

Investigación sobre los Requisitos del Movimiento Colectivo Coordinado en un Sistema Multi-agente

Yazid León Fernández de Lara, Angélica Muñoz Meléndez

INAOE, Coordinación de Ciencias Computacionales

Luis Enrique Erro No. 1

72840 Tonantzintla Puebla, México

{yazid,munoz}@ccc.inaoep.mx

Resumen

La robótica colectiva se interesa, de manera general, en el diseño y el control de sistemas multi-robot o multi-agente, grupos de robots o agentes trabajando de manera conjunta para lograr objetivos comunes. Estos sistemas son útiles en tareas que un solo individuo es incapaz de realizar, o bien en tareas en las cuales se obtiene una ganancia, en términos de tiempo por ejemplo, si son ejecutadas por más de un individuo. Tareas de este tipo son aquellas que requieren, por ejemplo, la dispersión espacial física o la suma de fuerzas. Debido a que el control de un sistema multi-robot o multi-agente está descentralizado entre sus componentes, es necesario diseñar e implantar estrategias que permitan a los miembros del sistema, coordinar sus acciones de modo que no interfieran entre ellos, así como integrar sus recursos, e.g. movimientos o percepciones, para realizar un tarea colectiva. En este trabajo se analizan las estrategias de percepción y propagación de información de un agente que forma parte de un sistema multi-agente capaz de desplazarse de manera coordinada, denominadas en este trabajo **principios de percepción**. Se propone así mismo, un conjunto de guías de comportamiento para sistemas multi-agente capaces de movimiento colectivo coordinado, denominadas aquí como **principios de organización**. Por último, se presentan y comparan resultados de la aplicación de ambos tipos de principios para lograr el movimiento colectivo coordinado de grupos de agentes y de robots móviles.

Palabras clave: sistema multi-agente, agente, movimiento colectivo coordinado, principios de percepción, principios de organización.

1. Introducción

Los etólogos distinguen entre sociedades y agrupaciones de animales. Aunque ambos términos refieren grupos de individuos de la misma especie, el término sociedad se refiere a individuos organizados que exhiben conductas cooperativas, mientras que el término agrupación se refiere a individuos reunidos espacialmente, los cuales no necesariamente están organizados o involucrados en conductas cooperativas [17].

Los animales forman sociedades y agrupaciones para trascender sus capacidades individuales. Las agrupaciones en particular, proveen protección contra depredadores o aumentan la eficiencia de la depredación. Camazine et al. [3] refieren que al agruparse, los animales pueden incluso aumentar la eficiencia de su locomoción y ahorrar energía gracias a la sincronización de sus movimientos individuales.

Las agrupaciones de animales son un caso de estudio interesante que puede apoyar la formulación de principios generales de organización es-

pacial para sistemas multi-agente y multi-robot. Para los estudiosos de estos sistemas, es de interés proponer estrategias fiables que permitan la percepción y propagación de información entre los miembros de un grupo, de modo que puedan reaccionar a perturbaciones externas tales como obstáculos en el ambiente. Es de interés también proponer estrategias que permitan a grupos de agentes y de robots autónomos, coordinar sus movimientos individuales para lograr el movimiento colectivo.

Estas estrategias de percepción y propagación de información, y de coordinación son indispensables en el control de sistemas multi-robot, para la ejecución de tareas como la exploración o vigilancia colectiva de espacios, el transporte colectivo de objetos y la manipulación de material peligroso, por mencionar algunas.

El objetivo de este trabajo es investigar las estrategias de percepción y propagación de información, así como las estrategias de coordinación de agentes y de robots móviles con capacidad de movimiento colectivo coordinado.

Las estrategias de percepción y propagación de información comprenden la cantidad y el tipo de información que los agentes y robots deben conocer acerca de ellos mismos y del ambiente para la acción colectiva, así como los medios que utilizarán para compartir esa información con los miembros de su grupo. Debido a que estas estrategias están relacionadas con los medios y maneras en que los robots perciben y transmiten información, en este trabajo las denominaremos en adelante como **principios de percepción**.

Las estrategias de coordinación comprenden las guías de comportamiento que los agentes y robots aplican en su interacción entre ellos y con el ambiente. Debido a que estas estrategias están relacionadas con la actuación de los individuos, tanto de carácter individual como colectiva, las denominaremos en adelante como **principios de organización**.

El resto del artículo está organizado en cinco secciones. En la sección 2 se reportan trabajos relacionados con el nuestro, en los cuales se documentan grupos de agentes y de robots capaces de generar movimiento colectivo coordinado. En la sección 3 se describe la investigación realizada para definir los principios de percepción y de organización para el movimiento colectivo coordinado de sistemas multi-agente. En la sección 4 se reportan resultados de experimentos de coor-

dinación de grupos de agentes autónomos y de robots físicos. En la sección 5 se comparan los resultados de nuestra investigación con trabajos similares. Por último, en la sección 6 se discuten las consideraciones finales del trabajo.

2. Trabajo relacionado

En esta sección se resumen importantes contribuciones al estudio y síntesis del movimiento colectivo coordinado de agentes autónomos y de robots físicos. Las interacciones entre los individuos de la mayor parte de estos trabajos se basan en esquemas de comunicación directa e indirecta y en esquemas de percepción local.

Por comunicación directa se denota la transmisión explícita de información entre individuos conocidos de un grupo. Por comunicación indirecta se indica la transmisión no explícita de información, apoyada comúnmente en los efectos de las acciones de los individuos de un grupo sobre su medio ambiente. La comunicación indirecta se conoce también como *estigmergia* [3]. La percepción local denota la percepción llevada a cabo por un individuo utilizando los medios y dispositivos situados en su propio cuerpo.

Un caso particular de movimiento colectivo coordinado es el de las formaciones espaciales de agentes, “agrupaciones” de individuos en el sentido introducido previamente. Una formación es un patrón espacial, e.g. una figura geométrica, formado con los cuerpos de los agentes. En este trabajo clasificamos los métodos para la generación y el mantenimiento de formaciones de agentes en dos familias: geométricos y posicionales.

En los métodos geométricos se utilizan modelos geométricos para reorientar, desplazar e incluso deformar la formación de los agentes. En este caso, cada agente puede tener un centro de masa asociado, el cual utiliza para calcular sus desplazamientos dadas sus coordenadas y una matriz de inercia, por ejemplo. En los métodos posicionales, un sistema multi-agente mantiene una formación aplicando fuerzas y señales locales, más que modelos geométricos explícitos. Estas fuerzas responden generalmente a principios motores simples, como repulsión y atracción.

En los métodos geométricos se da una gran importancia a las capacidades de deliberación y comunicación directa de los agentes. La organización de

los sistemas multi-agente que utilizan este enfoque puede incluso estar apoyada en planificadores externos que aseguran el correcto posicionamiento de los agentes. A continuación se citan trabajos representativos que utilizan el enfoque geométrico.

Sugihara y Suzuki [13] desarrollaron experimentos con múltiples agentes capaces de generar formaciones estables. Cada agente del grupo es capaz de percibir en forma de coordenadas geométricas, la posición relativa de los otros agentes y de moverse una posición en cada tiempo para mantener una formación en círculo.

Ünsal y Bay [15] desarrollaron un algoritmo de auto-organización para una colonia de agentes, cuyos miembros son física y funcionalmente idénticos. Este algoritmo está basado en el reconocimiento de una marca usada para identificar el punto de reunión de los agentes, creando formaciones tales como círculos, esferas y parábolas.

En los métodos posicionales, por su parte, se da mayor importancia a las capacidades de percepción local y comunicación indirecta de los agentes. La organización de los sistemas multi-agente que utilizan este enfoque, no depende de procesos externos sino de la interacción de múltiples agentes autónomos. A continuación citamos los trabajos más representativos de este enfoque.

Reynolds [12] desarrolló un modelo de comportamiento simple para simular el movimiento colectivo de parvadas de pájaros, mediante un grupo de agentes llamados *boids*. Los *boids* de Reynolds mantienen orientación y posición propia en la parvada y evitan colisiones con sus vecinos modificando sus velocidades.

Balch y Arkin [1] presentan diferentes formaciones tales como línea, columna, diamante, y cuña con un grupo de cuatro robots físicos. Para cada formación, cada robot tiene una posición específica basada en un número de identificación propio. Los comportamientos de cada robot son **dirigirse hacia la posición destino**, **evitar obstáculos**, **evitar colisiones** con otros robots y **mantener posición** en la formación.

Fredslund y Mataric [5] utilizan un algoritmo de formación basado en percepción y control locales. Este algoritmo fue probado con agentes autónomos y robots físicos. Cada individuo del grupo tiene además un identificador propio que se difunde regularmente como mensaje y que es

percibido por otros individuos. El individuo que está al inicio de la formación se considera el líder y cualquier individuo puede desempeñar esa función. Los individuos conocen el número total de individuos que participan y la clase de formación que deben generar. A excepción del líder, cada individuo sigue a un vecino designado conocido como su "amigo", guardando cierta distancia y ángulo con respecto a su orientación.

Algunos trabajos de formaciones que utilizan el enfoque posicional, hacen uso además de algoritmos de aprendizaje automático para la definición de las acciones o de los parámetros requeridos para el desplazamiento colectivo coordinado. Dos de estos trabajos se citan a continuación.

Flacher y Sigaud [4] presentan una metodología que consiste en la mejora de las interacciones de un sistema multi-agente a un micro nivel, orientadas a generar un comportamiento global a un macro nivel. Sus agentes utilizan algoritmos genéticos y métodos de campos potenciales [7] que hacen que un agente actúe como una partícula con propiedades de atracción y repulsión hacia otros agentes.

