

# DISEÑO DE ALGORITMOS BASADOS EN COMPORTAMIENTOS PARA EL CONTROL DE MINIBOTS

\*Maritza Bracho de Rodríguez

Recibido: 02/07/2012 Aprobado: 05/11/2012

## Resumen

Tomando como marco de referencia a la Inteligencia Artificial Distribuida y la Robótica Distribuida, en este trabajo se diseñan, desarrollan e implementan algoritmos para el control de pequeños robots autónomos, móviles, reactivos, racionales, proactivos y sociables. Estos minibots son capaces de exhibir comportamientos inspirados en las sociedades biológicas. En los resultados alcanzados durante el desarrollo de este trabajo se encontró que cuando el robot debe ejecutar tareas simples, la arquitectura reactiva es la más conveniente, eficiente y efectiva, mientras que para la ejecución de tareas de complejidad mediana o mayor, es más recomendable el uso de arquitecturas híbridas que permitan la incorporación de procesos deliberativos.

**Palabras clave:** Robótica Distribuida, Robótica Basadas en Comportamientos.

## DESIGN OF ALGORITHMS BASED ON BEHAVIOUR FOR THE CONTROL OF MINIBOTS

### Abstract

Using the Distributed Artificial Intelligence and the Distributed Robotics as a frame of reference, in this work are designed, developed and implemented algorithms to control autonomous, mobile, reactive, rational, proactive and sociable small robots. These minibots are capable to exhibit behaviors inspired in biological societies. Through the development of this work it was found that if the robot has to perform simple tasks, a reactive architecture is more convenient, efficient and effective. While for the performance of tasks of medium or greater complexity, is recommend the use of a hybrid architecture that allows the incorporation of deliberative reasoning

**Keywords:** Distributed Robotics, Behavior Based Robotics.

---

\* *Unidad de Investigación en Inteligencia Artificial, Decanato de Ciencias y Tecnología, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela, mbracho@ucla.edu.ve*

## Introducción

El término Robot, popularizado por el dramaturgo Karel Capek, en 1921, en su obra *Robots Universales* de Rossum, proviene de la fusión de las palabras checas: *robot*, - trabajo obligatorio - y *robotnik*, - siervo -. La palabra *robot* fue usada para denominar a cierta especie de humanos artificiales, sin sentimientos, producidos de metal, con la única misión de servir a sus amos. Un robot ha sido definido por el Instituto de Robótica de América, 1979, como un manipulador reprogramable, multifuncional, diseñado para mover materiales, partes, herramientas, o unidades especializadas en la ejecución de una gran variedad de tareas. Como esta definición es bastante restrictiva en el contexto de este proyecto se trabaja con la definición de Ronald Arkin, del Instituto Tecnológico de Georgia, [2], quien define al robot como una máquina programable, capaz de extraer información de su ambiente y usar conocimiento acerca de su mundo para moverse cuidadosamente de una manera significativa y útil.

La Robótica, palabra usada por primera vez por Isaac Asimov, - en *Yo, Robot*, en 1950 -, se refiere al estudio y desarrollo de los robots. De forma general, la robótica se define como: el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten concebir, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras mecánicas, dotados de un determinado grado de inteligencia y destinados a la producción industrial o a la sustitución del hombre en tareas diversas. Un sistema robótico puede describirse, como aquel que es capaz de recibir información, de comprender su entorno a través del empleo de modelos, de formular y de ejecutar planes y de controlar o supervisar su operación. La robótica es en esencia multidisciplinaria y se apoya en gran medida en los progresos de la microelectrónica, de la informática, y otras disciplinas, como la Inteligencia Artificial.

La Robótica ha estado relacionada con el diseño y la construcción de mecanismos, sensores, efectores y controles, para producir máquinas multifuncionales y reprogramables capaces de extraer información de su ambiente y de usarla para moverse de una manera segura y significativa, [2]. La Robótica, ha puesto mucho énfasis en el diseño y construcción del hardware y del sistema de control subyacente basándose en el principio de la necesidad de la existencia de un cuerpo físico para poder realizar investigaciones en el área. Básicamente, la Robótica se ha ocupado de todo lo concerniente a los cuerpos de los robots, lo cual incluye el control, mecanismos automáticos y neumáticos, sistemas de cómputos, sensores, actuadores, entre otros.

