

La robótica como herramienta para la educación

Orazio Miglino #* , Henrik Hautop Lund § , Maurizio Cardaci*

*Institute of Psychology, National Research Council and Faculty of Psychology, II University of Naples, Italy

Dirección: Insitute of Psychology, National Research Council, Viale Marx 15, 00145 Rome, Italy. Tel: (39) 06 86090227, Fax: (39) 06 824737, e-mail:

orazio@caio.irmkant.rm.cnr.it, <http://gracco.irmkant.rm.cnr.it/orazio>

§ LEGO Lab, InterMedia, Department of Computer Science, Aarhus University, Denmark

Dirección: Computer Science Department, Aarhus University, Ny Munkegade, 8000, Aarhus, Denmark. Tel.: (+45) 89 42 32 63, fax : (+45) 89 42 32 55, e-mail

hhl@daimi.aau.dk, <http://www.daimi.aau.dk/~hhl/>

*Cognitive Science Group, Department of Psychology, University of Palermo, Italy

Dirección: Department of Psychology, University of Palermo, 90133 Palermo, Italy. Tel. and fax: (39) 091 485738, e-mail: cardaci@inbox.unipa.it

RESUMEN

Este documento explora una nueva aplicación de las teorías de Piaget del desarrollo cognitivo, es decir, el uso, como herramienta de enseñanza, de robots físicos concebidos como organismos artificiales. Utilizando sencillos kits de ensamblaje, los estudiantes de todos los niveles son capaces de proyectar y construir robots reales que simulan comportamientos de los animales. El proceso de construcción de robots reales ayuda al alumnos y alumnas a comprender conceptos relacionados con sistemas dinámicos complejos –en particular cómo emerge un comportamiento global a partir de dinámicas locales. Esto es hecho mediante procesos de construcción. Con el objetivo de obtener el comportamiento deseado el estudiante modifica la “mente” y el cuerpo del organismo artificial. La construcción de poblaciones de organismos artificiales ayuda al estudiante a diferenciar entre los comportamientos observados a nivel individual (nivel microscópico) y a nivel de población (macroscópico). El desarrollo de una población de robots con el comportamiento deseado es un proceso evolutivo. La reproducción selectiva de una población de robots es una eficaz herramienta para explicar la teoría de la evolución de Darwin: experimentando con organismos artificiales –opuestos a los biológicos– es posible observar rápidamente los resultados de la selección, reproducción y mutación. En este documento se presentan varios proyectos educativos utilizando robots reales. Muestra que el uso de sistemas inteligentes para ampliar nuestra visión de la realidad biológica podría convertirse en una parte del currículo de ciencias, tecnología, psicología y biología.

Para aparecer en *Journal of Interactive Learning Research*.

ORGANISMOS ARTIFICIALES EN LA EDUCACIÓN

Durante la última década investigadores e industrias han propuesto y desarrollado cierto número de kits para la construcción de robots, diseñados para estimular el aprendizaje de conceptos y métodos relativos a la educación de estudiantes en contenidos científicos tales como matemáticas, física, informática y mecánica. Los kits incluyen pequeños motores, sencillos sensores, ruedas, engranajes, poleas y relés –todo aquello que el alumno puede necesitar para construir robots. Productos como LEGO Dacta y LEGO CyberMaster incluyen cables o equipamientos de radio que posibilitan conectar el robot con un ordenador personal. Esto permite al usuario controlar el invento. Recientemente ha sido desarrollado el producto LEGO Mindstorms que permite al usuario construir robots autónomos con toda la capacidad de control localizada en el interior de la máquina.

Estos kits han sido desarrollados de acuerdo a los principios educativos derivados de las teorías del desarrollo cognitivo de Jean Piaget (1966) revisados por Seymour Papert (1980-1986). Este enfoque indica que en el centro todo proceso de aprendizaje es el papel activo de quien aprende el que amplía su conocimiento a través de la manipulación y construcción de objetos. Esta filosofía sugiere que la tradicional construcción de kits es muy adecuada como herramienta de aprendizaje. Sin embargo, dar vida a un objeto por medio de la interacción con un ordenador personal hace posible desarrollar aplicaciones que van más allá de la idea original de los primeros que propusieron esta metodología. Precisamente, cierto número de grupos de investigación ha construido pequeñas máquinas móviles que simulan comportamientos de animales reales. Semejantes prototipos son esencialmente robots móviles que como los animales reales tienen un aparato sensorial (por ejemplo, sensores sensibles a la luz o el calor), un sistema motor (tales como brazos mecánicos o ruedas controladas por motores) y un cerebro (representado por un programa de ordenador que controla el sistema motor utilizando la información del aparato sensorial). Estas máquinas pueden ser consideradas como *Organismos Artificiales* y ser usadas a la vez con propósitos educativos y en investigación básica en campos como la psicología, etología y robótica.

ORGANISMOS ARTIFICIALES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS DE LA EDUCACIÓN

Los organismos artificiales y la comprensión de la complejidad

Las moléculas de un gas en el interior de un gasómetro, los códigos genéticos de los seres vivos, el cerebro de un organismo, las abejas en una colmena y las comunidades humanas son todos ellos ejemplos de *sistemas dinámicos complejos*. Se dice que un sistema es *complejo* cuando está constituido por diferentes elementos que interactúan entre sí. Es *dinámico* cuando las leyes de la interacción entre los diferentes elementos producen macroefectos que varían en el tiempo.