Bendersky y Santos [2] realizan formaciones usando robots con sensores de proximidad de corto alcance. Las formaciones de los robots emergen de un comportamiento individual llamado **seguir un blanco**, el cual se define utilizando aprendizaje por refuerzo. Estos autores proponen una técnica de descomposición de tareas en dos comportamientos activos que se ejecutan de manera concurrente, **mantener distancia** y **mantener ángulo**. El primero se encarga de mantener una distancia a un punto objetivo dentro de un rango delimitado y el segundo, de mantener a los robots alineados.

Dentro de los trabajos que utilizan tanto los métodos geométricos como los posicionales para la generación de formaciones espaciales, debe hacerse mención particular a una serie de trabajos orientados a la formulación de modelos teóricos que expliquen el comportamiento de múltiples agentes capaces de agruparse en formaciones. Dada la ausencia de controladores centrales y el uso de agentes cuya actuación se basa principalmente en percepción local, ubicamos todos los trabajos que a continuación se citan en la familia de los métodos posicionales.

Vicsek et al. [16] y Jadbabaie et al. [6], por ejemplo, analizan la dinámica de sistemas de agentes "partículas", los cuales convergen en formacio-

nes aplicando reglas orientadas al consenso de la orientación de los agentes basadas en la influencia de los vecinos cercanos.

Por su parte, Olfati-Saber y Murray [11], al igual que Ögren et al. [10], se interesan en la generación de formaciones específicas y estables, principalmente estáticas. Se propone en estos trabajos el uso de potenciales artificiales y de líderes artificiales. Los potenciales artificiales son fuerzas de control que determinan la atracción o repulsión entre agentes vecinos, mientras que los líderes artificiales representan puntos móviles de referencia para grupos de agentes ubicados dentro de una vecindad. Ambas nociones se utilizan para definir el espaciado entre, y en última instancia el patrón espacial formado por un grupo de agentes. Estos modelos representan las formaciones de agentes como grafos y con ello se apoyan en conceptos provenientes de la teoría de grafos.

La búsqueda de modelos teóricos más generales que expliquen no sólo la generación de formaciones espaciales, sino que puedan también aplicarse a otros casos de actuación colectiva de agentes es una empresa ambiciosa y no trivial. Suzuki y Yamashita [14] trabajan en este sentido, en particular en la definición de un modelo orientado a problemas de consenso entre grupos de agentes que utilizan esencialmente percepción y comunicación locales. Sus agentes no sólo convergen en formaciones espaciales, sino que pueden además acordar puntos de referencia, unidades de distancia y dirección de su orientación.

A diferencia de los trabajos citados, en este trabajo se reportan resultados de experimentos de movimiento colectivo no dirigido y dirigido hacia objetivos, en ambientes sin y con obstáculos, aplicando un enfoque posicional. Nuestra investigación está orientada a la identificación de principios generales de carácter cualitativo, subyacentes al movimiento colectivo coordinado de agentes autónomos.

Los experimentos de movimiento colectivo no dirigido y dirigido son importantes pues nos interesa investigar los requisitos del desplazamiento colectivo de sistemas multi-agente y sistemas multi-robot compuestos de individuos proactivos, capaces de agruparse en formaciones y de alcanzar también objetivos específicos.

3. Requisitos del movimiento colectivo coordinado

En esta sección se investigan los requisitos, en forma de principios de percepción y de organización para el movimiento colectivo de agentes autónomos cuya tarea es mantener una formación espacial.

Distinguimos dos tipos de formaciones: estáticas y dinámicas. Las formaciones estáticas son generadas por un grupo de agentes que se reúnen alrededor de una marca y permanecen inmóviles, mientras que las formaciones dinámicas son generadas por un grupo de agentes en movimiento.

A excepción de los experimentos de la sección 4.1.1, en los experimentos reportados en este trabajo la generación de una formación estática se considera un requisito para el mantenimiento de una formación dinámica. La generación de una formación estática se lleva a cabo aplicando reglas de reunión de los agentes en un punto conocido por ellos, y posteriormente reglas de distribución espacial en patrones específicos. Los experimentos de reunión y generación de formaciones estáticas se encuentran reportados en [8, 9].

3.1. Percepción

La atracción de un individuo, sea éste un animal, un agente o un robot hacia sus congéneres, supone el reconocimiento de lo que es similar a sí mismo, la plena identificación de los miembros de su especie. El reconocimiento de la especie o del grupo al que se pertenece es en efecto el principio básico de la interatracción grupal. Sin embargo, este reconocimiento no explica *per se* el movimiento colectivo coordinado y otros principios son necesarios para lograr que un grupo se reúna y permanezca reunido.

Diversos autores (por ejemplo Parr citado en [3]) han afirmado que una agrupación animal, de peces en particular, resulta de un balance en la aplicación de fuerzas de atracción y repulsión guiadas ambas por la percepción visual. Otros autores (Shaw y Partridge citados en [3]), han encontrado evidencia en donde la percepción visual apoya en efecto la atracción, no así la repulsión. En esta última parecen participar otros sentidos de percepción lateral que proveen información sobre la velocidad y dirección de una agrupación.

Por otra parte, en las agrupaciones de peces éstos se mantienen a distancias y elevaciones específicas de sus vecinos [3], es decir que tales parámetros son conocidos o percibidos por cualquier individuo participando en la agrupación. Aún aceptando que esta información es indispensable, en particular en un enfoque posicional, tenemos que indagar la forma en que los miembros de un grupo propagan y reciben esa información para ejecutar acciones necesarias para el movimiento colectivo, como seguirse o cambiar de dirección. Esta investigación es el objeto de las siguientes secciones.

3.1.1. Modelos de agentes

Se estudiaron tres modelos de agentes para determinar la forma en que parámetros indispensables para el movimiento colectivo coordinado son transmitidos y percibidos entre los miembros de un grupo.

El primer modelo consiste en un **agente comunicativo** basado en la comunicación directa. Este agente es un punto en un espacio bidimensional, puede moverse un cierto número de posiciones y cambiar su dirección en un ángulo dado. Un agente comunicativo transmite directamente su posición a otros agentes en todo momento. Los agentes tienen un radio de percepción y transmisión de información de 2 posiciones en el ambiente (ver Figura 1(a)).

El segundo modelo consiste en un **agente compuesto** basado en la fusión de percepciones. Debido a que los agentes comunicativos son incapaces de distinguir por sí mismos las orientaciones y formaciones de sus vecinos, los agentes fueron rediseñados para percibir localmente esta información, lo cual dio origen a los agentes compuestos. Un agente compuesto es un sistema multi-agente formado por cuatro agentes: una cabeza, un centro y dos brazos, cada uno de los cuales es un punto en un espacio bidimensional pintado de un color distintivo. Esta información es usada por los agentes compuestos para estimar sus orientaciones. La percepción de estos agentes surge de la percepción individual de cada una de sus partes. Estos agentes estiman sus orientaciones basándose en el reconocimiento de su composición (ver Figura 1(b)).

El tercer modelo está basado en la percepción

local y se denomina **agente perceptivo**. Trata de reunir en un solo modelo las ventajas de los modelos anteriores, simplicidad y autonomía. Un agente perceptivo es un punto en un espacio bidimensional donde puede moverse cierto número de posiciones y cambiar su dirección. Los agentes perceptivos están pintados en una escala predefinida de color rojo de acuerdo a sus orientaciones, e.g. un agente rojo oscuro está orientado hacia el norte, y cada vez que gira 45° a la derecha se degrada su color hasta completar 315°, después de lo cual recupera su tono original. Estos agentes estiman las orientaciones de sus vecinos por medio de sus percepciones locales y tienen un radio de percepción de 5 posiciones en el ambiente (ver Figura 1(c)).

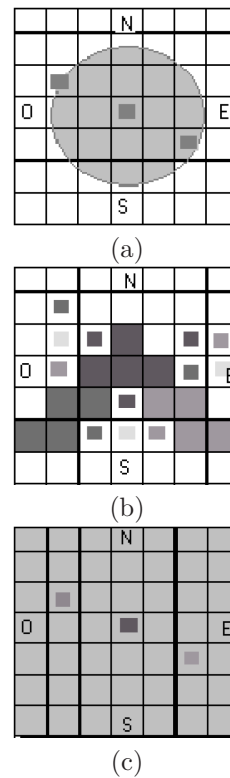


Figura 1. Representación de los agentes comunicativo (a), compuesto (b) y perceptivo (c). En cada figura se ilustran tres agentes, orientados, de izquierda a derecha, hacia el Este, Norte y Noreste. El área en gris representa el área percibida por el agente del centro. N, E, S y O indican, respectivamente, Norte, Este, Sur y Oeste

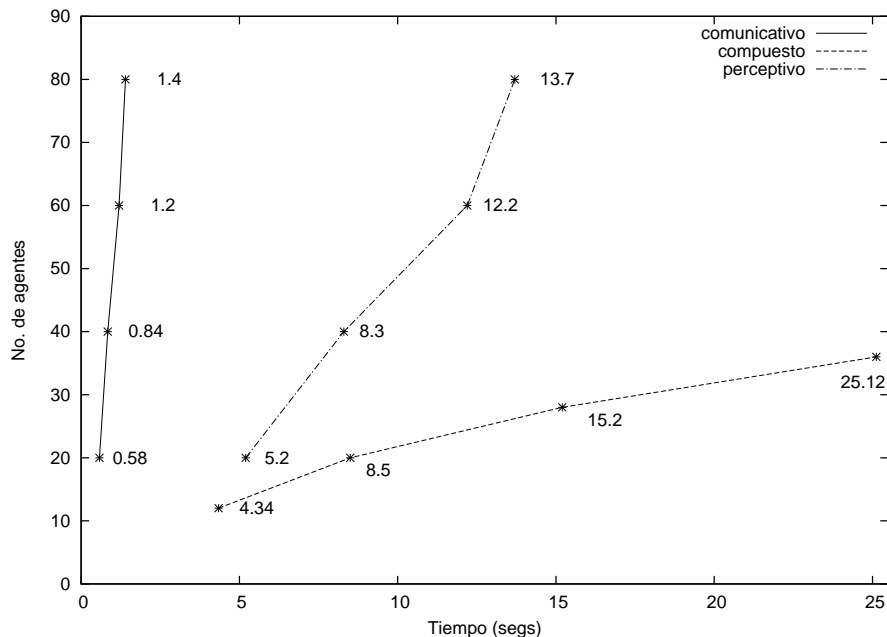


Figura 2. Tiempo invertido por agentes de los tres modelos para desplazarse de un punto inicial hacia un punto destino

La Figura 2 muestra el tiempo invertido por tres grupos de agentes de los modelos descritos anteriormente para realizar la misma tarea, consistente en mantener una formación dinámica en cuña de un punto a otro. Estos tiempos fueron registrados en cuatro pruebas realizadas con grupos de agentes de cada modelo. Los experimentos se realizaron en *Starlogo*¹.