Por su parte, la Inteligencia Artificial tiene como fin u objetivo final el desarrollo de entes o entidades con un desempeño igual o mejor al del ser humano, [12], en consecuencia la Inteligencia Artificial se encarga del estudio, modelado, construcción y aplicación de sistemas capaces de ejecutar tareas complejas, caracterizados por la percepción, razonamiento, aprendizaje, comunicación y actuación en ambientes complejos. A través del tiempo, la Inteligencia Artificial ha estudiado la naturaleza de los problemas de razonamiento y ha desarrollado aplicaciones de alto impacto tecnológico en áreas como prueba de teoremas, solución de ecuaciones, búsqueda, planificación, toma de decisiones, juegos, entre otros. Tradicionalmente la Inteligencia Artificial se ha fundamentado en el paradigma simbólico de Allen Newell y Herbert Simon, 1976, bajo el cual se asocia la Inteligencia a la capacidad de razonamiento matemático y al manejo de la lógica abstracta, considerado a la mente como una máquina de procesamiento de información, en donde no interesan los mecanismos biológicos subyacentes.

Aunque durante las décadas de los años 60 a los 80, las teorías e investigaciones en estas áreas de la ciencia y la tecnología promovieron el desarrollo de robots inteligentes, sus enfoques tradicionales no han sido suficientes cuando se exponen problemas surgidos en tópicos de investigación más recientes. Por esta razón a mediados de los 80 surge un paradigma el cual intenta imitar el sustrato emergente de la inteligencia produciendo solamente sus propiedades observables. Se aplica este paradigma para lograr dinámicas y estructuras de alto nivel que tienen la calidad de propiedades emergentes y que son originadas a partir de la totalidad de las interacciones locales ocurridas en el transcurso del tiempo entre componentes de bajo nivel. Como ejemplos de máquinas que pertenecen a esta categoría podemos citar a: las redes neuronales, - inspiradas en los modelos biológicos de las neuronas en el cerebro -, los algoritmos genéticos, - simuladores de la evolución biológica, incluyendo sus mecanismos de reproducción sexual, mutación, selección y supervivencia de los más aptos -, la arquitectura robótica de inclusiones de Rodney Brooks, [5], la vida artificial, la inteligencia colectiva, entre otros.

Desde el año 1956, cuando se produjo la primera patente de un manipulador programable, la Robótica ha generado aportes fundamentales a la industria que han permitido el aumento de la productividad, mejora de la calidad de los productos, realización de trabajos en ambientes hostiles y peligrosos, optimización del rendimiento de las máquinas directamente relacionadas con los robots, implementación de líneas de producción, entre otras. Sin embargo, en tiempos recientes se han producido cambios en las tendencias de desarrollo de la Robótica. Los robots de última generación deben tener capacidad para relacionarse con el mundo exterior, tomar decisiones en tiempo real, adaptando sus planes de acción a las circunstancias exteriores. En consecuencia, se persigue la construcción de un solo robot de elevadas potencialidades y complicados algoritmos, capaz de ejecutar todas las tareas en una misión, pero también se trabaja en la estructuración de conjuntos de robots, - pequeños y simples -, para la ejecución colectiva de tareas.

Es así como ha surgido la Robótica Distribuida, la cual se refiere a sistemas de múltiples robots móviles comprometidos en un comportamiento colectivo, [6], [7], [8], [14]. Se caracteriza porque los robots pueden llevar a cabo tareas que un solo robot no puede lograr, debido a que en última instancia un solo robot, - no importa lo capaz que sea -, es espacialmente limitado. Difieren de otros sistemas distribuidos porque su ambiente implícito es el mundo real, el cual es presumiblemente más difícil de modelar que componentes tradicionales de ambientes de sistemas distribuidos. La robótica distribuida comprende el estudio, construcción y aplicación de sistemas de múltiples robots, sistemas en los cuales, varios robots interactúan persiguiendo algún conjunto de metas o ejecutando algún conjunto de tareas.

Esta nueva tendencia ha dado origen a los minibots, pequeños robots gobernados por un microcontrolador con limitado nivel de programación y acción. Con la inserción de los pequeños robots en la simplicidad y cotidianidad de la vida se espera resolver tareas simples, con rapidez y precisión. Pero, también se espera que estos robots realicen tareas de mayor envergadura: actuar como mascotas y compañeros de juego, operaciones de microcirugía, operaciones militares, simular la vida y comportamiento de los animales, entre otras. Las actividades de investigación por parte de la industria y de las universidades apuntan hacia un futuro inmediato en el cual se observará una intensa aplicación de robots no solamente a gran escala industrial, sino también, en la ejecución de tareas cotidianas.

