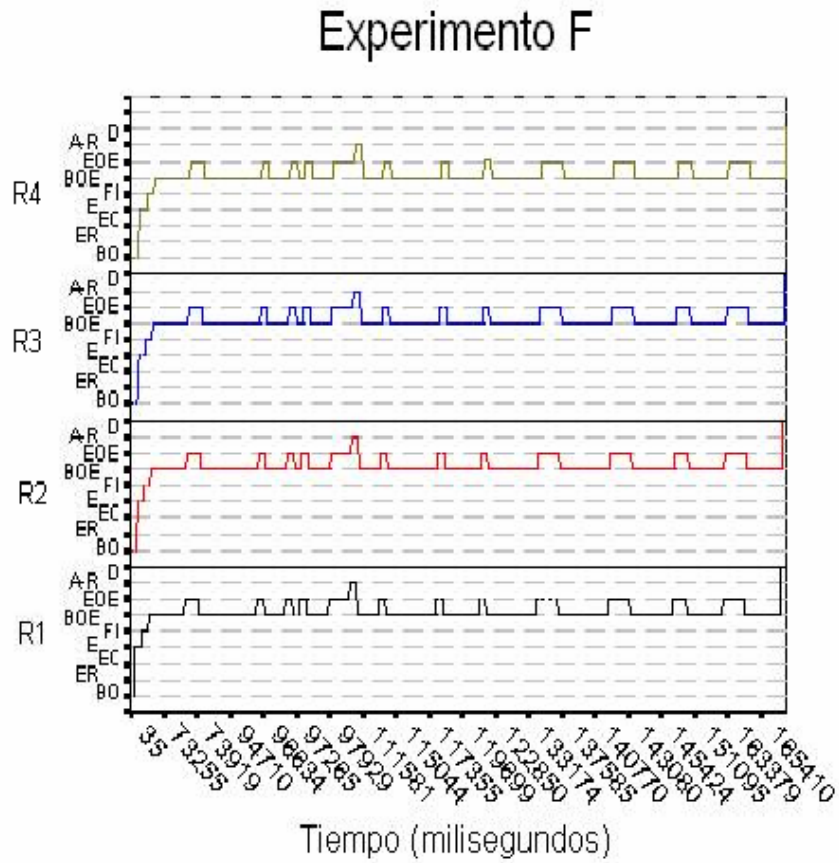


Figura 4.10 Experimento F. (a) Detección de obstáculo que no pueden evadir con su estructura actual. (b) Inicia proceso de auto-reconfiguración en fila para evadir el obstáculo, con el retroceso de los robots 2, 3 y 4 del orden de formación. (c) Posicionamiento de robot 2 en la estructura de fila. (d) Posicionamiento de robot 3 en la estructura de fila. (e) Posicionamiento de robot 4 en la estructura de fila. (f) Evación del obstáculo con auto-reconfiguración. (g) Llegada a la meta.



Gráfica 4. Comportamientos de los robots en el experimento F. Los comportamientos individuales son buscar objeto, evadir robot, evadir obstáculo y detenerse, etiquetados como BO, ER, EO, D respectivamente, y como colectivos ensamblarse, formación inicial, buscar objeto ensamblados, evadir obstáculos ensamblados, auto-reconfigurarse y detenerse, etiquetados como E, FI, BOE, EOE, AR y D respectivamente.

4.4.2 Experimento G

Este experimento, se desarrollo en un ambiente conteniendo varios obstáculos que forman un laberinto, la tarea a realizar por los robots

fue una exploración del ambiente que les permita ir de su posición inicial al extremo contrario, en donde se encuentra la meta que ellos deben encontrar.

Para este experimento implementamos un sistema de marcación en el ambiente, con la finalidad de apoyar la auto-reconfiguración de los robots, pues como se mencionó en el capítulo anterior, para realizar dicho proceso es necesario un espacio mínimo libre para cada reconfiguración. Estas marcas se pueden ver como un estímulo que los robots reciben para generar una reconfiguración determinada.