Por cada modelo se obtuvo un promedio del tiempo invertido por un agente para completar la tarea. El tiempo promedio requerido por un agente comunicativo para mantener una formación dinámica de una posición inicial a una posición final es de 0.02 segs., de 0.48 segs. por un agente compuesto y de 0.20 segs. por un agente perceptivo.

La razón por la que un agente comunicativo es en promedio 24 veces más rápido que un agente compuesto, se debe a que el primer agente no invierte tiempo estimando la posición y orientación de sus vecinos, a diferencia del segundo, el cual está integrado por cuatro agentes que tienen que percibir

a sus vecinos y fusionar sus percepciones. Sin embargo, aunque más veloces, los agentes comunicativos no son capaces de operar por sus propios medios. En promedio, un agente perceptivo es 10 veces más lento que un agente comunicativo para realizar movimientos similares pero conserva, a diferencia de éste, una autonomía total.

La Figura 3 muestra el desempeño de un agente de cada modelo medido con respecto a su grado de autonomía y al tiempo invertido para realizar la misma tarea. Los agentes compuestos y perceptivos son capaces de operar por sí mismos basados en sus propios sensores y actuadores por lo que tienen un alto nivel de autonomía, mientras que los agentes comunicativos dependen de la información transmitida directamente por otros agentes para operar, por lo que tienen un grado medio de autonomía.

¹*Starlogo* es un ambiente de simulación gráfica en 2D desarrollado por Mitchel Resnick, orientado a la experimentación con sistemas descentralizados. Está disponible en el sitio <http://education.mit.edu/starlogo/>

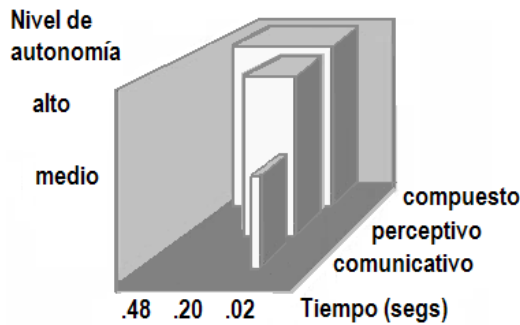


Figura 3. Comparación del nivel de autonomía y del tiempo que invierten en promedio los agentes de cada modelo para realizar tareas similares

3.1.2. Extensión del modelo de agente perceptivo

De acuerdo a los experimentos previos, el tercer modelo de agente ofrece un equilibrio entre rapidez y grado de autonomía en su operación. Por esta razón, este modelo fue elegido para realizar el resto de los experimentos.

Estamos en un punto en el cual un agente puede identificar las orientaciones de sus vecinos de manera simple y rápida: cada agente informa en todo momento con su cuerpo, la orientación que lleva de manera que otros agentes pueden registrar y copiar esa información. Sin embargo, es necesario equipar a estos agentes con algún tipo de percepción lateral que les permita el constante alineamiento entre ellos una vez agrupados.

El radio de percepción de los agentes se redefinió: ahora cuentan con un radio de percepción izquierdo, un radio de percepción derecho y un radio de percepción frontal, con el fin de determinar la ubicación de sus vecinos con respecto a ellos. Dentro de esos radios de percepción, los agentes son también capaces de percibir a otros agentes, un obstáculo o camino libre para desplazarse (ver figura 4).

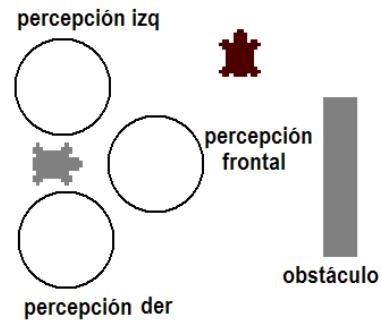


Figura 4. Percepción extendida del agente perceptivo

Con las nuevas percepciones de los agentes surgen nuevos estados tales como **líder**, **seguidor**, **obstruido** y **rezagado**, los cuales se explican a continuación.

Un agente es “**líder**” cuando en sus radios de percepción frontal, izquierdo y derecho no percibe ningún otro agente.

Si un agente se unió a una formación y percibe a otro agente en alguno de sus radios de percepción, se encuentra en el estado de **seguidor**.

Un agente está en estado de **obstruido** cuando percibe un obstáculo en su radio de percepción frontal.

El estado de **rezagado** se presenta después de que un agente en el estado de obstruido, trata de rodear un obstáculo y retomar la dirección que llevaba antes de verse obstruido; es decir cuando en sus radios de percepción izquierdo o derecho el agente percibe algún obstáculo.

Estos estados son mutuamente exclusivos y las transiciones válidas entre ellos se indican en el cuadro 1.

Nótese que los agentes no pueden determinar si encabezan una formación, todos los agentes son “líderes” naturales, i.e. candidatos involuntarios a encabezar una formación. Sin embargo, una vez en el estado de seguidor, los agentes pueden determinar si se encuentran en el centro o extremo de una formación, e.g. un agente reconoce que se encuentra en el extremo izquierdo de una formación cuando en su radio de percepción derecho percibe algún otro agente, y en su radio de percepción izquierdo no percibe ningún agente. Aún cuando la identificación de esos estados es útil para los agentes, para determinar por ejemplo el sentido

de un giro, sólo nos referiremos a los cuatro estados mencionados previamente, por considerar que reflejan la situación de una formación.

El modelo extendido de agente perceptivo se pondrá en práctica en los experimentos reportados en la sección 4.

Estado previo	Estado actual			
	líder	seguidor	obstruido	rezagado
líder	✓	✓	✓	
seguidor	✓	✓	✓	
obstruido			✓	✓
rezagado	✓	✓	✓	✓

Cuadro 1. Transiciones válidas entre estados

3.1.3. Principios de percepción

Concluimos esta sección con un recapitulativo de los principios de percepción para el movimiento colectivo coordinado de agentes autónomos.

1. **Reconocimiento de los miembros del grupo.** Este principio indica que un agente debe ser capaz de diferenciar entre los individuos que pertenecen y los que no pertenecen a su grupo, basado probablemente en percepción visual. Más aún, un agente debe ser capaz de distinguir una agrupación de sus congéneres.
2. **Reconocimiento de propiedades variables del grupo en movimiento: velocidad y orientación.** Dada la dinámica de un grupo de agentes, estas propiedades deben idealmente conocerse en tiempo de ejecución por los miembros del grupo. Nuestros agentes, por ejemplo, comunican localmente sus orientaciones a los demás y aunque se mueven en grupo a una velocidad constante conocida, esta velocidad podría ser comunicada también localmente.
3. **Reconocimiento de propiedades intrínsecas del grupo en movimiento: distancias máxima y mínima entre los miembros del grupo.** Estas propiedades

son parte del arsenal de “reglas” que los agentes aplican para agruparse. No parece evidente que dichas propiedades puedan transmitirse localmente, pues son conocidas y aceptadas por los agentes de antemano. En nuestro caso, los agentes conocen los rangos de distancia que los separan de otros agentes agrupados.

3.2. Organización

En esta sección se analiza el complemento de los principios de percepción de los agentes. Comenzamos describiendo las acciones individuales y a continuación proponemos un conjunto de principios de organización.

3.2.1. Conductas

Las conductas se forman a partir de aquellas acciones que todo agente o robot autónomo es capaz de ejecutar, e.g. **avanzar**, **girar** a la derecha o a la izquierda y **detenerse**.

Una conducta puede traducirse en comandos directos a los actuadores del agente o robot. Las conductas mencionadas, por ejemplo, se producen al aplicar voltajes equivalentes, variables o iguales a 0 a los motores de un robot móvil con un arreglo diferencial de llantas convencional.

El saber qué acción debe ejecutar un agente o un robot, no implica saber en qué momento debe ejecutarse. La solución a este problema, evidente para un agente operando individualmente, requiere ciertas guías de comportamiento colectivo que son analizadas a continuación.

3.2.2. Principios de organización

Proponemos un conjunto de principios de organización para el movimiento colectivo coordinado de grupos de agentes y robot móviles. Consideramos que estos principios son necesarios para lograr el movimiento colectivo tanto no dirigido como dirigido hacia objetivos.

1. **Preservación de la individualidad.** Este principio indica a los agentes que deben ejecutar acciones encaminadas a asegurar su permanencia en el ambiente. El principio es aplicado en tres situaciones:

- a) Cuando un agente no percibe otros agentes a su alrededor, debe moverse para favorecer el encuentro con otros agentes.
- b) Cuando un agente percibe a otro agente en su radio de percepción frontal y en orientación opuesta a la suya, debe cambiar su orientación para evitar una colisión.
- c) Cuando un agente en formación es obstruido a causa de un obstáculo y deja de percibir a otros agentes que antes percibía a su alrededor, debe moverse alrededor de ese obstáculo con objeto de alcanzar a los agentes del grupo.