Hans Moravec, de la Universidad Carnegie Mellon, considera que la construcción de máquinas inteligentes en el futuro cercano es inevitable. En su hipótesis de evolución artificial de la mente, Moravec plantea como el aumento de la capacidad de los procesadores sugiere un desarrollo incremental de los robots inteligentes, de una forma acelerada y probablemente paralela a la evolución de la inteligencia biológica, la cual toma como modelo. Por esta razón titula a su artículo: Robots, Re-Evolución de la Mente, 2000. De cumplirse las predicciones de Moravec, en esta década se tendrá un crecimiento en el mercado industrial, destinado al desarrollo y fabricación de productos de consumo masivo, comenzando por robots mascotas y compañeros de juego, pequeñas aspiradoras y mecanismos de limpieza automáticos, seguidos por robots utilitarios capaces de manipular objetos, abrir puertas, custodiar hogares y oficinas, cortar el césped, entre otras cosas. En algún momento, alrededor del año 2010, aparecerá la primera generación de robots universales, tan grandes como personas pero con cerebro de lagartija, capaces de ejecutar aplicaciones para múltiples tareas diarias y de resolver contingencias explícitamente declaradas en sus programas, pero sin posibilidades de adaptación a las circunstancias variables. Los robots con cerebros de ratón, capacidad de adaptación y entrenamiento, surgirán como la segunda generación de robots universales, - cuando los procesadores alcancen los 100 mil MIPS-, y esta evolución artificial de la mente continuará pasando por los robots con cerebro de mono, - procesadores de 5 millones de MIPS -, hasta alcanzar los robots universales con cerebros semejantes a los de los humanos, cuando los computadores sean capaces de procesar los 100 millones de MIPS.

Partiendo de estos hechos, en esta investigación se diseñaron e implementaron un conjunto de algoritmos para el control de agentes con pequeños cuerpos físicos, - cuyas dimensiones puedan ser expresadas en decenas de centímetros -, con arquitecturas robóticas gobernadas por microcontroladores y con limitados niveles de programación y acción. Los minibots se construyeron usando kits de LEGO, aplicando el método diseñado por Fred Martin en el Media Laboratory de MIT.

## Métodos empleados en el diseño de los algoritmos

La estructura de los agentes desarrollados en este proyecto consta de dos elementos principales: 1) Un programa o conjunto de programas que le permiten establecer una relación entre la secuencia de percepciones y las posibles acciones a ejecutar. 2) Un dispositivo de cómputo que coloca al alcance del conjunto de programas las percepciones, los ejecuta y alimenta los efectores con las acciones elegidas por el conjunto de programas, conforme éstas se van generando.

Los minibots construidos e implementados en este trabajo muestran las siguientes propiedades: 1) Autonomía: capacidad del agente para actuar sin la intervención directa de otras entidades, manteniendo control sobre sus acciones y estado interno. 2) Movilidad: habilidad de moverse. Adicionalmente pueden exhibir al menos una de las siguientes características: 1) Reactividad: percepción del ambiente y respuesta en una forma oportuna a los cambios que ocurren en él. 2) Racionalidad: capacidad del agente de razonar acerca de las percepciones que recibe en busca de la mejor acción, para el logro de sus metas 3) Proactividad: comportamiento dirigido a metas tomando la iniciativa. 4) Sociabilidad: interacción con otros agentes u otras entidades.

De acuerdo a lo definido en [9], los pequeños robots construidos han sido caracterizados por la arquitectura, - esto es la forma como están diseñados -, y por los comportamientos, - las acciones que pueden ejecutar -. En la arquitectura, el punto de vista del diseñador es descrito indicando la forma en que en el agente debe ser ensamblado para que ejecute las acciones esperadas. La arquitectura especifica si el agente posee una representación interna del mundo o simplemente reacciona a los estímulos que percibe, si razona el agente partiendo de los símbolos o son acciones preestablecidas. La arquitectura del agente caracteriza su estructura interna, esto es, el principio de organización que sostiene el arreglo de sus componentes. Por otra parte, el comportamiento especifica las acciones a ser tomadas por el agente y describe las relaciones existentes entre el agente, su ambiente y otros agentes. El comportamiento permite describir el funcionamiento del agente y puede ser analizado sin conocer los detalles de implementación.

Las arquitecturas diseñadas presentaron las siguientes características, [2], [9], [13]: (1) Los comportamientos conforman los bloques de construcción básicos para las acciones de los robots. (2) Evaluadas desde la perspectiva del diseño del software, estas arquitecturas son inherentemente modulares. (3) Las arquitecturas no pudieron suministrar soporte para el paralelismo, debido a las limitaciones del dispositivo de cómputo. Sin embargo, fueron programadas emulando la concurrencia para permitir el paralelismo inherentemente en los sistemas basados en comportamiento. Los dispositivos de cómputo fueron programados en lenguaje C o en lenguaje Java.