En la figura 4.11 se ilustra la primera fase de la reconfiguración de los robots (a) y (b), que es encontrar el punto de formación lineal, desplazándose todos a la izquierda y posteriormente forman la estructura inicial de estrella para iniciar la exploración colectiva (c).

En las imágenes (d) a (f) se muestra la auto-reconfiguración de los robots, donde cambian la estructura de estrella por una de fila. Posteriormente, los robots continúan la exploración en el ambiente con su nueva reconfiguración hasta encontrar la siguiente marca, que los robots interpretan como señal de cambio de configuración, (h).

En las imágenes (i) y (j) se muestra el proceso de auto-reconfiguración de fila a cubo. En ésta reconfiguración, los robots que cambian de posición son el robot 3 y 4 pues los robots 1 y 2 ya se encuentran en la posición que les corresponde para esa configuración. Cuando terminan su reconfiguración, los robots proceden a la exploración en forma de cubo (k), hasta encontrar la última marca que les indica a los robots pasar de la estructura de cubo a la estructura de columna, ver secuencia (l).

En la misma figura se muestra el cambio de estructura de cubo a columna en la secuencia de imágenes (m) a (q). En las secuencias (r) y (s) se muestra la exploración con reconfiguración de columna y finalmente en la secuencia (t) se muestra cómo los robots han encontrado la meta, recorriendo todo el ambiente y reconfigurándose. La gráfica 5 muestra los comportamientos ejecutados por los robots en este experimento.

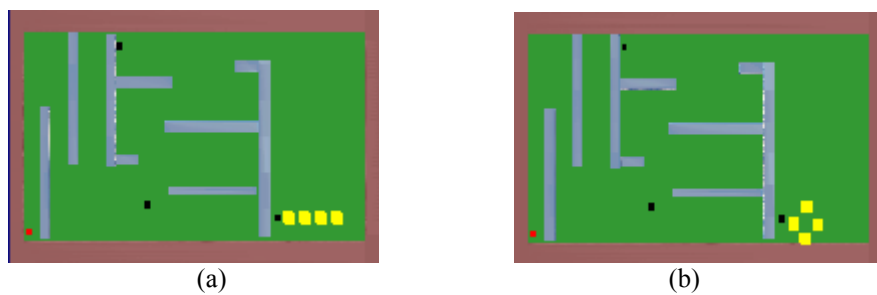
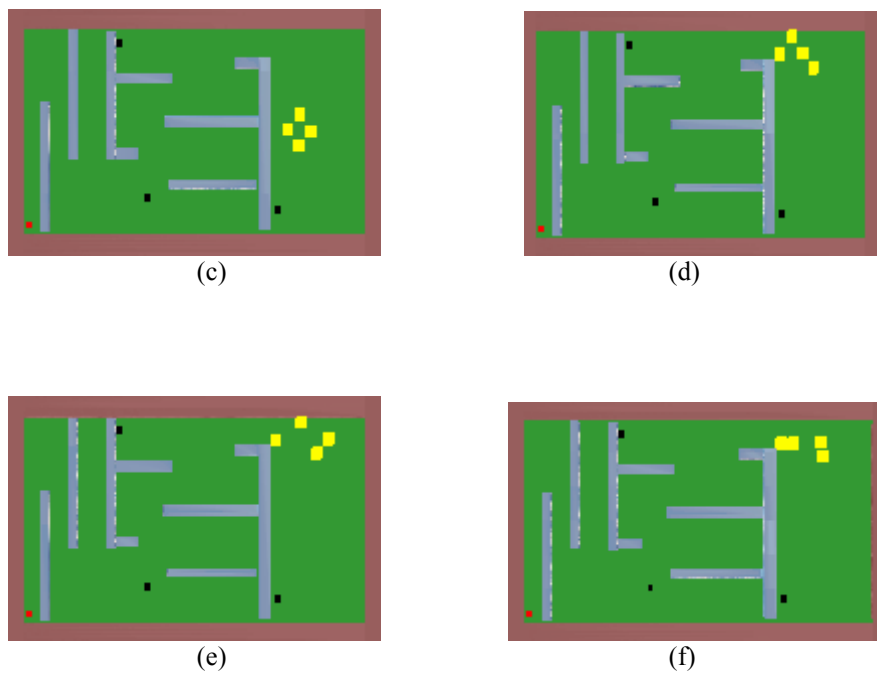
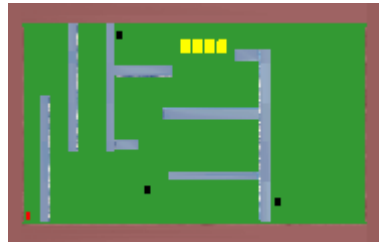
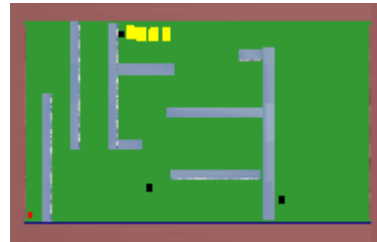


