

# Robótica cooperativa

José Rodrigo Cuautle Parodi  
Eduardo Berra Villaseñor  
Mónica Pérez Castañeda

La robótica cooperativa (Bekey, Ambrose, Kumar, Lavery, Sanderson, Wilcox, Zheng, 2008) se refiere a múltiples robots que realizan actividades de forma coordinada. Toma influencia de animales que muestran comportamientos relativamente simples, pero que con la comunicación e interacción entre vecinos se posibilitan comportamientos complejos fundamentales para la navegación, alimentación y construcción, entre otras actividades.

Los robots cooperativos pueden acoplarse automáticamente para desempeñar tareas de locomoción y manipulación que un solo robot no podría, además, como sistema, son más tolerantes a fallos que un solo elemento.

Existe un interés creciente en aplicaciones de robótica cooperativa en campos como minería, manufactura, milicia, construcción, transporte, agricultura, servicios, mantenimiento y exploración submarina y del espacio (Sanderson, 1998).

Sin embargo, coordinar un colectivo robótico para la ejecución de tareas útiles implica grandes retos, entre los que se encuentran: la localización, la navegación, la comunicación (entre robots y con usuarios humanos) y la escalabilidad.

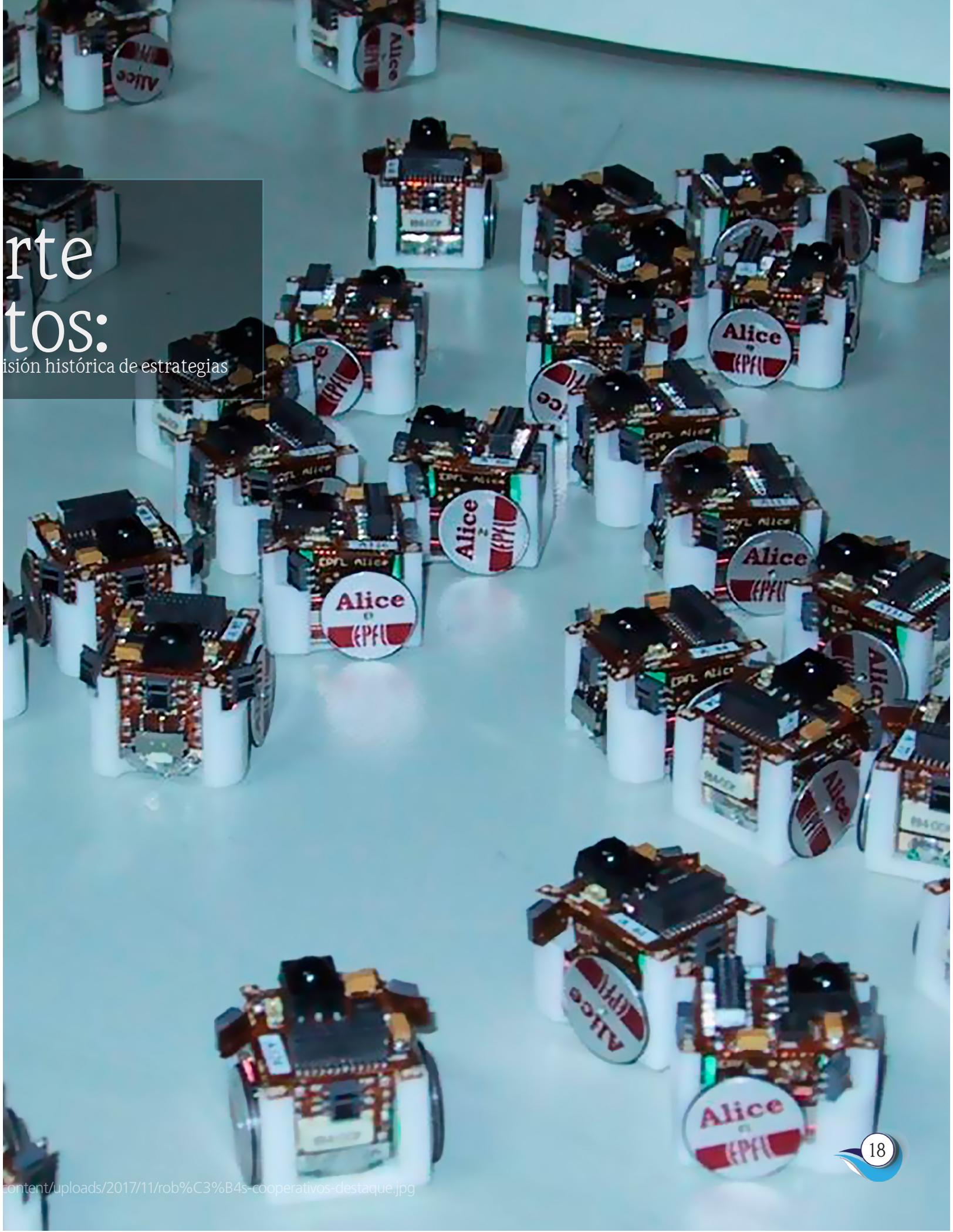
Localizar un robot significa conocer las coordenadas de su posición y orientación, por medio de sensores. En el caso de emplear odómetros, se tendrá una acumulación de errores, por lo que no es un método adecuado para largos periodos de tiempo, tampoco es factible el uso de monitores que supervisen los movimientos de robots y objetos, debido a los grandes costos que implican los sensores, equipo de cómputo y de comunicaciones requeridos para tal solución (Yang, Watanabe & Izumi, 2005).