Dos tipos de arquitecturas fueron empleadas: (1) Arquitecturas reactivas en las cuales el control acopla la percepción con la acción. (2) Arquitecturas híbridas organizadas en niveles o capas, en las cuales se combinan aspectos deliberativos y reactivos. Los módulos reactivos se encargan de procesar los estímulos que no necesitan razonamiento, mientras que los módulos deliberativos determinan las acciones a realizar para satisfacer los objetivos locales y cooperativos de los agentes. La funcionalidad del agente es dividida en una estructura que contiene dos o más niveles organizados jerárquicamente que interactúan constantemente para que el agente pueda exhibir un comportamiento coherente.

Las arquitecturas híbridas tiene las siguientes ventajas: 1) Permiten construir al agente en base a módulos; cada funcionalidad está bien separada y enlazada por interfaces bien definidas. 2) Los agentes son más robustos y fáciles de depurar. 3) Los agentes son altamente cohesivos y levemente acoplados. 4) Los diferentes niveles pueden ser ejecutados en paralelo, incrementando la capacidad de cómputo del agente en principio por factores lineales. 5) La reactividad del agente puede ser incrementada, mientras está planificando un comportamiento puede estar observando el mundo para situaciones de contingencia. 6) Diferentes tipos y particiones de conocimiento son requeridas para la implementación de funcionalidades diferentes, es posible restringir la cantidad de conocimiento que los niveles individuales necesitan considerar para lograr una decisión

El diseño de los comportamientos fue basado en la etología. Esto es, inspirado en las sociedades biológicas, tales como las sociedades de insectos, o de otros animales. Además fue guiado y restringido por principios biológicos teóricos y prácticos en la clasificación, descomposición, y especificación de comporta-

mientos.

Como las arquitecturas desarrolladas se basaron en comportamientos, [3], [4], [10], [11], la metodología utilizada para especificar las conductas robóticas fue el diseño basado en situaciones: las acciones del robot son predicados a las situaciones en las cuales se encuentra. La percepción reconoce la situación en la cual se encuentra el robot y luego se selecciona una acción a ser tomada. Una estrategia para la aplicación de este método es la siguiente: (1) Se evalúa detalladamente la dinámica agente - ambiente. (2) Se particiona esta dinámica en situaciones. (3) Se crean las respuestas o comportamientos de acuerdo a cada una de las situaciones. (4) Se importan los comportamientos al agente físico. (5) Se realizan las experimentaciones comparando y evaluando los resultados robóticos con cada uno de las situaciones y comportamientos previamente generados. (6) Finalmente, tanto el modelo basado en las situaciones definidas y analizadas, como el robótico pueden ser ampliados o modificados para producir resultados acordes con el comportamiento de las especies en las sociedades biológicas correspondientes.

Los minibots construidos no fueron diseñados para llevar a cabo operaciones que exijan elevadas potencialidades y complejos algoritmos y estuvieron destinados a realizar tareas pequeñas con rapidez y precisión. En consecuencia, sus cuerpos normalmente carecen de una estructura en forma de brazo y su imagen se parece más a la de un vehículo con ruedas.

## Conocimiento y su representación

Los comportamientos deliberativos integrados en una arquitectura híbrida se caracterizan porque contienen un razonamiento que requiere de información o de una representación del mundo, la cual es usada para determinar las acciones del agente. Este modelo contiene conocimiento del mundo real, en contexto con la función del robot y es organizado de tal forma que pueda ser utilizado por el bot en la percepción, en el aprendizaje y/o en la solución de problemas. Además, puede estar disponible en diferentes formas al sistema de control.

Como el uso de conocimiento y sus representaciones ha sido criticado por algunos de los diseñadores de sistemas robóticos basados en comportamientos, dos propiedades fueron empleadas para determinar su utilidad e importancia para los algoritmos desarrollados en esta investigación: (1) El grado de correspondencia de la representación del conocimiento con el ambiente del robot. (2) El poder de predictibilidad del modelo con respecto al mundo real. Las representaciones empleadas no requieren necesariamente de complejas organizaciones y cuantiosos depósitos de información; en algunas cosas son estructuras físicas muy simples en el robot que están correlacionadas con aspectos del mundo y le permiten estimar con cierta anticipación situaciones que puedan presentarse en el ambiente.