Figura 4.11 Experimento G. (a) Desplazamiento de los robots hacia la izquierda en formación lineal. (b) Configuración inicial de estrella de los robots





(g)



(h)

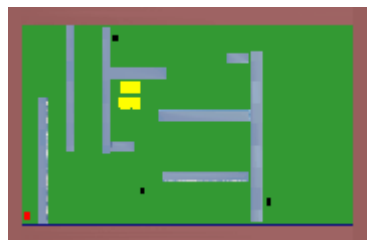
Figura 4.11 Experimento G. (c) Exploración con reconfiguración de estrella. (d) Cambio de estructura para evasión del obstáculo. Retroceso de robot 4. (e) Retroceso de los robots 3 y 2. (f) Posicionamiento del robot 2 basado en la posición del robot 1. Posteriormente el robot 3 y 4 se posicionan con referencia al robot anterior de su orden de formación. (g) Exploración del ambiente en forma de fila. (h) Detección de la marca que les indica a los robots reconfiguración en cubo.



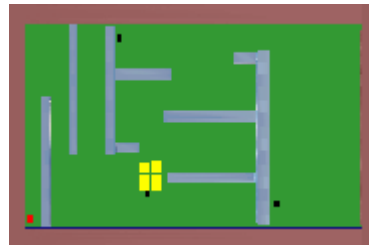
(i)



(j)



(k)



(l)

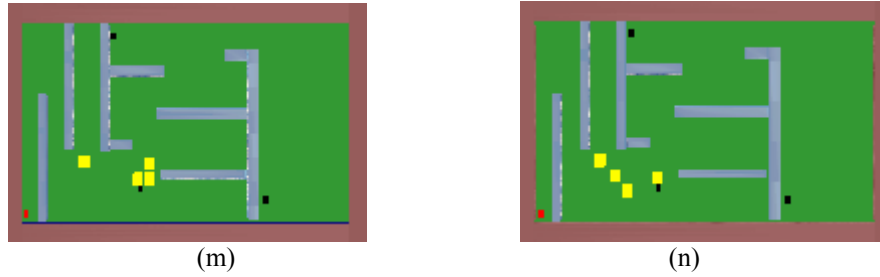
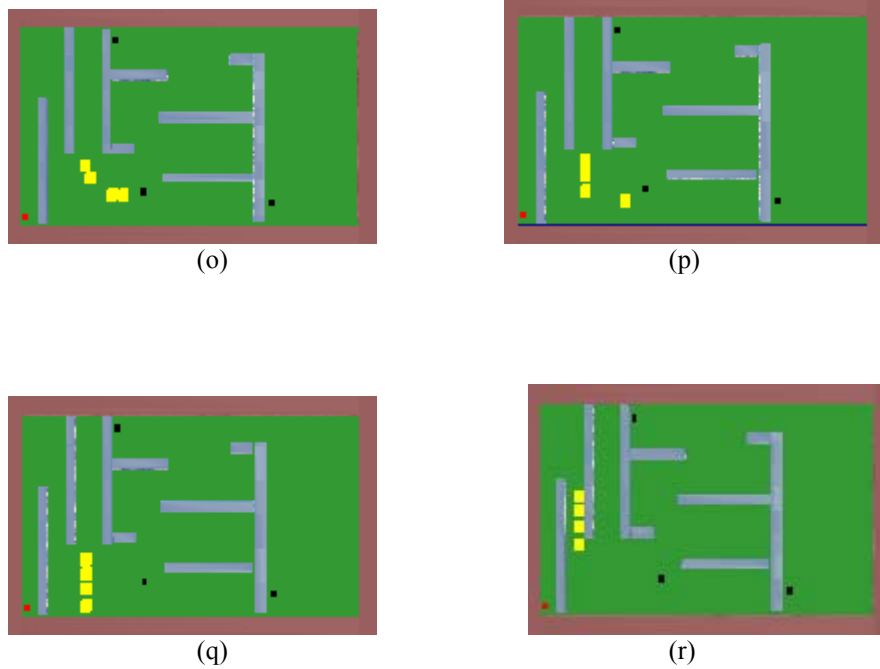