El interés científico en la complejidad ha producido algo más que simple conocimiento tecnológico; ya que ha generado un nuevo camino de observación e interpretación de la realidad. Este está basado en el saber que en un sistema complejo cada elemento interactúa con los otros elementos y que, por consiguiente, cualquier acción de un componente influye en el comportamiento de los otros componentes. Un comportamiento global resultante emerge de las dinámicas locales afectando a subsistemas específicos. Las perturbaciones exteriores o modificaciones en la interacción de los principios que gobiernan la actividad de los componentes del sistema conducen a cambios

en estas dinámicas locales. Estas son reguladas por leyes no lineales. Pequeñas fluctuaciones aleatorias en el comportamiento de un componente individual pueden generar grandes cambios en el comportamiento global. Sin embargo, al mismo tiempo perturbaciones importantes pueden ser eventualmente absorbidas, dejando el estado del sistema inalterado. Consecuentemente, para estudiar sistemas dinámicos complejos, han de ser considerados tanto los comportamientos a nivel microscópico (el comportamiento de un componente individual) como a nivel macroscópico (el colectivo, comportamiento global producido por la interacción de todos los componentes).

Trasladar este nuevo modo de percepción de la realidad a los niños, o en general, a personas ajenas a la investigación científica, requiere nuevas herramientas de enseñanza. La importancia de esta tarea es evidente: no estamos hablando de nuevas nociones o conceptos, sino que de nuevos modos de observación y razonamiento que puedan ayudar a las personas a evaluar con más atención la realidad en la que viven.

Mitchel Resnick (Media Lab, MIT) ha desarrollado una metodología de enseñanza que facilita la enseñanza de conceptos esenciales para la comprensión de sistemas complejos dinámicos (Resnick, 1988, 1989, 1994; Kafai&Resnick, 1996). Este trabajo es una parte importante del origen de LEGO MindStorms (ver apéndice A).

Resnick propone a un grupo de trabajo de alumnos y alumnas que construya “organismos artificiales”. El grupo sigue un preciso plan de construcción, pero tiene la libertad de introducir variantes. Un ejemplo concreto del potencial de esta propuesta puede ser aquel que se basa en experiencias en las que a un grupo de niños y niñas se le pide que construya un organismo artificial que tenga la capacidad de moverse hacia una fuente de luz.

En la primera fase de esta experiencia hay que construir el cuerpo de la máquina, es decir, construir la estructura del robot, decidir que tipo de sensores se van a utilizar y cuantos debería tener, y definir el aparato motor (eligiendo ruedas, poleas, correas de transmisión o piernas artificiales). Una estructura sencilla para un robot móvil puede comprender una caja montada sobre dos ruedas con un sensor en el frente. Cada rueda está controlada por un motor eléctrico. En el diseño más sencillo, el motor puede ser puesto en marcha y en consecuencia provocar el movimiento de avance de la rueda, o desconectado, en cuyo caso no generará movimiento. De este modo un robot con dos motores independientes, conectados cada uno a una rueda, puede producir 4 tipos de acción: avance (cuando los dos motores están en marcha), giro a derecha o izquierda (cuando un motor está en marcha y el otro no) o reposo (cuando los dos motores están parados simultáneamente). Las características de los sensores son tales que la activación es directamente proporcional a la distancia que separa el sensor de la fuente de luz.

Una vez construido el cuerpo del organismo artificial, los alumnos han de darle una mente. En esta fase, los alumnos programan el comportamiento del robot por medio del ordenador. Si desean un comportamiento de “acercamiento a la luz”, los alumnos han de escribir procedimientos en los que la activación de los motores esté en función de la intensidad de luz percibida por los sensores. En este punto surge el debate: ¿Cómo puede un organismo artificial con un solo sensor moverse hacia la fuente de estimulación?

Normalmente el niño se da cuenta que, como en la vida real con organismos vivos, hay dos diferentes soluciones para el problema. En una de las soluciones (a) el robot lee la intensidad de luz percibida por el sensor en dos momentos diferentes; si la intensidad de luz

en el momento 1 es inferior a la intensidad del momento 2, el robot se está moviendo hacia la luz y la acción correcta será seguir adelante. Una segunda solución (b) puede ser añadir un segundo sensor de luz en la parte trasera del organismo artificial, de este modo, si la lectura del sensor delantero es superior a la del trasero, la acción correcta será seguir hacia delante.

En este punto del proceso, el instructor sugiere soluciones alternativas, advirtiendo que la solución (a) requiere “memoria”, es decir, un cambio en el “cerebro” del robot, mientras que la (b) requiere una modificación estructural, es decir, un cambio en el “cuerpo” del robot.

En una segunda experiencia se pide a los niños que construyan una población de organismos artificiales y observen sus comportamientos a nivel individual (microscópico) y a nivel colectivo (macroscópico). La población consiste en dos tipos diferentes de organismos artificiales: una categoría de robots es programada para moverse hacia las fuentes de luz, mientras que la segunda categoría de robots está programada para alejarse de todo tipo de luz. De este modo, cada individuo tendrá un comportamiento bastante simple. No obstante, si colocamos una pequeña lámpara en la “cabeza” de cada organismo el comportamiento cambia –de interesantes maneras. Esto puede conducir a una de las dos pautas de comportamiento del conjunto de la población. En la pauta (a) se observa que si las dos categorías de robots se hayan inicialmente separadas en diferentes regiones del espacio, los organismos que son atraídos por la luz tienden a agruparse, tropezarse y concentrarse en una muy pequeña área; por otra parte, los robots que tienden a evitar la luz se dispersan a través del entorno hasta que cada individuo se encuentra a una distancia de seguridad de todo el resto de robots. En la pauta (b) no hay separación inicial; esto implica que un individuo perteneciente a una categoría puede interactuar con individuos de la otra categoría; en este caso se observan complicadas pautas de huidas y persecuciones. Entre las pautas (a) y (b) existe un gran número de soluciones intermedias.

Experimentos prácticos como este ayudan a los estudiantes a asimilar conceptos que de otra manera serían abstractos y confusos. Los niños asimilan nociones de dinámica y complejidad a través de la construcción de sistemas compuestos por varios componentes de hardware y software. Aprenden a estudiar la realidad desde diferentes puntos de vista (es decir, en diferentes niveles de análisis) observando el comportamiento de robots individuales y el comportamiento global que emerge de la interacción entre estos individuos.