Algunas aplicaciones pueden requerir formaciones, resultando necesario controlar los procesos de establecimiento de la formación, el mantenimiento de la

para el  
transporte  
de  
objetos

# arte tos:

visión histórica de estrategias



misma o el cambio a otra diferente. Si existen robots manteniendo cierta formación (Chia & Hsu, 2007), los errores de posición pueden propagarse a través de la cadena de robots, lo que resulta inapropiado en algunas aplicaciones, como el transporte de un solo objeto por una formación de robots, donde se permiten errores muy pequeños.

Hablar de la navegación de un colectivo robótico (Sanderson, 1998), significa controlar las trayectorias de los robots para la ejecución de tareas comunes, evitando colisiones y reduciendo distancias y tiempos.

Por otra parte, el establecimiento de sistemas de comunicación en operaciones cooperativas es aún un problema abierto (Bekey, et al., 2008), decisiones sobre el tipo de información a transmitir entre sus integrantes, seleccionar emisores y receptores según la situación del momento, determinar la información que se debe agregar a la base de conocimientos, son ejemplos de estos problemas.

Cuando se mueve un robot, sus vecinos cambian y, por lo tanto, también lo hacen las relaciones con su ambiente, consecuentemente, la información que adquiere y las acciones por ejecutar cambian constantemente. No solo la topología de red es dinámica sino que los comportamientos cambian según cambia la topología. Es muy difícil predecir el desempeño de tales sistemas dinámicos y cooperativos de robots en red.

Si los robots solo se comunican por medio de sensores con otros robots localmente, sin un canal general de comunicaciones, los robots perderán la comunicación entre ellos cuando estén fuera de vista. Por contraparte, si se emplea una red de comunicaciones, pueden

existir retrasos, pérdida de datos, o incluso la pérdida de la red. En la robótica cooperativa existe un largo camino para la creación de redes de robots robustas que puedan realizar tareas físicas en el mundo real (Bekey, et al., 2008).

Actualmente las redes robóticas tienden a limitarse a reaccionar ante instrucciones específicas provistas por un humano; en aplicaciones futuras, los robots deberán interactuar con una complejidad mayor a la obediencia de comandos. Deben entonces establecerse formas efectivas para que varios humanos sean integrados en la red robótica sin preocuparse acerca de las características específicas de robots individuales. Un reto mayor es crear redes proactivas de robots que anticipen nuestras necesidades en lugar de reaccionar, con cierto retraso, a comandos humanos.