2. **Atracción por el grupo.** Este principio indica a los agentes que deben ejecutar acciones orientadas a asegurar que se reúnan y permanezcan reunidos. El principio es aplicado en los siguientes casos:

- a) Cuando un agente percibe una agrupación de agentes, aumenta su velocidad y se dirige hacia la agrupación.
- b) Cuando un agente ha alcanzado una agrupación percibida a la distancia, copia la velocidad y orientación de los agentes agrupados para mantenerse en formación.

3. **Atracción por estímulos externos.** Este principio indica a ciertos agentes, los que eventualmente se convierten en líderes del grupo, que se dirijan hacia estímulos del ambiente. El principio es aplicado en un único caso:

- a) Cuando un agente es líder, y eventualmente se encuentra a la cabeza de un grupo, se dirige a un punto conocido del ambiente.

4. Experimentos y resultados

En esta sección se reportan experimentos de movimiento colectivo no dirigido hacia objetivos en ambientes sin y con obstáculos realizados en *Starlogo*. Se reportan también experimentos de movimiento dirigido hacia puntos específicos del ambiente, en ambientes sin y con obstáculos.

Se reportan además experimentos que muestran cómo los principios propuestos, permiten a los agentes adaptarse a ciertas situaciones imprevistas como la pérdida del líder de la formación, o el cambio inesperado del objetivo hacia el cual se dirigía una formación.

Finalmente, se reportan resultados de la aplicación de los principios propuestos en el mantenimiento de una formación simple de robots físicos.

En todos los experimentos, cada agente o robot identifica su situación por sus propios medios, de acuerdo a los principios de percepción enumerados, y determina en consecuencia el principio de organización que debe aplicar.

4.1. Movimiento no dirigido

En esta sección se describen experimentos de agentes que deben agruparse en formaciones mientras se desplazan libremente, i.e. sin dirigirse hacia objetivos fijos.

4.1.1. Movimiento no dirigido en ambientes sin obstáculos

En estos experimentos, los agentes inician distribuidos aleatoriamente en el ambiente. El objetivo del experimento es lograr que los agentes se agrupen y se mantengan agrupados.

Como se dijo en 3.1.1, las orientaciones de los agentes pueden ser identificadas a partir de una escala de colores. Los agentes se desplazan a tres distintas velocidades: media, alta y baja. La primera se utiliza cuando los agentes no están formados, la segunda para alcanzar una formación y la tercera para mantenerse en formación.

La figura 5 muestra una secuencia de imágenes de un experimento con 25 agentes inicialmente desagrupados. En la figura 6 se muestra el estado de los agentes a lo largo de dicho experimento. El estado de los agentes se registró cada segundo y como puede apreciarse en la gráfica, paulatinamente los agentes se agrupan y pasan del estado de "líder" potencial, al estado de seguidor de una formación. La creación de una agrupación refuerza en los agentes la aplicación del principio de atracción por el grupo sobre el principio de preservación de la individualidad.

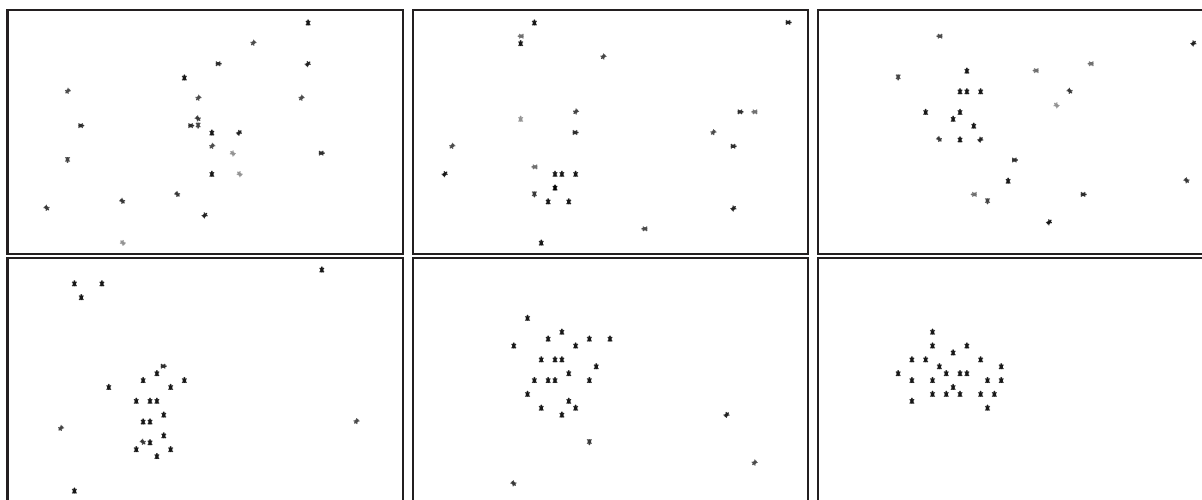


Figura 5. Del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho: posiciones de los agentes durante el movimiento colectivo no dirigido en un ambiente sin obstáculos

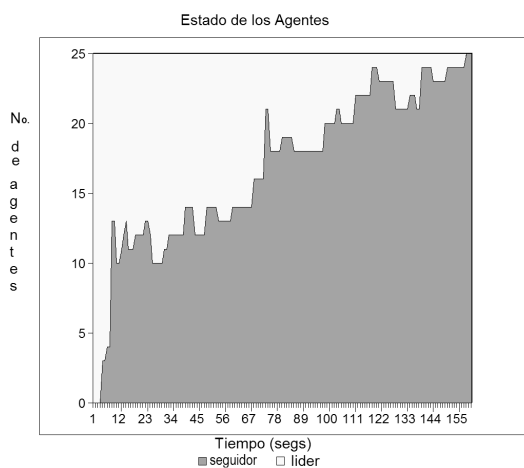


Figura 6. Estado de los agentes durante el movimiento colectivo no dirigido en un ambiente sin obstáculos

4.1.2. Movimiento no dirigido en ambientes con obstáculos

En este experimento los agentes inician formados en un ambiente con obstáculos, y deben ser capaces de evitar los obstáculos y recuperar la formación que llevaban o una similar.

Los agentes interactúan en su medio ambiente con obstáculos de dos tipos, unos que fragmentan la formación y otros que obligan a los agentes a deshacer la formación.

Los **obstáculos que fragmentan las formaciones** perturban los extremos, es decir, los agentes que están en las orillas de la formación son los que contienden con los obstáculos aplicando el principio de preservación de individualidad.

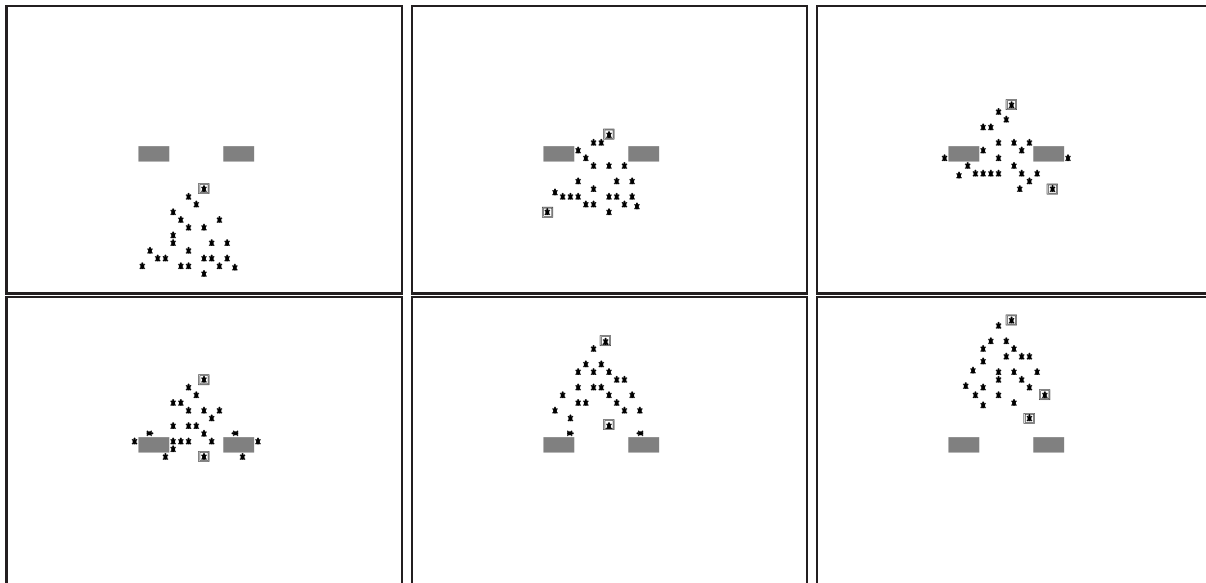


Figura 7. Del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho: posiciones de los agentes durante el movimiento colectivo no dirigido en un ambiente con dos obstáculos que fragmentan la formación. Los recuadros indican los agentes en estado de líder

Los **obstáculos que rompen las formaciones** perturbaban a todos los individuos de la formación, es decir, todos los agentes formados perciben un obstáculo al frente. Los agentes preservan su individualidad en cascada, iniciando con los que se encuentran en los extremos de la formación y seguidos por los que se encontraban al centro, quienes esperan a que los vecinos que los rodean, igualmente obstruidos, se muevan para rodear el obstáculo y les permitan a su vez rodearlo.

La figura 7 muestra una secuencia de imágenes tomadas en un experimento con 25 agentes y dos obstáculos que fragmentan la formación. Es de notarse que después de haber rodeado un obstáculo fijo, los agentes exhiben una formación similar a la que mantenían antes de contender con el obstáculo. La Figura 8 muestra el número de agentes líderes, seguidores, obstruidos y rezagados a lo largo de este experimento. Nótese que a pesar de que la mayoría de agentes logran recuperar la formación, algunos agentes rezagados no son capaces de reintegrarse y se convierten en líderes potenciales de otras formaciones.

Experimentos con obstáculos que rompen las formaciones pueden consultarse en [8].