Organismos artificiales en cursos para graduados y no graduados

Se ha observado que ingenieros licenciados a menudo tienen un excelente conocimiento de los conceptos teóricos fundamentales en su disciplina, pero insuficiente experiencia en el diseño y construcción de prototipos industriales.

Durante los cuatro últimos años, Fred Martin del MIT ha organizado un curso sobre “Diseño y Construcción de Robots LEGO” (Martín, 1994, 1996), con el objeto básico de estimular las capacidades de diseño y desarrollo en jóvenes estudiantes de ingeniería. Los estudiantes participantes en esta experiencia fueron divididos en pequeños grupos de trabajo que se dedicaron a tareas de diseño y construcción de robots móviles para resolver problemas planteados por el profesor (por ejemplo, moverse de un lugar a otro mientras evita obstáculos de distintas formas y dimensiones). Al final del curso los prototipos construidos por los alumnos participaron en una competición y el grupo que produjo el

robot más eficiente ganó un premio. El concurso se ha convertido en un acontecimiento anual en el MIT, produciendo un fuerte interés y entusiasmo en toda la comunidad científica del MIT.

El Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad de Edimburgo también utiliza competiciones de robots como parte de su currículo. En su curso “Inteligencia y control sensorial”, John Hallam da una conferencia sobre inteligencia artificial aplicada a la robótica. Los estudiantes disponen del “Edinburgh brain brick” (ladrillo inteligente Edimburgo), semejante al ladrillo programable del MIT, para controlar sus LEGO robots. Las competiciones incluyen lucha sumo y rugby entre robots.

En el Departamento de Informática de la Universidad Aarhus también usamos las competiciones de robots en cursos para licenciados de *Robots Adaptativos* y *Modelado de Robots*. En las diferentes competiciones, los estudiantes disponen de un robot móvil miniatura Khepera; o bien ellos construyen sus propios robots LEGO MindStorms. Las competiciones incluyen el Campeonato de Dinamarca de fútbol con robots. Construir un robot permite a los alumnos de informática aprender sobre las aplicaciones en el mundo real. En los cursos tradicionales de informática pocas veces se enseña a los alumnos sobre las indeterminaciones de la interacción en el mundo real; de hecho, a menudo intentan abstraerse a partir del mundo real, y construyen sistemas completamente deterministas. Esto puede generar problemas cuando informáticos deben posteriormente diseñar y/o programar sistemas de control para el mundo real.



Figura 1. Foto de uno de los torneos de fútbol (Copyright 1998. H. H. Lund)

Mientras diseñan robots jugadores de fútbol, los estudiantes de informática incurren siempre en cierto número de errores, normalmente debidos a una irreal percepción de las capacidades reales de sus robots. Estos problemas son a menudo debidos a que los estudiantes yerran al ver el robot desde su propio punto de vista, ya que confían en abstracciones poco realistas en las que han sido adiestrados a lo largo de su educación. Por medio de la experimentación con sensores, motores y control, los estudiantes modifican gradualmente su percepción de la interacción entre el robot y el mundo real, modificando continuamente sus diseños hasta convertirlo en uno realista.

Según Fred Martín, el éxito de este tipo de experimento educativo es parcialmente debido a la facilidad del ensamblaje de los kits de construcción disponibles en el mercado. Los kits de construcción disponibles permiten a los estudiantes encontrar soluciones sencillas a problemas físicos. Los estudiantes adquieren una comprensión profunda de las discrepancias entre los resultados pronosticados en la fase de diseño y los realmente producidos por sus máquinas, aprendiendo a reducir esta discrepancia durante el diseño y construcción. De este modo, los estudiantes llegan a familiarizarse con la relación circular entre la teoría y la práctica, lo que es fundamental para la innovación tecnológica.

La robótica en la escuela superior¹

En el LEGO Lab de la Universidad Aarhus, hemos utilizado robots con estudiantes de escuelas superiores en varias ocasiones. Recientemente, hemos organizado la 1ª Liga LEGO como proyecto piloto para varias escuelas superiores danesas. La edad del alumnado estaba comprendida entre 12 y 14 años. Cada clase estaba provista de cuatro equipos LEGO MindStorms. Los estudiantes trabajaban en grupos de 4 ó 5, planificando, diseñando y programando sus propios robots para participar en la competición. La tarea fue enfocada a la construcción de un robot que pudiese navegar rápidamente por un terreno con caminos negros en el suelo, rampas, pequeños obstáculos, etc. Se premiaba el robot mejor conseguido, así como el más bonito y el más intrépido.



Figura 2. Robot simulando un Pacman real. (Copyright 1998. H. H. Lund)

El proyecto piloto Liga LEGO se organizó para un corto periodo de un par de meses en otoño de 1998. Durante este tiempo las clases trabajaron intensamente en el proyecto. Comenzaron sin saber nada, o muy poco, sobre robótica, y poco sobre programación (ninguno conocía el lenguaje de programación gráfica MindStorms antes de que el proyecto comenzara). Pero a base de entusiasmo y ayuda de sus tutores, los alumnos lograron completar el trabajo y tener un bien realizado robot preparado para la final. Tanto chicos como chicas se implicaron completamente en el proyecto. Por ejemplo, un grupo de chicas

¹ Utilizamos aquí el término inglés de escuela superior, aunque no en el sentido de escuela superior en el sentido danés, sino que de escuelas con alumnado de edad entre 6 y 15 años.

decidió construir un novio y una novia que debían juntarse. Tras dedicar un gran esfuerzo a la estética, querían dar una especial funcionalidad a los robots. De este modo, llegaron a interesarse en la programación e incluso a programar robots, a pesar de que inicialmente ellas consultaban a los chicos cuando el tipo de trabajo así lo requería.