La escalabilidad de un sistema cooperativo significa flexibilidad para remover o añadir robots a una formación, realizando los ajustes necesarios para ejecutar la misión programada. Actualmente no se dispone de una metodología suficientemente robusta para la creación de redes de robots auto organizados, que etiquete y controle a sus integrantes de manera descentralizada. Se requiere investigación básica en la intersección de control, percepción y comunicación (Bekey, et al., 2008).

Con el panorama anterior, el objetivo de este artículo es describir parcialmente la evolución de estrategias propuestas en años relativamente recientes, útiles para el transporte colectivo de objetos por medio de robots, atendiendo los problemas de localización, navegación, comunicación y escalabilidad.



# Metodología

La búsqueda de información se realizó de forma manual en las fuentes incluidas en EBSCO y en la sección abierta de CONRICyT en el idioma inglés, los descriptores empleados son *cooperative robotics*, *collective robotic* y *transport*.

El criterio para la inclusión de fuentes de información es que presenten alguna estrategia con aplicabilidad para el transporte cooperativo mediante sistemas multi-robot, haciendo énfasis en los procesos de localización, navegación, comunicación y escalabilidad, que describan aplicaciones innovadoras realizadas, o aplicaciones potenciales y que hayan sido publicados alrededor de la primera década del presente siglo. La revisión consiste en una bibliografía comentada más una tabla resumen.