El conocimiento empleado por los algoritmos diseñados en este proyecto, puede ser clasificado en dos tipos de acuerdo a su durabilidad: (1) persistente, cuando implica información a priori o información almacenada acerca del mundo del robot que puede ser considerada relativamente estática durante la duración de la misión o de la tarea del robot. Esta información puede referirse a objetos que se espera que el robot encuentre en el desarrollo de su trabajo, modelos de espacio de navegación, modelo del robot y sus intenciones, entre otros. (2) Transitorio, cuando la información es adquirida en forma dinámica, en la medida de que el robot se mueve alrededor del mundo.

## Algoritmos diseñados

### A. Control Reactivo.

Estos algoritmos se caracterizan porque acoplan la percepción con la acción, normalmente en el contexto de los motores, para producir respuestas oportunas en mundos dinámicos no estructurados, Figura 1. En estos sistemas existe un par estímulo - respuesta para las situaciones del ambiente, el cual es modulado por la atención y determinado por la intención. La atención permite dar prioridad a la tarea, enfocando los recursos de percepción y está determinada por el contexto actual del ambiente.

La intención determina cual conjunto de comportamientos debe ser activado basándose en las metas y objetivos internos del agente. El comportamiento global del robot es una consecuencia emergente de la interacción de los comportamientos individuales.

Cuando se implementan estos algoritmos de control, los agentes toman sus decisiones en tiempo de ejecución, basándose usualmente en muy poca información y en reglas simples de situación acción. Algunos desarrolladores de estos algoritmos niegan la necesidad de cualquier representación del mundo: en lugar de ésta, los agentes reactivos toman decisiones basándose directamente en las entradas de los sensores. El enfoque de esta clase de sistema está dirigido hacia el logro de comportamientos robustos en lugar de comportamientos óptimos.

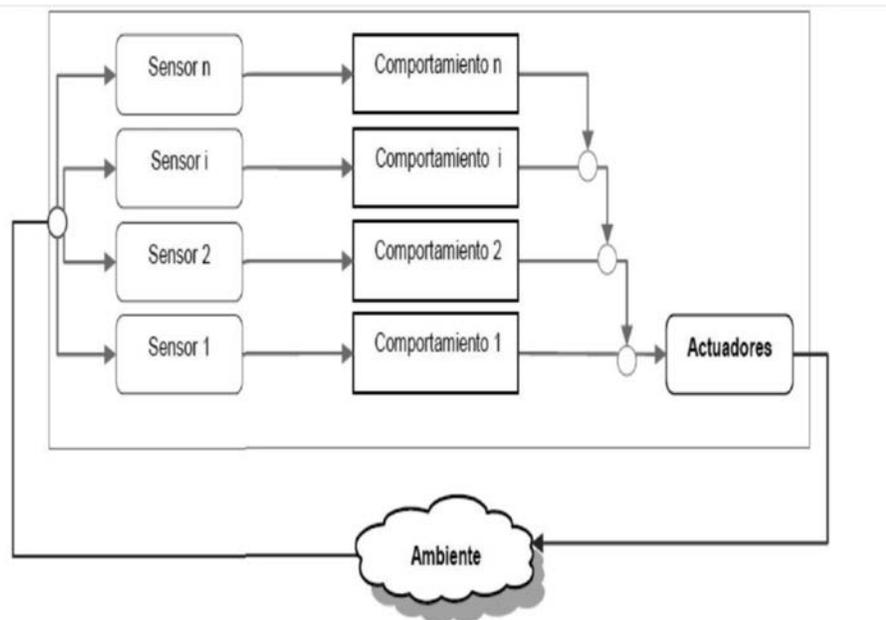


Figura 1: Algoritmo de Control Reactivo

En estos algoritmos se combina el control distribuido en tiempo real con los comportamientos disparados por sensores. En lugar de hacer una evaluación sobre la validez del sensor, o de hacer una conversión del dato de la percepción a una representación interna, usa una estrategia en la cual los sensores son responsables de iniciar los comportamientos. Los comportamientos son estratos o capas de control del sistema que se ejecutan todos en paralelo cuando el sensor apropiado se dispara. Existe una fusión de comportamientos pero no opera una fusión de sensores. Un esquema de prioridades es usado para resolver los comportamientos dominantes en un escenario dado. Para esta arquitectura el modelo estímulo respuesta se descompone en un modelo horizontal, en el cual el comportamiento total del agente emerge del producto o combinación o coordinación de un conjunto comportamientos simples. Cada tarea o comportamiento del agente está representado por un nivel separado. Cada nivel trabaja en sus propias metas, asíncrona y concurrentemente con los otros niveles de la arquitectura. En el nivel más bajo, cada comportamiento está representado por una máquina de estados finitos, la cual encapsula a una función de comportamiento. Cada estímulo o respuesta puede ser suprimido o inhibido por otros comportamientos activos. Cuando se le coloca en el bot en un estado de reinicio o reset, todo el agente y sus comportamientos son retornados a las condiciones iniciales. Cada máquina de estado finito es responsable por su propia percepción del mundo y por la acción correspondiente. No existe en el agente un modelo o una representación del mundo o la representación de un sensor global. Cada percepción de entrada es manejada en su nivel propio y origina su acción.