ORGANISMOS ARTIFICIALES E INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA BÁSICA

Vehículos Braitenberg

Alrededor de 10 años antes, Valentino Braitenberg, uno de los pioneros de la cibernética, publicó un pequeño, pero interesante libro titulado “Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology” (Braitenberg, 1984). En el libro propone –como una provocación– que puede ser posible llegar a comprender varias cuestiones de investigación psicológica por medio de la construcción de pequeños robots móviles que se comporten como si poseyeran un estado mental sofisticado. En el folleto, Braitenberg describe varios experimentos en los que pequeños vehículos de complejidad gradualmente creciente son construidos con sencillos componentes mecánicos y eléctricos. Cada una de estas máquinas imita de algún modo un comportamiento inteligente; a cada una se le ha asignado un nombre que se corresponde con el comportamiento que imita. Es importante enfatizar que en realidad Braitenberg nunca construyó robots reales, sino que se limitó a diseñar y describir los robots por escrito. Él denomina esta metodología *Sicología Sintética*. Lo que Braitenberg muestra con este trabajo es que, a pesar de sus simples mecanismos, sus máquinas (vehículos) muestran comportamientos que un observador externo podría clasificar como producto de estados mentales tales como temor, vergüenza, indecisión, paranoia, etc. A pesar de que las ideas de Braitenberg han generado polémica, es innegable que han tenido un fuerte impacto en la investigación básica, inspirando una amplia gama de diferentes estudios.

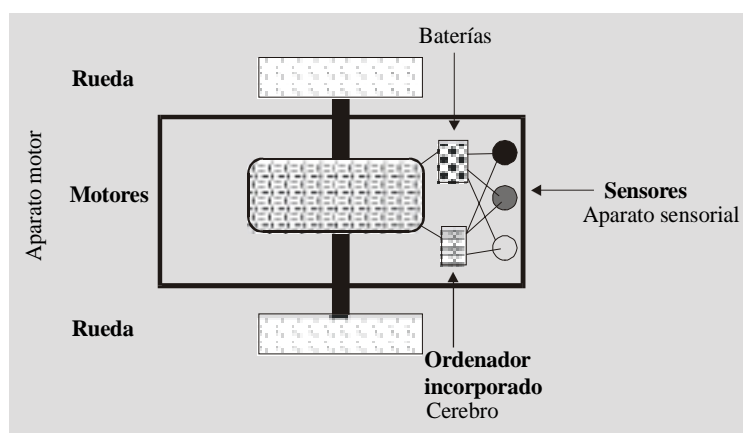


Figura 3. Configuración general del hardware de un vehículo Braitenberg

Utilizando un kit especial de ladrillos programables, David Hogg, Fred Martín y Mitchell Resnick (Media Lab, MIT) han construido las partes principales de los vehículos Braitenberg (Hogg, Martin & Resnick, 1991). Lund y Miglino (1995) han producido las mismas series de vehículos Braitenberg utilizando la estructura básica de hardware presentada en la figura 3.

Tímido (el buscasonombra). El robot tiene un sensor que percibe la intensidad de luz. El vehículo avanza si la iluminación de su entorno supera un umbral predefinido, parando si encuentra una zona oscura (véase la figura 4). A pesar de la simplicidad de este comportamiento, un observador normalmente atribuiría sofisticados estados mentales al organismo (por ejemplo “busca la sombra”, “se esconde”, etc).

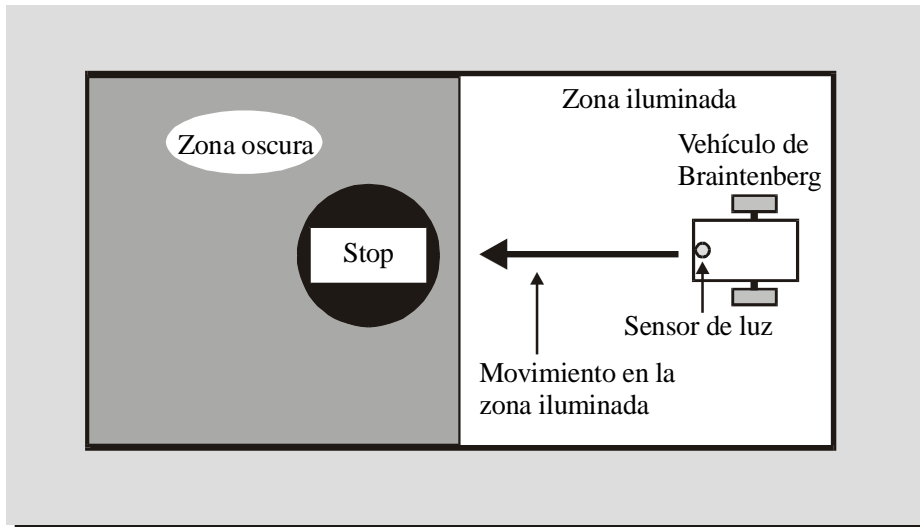


Figura 4. Tímido

Indeciso (buscador del límite de la sombra). Esta máquina tiene la misma estructura de hardware que el “tímido” con la diferencia que cuando llega a la zona de sombra, en lugar de detenerse invierte la dirección del movimiento. Cuando se encuentra al lado del borde entre la zona bien iluminada y la mal iluminada, comienza a moverse hacia delante y atrás, dando la impresión de que está “indeciso” (ver figura 5).