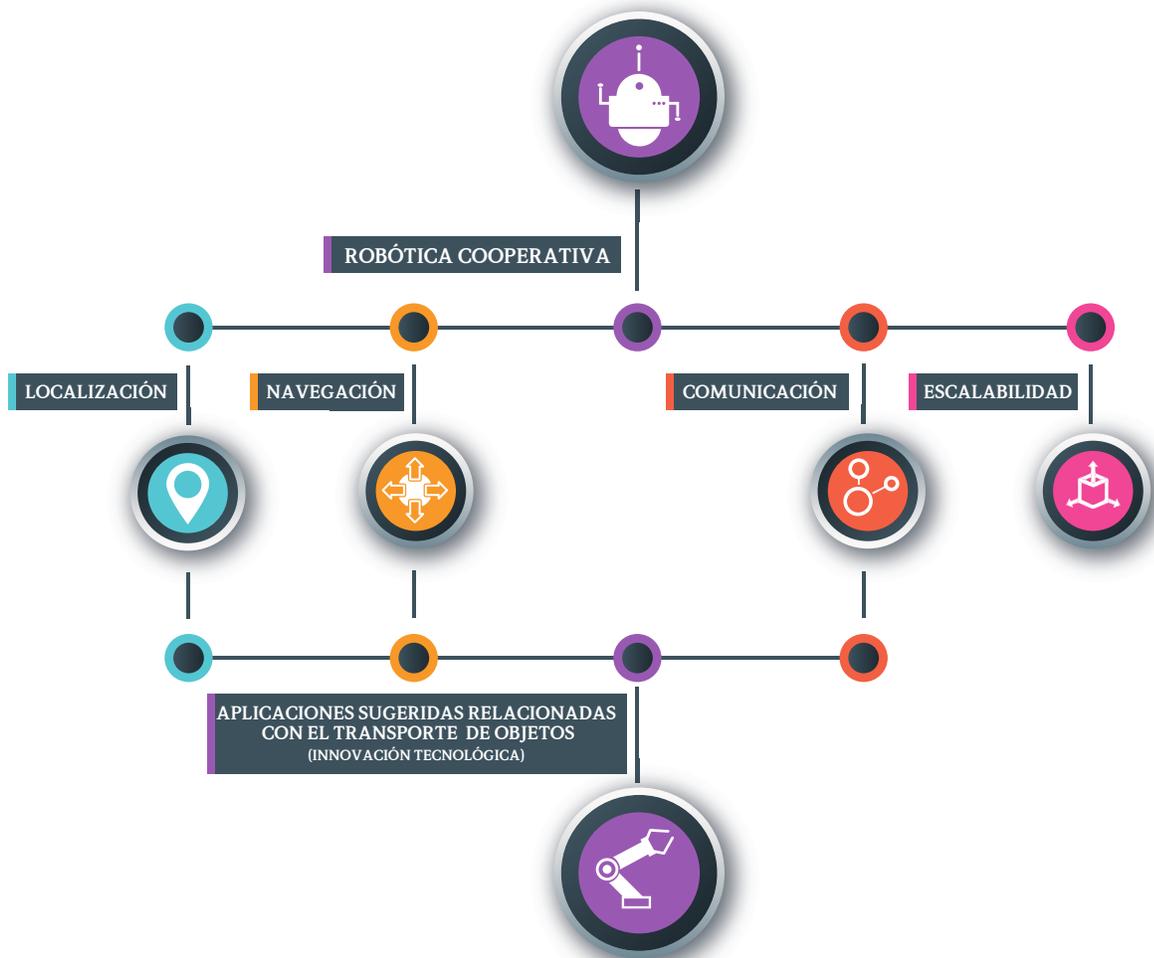


Fig. 1. Procesos descritos de la robótica cooperativa bajo diferentes estrategias.

# I. Revisión de Estrategias

## 1.1. Localización

La navegación de un robot móvil individual está limitada por la acumulación de errores provenientes de sus sensores, por esta razón a menudo se emplean marcas en el ambiente para proveer una referencia de navegación.

Para Sanderson (1998), las posiciones relativas entre un grupo de robots coordinados pueden ser utilizadas para promediar y mejorar la estimación del grupo sobre las posiciones individuales. Para esto, además de las mediciones de sus sensores, se requiere un canal para el intercambio de información: posiciones relativas e información de control. El algoritmo del sistema de navegación cooperativa detecta las posiciones entre robots para mejorar la estimación de la posición y, por tanto, el control de la trayectoria de un grupo de robots. En esta formulación, el espacio de posiciones de todos los robots es estimado simultáneamente usando un filtro tipo Kalman.

Pocos de los métodos existentes en robótica cooperativa son capaces de transportar objetos en forma coordinada y omnidireccional, lo cual es un requerimiento importante para el transporte en espacios estrechos. Yang, Watanabe e Izumi (2005) presentan, en este sentido, un enfoque que imita el comportamiento humano en la manipulación cooperativa de lo que se denomina “objeto de referencia común”, siendo este un mismo objeto transportado en forma cooperativa por los robots.

Más detalladamente, “objeto de referencia común” significa que, en un sistema de transporte cooperativo, la planificación de movimientos de cada agente está basada en su propio sistema de coordenadas locales, las cuales están definidas con respecto al objeto a ser transportado, a diferencia de otros métodos que hacen referencia a los demás agentes participantes.

Empleando un sistema de múltiples robots no holonómicos bajo un sistema de control descentralizado, Yang (et al., 2005) recurre a un marco de líder-seguidores donde los seguidores deben moverse según las indicaciones de un líder.

Los comandos de control para los seguidores se generan a través de métodos de cómputo suave como la lógica difusa, redes neuronales o algoritmos genéticos. En su estudio, Yang (et al., 2005) presenta resultados de simulaciones de movimientos donde un robot líder y dos seguidores deben mover (en forma coordinada) un objeto en forma de triángulo.

Por otra parte Chia y Hsu (2007) proponen una taxonomía para formaciones robóticas cooperativas, entendiéndose por formación al patrón geométrico específico que mantiene un equipo de robots mientras ejecuta movimientos. La taxonomía clasifica los sistemas formados bajo dos criterios: la forma de control y si los robots son distinguibles o anónimos. El primer criterio se divide en tres partes: Patrón de la formación, Tipo de referencia y Tipo de control.