Figura 4.11 Experimento G. (i) Posicionamiento del robot 3. (j) Posicionamiento del robot 4. (k) Exploración del ambiente en forma de cubo. (l) Detección de la última marca en el ambiente que indica a los robots cambio de estructura, pasando de cubo a columna. (m) Los robots inician proceso de reconfiguración con el posicionamiento del robot líder, que es el robot número uno del vector orden. (n) Desplazamiento del robot 2 y 3, en posición de pre-formación.



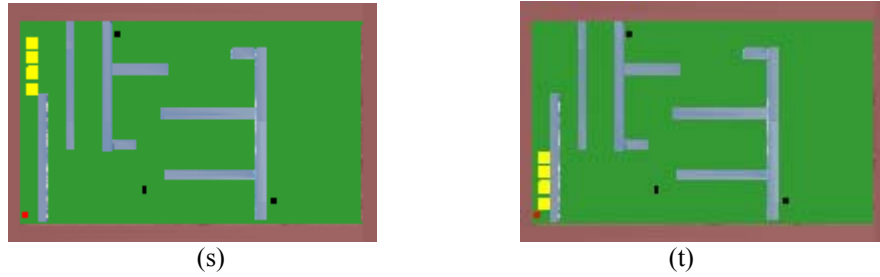
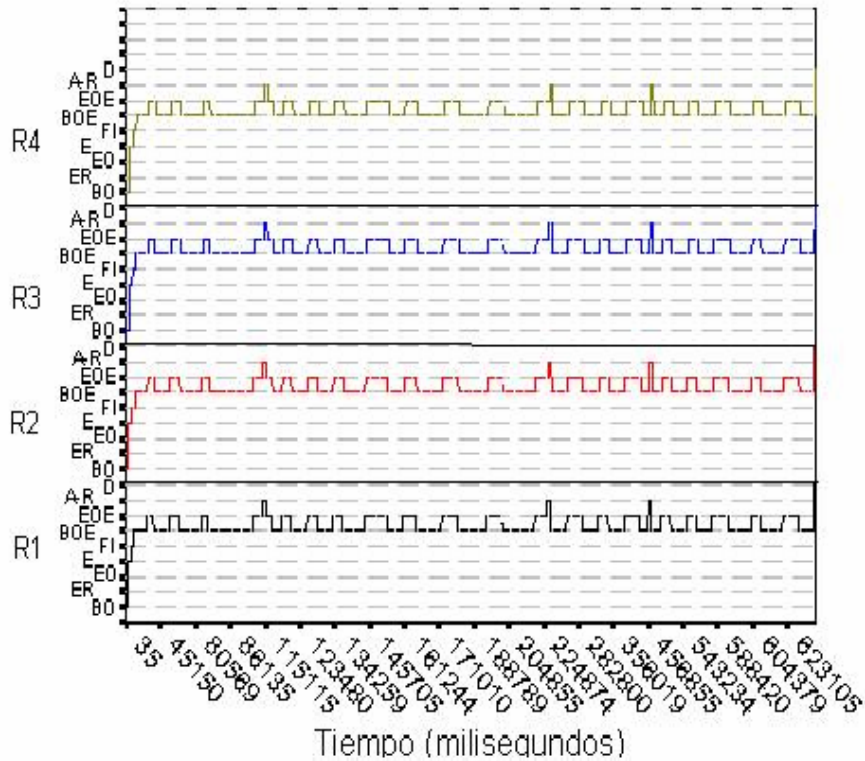