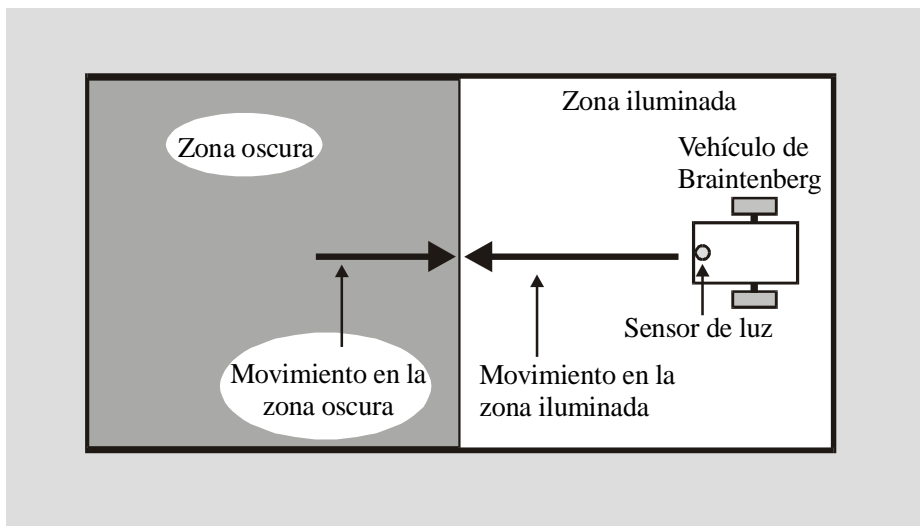


Figura 5. Indeciso

Paranoico (robot temeroso de las oscuridad). La estructura de este robot es idéntica a la de los anteriormente descritos. No obstante, cuando el paranoico entra en la zona de oscuridad modifica su trayectoria y gira a izquierda o derecha con el objeto de volver a la zona bien iluminada.

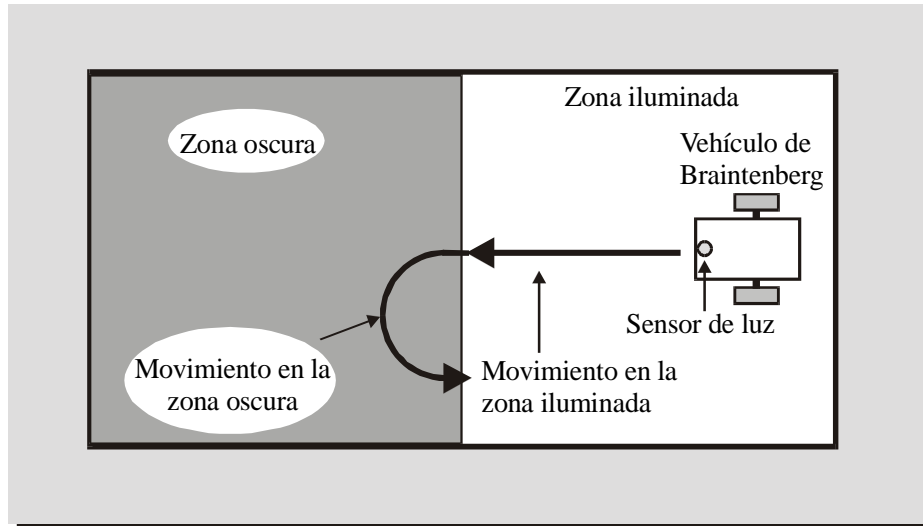


Figura 6. Paranoico

Obstinado (el esquivador de obstáculos). El aparato sensorial de este vehículo está formado por dos sensores (parachoques), sensibles al contacto con objetos. Los dos sensores están colocados en la parte delantera y trasera del vehículo respectivamente. El vehículo se mueve hacia atrás si toca un obstáculo con el sensor frontal, y hacia delante si toca un obstáculo con el sensor trasero (véase la figura 7).

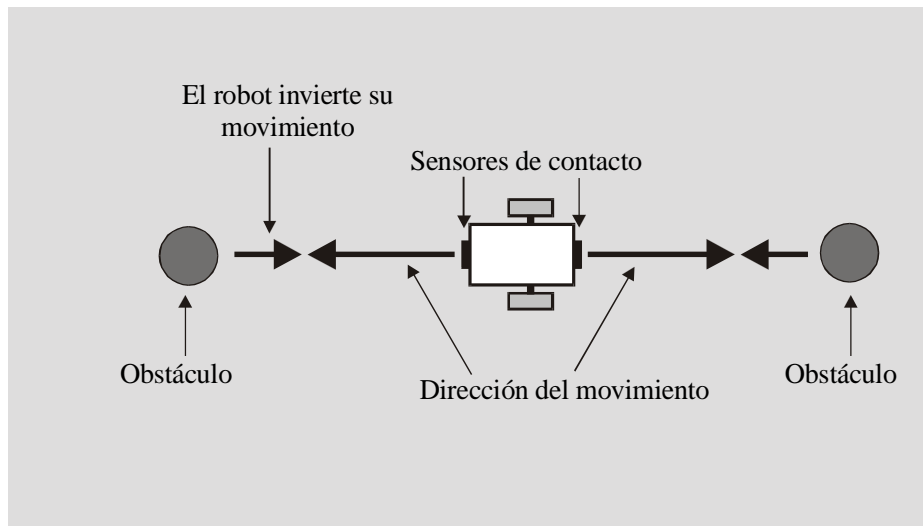


Figura 7. Obstinado

Conductor (el buscador de luz). Un sensor está colocado en el frente del robot. El sensor es sensible a la diferencia de intensidad de luz entre la que proviene de la izquierda y la que proviene de la derecha. El vehículo gira a la derecha si la mayor intensidad de luz proviene de la derecha, en caso contrario gira a la izquierda. Si no hay diferencia en la intensidad de luz, se mueve hacia delante. Estas simples reglas permiten al vehículo maniobrar hacia la fuente de luz, provocando una trayectoria en zig-zag (véase figura 8).