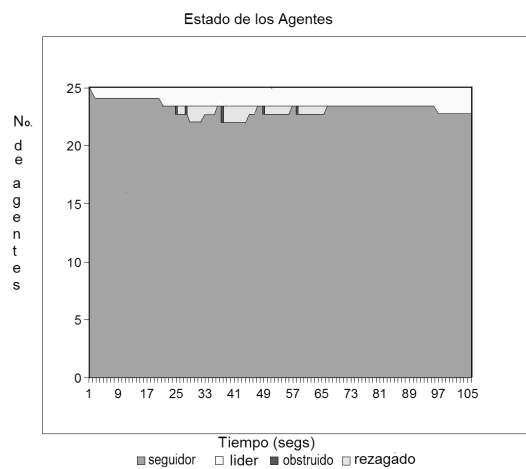


Figura 8. Estado de los agentes durante el movimiento colectivo no dirigido en un ambiente con obstáculos que fragmentan la formación

4.2. Movimiento dirigido

En esta sección se describen experimentos con agentes en formación que deben mantenerse agrupados mientras se dirigen hacia objetivos marcados en el ambiente.

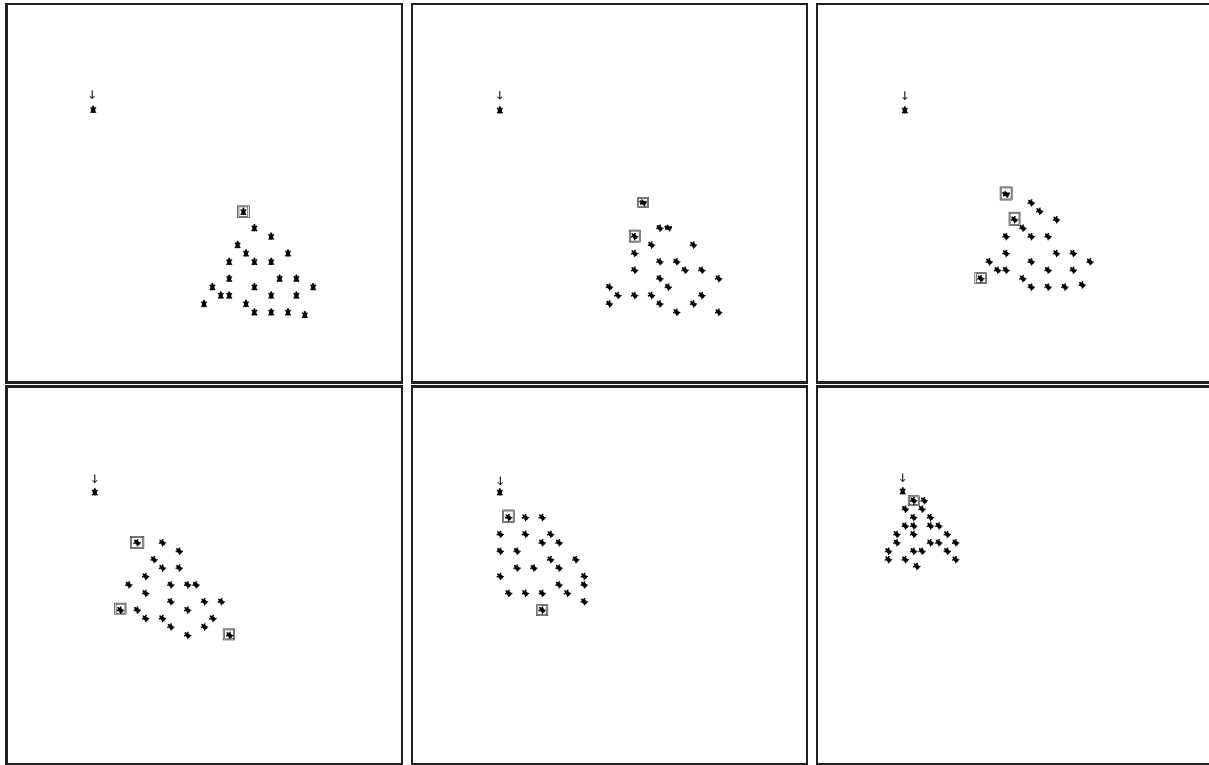


Figura 9. Del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho: posiciones de los agentes durante el movimiento colectivo dirigido en un ambiente sin obstáculos. La flecha y el recuadro indican, respectivamente, el punto objetivo hacia el cual se dirige la formación, y los líderes

4.2.1. Movimiento dirigido en ambientes sin obstáculos

En este experimento, los agentes inician formados en un ambiente sin obstáculos y deben mantener la formación mientras se dirigen hacia un objetivo fijo. El líder en la formación es atraído por un estímulo externo o meta y se dirige ahí mientras que los demás agentes lo siguen.

En la Figura 9 se ilustra una secuencia de imágenes de un experimento con 25 agentes. En la secuencia puede apreciarse que al avanzar el líder de la formación hacia la meta, los agentes que se encuentran detrás de éste copian su orientación y se desplazan detrás de él, y así sucesivamente los demás agentes al percibir que un agente que se encuentra al frente se mueve, copian la orientación y se desplazan junto con éste, generando así en el punto destino una formación en forma de cuña.

Los principios de atracción por el grupo y atracción por estímulos externos son aplicados por los agentes en este experimento. La Figura 10 muestra los estados de los agentes, registrados cada se-

gundo, durante el experimento ilustrado en la figura 9. Como se aprecia en esta figura, un número de agentes pasa al estado de líder en el transcurso del experimento debido al cambio de orientación de la formación.

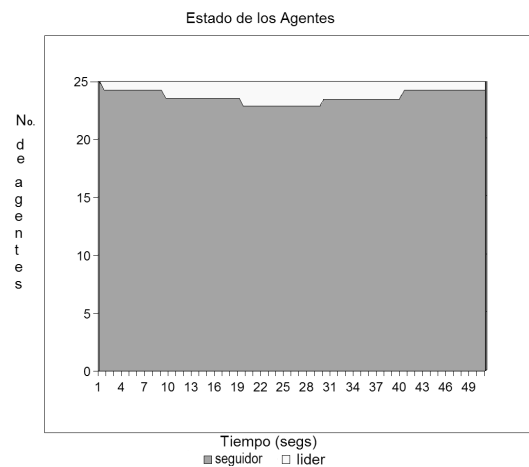


Figura 10. Estado de los agentes durante el movimiento colectivo dirigido en un ambiente sin obstáculos

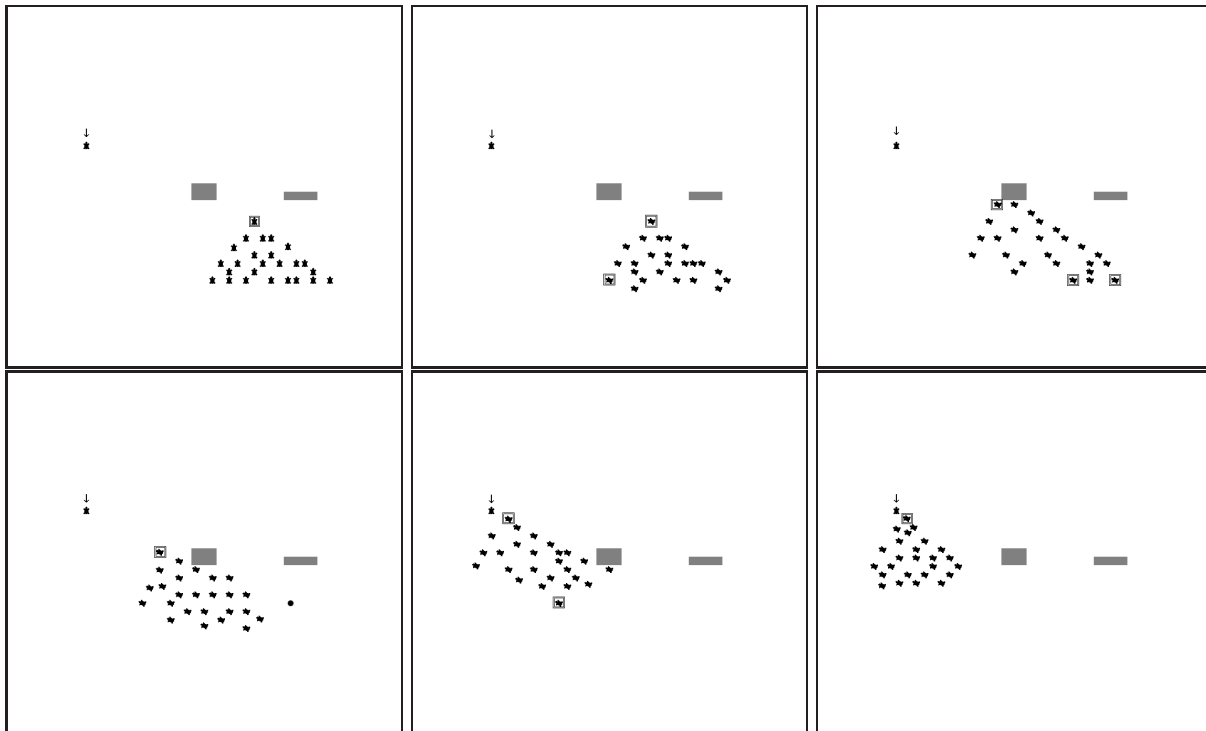


Figura 11. Del extremo superior izquierdo al extremo inferior derecho: posiciones de los agentes durante el movimiento colectivo dirigido en un ambiente con obstáculos. La flecha y el recuadro indican, respectivamente, el punto objetivo hacia el cual se dirige la formación y los agentes líderes

4.2.2. Movimiento dirigido en ambientes con obstáculos

En este experimento, los agentes deben mantener la formación en un ambiente con obstáculos mientras se dirigen hacia un objetivo fijo, sorteando el obstáculo de ser preciso. El o los agentes líderes son atraídos por un estímulo mientras los demás agentes de la formación son atraídos por el grupo. Para contender con los obstáculos del ambiente, todos los agentes aplican el principio de preservación de individualidad.