Dentro de los Patrones de la formación destacan: los tipos línea, columna, círculo y cuña. Para el Tipo de referencia se mencionan las referencias basadas en otros robots vecinos (anónimos) o la referencia a un robot líder (distinguible). Otra forma de referencia es el uso de múltiples puntos que no corresponden a robots para determinar la posición de los mismos. La capa de control robótico se encarga de dirigir a cada robot hacia su posición correcta según el tipo de forma y de referencia empleados. Esto último considerando la evasión de obstáculos y de otros robots.

La detección y seguimiento de un objeto de forma cooperativa por un equipo de sensores móviles es una extensión de la fusión de sensores en la que debe enfrentarse la incertidumbre generada por oclusiones, diferencias entre sensores y cambios de los ambientes observados debido a los cambios de posiciones de los robots. En este sentido Ahmad (2013), propone un enfoque bayesiano para tratar con estas incertidumbres bajo el escenario de una cancha de fútbol para robots. Se propone un algoritmo cooperativo para la localización del sistema multi-robot y del objeto seguido en un marco descentralizado para la implementación en tiempo real, así como un método centralizado de cómputo previo a la ejecución basado en la optimización de grafos para la localización del sistema multi-robot y del objeto bajo seguimiento.

## 1.2. Navegación

La navegación controlada de varios robots en un mismo entorno es un sistema complejo: para su comprensión, Bonabeau, Dorigo y Theraulaz (1999) presentan un estudio del comportamiento colectivo de hormigas de varias especies en tareas de búsqueda y recolección de comida. Los autores describen modelos probabilísticos para explicar el comportamiento de las colonias en la búsqueda de alimento, describen la ejecución de simulaciones de Monte Carlo para demostrar la validez de sus modelos al compararlos con el comportamiento de colonias reales.

Así también, Bonabeau (et al., 1999) describe aplicaciones de los modelos propuestos en problemas de optimización, tales como el de asignación cuadrática, el coloreado de grafos, la calendarización de trabajos, el ordenamiento secuencial y el ruteo de vehículos.

Diversos aspectos del comportamiento sensorial y motor de los animales pueden ser modelados en términos de inferencia Bayesiana, un enfoque que puede tratar la incertidumbre inherente y el ruido en el mundo natural. Con este marco Baddeley, Philippides, Graham, Hempel, Collett y Husbands (et al., 2009) propone un análisis de la orientación de abejorros durante el vuelo. Se emplea una técnica basada en la localización y mapeo simultáneos (SLAM por sus siglas en inglés), una herramienta de robótica autónoma, bajo un enfoque probabilístico Bayesiano. Baddeley (et al., 2009) plantea que la comprensión de la orientación de los abejorros durante el vuelo puede aprovecharse para el estudio del aprendizaje activo del espacio.

Fallahi y Leung (2010) proponen un método para asignar un comportamiento caótico a un sistema multirobot que debe alcanzar una serie de posiciones objetivo de manera cooperativa dentro de un ambiente determinado. Se basa en un controlador que asegura la generación de movimientos caóticos, lo que garantiza la cobertura total del espacio de trabajo conectado.

El enfoque adoptado por Fallahi y Leung no requiere mapas del ambiente ni un plan global de movimiento. Solo requiere la medición de la normal local hacia los límites del espacio cuando un robot está muy cerca de los mismos.

La asignación de objetivos se completa cuando todos los objetivos han sido alcanzados por al menos un robot móvil. La cooperación entre robots se logra con un robot actuando como amo, siendo el resto de los robots sincronizados por este. Fallahi y Leung (2010) presentan una estrategia denominada “de espejo”, empleada para generar movimientos cuando los robots están cerca de los límites del espacio de trabajo o en posibilidad

de colisionar con objetos estáticos. Fallahi y Leung presentan resultados de simulaciones donde se aprecian mejorías en los movimientos caóticos sincronizados contra los movimientos caóticos no sincronizados.