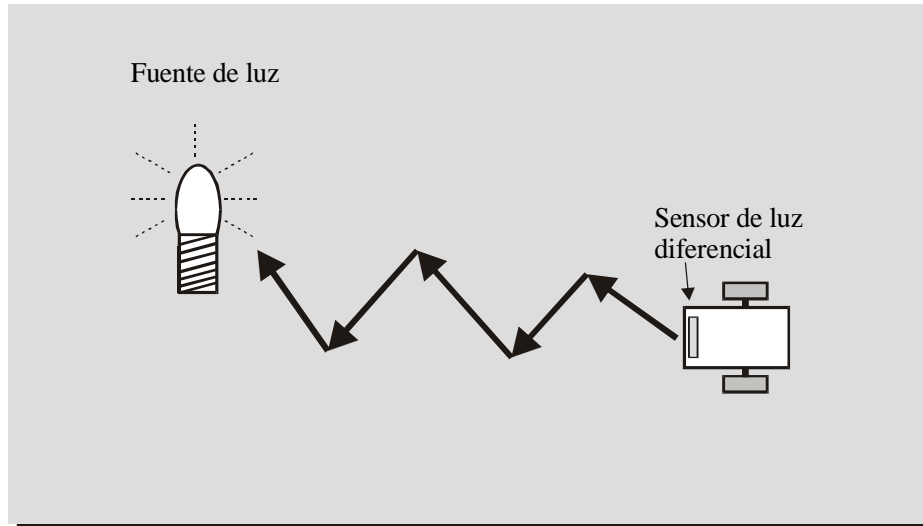


Figura 8. Conductor

Atractivo y repulsivo (perseguidor y perseguido). Este experimento utiliza dos vehículos Braitenberg. “Atractivo” es un organismo artificial con un sensor de luz montado en su parte trasera. Cuando la luz ambiente supera un umbral previamente definido, el vehículo avanza rápidamente; en caso contrario se queda parado. “Repulsivo” tiene una pequeña lámpara en el frente; cuando avanza lo hace de despacio y sin interrupción.

Imagínese que “Atractivo” y “Repulsivo” se encuentran sobre una línea recta con “Atractivo” a una considerable distancia de “Repulsivo”. Inicialmente, “Atractivo” está parado mientras “Repulsivo” comienza a avanzar lentamente. Cuando “Repulsivo” se acerca hasta una distancia en la que el sensor de luz de “Atractivo” se activa, “Atractivo” se desplaza con un rápido movimiento de avance. En este momento, se puede observar una persecución (véase figura 9) caracterizada por una lenta aproximación (de “Repulsivo”) y una rápida huida (de “Atractivo”).

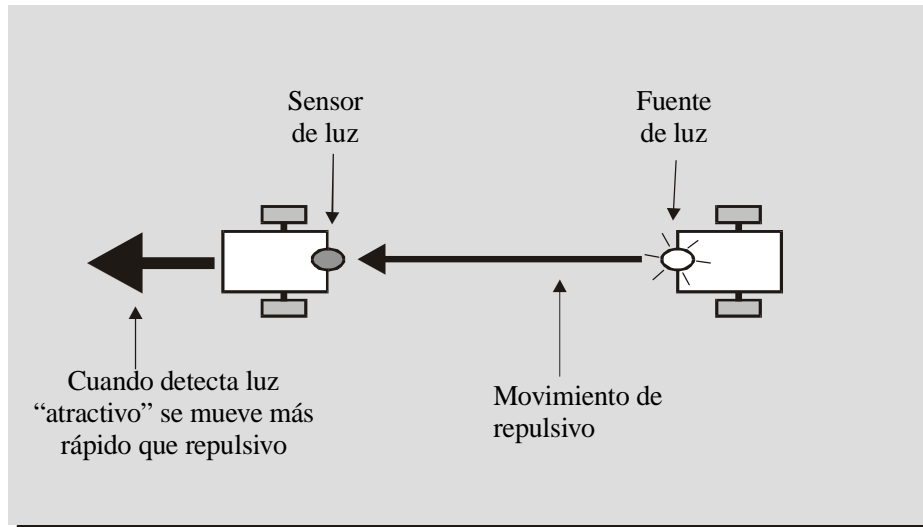


Figura 9. Atractivo y repulsivo

Un organismo artificial que simula el comportamiento grillo

En el Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad de Edimburgo hemos investigado organismos artificiales en colaboración con Barbara Webb, la psicóloga de animales, y John Hallam. El resultado de este trabajo ha sido presentado en *Science*² (Bains, 1994). *Robotic experiments in cricket phonotaxis* se dirige a aclarar el enmarañado comportamiento del grillo. En especial, hemos investigado el modo en que la hembra de estos insectos busca al macho a partir de las llamadas realizadas por él. Lo curioso de este caso es que el comportamiento observado aparentemente requiere complejas capacidades mentales: la hembra ha de reconocer e identificar el sonido del grillo macho entre todos los sonidos presentes en el entorno, entonces ella ha de maniobrar eficientemente hacia el lugar del que proviene el sonido. La tarea es más complicada por el hecho de que el sonido del grillo macho no es continuo, sino que se compone de "sílabas", es decir, sonidos cortos, repetidos en intervalos regulares. La cuestión polémica es si la grillo hembra localiza su pareja gracias a una representación mental compleja de variables relevantes del problema o por un simple comportamiento reflejo. Nuestros experimentos con organismos artificiales sugieren que la segunda hipótesis es, en efecto, una posibilidad real. Esta idea ha sido validada con la construcción de un pequeño robot con reacciones muy similares a las del insecto.

² En "Investigación y Ciencia" de febrero de 1997 Barbara Webb publicó el artículo "Un grillo robot"(Nota del traductor)

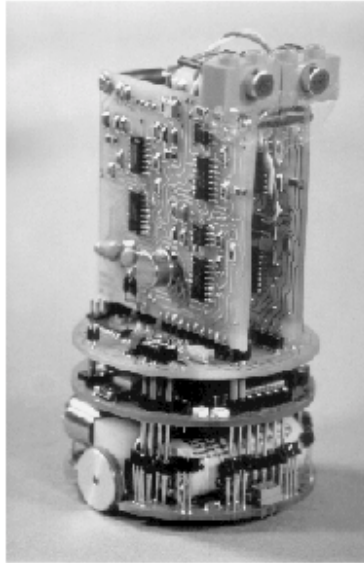


Figura 10. El grillo robot que ha sido utilizado en experimentos de robótica en phonotaxis de grillos (Copyright 1997 H. H. Lund)

El organismo artificial tiene dos ruedas, cada una de ellas dirigida por un motor independiente; el aparato sensorial consiste en dos receptores de sonido situados en el costado del organismo hacia el frente, sensores de infrarrojos y sensores de contacto. Reglas en la memoria del ordenador incorporado representan el “cerebro” de la máquina. El “cerebro” permite al organismo artificial reconocer y evitar obstáculos, identificar estímulos sonoros similares a los sonidos de llamada sexual del grillo macho y seguir dichos sonidos. Incluso con este elemental “cerebro”, el robot muestra un comportamiento que es casi idéntico al comportamiento de los insectos vivos. Sorprendentemente también produce estrategias conductistas muy eficientes que no estaban previstas en el diseño experimental original. Si, por ejemplo, el entorno incluye dos altavoces que emiten el mismo sonido de llamada, el organismo artificial se orienta, y se acerca, hacia uno solo de ellos.