Figura 4.11 Experimento G. (o) Desplazamiento del robot 4 en posición de preformación. (p) Desplazamiento de los robots 2 y 3 en su posición de formación en la estructura de columna. (q) Estructura de columna terminada con la formación del robot 4 en el orden de la formación. (r) Exploración en el ambiente con configuración de columna. (s) Robots en forma de columna, buscando la meta en el ambiente. (t) Fin del experimento. Los robots han encontrado la meta en forma colectiva, manteniendo la última estructura formada.

Experimento G



Gráfica 5. Comportamientos de los robots en el experimento G. Los comportamientos individuales son buscar objeto, evadir robot, evadir obstáculo y detenerse, etiquetados como BO, ER, EO, D respectivamente, y como colectivos ensamblarse, formación inicial, buscar objeto ensamblados, evadir obstáculos ensamblados, auto-reconfigurarse y detenerse, etiquetados como E, FI, BOE, EOE, AR y D respectivamente.

4.6 Resultados

En los experimentos anteriores hemos comprobado cómo para nuestro sistema multi-robot en un ambiente regular, es posible llegar a la meta sin necesidad de auto-reconfigurarse. Por otro lado, hemos visto que para realizar dichas auto-reconfiguraciones es necesario

que los robots dispongan de un espacio libre para realizar dichas transformaciones. La implementación del sistema de marcación en el ambiente para apoyar la auto-reconfiguración es sólo una forma de solucionar el problema del espacio mínimo requerido en el proceso de reconfiguración del sistema multi-robot.

Un caso no considerado para su experimentación fue la exploración en un ambiente donde la marca o meta buscada por los robots sea totalmente inaccesible para ellos, i.e. que dichos objetos se encuentren rodeados de obstáculos que impidan el paso de los robots.

Capítulo 5



Conclusiones

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis hemos propuesto una serie de métodos y técnicas que permiten controlar, coordinar y reconfigurar un sistema multi-robot. Dichos métodos están basados en la analogía biológica de insectos sociales que pueden formar estructuras con sus cuerpos por medio de la auto-reconfiguración.

Cada robot fue diseñado como un módulo simple el cual es capaz de interactuar con el medio en que se encuentra por sus propios medios. Para esto se desarrollaron funciones que emulan sensores a través de las cuales los robots pueden reconocer los objetos que se encuentran en el ambiente. También se estableció una secuencia de reglas que permiten a los robots ejecutar comportamientos individuales a partir de los objetos que perciben.

Para el control de nuestro sistema multi-robot proponemos una arquitectura de subsumción formada por tres niveles conductuales. El primer nivel es el encargado del control individual de los robots, el segundo nivel se encarga de coordinar a todos los robots permitiendo la interacción entre ellos para realizar tareas en conjunto, y el tercero permite a los robots cambiar de forma o estructura. Para la coordinación del sistema multi-robot, hemos propuesto un método de generación de líderes emergentes del grupo de robots llamado PFPL-PCCD, a través del cual es posible evitar la existencia de conflictos entre robots por tomar el control del equipo. Para lograr la auto-reconfiguración de los robots, propusimos e implementamos un método de formación de estructuras por referencia, a través del cual es posible que los robots cambien las estructuras formadas con sus cuerpos. Finalmente, se diseñó una herramienta de simulación con la cual pudimos probar los mecanismos de auto-reconfiguración propuestos y depurar los aspectos conductuales de nuestros robots modulares auto-reconfigurables.