Ioannidis, Sirakoulis y Andreadis (2011) presentan un método para la planificación de caminos en ambientes dinámicos para sistemas de robots cooperativos bajo un esquema de control descentralizado, donde se ejecutan movimientos bajo diferentes formaciones. Su método emplea un sistema bidimensional de células para la creación de rutas libres de colisión y para mantener una formación inmutable del equipo de robots. Ioannidis (et al., 2011) define el concepto de autómatas celulares como el modelo de un sistema físico donde el espacio y el tiempo son discretos y las interacciones son locales. En este esquema cada robot se mueve hacia su posición final sin conocimientos previos del ambiente, tratando de seguir en línea recta hacia su objetivo, cada robot actúa dependiendo de las localizaciones y de los estados de sus vecinos.

## 1.3. Sistemas de Comunicación

Un recurso útil para el desarrollo de la tecnología cooperativa es la realización de torneos de fútbol con jugadores robóticos, en este contexto Ozaki, Yokota, Matsumoto y Asama (1999) proponen un sistema de comunicación para un equipo de fútbol soccer robótico, basado en una red local inalámbrica y un sistema de comunicación UDP/IP. Ozaki (et al., 1999) considera que la comunicación en tiempo real es más importante que la confiabilidad debido a la dinámica del juego: presentan una red conformada por tres robots y un computador central. El sistema de comunicación realiza una cantidad de reintentos de envíos de mensajes de acuerdo a condiciones de recepción cambiantes.

Otro esquema de cooperación es la búsqueda y recuperación de objetos dispersos, Bourgault, Furukawa, y Durrant-Whyte (2004) estudian la coordinación de un equipo de vehículos en tareas de búsqueda de objetivos perdidos. Bajo un enfoque bayesiano, la utilidad de una secuencia de control es una función de probabilidad del estado del objetivo. Cada integrante construye una estimación de las condiciones del objetivo basada en alguna función de densidad de probabilidad al comunicarse y fusionar la información proveniente

de sus colaboradores. Las utilidades incitan a los agentes a colaborar. La planificación cooperativa descentralizada, se logra a través de una negociación anónima basada en la comunicación de la información observada.

La integración de habilidades de percepción entre humanos y robots puede enriquecer la ejecución de tareas complejas como búsqueda y rescate. Ahmed, Sample, Yang, Lee, de la Garza, Elsamadisi y Campbell (2013) caracterizan y combinan diversos flujos de información provenientes tanto de robots como de humanos dentro de un marco probabilístico unificado que soporta la percepción, la conciencia situacional humana y la ejecución de tareas cooperativas entre humanos y robots. Este enfoque requiere interfaces humano-robot, modelos probabilísticos para explotar los datos del “sensor humano” y sofisticados métodos de inferencia Bayesiana para un aprendizaje eficiente y para la estimación de un estado dinámico en tiempo real.

## 1.4. Escalabilidad

En el contexto de un sistema multi-robot, la escalabilidad se refiere a qué tan bien funciona una estrategia dada cuando el tamaño del equipo crece y cómo es influenciada la productividad de cada robot. Teniendo esto en mente, el grado de interferencia entre robots es una medida de interés, así como lo es el número de veces que diferentes agentes comparten zonas cercanas. Rosenfeld, Kaminka y Kraus (2006) realizan un estudio de la manera en que se afecta la productividad de un grupo de robots similares, atendiendo a un principio de la economía denominado Ley de Retorno Marginal, que indica que la adición de trabajadores a un grupo resulta en una contribución que a partir de algún punto, pierde productividad progresivamente conforme aumenta el número de integrantes.

Demuestran la existencia de una alta correlación negativa entre la interferencia entre robots en la ejecución de tareas y la productividad. Concluyen que la interferencia mostrada entre robots bajo diversas estrategias es alta y deben desarrollarse nuevos métodos para resolver este problema.