Este algoritmo de control reactivo puede ser implementado emulando al modelo etológico Bacterias con Fototropismo Positivo.

B. Control con Conocimiento Espacial del Ambiente.

Para solucionar algunos problemas es necesario mantener conocimiento en la memoria del robot sobre la configuración espacial del ambiente en el cual se mueve. Esto es, mantener información sobre el espacio de navegación ocupado por objetos o libre de obstáculos y la estructura física del mundo que rodea al robot, Figura 2.

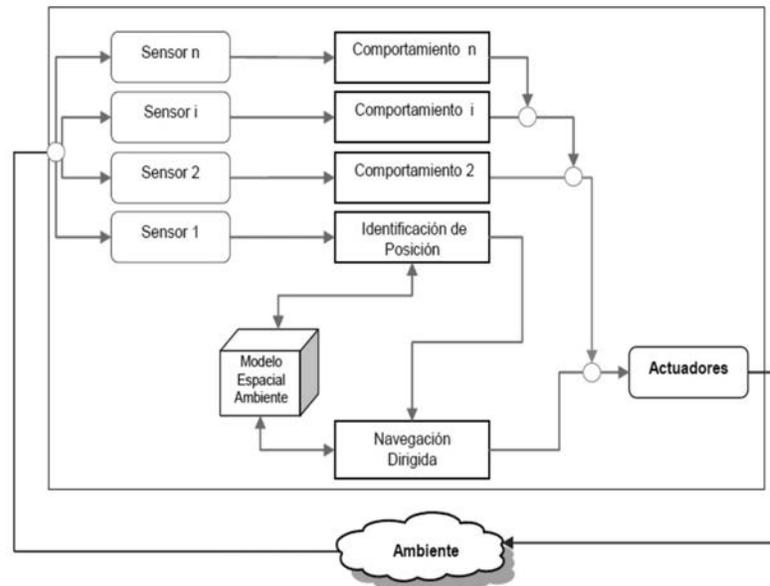


Figura 2: Algoritmo de Control con Conocimiento Espacial del Ambiente

Este conocimiento espacial puede tomar varias formas: (1) cuantitativo o métrico cuando alguna medida es usada para establecer la relación del robot con el mundo. (2) Cualitativo o relacional, cuando la información acerca del mundo es descrita en términos relativos. En los algoritmos diseñados en este proyecto fueron utilizados en particular, dos tipos de representaciones espaciales: basada en hitos y basada en rejillas o celdas. Algunos insectos y aves utilizan mapas cognitivos para forrajear, regresar a sus nichos o nidos, saltar charcos, localizar recursos, evitar obstáculos cercanos recordando su posición, orientación hacia metas ocultas, selección de rutas basándose en distancias relativas, selección de rutas entre lugares encontrados en el pasado, entre otros. El proceso de coordinación usado en estos algoritmos fue del tipo arbitraje por supresión o inhibición de comportamientos. El orden de los comportamientos se establece a través de una jerarquía de prioridades.

Estos algoritmos de control con conocimiento espacial de su ambiente fueron implementados en la solución de dos problemas diferentes: navegación controlada por hitos con intercambio de comportamientos y emulación del modelo etológico presa - predador.

C. Control con conocimiento de objetos en el ambiente y con conocimiento de diferentes tipos de comportamientos a ser desempeñados.

En algunos casos es necesario incorporar a la memoria del robot conocimiento sobre categorías o instancias de tipos de cosas presentes en el ambiente y conocimiento de cuál y cómo desempeñar un comportamiento específico dependiendo del objeto que encuentre en el ambiente, Figura 3.