Los métodos y técnicas propuestos en esta tesis, pueden ser útiles para sistemas multi-robot, con problemas a resolver parecidos a los nuestros, e.g. exploración y búsqueda de objetos en el ambiente colectivamente. Para esto es necesario que dicho sistema sea homogéneo y cumpla con los siguientes requerimientos: 1) Características físicas: movilidad omnidireccional, sensores que

detecten objetos en 360° alrededor del robot, dispositivos de ensamblado en 360° alrededor del robot. 2) Capacidades: reconocimiento de objetos en el ambiente, reconocimiento entre robots y comunicación entre robots. 3) Características del ambiente que garanticen el éxito de sus mecanismos de coordinación y reconfiguración.

El número de robots que pueden integrar el sistema multi-robot no es una limitante, aunque está directamente relacionado con el espacio del que deben disponer los robots para operar, si las estructuras que se desean formar con los robots son la fila o la columna, pero sí lo es para el caso del cubo o la estrella.

A continuación se resumen las aportaciones de este trabajo:

Aportaciones conceptuales:

- Métodos de comunicación
- Métodos de coordinación
- Mecanismos de auto-reconfiguración
- Integración de categorías de comportamientos a la arquitectura de subsumción

Aportaciones materiales:

- Ambiente de simulación



Como trabajo futuro, se puede trabajar en el diseño de nuevos mecanismos que permitan la formación de otras estructuras para un sistema multi-robot de cuatro robots, o diseñar mecanismos que permitan la formación de estructuras semejantes o diferentes a las propuestas por nosotros para un sistema multi-robot con n robots. Con respecto al simulador es posible modificar la interfaz gráfica para dar opciones al usuario de seleccionar el número de robots desea simular.

Referencias

- [Alarcón, 2005] E. Alarcón A.(2005). Diseño y construcción de una tarjeta electrónica y su aplicación en el control de un robot ápodo, Tesis de maestría en Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla México.
- [Anderson et al., 2002] C. Anderson, G. Theraulaz y J. L. Deneubourg (2002), Self – Assemblages in Insect Societies, *Insectes Sociaux*. 49:99-110. Birkhäuser Verlag, Basel.
- [Angulo et al., 2002] J. M. Angulo, S. Romero e I. Angulo (2002). *Microbótica, Tecnología, Aplicaciones y Montaje Práctico*, Thomson, segunda edición, 297 páginas, Madrid España.
- [Bonabeau et al., 1999] E. Bonabeau, M. Dorigo y G. Theraulaz (1999). *Swarm Intelligence From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 307 páginas, New York, E.U.
- [Brooks, 1986] R. Brooks (1986). A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2, Abril 1986
- [Brooks, 1989] R. Brooks (1989). Fast, Cheap and Out of Control: a Robot Invasion of the Solar System, *Journal of The British Interplanetary Society*, Vol. 42, 1989
- [Brooks, 1991] R. Brooks (1991). *Intelligence Without Reason*. Reporte técnico No. 1293, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, E.U.
- [Butler et al., 2002] Z. Butler, S. Murata y D. Rus (2002). Distributed Replication Algorithms for Self-Reconfiguring Modular Robots, ed. H. Asama, T. Arai, T. Fukada, T. Hasegansa, *Distributed Autonomous Robotics Systems 5*: 37-48. Springer, Verlag. Tokyo 2002.
- [Cao et al., 1997] Y. Uny Cao, A. S. Fukunaga y A. B. Kahng (1997). *Coperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions*, R.C. Arkin and G.A. Bekey,