Portugal y Rocha (2013) comparan 5 estrategias (Chevalyere, 2004), (Machado, Ramalho, Zucker y Drogoul, 2002), (Almeida, 2003) y (Elmaliach, Agmon y Kaminka, 2007) para patrullar un ambiente con un equipo dinámico de robots, comparando el desempeño y escalabilidad del mismo bajo diferentes ambientes. Portugal y Rocha concluyen que la interferencia entre robots colectivos bajo los métodos actuales aún es un problema importante, por lo que se requieren nuevas propuestas que atiendan la escalabilidad.

## II. Resultados

| Tabla Resumen de las estrategias revisadas  |                 |            |              |               |  |      |   |
|---|-----------------|------------|--------------|---------------|--|------|---|
| Cita  | temas descritos |            |              |               | Sustento teórico   | Año  | Posibles aplicaciones innovadoras   |
|   | Localización    | Navegación | Comunicación | Escalabilidad |  |      |   |
| (Bekey, et al., 2008)                       | ✓               | ✓          | ✓            | ✓             | Revisión del estado del arte   | 2008 | Manufactura, telemedicina, aplicaciones militares, exploración submarina.                           |
| (Sanderson, 1998)                           | ✓               |            |              |               | Estadística Inferencial<br>Filtro de Kalman<br>Simulación.                             | 1998 | Construcción, transporte, agricultura, servicios de mantenimiento, exploración submarina y espacial |
| (Yang, Watanabe & Izumi, 2005)              | ✓               |            |              |               | Lógica Difusa<br>Redes neuronales artificiales<br>Algoritmos genéticos.<br>Simulación. | 2005 | Transporte coordinado de un objeto entre varios robots.   |
| (Chia & Hsu, 2007)                          | ✓               | ✓          | ✓            | ✓             | Revisión del estado del arte.  | 2007 | Búsqueda y rescate  |
| (Ahmad, 2013)                               | ✓               |            |              |               | Inferencia Bayesiana.  | 2013 | Inferencia Bayesiana.   |
| (Bonabeau, Dorigo & Theraulaz, 1999)        |                 | ✓          |              |               | Simulación Monte Carlo.  | 1999 | Optimización de sistemas.   |
| (Fallahi & Leung, 2010)                     |                 | ✓          |              |               | Teoría del Caos<br>Simulación.   | 2010 | Exploración de ambientes desconocidos.  |
| (Ioannidis, Sirakoulis, & Andreadis, 2011)  |                 | ✓          |              |               | Autómata Celular.  | 2011 | Diversas, sin especificar.  |
| (Baddeley, et al., 2009)                    |                 | ✓          |              |               | Inferencia Bayesiana.  | 2009 | Exploración del espacio.  |
| (Bourgault, Furukawa & Durrant-Whyte, 2004) |                 |            | ✓            |               | Inferencia Bayesiana<br>Utilidad.  | 2004 | Búsqueda y rescate  |
| (Ahmed, et al., 2013)                       |                 |            | ✓            |               | Inferencia Bayesiana.  | 2013 | Búsqueda y rescate.   |
| (Ozaki, Yokota, Matsumoto & Asama, 1999)    |                 |            | ✓            |               | Protocolo UDP/I P.   | 1999 | Juego de fútbol soccer.   |
| (Portugal & Rocha, 2013)                    |                 |            |              | ✓             | Teoría de grafos, multiagentes.  | 2013 | Sistemas de patrullaje autónomo.  |
| (Rosenfeld, Kaminka & Kraus, 2006)          |                 |            |              | ✓             | Ley de retorno marginal.   | 2006 | Diversas, sin especificar.  |

### III. Conclusiones

Se ha presentado una bibliografía comentada de la robótica cooperativa de sus inicios y hasta el 2013, enfocándose en las tareas de localización, navegación, comunicación y escalabilidad. Todas estas tareas son indispensables para el transporte de objetos por robots de manera colaborativa. Se presentó también una tabla resumen donde se aprecian los sustentos teóricos vinculados y las posibles aplicaciones de la robótica cooperativa que sin duda pueden convertirse en los próximos años en importantes innovaciones tecnológicas.