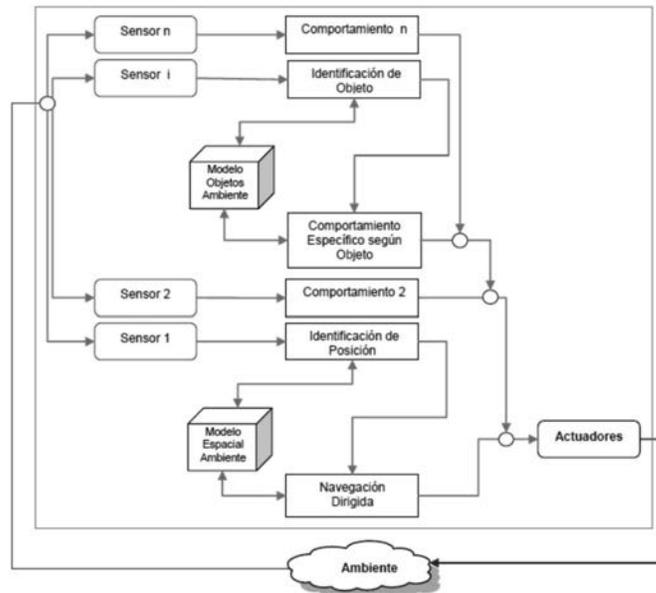


Figura 3: Algoritmo de Control con Conocimiento de Objetos en el Ambiente y con Conocimiento de Diferentes Tipos de Comportamientos a Ser Desempeñados

Esta información puede estar relacionada con representaciones funcionales sin necesidad de usar modelos geométricos o estructuras. Puede corresponder a percepciones de sensores específicos, a movimientos particulares o exploratorios, entre otros. El proceso de coordinación usado en estos algoritmos fue arbitraje por supresión o inhibición de comportamientos, con jerarquía de ejecución para los comportamientos.

Un ejemplo de este tipo de algoritmo de control es el implementado en la emulación del modelo etológico presa - predador. En este algoritmo la lectura de ciertos sensores estuvo asociada a la identificación de la especie y se definieron un conjunto de comportamientos los cuales dependían tanto de la identidad del ejemplar, como de la especie u objeto con el se encontraban en el ambiente durante la ejecución de su misión.

#### D. Control con Conocimiento de la Intención del Robot.

En estos algoritmos se incorpora al minibot conocimiento sobre las intenciones del agente y acciones a ser desarrolladas en el ambiente de acuerdo al plan de acción o en orden de lograr sus objetivos y metas, Figura 4.

Las acciones a ser ejecutadas por los minibots fueron ensambladas en una arquitectura de comportamientos basada en un pizarrón. Este tablero estuvo emulado en una memoria global, en la cual se registró la información concerniente a todos los sensores del robot y podía ser accedida por los diferentes módulos del sistema. Dependiendo de la percepción, esto es del estado de los sensores, se determinaba el comportamiento a ser ejecutado. La coordinación en la ejecución se logró a través de una supresión o inhibición.

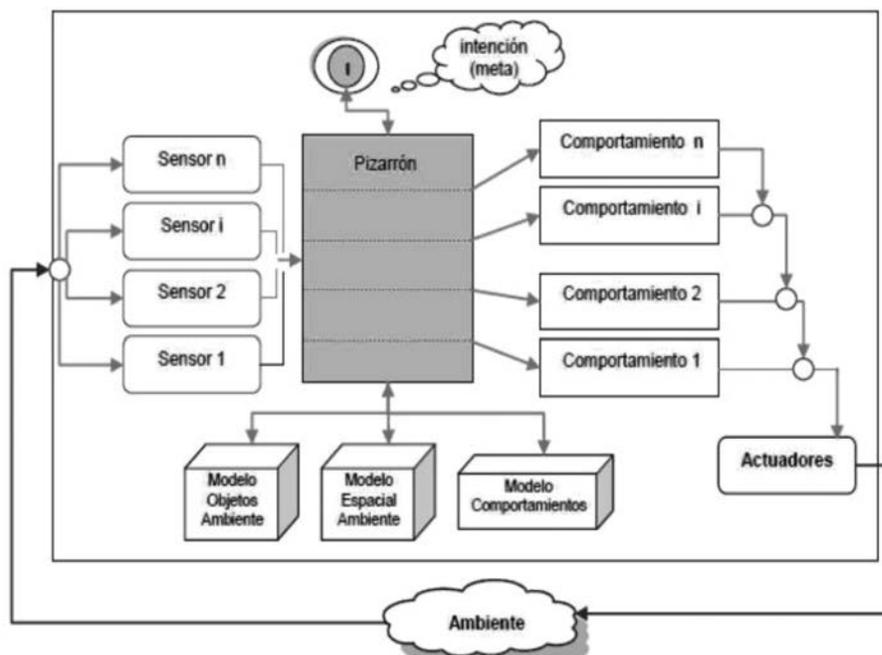


Figura 4: Algoritmo de Control con Conocimiento del Robot

Este algoritmo de control pudo ser implementado emulando al modelo etológico de Recolección de Huevos de Pascua.