En la Figura 11 puede observarse cómo después de percibir que el líder avanza hacia la meta, los agentes copian su orientación y se desplazan junto con él evitando un obstáculo que fragmenta la formación hasta alcanzar el punto destino. La Figura 12 muestra los estados de los agentes durante el mismo experimento, registrados cada segundo.

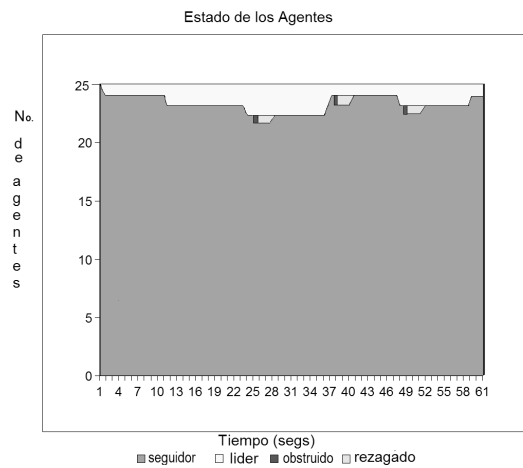


Figura 12. Estado de los agentes durante el movimiento colectivo dirigido en un ambiente con obstáculos

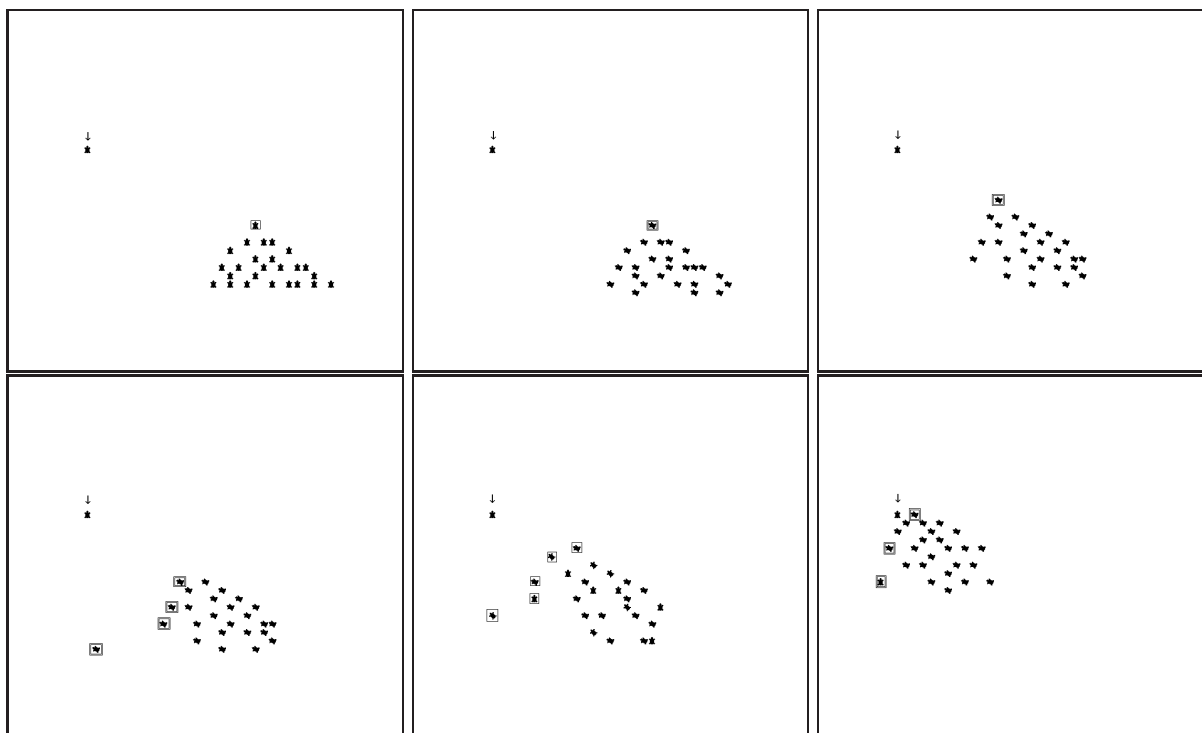


Figura 13. Pérdida del líder. La flecha indica el punto objetivo hacia el cual se dirige la formación, los recuadros indican los agentes en el estado de líder

4.3. Movimiento adaptativo

Estos experimentos fueron realizados para probar la robustez de los principios de percepción y organización utilizados por nuestros agentes. En el primer experimento se presenta la pérdida de líder con el objeto de ilustrar que otro agente puede tomar el liderazgo y guiar la formación hacia un estímulo externo. En el segundo experimento, el cambio inesperado de la ubicación del estímulo externo u objetivo ilustra la reactividad de los agentes.

4.3.1. Pérdida del líder

En este experimento, la formación tiene inicialmente un líder que se dirige hacia un estímulo externo.

Cuando se produce la pérdida del líder, es decir, cuando el usuario selecciona al líder y lo retira intencionalmente de su posición colocándolo fuera del radio de percepción de los demás agentes, otros agentes toman el liderazgo y los demás agentes de la formación copian las orientaciones de los nuevos líderes y los siguen hasta llegar a la meta indicada por el estímulo externo.

Ante la pérdida del líder inicial y gracias a la reactividad que muestran los agentes al aplicar los principios de organización, la formación es mantenida y se logra llegar al objetivo.

En la figura 13 se muestra una serie de imágenes que ilustran el comportamiento de 25 agentes cuando se presenta la pérdida de líder en un experimento de movimiento dirigido en un ambiente sin obstáculos. En la cuarta escena de la secuencia, el usuario cambia de lugar al líder de la formación. En consecuencia, en la quinta escena otros agentes se identifican en posición de líderes y aplican el principio de atracción por un estímulo externo.

La figura 14 indica los estados de los agentes, registrados cada segundo, durante el experimento ilustrado en la figura 13. Nótese el incremento en el número de líderes en la primera mitad del experimento, lo cual corresponde al efecto del desplazamiento intencional del líder original.

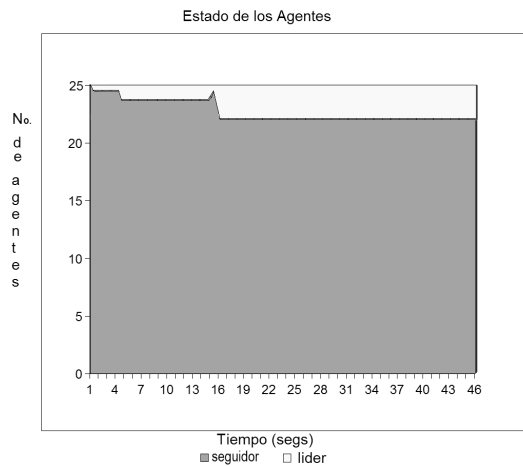


Figura 14. Estado de los agentes durante un experimento de movimiento colectivo en el cual los agentes reaccionan a la pérdida del líder de la formación

4.3.2. Cambio inesperado de objetivo

En este experimento al igual que en el anterior, la formación tiene inicialmente sólo un líder que es atraído por un estímulo externo. Cuando en tiempo de ejecución el usuario cambia la posición del punto destino de la formación, es decir mueve el estímulo a otro punto que no era conocido por el líder actual, éste percibe la nueva posición y se re-orienta hacia el estímulo.

Con este cambio de orientación, otro agente toma el liderazgo de modo que la formación tiene más de un líder. Estos agentes, en su calidad de líderes, son atraídos por el estímulo externo y se dirigen hacia él, mientras que los demás agentes copian sus orientaciones y los siguen hasta llegar a la meta.

Ante el cambio inesperado del objetivo final, y gracias a la aplicación de los principios de organización tanto por el líder como por el resto de los robots, la formación es mantenida en su movimiento hacia el nuevo objetivo.

La Figura 15 muestra una serie de imágenes que ilustran el comportamiento de 25 agentes ante el cambio inesperado de objetivo. En la cuarta escena de esta secuencia, el usuario cambia de lugar el objetivo, lo cual es percibido por el agente líder. En respuesta a ello, otros agentes se identifican

en posición de líderes en la quinta escena y se orientan hacia el nuevo objetivo.

La Figura 16 muestra el estado de los agentes, registrado cada segundo, a lo largo del experimento ilustrado en la figura 15. Como se puede apreciar, el número de agentes en posición de líder aumenta en un punto del experimento. Este punto es el momento en que el usuario cambia de lugar el objetivo, con lo cual algunos agentes no perciben a ningún otro agente en sus radios frontal, izquierdo y derecho, y en consecuencia se consideran líderes.

4.4. Experimentos con robots físicos

Los principios de percepción y organización propuestos se probaron con tres robots físicos, los cuales se construyeron con el *kit de Lego Mindstorms Robotics Invention System 2.0* ©.

Los experimentos reportados en esta sección son conocidos como seguimiento de laberintos y usualmente se realizan con sistemas mono-robot. Se evaluó un grupo de robots cuya tarea era mantener una formación lineal mientras recorría un laberinto marcado en el piso.

Inicialmente, los robots se encuentran formados en línea. El líder es invariablemente el robot situado al frente de la formación. Este robot decide la trayectoria de la formación, la cual no es conocida por los robots seguidores. Los robots seguidores perciben los movimientos del líder y tratan de seguirlo manteniéndose en formación.

4.4.1. Diseño de los experimentos

Ambiente. Los experimentos se desarrollaron en un ambiente de 152 cm de ancho \times 190 cm de largo con una superficie blanca. Tres trayectorias trazadas con líneas negras que permiten hacer giros de 90° y marcas entre las intersecciones de las líneas fueron dispuestas en ese ambiente (ver Figura 17).

Robots. El *kit Lego* tiene dos tipos de sensores: de contacto y de luz. Los sensores de contacto permiten detectar obstáculos, es decir, permiten discernir el punto de impacto a través de lecturas binarias: choque o no-choque.