### Referencias

- Ahmad, A. (2013). *An Integrated Bayesian Approach to Multi-Robot Cooperative Perception*. Lisboa: Universidad Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico.
- Ahmed, N.; Sample, E.; Yang, T.-L.; Lee, D.; de la Garza, L.; Elsamadisi, A. & Campbell, M. (2013). Towards Cooperative Bayesian Human-Robot Perception: Theory, Experiments, Opportunities. *AAAI 2013 Workshop on Intelligent Robotics Systems*, pp. 104-109.
- Almeida, A. (2003). *Patrulhamento Multiagente em Grafos com Pesos*. Pernambuco, Brazil: Univ. Federal de Pernambuco.
- Baddeley, B.; Philippides, A.; Graham, P.; Hempel de Ibarra, N.; Collett, T. & Husbands, P. (2009). "What can be learnt from analysing insect orientation flights using probabilistic SLAM?" *Biological Cybernetics*, pp. 169-182.
- Bekey, G.; Ambrose, R.; Kumar, V.; Lavery, D.; Sanderson, A.; Wilcox, B.; Zheng, Y. (2008). *Robotics State of the art and future challenges*. London: Imperial College Press.
- Bonabeau, E.; Dorigo, M. & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems*. New York, USA: Oxford University Press.
- Bourgault, F.; Furukawa, T. & Durrant-Whyte, H. F. (2004). "Decentralized Bayesian Negotiation for Cooperative Search". *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sendai: IEEE/RJS, pp. 2681-2686.
- Chevalere, Y. (2004). Theoretical analysis of the multi-agent patrolling problem. Proceedings of the Intelligent Agent Technology: IAT'04, IEEE/WIC/ACM (International Conference). Beijing, pp. 302-308.
- Chia, H. & Hsu, H. (2007). "Applying a taxonomy of formation control in developing a robotic system". *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, volume 16(4), pp. 565-582.
- Elmaliach, Y., Agmon, N. & Kaminka, G. (2007). Multi-robot area patrol under frequency constraints. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma. pp. 385-390.
- Fallahi, K. & Leung, H. (2010). "A cooperative mobile robot task assignment and coverage planning based on chaos synchronization". *International Journal of Bifurcation and Chaos*, volume 20(1), pp. 161-176.
- Ioannidis, K.; Sirakoulis, G. C. & Andreadis, I. (2011). "A path planning method based on cellular automata for cooperative robots". *Applied Artificial Intelligence*, volume 25, pp. 721-744.
- Machado, A., Ramalho, G., Zucker, J. & Drogoul, A. (July de 2002). Multi-agent patrolling: an empirical analysis of alternative Architectures. *Multi-Agent-Based Simulation, 3rd International Workshop, Bologna*, pp. 155-170
- Ozaki, K.; Yokota, K.; Matsumoto, A. & Asama, H. (1999). "Communication system for cooperative mobile robots: implementation of communication among soccer robots". *Advanced Robotics*, volume 13(3), pp. 287-288.
- Portugal, D. & Rocha, R. P. (2013). "Multi-robot patrolling algorithms: examining performance and scalability". *Advanced Robotics*, volume 27(5), pp. 325-336.
- Rosenfeld, A., Kaminka, G. A. & Kraus, S. (2006). A study of Scalability Properties in Robotic Teams. *Coordination of Large-Scale Multi-agents Systems*, volume 7, pp. 27-51.
- Sanderson, A. C. (1998). *A distributed algorithm for cooperative navigation among multiple mobile robots*. *Advanced Robotics*, volume 12(4), pp. 335-349.
- Yang, X., Watanabe, K. & Izumi, K. (2005). "A concept of common reference object to the cooperative transportation of multiple mobile robots". *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, (9), pp. 209-221.