Varios investigadores han criticado el trabajo con “grillos artificiales” por no demostrar si los grillos reales, de hecho, usan reglas simples o esquemas mentales complejos. Sin embargo, lo que nuestros experimentos de “etología artificial” han hecho, ha sido proporcionar una prueba concreta de que por lo menos en un principio sería posible para el grillo hembra identificar y acercarse a su pareja utilizando un elemental sistema motor sensorial. Después de nuestro primer prototipo procedimos a poner a prueba nuestra hipótesis utilizando un robot tan pequeño como era posible construir para reproducir el experimento con entornos y organismos de tamaño real (véase la figura 10). Este robot tenía un procesado más rápido y nuevo hardware para los oídos. Esto nos permitía utilizar sonidos de llamada de grillo macho reales y trabajar con grillos machos reales. Cuando el grillo iniciaba los sonidos de llamada, el organismo artificial se le aproximaba (Lund, Webb, & Hallam, 1997, 1998).

Todos los robots móviles mencionados hasta ahora han sido programados por seres humanos. Desgraciadamente, aunque los humanos somos muy buenos controlando procesos complejos, en entornos artificiales “ad hoc”, no tenemos la capacidad de dominar y predecir con exactitud secuencias de sucesos en la vida real. Hemos inventado autómatas ensamblando cables y ordenadores que juegan casi con perfección al ajedrez, pero todavía no hemos podido producir máquinas autónomas que se puedan mover en el espacio en un amplio rango de diferentes condiciones ambientales.

Durante los dos últimos años, los investigadores han intentado superar esta limitación inspirándose directamente de la naturaleza. Como es bien sabido, los organismos se adaptan a las condiciones del entorno modificando su cuerpo y comportamiento. Esta plasticidad es mostrada tanto durante la vida de un individuo (desarrollo ontogénico) como tras sucesivas generaciones de individuos pertenecientes a una misma especie (evolución filogénica). Es esta capacidad de *auto-organización* la que los investigadores intentan imitar en la construcción de sistemas artificiales. En este enfoque de auto-organización, las reglas que deciden el comportamiento del robot nunca son hechas de modo explícito por el programador humano, sino que son el resultado de un proceso adaptativo durante el que las máquinas adquieren experiencia en el mundo y se modifican sobre la base de dicha experiencia.

Uno de los más ambiciosos proyectos sobre estas ideas está basado en la nueva disciplina de los Robots Evolutivos. El objetivo final de la Robótica Evolutiva es desarrollar máquinas que puedan vivir, reproducirse y morir sin intervención humana. Por el momento, la mayoría de experimentos en Robótica Evolutiva están basados en simulaciones por ordenador que emulan importantes características del entorno y de los robots físicos que intentan estudiar. Los modelos matemáticos —también llamados “algoritmos genéticos”— que gobiernan la dinámica de la población intentan reproducir la evolución biológica —como se describe a continuación.

Una población inicial de robots (generación 1) es construida de modo aleatorio dando a cada individuo características diferentes (por ejemplo, diferente número y tipo de sensores, reglas de comportamiento, posición de las ruedas). Cada máquina tiene que resolver una tarea determinada (por ejemplo buscar un punto determinado del espacio tan rápido como sea posible). En este momento, el mejor resultado individual de la generación 1 es seleccionado para la reproducción. Cada individuo seleccionado se convierte en un “organismo padre” y reproduce cierto número de copias de sí mismo —es decir, hijos. El proceso de reproducción padre/hijo no es perfecto: hay errores —mutaciones genéticas— en el proceso de copiado. Los robots niños constituyen la generación 2. Este proceso de selección y reproducción puede repetirse un número arbitrario de veces —normalmente por medio de una simulación de software. En algún momento de la investigación puede decidir detener el proceso de simulación de evolución e incluso intentar construir los robots representados en la memoria del ordenador.

Uno de los primeros experimentos en Robótica Evolutiva fue dirigido por Miglino, Nafasi y Taylor (1995) en el Departamento de Biología, UCLA. Utilizando un simulador los tres investigadores desarrollaron una población de robots que aprendían a explorar un entorno concreto. El sistema de control del robot simulado más eficiente fue entonces transferido a un robot real. Se descubrió que el comportamiento del robot físico era casi

idéntico al del organismo simulado. La figura 11 muestra la arquitectura hardware del robot móvil de Miglino, Nafasi y Taylor. La versatilidad del kit de construcción utilizado por los tres investigadores hizo posible una rápida implementación y experimentación con diferentes soluciones hardware. Los éxitos de la Robótica Evolutiva están de hecho principalmente basados en la disponibilidad de herramientas (kits de construcción), que facilitan la construcción de robots prototipo proyectados por evolución simulada.