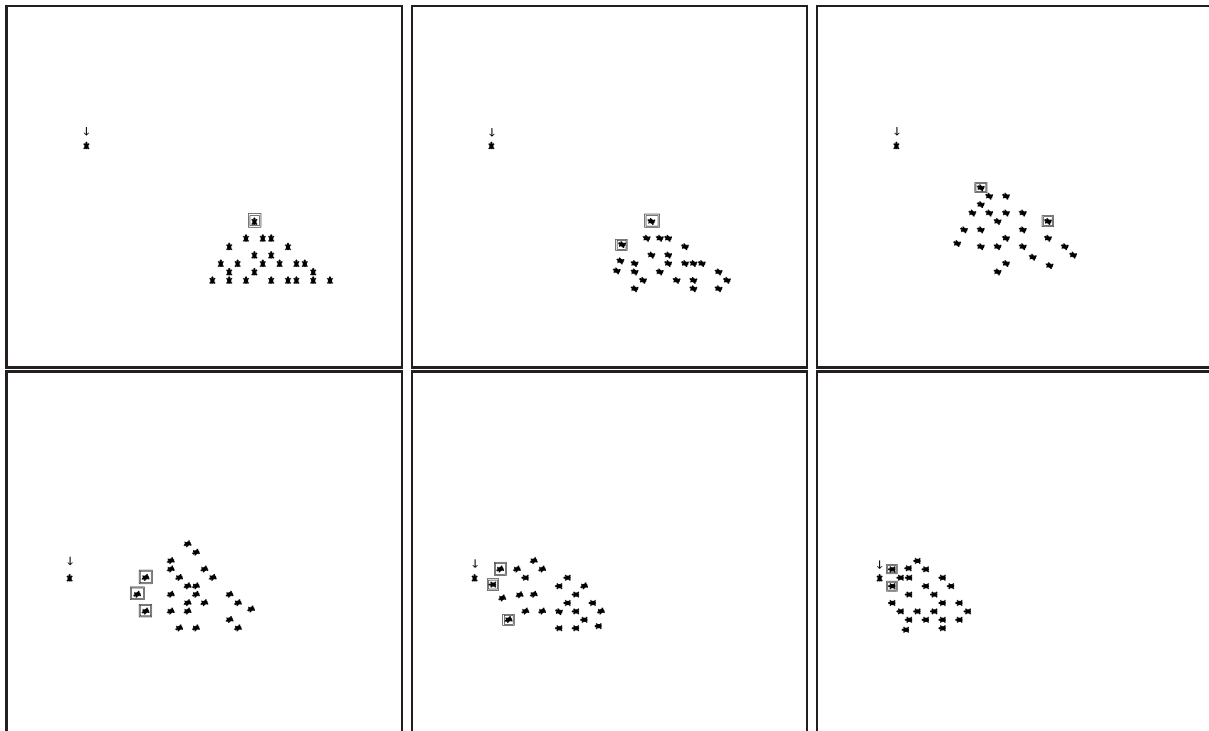


Figura 15. Cambio inesperado de objetivo. La flecha indica el punto objetivo hacia el cual se dirige la formación, los recuadros indican los agentes en estado de líder

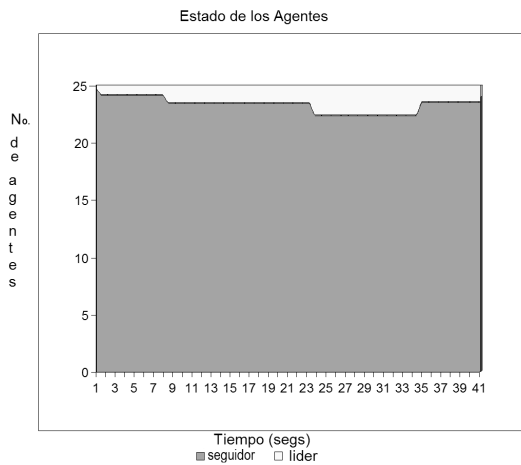


Figura 16. Estado de los agentes durante un experimento de movimiento colectivo en el cual los agentes reaccionan al cambio inesperado de objetivo

Los sensores de luz, fotoceldas o fotocélulas por su parte, detectan la variabilidad de la luz y permiten identificar tres gamas de colores. Se usaron en nuestros experimentos para determinar sobre qué zona se encuentra un robot. Los sensores entregan una lectura de 0 en blanco a 256 en negro.

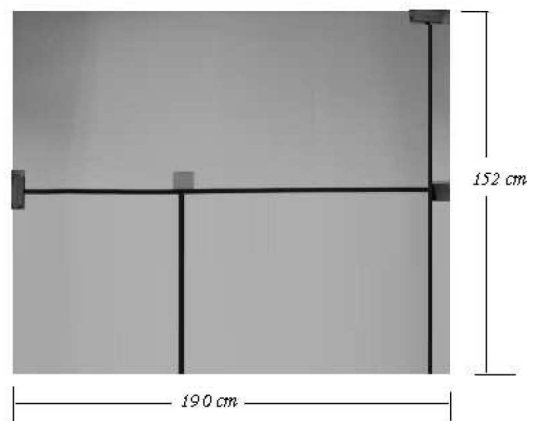
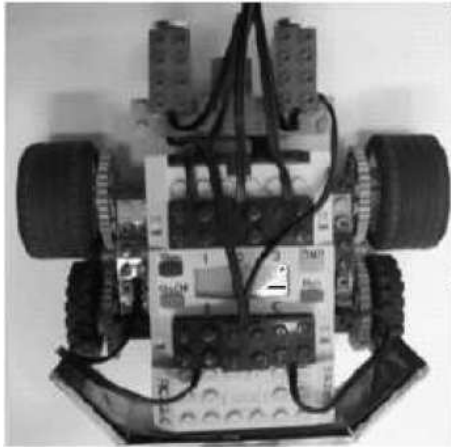


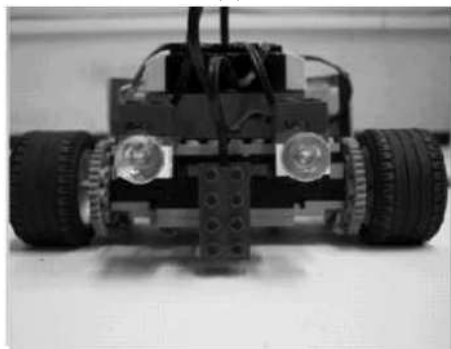
Figura 17. Ambiente del experimento con robots físicos. Las marcas indican las intersecciones o el final del laberinto.

La base de cada robot consiste en un modelo diferencial con cuatro ruedas controladas por dos motores independientes colocados en la parte central, una placa de espejos en la parte trasera para comunicar de manera indirecta la orientación a los vecinos cercanos, tres sensores de luz al frente, dos apuntando hacia la parte frontal para percibir a los vecinos y uno apuntando al piso para

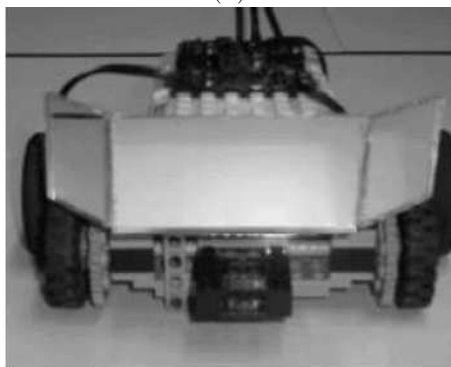
percibir el laberinto. Dos lámparas se colocaron debajo de los sensores de luz, al frente del robot (ver figura 18).



(a)



(b)



(c)

Figura 18. Estructura del robot. Vista superior (a), frontal (b) y trasera (c)

Percepción y organización de los robots. Cada robot determina la orientación del robot situado al frente mediante los reflejos de sus lámparas en los espejos del otro. Los robots pueden igualmente percibir obstáculos y el objetivo final

marcado en el piso. En cuanto a la actuación, los robots ejecutan conductas como **avanzar**, **esperar**, **girar** y **detenerse** y aplican los principios de percepción y organización discutidos previamente.

4.4.2. Resultados

Las conductas ejecutadas y los principios de organización aplicados por los robots en uno de los experimentos realizados se muestran en la figura 19. Los robots permanecen inmóviles hasta que el líder se desplaza y al llegar a una marca de intersección elige dar vuelta indistintamente hacia la izquierda o hacia la derecha y continúa desplazándose sobre la línea hasta llegar al objetivo.

A diferencia de los agentes, los robots físicos ejecutan una conducta denominada **esperar**. Esta conducta se ejecuta cuando un robot seguidor percibe que el robot de enfrente cambia su orientación. Los agentes perciben esa información de forma casi instantánea, mientras que los robots físicos deben detenerse, estimar y memorizar la nueva orientación del robot de enfrente, para copiarla cuando ellos mismos alcancen el punto de intersección. De otro modo, los robots podrían seguirse pero abandonarían el laberinto.

Aunque para los robots físicos el problema se concentró en el seguimiento y mantenimiento de una formación lineal, los principios propuestos, en particular los principios de reconocimiento de las propiedades intrínsecas y variables de un grupo en movimiento, así como los principios de atracción por estímulos y de atracción por el grupo, fueron de utilidad para lograr el movimiento colectivo coordinado del grupo.

5. Comparación

En esta sección se comparan algunos de los modelos que fueron presentados en la sección 2 con nuestra propuesta. Cabe aclarar que las propiedades de nuestra propuesta que se están considerando conciernen únicamente el modelo de agente perceptivo, que fue el modelo retenido por razones expuestas anteriormente. Los aspectos considerados en esta comparación se dividen en las categorías de control mono-agente, configuración de la formación y escalabilidad.