Referencias

- Autonomous Robots 4:1-23. Kluwer Academic Publishers, Boston. Netherlands, E.U.
- [Dorigo et Colombetti, 1998] M. Dorigo, y M. Colombetti (1998). Robot Shaping an Experiment in Behavior Engineering, MIT Press, 203 páginas, Londres, Inglaterra.
- [González, 2003] J. González (2003). Diseño de robots ápodos. Reporte técnico, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, España.
- [Grob et al, 2006] R. Grob, M. Bonani, F. Mondana y M. Dorigo (2006). Autonomous Self-assembly in Swarm-bot, Proceedings of the International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Entertainment, Springer-Verlag, Berlin Alemania
- [Howard et Odum, 2000] H. T. Odum y E. C. Odum (2000). Modeling For All Scales, an Introduction to System Simulation, Academic Press, 442 páginas, E.U.
- [Holland et McFarland, 2001] O. Holland y D. McFarland (2001). Artificial Ethology, Oxford University Press, 261 páginas. New York, E.U.
- [Jiménez, 2006] G. Jiménez V. (2006). Diseño e implementación de un sistema multi-robot con capacidades de auto-ensamblado, Tesis de maestría en Ciencias Computacionales, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Puebla México.
- [Jones et Flynn, 1993] J. L. Jones y A. M. Flynn (1993). Mobile Robots Inspiration to Implementation, A. K. Peters, 342 páginas, Massachusetts E.U.
- [Jones et Mataric, 2004] Ch. Jones y M. Mataric (2004). The use of internal state in multi-robot coordination, Hawaii International Conference on Computer Science (HICCS), Hawaii, E.U.
- [Mataric, 1994] Maja J. Mataric (1994) Interaction and Intelligent Behavior. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge MA, E.U.
- [McFarland et Bösser, D. McFarland y T. Bösser (1993). Intelligent

Referencias

- 1993] Behavior in Animals and Robots, A Bradford Book the MIT Press Cambridge, Massachusetts, 305 páginas. Londres, Inglaterra.
- [McGray et Rus, 1998] C. McGray y D. Rus (1998). Self-reconfigurable molecule robots as 3D Metamorphic robots, Proceedings of the 1998 International Conference on Intelligent Robot and Systems, IEEE Press
- [Miramontes, 2000] O. Miramontes (2000). Orden y caos en la organización social de las hormigas, Reporte Técnico, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Muñoz, 2004] A. Muñoz M. (2004). Comunicación personal.
- [Murphy, 2000] R. Murphy (2000). Introduction to AI Robotics, A Bradford Book the MIT Press Cambridge, Massachusetts, 466 páginas. Londres, Inglaterra.
- [Penrose, 1959] L. Penrose (1959). Self-reproducing machines, Scientific American: 105-114.
- [Potter et al., 2001] M. A. Potter, L. Meeden y A. Schltz (2001). Heterogeneity in the Coevolved Behaviors of Mobile Robots: The Emergence of Specilists. Morgan Kaufmann, Seventeenth International Conference on Artificial Intelligence: pp.1337-1343.
- [Pratdepadua, 2003] J. Pratdepadua (2003) Programación en 3D con Java 3D, Alfaomega Ra-Ma, 303 páginas, Madrid, España.
- [Santos et Duro, 2005] José Santos, Richard J. Duro (2005). Evolución artificial y robótica autónoma, Alfaomega Ra-Ma, Primera edición, 234 páginas, Madrid España.
- [Ünsal et Bay, 1994] C. Ünsal y J. Bay (1994). Spatial Self-Organization in Large Populations of Mobile Robots, IEEE International Symposium on Intelligent Control, TA1-10:25, Columbus, Ohio, E.U.
- [Yim et al., 2002] M. Yim, Y. Zhang, K. Roufas y D. Doff (2002). Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration whith Polybot, IEEE/ASME Transactions on Mecatronic, 7(4) pp. 442-451.

Referencias

- [Yim, 1994] M. Yim (1994). Locomotion With a Unit-Modular Reconfigurable Robot, Tesis doctoral, Stanford University, CA, E.U.

Referencias en línea

- [Calderón, 2004] Las Ciencias del Comportamiento Animal,
<http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra>.
Fecha de consulta: Diciembre del 2004.
- [Ins_Soc, 2004] Artículo en Nature:
<http://www.nature.com/nsu/020708~1.html> Fecha de
consulta: 17 de agosto del 2004.
- [Saidani et Piel,
2004] S. Saidani, M. Piel (2004). ESUG Conference. Research
Track. <http://www.esug.org> Fecha de consulta:
Noviembre del 2004.