## Conclusiones

Este trabajo de investigación se desarrolló en el contexto de la Robótica Distribuida. Su aporte fundamental es la proposición, diseño e implementación de algoritmos para el control de uno o más pequeños robots, -Minibots-, mediante los cuales los pequeños robots pueden exhibir tanto comportamientos previamente definidos y especificados, como comportamientos completamente emergentes. Los algoritmos formulados y desarrollados para los diferentes procesos se caracterizan por la aplicación de métodos y técnicas, clasificados dentro de la Robótica basada en Comportamientos.

Los minibots se construyeron usando kits de LEGO. Cada uno de ellos es autónomo, móvil y es capaz de exhibir al menos una de las siguientes propiedades: reactividad, racionalidad, proactividad, sociabilidad.

Las arquitecturas diseñadas presentaron las siguientes características: (1) Los comportamientos conforman los bloques de construcción básicos para las acciones de los robots. (2) Evaluadas desde la perspectiva del diseño del software, estas arquitecturas son inherentemente modulares. (3) Las arquitecturas no pudieron suministrar soporte para el paralelismo, debido a las limitaciones del dispositivo de cómputo. Sin embargo fueron programadas emulando la concurrencia para permitir el paralelismo inherentemente en los sistemas basados en comportamiento. Los dispositivos de cómputo fueron programados en lenguaje C o en lenguaje Java.

Una controversia significativa se ha desarrollado a través de los años sobre la pertinencia y la conveniencia de incorporar conocimiento a los sistemas robóticos. Para describir este conflicto de una manera bastante simple se puede decir que los diseñadores de robots pertenecientes a la línea de robótica basada en comportamientos indican que el uso de representaciones simbólicas del conocimiento es un impedimento para el control eficiente y efectivo de los robots, mientras que otros argumentan que formas robustas de

representación el conocimiento son necesarias para que el robot pueda ejecutar tareas cuya complejidad esté por arriba del nivel de las formas de vida más simples. En los resultados alcanzados durante en el diseño e implementación de los algoritmos de control de esta investigación se encontró que cuando el minibot debe ejecutar tareas simples, la arquitectura reactiva es la más conveniente, eficiente y efectiva. Sin embargo, cuando el robot debe desarrollar tareas de complejidad mediana o mayor, se requiere de arquitecturas híbridas que permitan la incorporación de procesos deliberativos, los cuales requieren de un conocimiento, aunque éste sea expresado en un modelo muy simple. En consecuencia, los resultados encontrados favorecen al segundo de los argumentos.

## Referencias

- [1] Arkin, R. (2001). Integrating Behavioral, Perceptual, and World Knowledge in Reactive Navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 6, 105-22.
- [2] Arkin, R. (1998). *Behavior-Based Robotics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [3] Balch, T., Arkin, R. (1998). Behavior Based Formation Control for Multirobot Teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), 926-939.
- [4] Beckers, R., Holland, O., Deneubourg, J. (1994). From Local Actions to Global Tasks: Stigmergy and Collective Robotics. En R. Brooks, P. Maes (Eds.), *Artificial Life IV: Proceedings of Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, (pp. 181-189). Cambridge, MA: MIT Press.
- [5] Brooks, R. (1986). A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1), 14-23.
- [6] Cao, Y., Fukunaga, A., Kahng, A. (1997). Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*, 4, 1-23.
- [7] Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E., Wilkes, D. (1996). A Taxonomy for MultiAgent Robotics. *Autonomous Robots*, 3, 375-397.
- [8] Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E. (2002). A Taxonomy of MultiRobot Systems. En T. Balch, L. Parker (Eds.), *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*. Natick, MA: A K Peters.
- [9] Ferber, J. (1999). *MultiAgent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Harlow, England: Addison Wesley.
- [10] Holland, O., Melhuish, C. (1999). Stigmergy, Self-Organisation, and Sorting in Collective Robotics. *Artificial Life*, 5(2), 173-202.
- [11] Jung, D., Zelinsky, A. (2000). Grounded Symbolic Communication between Heterogeneous Cooperating Robots. *Autonomous Robots Journal*, 8(3), 269-292.
- [12] Nilsson, N. (1998). *Artificial Intelligence*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- [13] Parker, L. (1998). ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant Multirobot Cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(2), 220-240.
- [14] Parker, L. (2000). Current State of the Art in Distributed Robot Systems. En L. Parker, G. Bekey, J. Barhen (Eds.). *Distributed Autonomous Robotic Systems 4*. (pp. 3-12). Heidelberg: Springer Verlag.