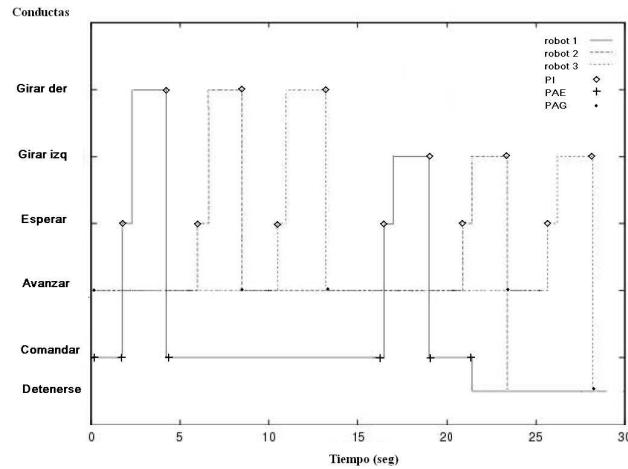


Figura 19. Conductas ejecutadas por los robots en un laberinto. Por claridad, la conducta avanzar del robot líder se indicó como comandar. La conducta detenerse es ejecutada por un robot cuando percibe el objetivo. PI, PAE y PAG indican, respectivamente, la aplicación de los principios de individualidad, atracción por estímulos externos y atracción por el grupo

<i>Propiedades</i>	Reynolds 1987	Únsal 1994	Balch & Arkin 1998	Fredslund & Mataric 2002	León & Muñoz 2005
Enfoque situado basado en percepción local situado basado en comunicación directa	✓	✓	✓	✓	✓
Percepción del ambiente congéneres obstáculos	✓	✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Actuación mantener formación dirigirse hacia objetivos	✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Control del sistema descentralizado	✓	✓	✓	✓	✓

Cuadro 2. Enfoque, percepción y actuación

En la categoría de control mono-agente se identificaron las propiedades del enfoque, percepción, actuación y el tipo de sistema. En la segunda categoría se evaluaron los mecanismos de control, el tipo de formación, el número de agentes y el tipo de ambientes utilizados. Por último, en la escalabilidad se consideran los tipos de agentes y la resistencia ante perturbaciones externas.

Como se puede apreciar en el cuadro 2, nuestro modelo se basa en un enfoque situado utilizando percepción local. Los agentes pueden percibir

otros agentes y obstáculos, son capaces de dirigirse hacia una marca manteniendo una formación y el control es descentralizado. Nuestra propuesta en cuanto al control mono-agente es equivalente a los modelos propuestos por Balch y Arkin [1] y Fredslund y Mataric [5] que se ubican en lo más reciente del estado del arte en formaciones. Cabe recordar que nosotros llegamos a un modelo con esas propiedades basados en evidencia experimental y comparación con otros modelos de agentes propuestos por nosotros mismos.

<i>Propiedades</i>	Reynolds 1987	Ünsal 1994	Balch & Arkin 1998	Fredslund & Mataric 2002	León & Muñoz 2005
Método de formaciones posicional geométrico	✓	✓	✓	✓	✓
Tipo de formación cuña círculo parábola línea diamante	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓
Número de agentes más de 10 hasta 10	✓	✓	✓	✓	✓
Ambientes con obstáculos objetivos fijos			✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓

Cuadro 3. Configuración de las formaciones y tipos de ambientes enfrentados

<i>Propiedades</i>	Reynolds 1987	Ünsal 1994	Balch & Arkin 1998	Fredslund & Mataric 2002	León & Muñoz 2005
Tipos de agentes simulados robots físicos	✓	✓	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Resistencia cambio de líder cambio de objetivo	✓	✓	✓	✓	✓ ✓

Cuadro 4. Escalabilidad

Como se aprecia en la comparación resumida en el cuadro 3, nuestros agentes dependen de un método de control posicional para agruparse. Los tipos de formaciones que nuestros agentes pueden generar son círculo [8] y cuña. En nuestro trabajo interactúan como máximo 80 agentes en ambientes sin y con obstáculos y objetivos fijos. De nuevo nuestros agentes están emparentados con los modelos propuestos por Balch y Arkin [1] y Fredslund y Mataric [5]. Los enfoques posicionales a diferencia de los geométricos, están inspirados en principios biológicos, i.e. mecanismos de atracción y repulsión, y son adecuados para agentes y robots con poco conocimiento del ambiente en el que operan.

En el cuadro 4 se compara la escalabilidad de los

modelos. Esta comparación muestra cómo nuestro modelo de agente perceptivo es robusto ante la pérdida del líder y el cambio inesperado del objetivo, una propiedad raramente observada en otros modelos. El empleo de robots físicos para probar los principios de los modelos es considerado un factor igualmente relevante en esta comparación.

En nuestro modelo de agente perceptivo los agentes tienen 8 orientaciones, así que en el peor de los casos para que un agente se integre a una formación, tiene que interactuar 7 veces con el agente formado, por lo que el número máximo de interacciones para n agentes está determinado por la fórmula $7n - 7$, así que el orden de nuestro método para el mantenimiento de formaciones es lineal. A diferencia del nuestro, los trabajos analizados

anteriormente no reportan el orden de sus algoritmos.

6. Consideraciones finales

El problema fundamental abordado en este trabajo es el estudio de los principios de percepción y organización del movimiento colectivo coordinado de grupos de agentes autónomos y grupos de robots móviles. La formulación de estos principios está orientada a lograr la operación de grupos de robots a los que se les puedan encomendar tareas como manejo de materiales peligrosos, exploración y vigilancia de espacios, manipulación y recolección de objetos.

En este trabajo se propusieron y compararon tres diferentes modelos de agentes para la generación y el mantenimiento de formaciones espaciales, comunicativos, compuestos y perceptivos, los cuales fueron diseñados de manera constructivista, i.e. cada modelo surgió como consecuencia de otro del que tomó sus ventajas.

El modelo de agente perceptivo fue el más apropiado y fue seleccionado y extendido para realizar experimentos de movimiento colectivo en diversas situaciones.

Las principales aportaciones de este trabajo son la identificación y la aplicación de principios cualitativos generales de percepción y organización para el movimiento colectivo coordinado de agentes autónomos y de robots móviles, basados en comunicación indirecta y percepción local.

Los principios identificados se caracterizan por ser aplicables a agentes y robots de estructura simple, por proveer un alto grado de autonomía y tiempo de respuesta aceptable. Finalmente, estos principios probaron ser robustos para contender con situaciones imprevistas en el ambiente.

Los experimentos realizados con robots físicos deben extenderse a situaciones más complejas. Sin embargo, consideramos importante incluir estos experimentos en esta comunicación, no como evidencia concluyente, sino como un indicativo de que principios cualitativos como los propuestos en este trabajo pueden exportarse a agentes físicos operando en ambientes reales.

A futuro, consideramos extender nuestro modelo de agente perceptivo, así como revisar los principios de percepción y de organización para

contender con ambientes más ricos que incluyan obstáculos y objetivos móviles. Estas extensiones pretenden incursionar en aplicaciones como el seguimiento de objetivos en esquemas presa-depredador, la protección de un individuo de la formación o la cobertura de ambientes dinámicos hostiles.

Igualmente, se experimentarán los principios propuestos con robots físicos mejor equipados, en ambientes menos estructurados y en situaciones de mayor complejidad, e.g. formaciones de robots móviles operando como arreglos de sensores.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los revisores anónimos por sus valiosas observaciones y sugerencias.

Durante el desarrollo de la investigación reportada en este trabajo, el primer autor fue becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México, bajo el número de expediente 182899.

Referencias

- [1] Balch T., Arkin R. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14: 926-939, 1998.
- [2] Bendersky D. A., Santos J.M. Robot formation as an emergent collective task using target-following behavior. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 7: 9-18, 2003.
- [3] Camazine S., Deneubourg J.-L., Franks N. R., Sneyd J., Bonabeau E.. Fish Schooling, capítulo del libro *Self-organization in biological systems*, páginas 166-187. Princeton University Press, 2001.
- [4] Flacher F., Sigaud O.. Spatial coordination through social potential fields and genetic algorithms. *Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats*, páginas 389-390, 2002.
- [5] Fredslund J., Mataric M. A general algorithm for robot formation using local sensing

- and minimal communication. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18: 837-846, 2002.
- [6] Jadbabaie A., Lin J., Morse S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control* 18(6): 988-1000, 2003.
- [7] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotic Research* 5: 90-98, 1986.
- [8] León Fernández Y. Generación y mantenimiento de formaciones en robótica colectiva. Tesis de maestría en Ciencias Computacionales. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE. México, 2005.
- [9] León Fernández Y., Muñoz Meléndez A. Formations in collective robotics. *Research on Computing Science* 17: 223-232, 2005.
- [10] Ögren P., Fiorelli E., Leonard E. Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers. *Proceedings of the 15th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*. Notre Dame, Indiana. Agosto, 2002. [CD-ROM]
- [11] Olfati-Saber R., Murray R. M. Distributed cooperative control on multiple vehicle formations using structural potential functions. *Proceedings of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*. Barcelona, España. Julio, 2002.
- [12] Reynolds C. Flocks, herds, and schools. A distributed behavioral model. *Computer Graphics* 21(4): 25-34, 1987.
- [13] Sugihara K., Suzuki I. Distributed motion coordination of multiple robots. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, páginas 138-143, 1990.
- [14] Suzuki I., Yamashita M. Distributed anonymous mobile robots - Formation and Agreement Problems. *Proceedings of the 3rd International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO'96)*, páginas 313-330. Siena, Italia. Junio, 1996.
- [15] Ünsal C., Bay J. S. Spatial self-organization in large populations of mobile robots. *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, páginas 249-254. Columbus, Ohio, 1994.
- [16] Vicsek T., Czirok A., Ben-Jacob E., Cohen I. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters* 75: 1226-1229, 1995.
- [17] Wilson E. O. *Sociobiology. The New Synthesis*. Harvard University Press, 1975.