Figura11. Organismo artificial construido por Miglino y Taylor en el Departamento de Biología de UCLA

Un bien conocido robot, a menudo utilizado en Robótica Evolutiva, es el robot móvil miniatura Khepera (figura 10). El Khepera tiene una controladora Motorola 68331 incorporada con 256 Kbytes RAM y 512 Kbytes ROM, dos motores DC, dos ruedas, ocho sensores infrarrojos y tiene un diámetro de 55 mm, altura de 30 mm y peso de 70 g. A pesar de que por ahora el Khepera no es fácilmente modificable, es una buena herramienta por su pequeño tamaño y robustez. En consecuencia, cada vez más investigadores están utilizando Khepera, no únicamente en Robótica Evolutiva, sino que en todas las áreas de investigación en organismos artificiales. Por ejemplo, el trabajo adicional dirigido a mejorar el realismo del grillo artificial fue hecho utilizando una versión ampliada del robot Khepera, principalmente por que es pequeño y ofrece un mejor control de los parámetros experimentales.

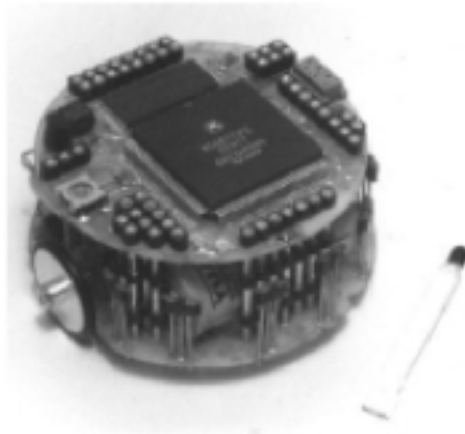


Figura 12. Robot miniatura móvil Khepera

Miglino, Lund y Nolfi (1995) han avanzado en el desarrollo del sistema de UCLA utilizando Khepera. En el Instituto de Psicología del Consejo de Investigación Nacional Italiano en Roma, los tres investigadores han utilizado evolución simulada para desarrollar sistemas de control de redes neurales para el robot Khepera, para a continuación transferir el mejor sistema de control de red neural al robot Khepera real. El uso de un simulador redujo el tiempo necesario para la experimentación en un 98%. Se descubrió que, añadiendo sonido al simulador, era posible obtener individuos con el mismo rendimiento en entornos simulados y físicos. Es por lo tanto válido utilizar un rápido simulador antes de transferir los sistemas de control desarrollados al robot real. Esto permite a los estudiantes ampliar sus estudios sobre evolución, lo que sería imposible en escenarios biológicos, debido al tiempo necesario para experimentos que implican muchas generaciones de animales reales.

Experimentos en Robótica Evolutiva muestran como la simulación de procesos evolutivos puede hacer posible la automatización del desarrollo de sistemas de control inteligentes para robots reales. Simulando el proceso natural predicho por la teoría de la evolución de Darwin y jugando con varios componentes (tasa de mutación, presión selectiva, etc) los estudiantes logran una mucho mejor comprensión teórica que la que de otro modo sería posible.

Como ha sido mencionado, las técnicas de la robótica evolutiva obligan al investigador a un continuo cambio de los mundos simulados (digitales) al entorno real y máquinas (y viceversa). Desde un punto de vista educativo, la perspectiva del cambio continuo puede ser utilizada para enseñar varias cuestiones importantes sobre cómo construir modelos de entornos físicos y cómo incorporar características difusas no controlables de entorno como la intensidad de luz. La transferencia de los controladores a los robots reales proporciona una respuesta implícita sobre la exactitud de la simulación. En pocas palabras, los experimentos de robótica evolutiva obligan a los estudiantes a enfrentarse a una amplia gama de cuestiones en la investigación informática actual. Por esta razón, el Departamento de Informática de la Universidad de Aarhus ha puesto en marcha un curso sobre Robótica Evolutiva y Robots Adaptativos. El proyecto final de este curso es la participación en el Campeonato Danés de Fútbol de Robots.

Experimentando con robots físicos que tienen que navegar en el mundo real, los estudiantes de informática aprenden rápido que hay discrepancias entre el mundo simulado

(un modelo informático sin incertidumbres) y el mundo real. Los estudiantes que trabajan con datos fiables se sorprenden siempre particularmente por la dificultad de interpretar las entradas provenientes de los sensores. Son necesarios muchos experimentos con robots físicos para que los estudiantes cambien su forma de razonar. Incluso en el proyecto final a menudo se extrañan por las diferencias entre las condiciones de laboratorio y las condiciones físicas del “campo de juego”. Este tipo de experiencia es muy importante para los informáticos para cuando se gradúen y tengan que diseñar y programar dispositivos, como la lanzadera espacial, que trabajan con datos del mundo real.

CRÍA DE ROBOTS PARA SUPERAR LAS LIMITACIONES DEL DISEÑO Y LA PROGRAMACIÓN

Todos los proyectos, ideas y experimentos presentados en la sección previa están basados en la filosofía orientada a la programación. En otras palabras, los niños, los alumnos y alumnas de la escuela superior y estudiantes suponen que poseen y/o aprenden el conocimiento/habilidades manuales necesarias para prediseñar y programar entornos y organismos artificiales. Sin embargo, en la vida de cada día los individuos son a menudo requeridos a participar en procesos dinámicos y a guiar estos procesos sin tener una clara idea del objetivo final. En muchas situaciones de la vida real, las metas cambian con el tiempo. Esto hace imposible programar una solución (o una máquina) que trabajará en todas las situaciones posibles. A menudo el rol del individuo se limita a elegir entre las soluciones que “acaban de suceder” o a ayudar a crear soluciones semejantes. Esto es, por ejemplo, lo que un ganadero o un agricultor hace cuando cría animales o plantas; es la sensación real de cuidar un bebé. En pocas palabras, lo que tenemos que aprender no es cómo programar la complejidad, sino cómo administrarla.

En un reciente experimento hemos examinado lo que ocurre cuando se permite a niños interactuar en un experimento de robótica evolutiva en el que intentan gobernar un proceso evolutivo.

El enfoque de la robótica evolutiva tradicional habría requerido que los niños fuesen capaces de comprender funciones matemáticas. Esto quedó excluido. También buscábamos un enfoque que fuese diferente del tradicional “Programación LOGO de robots LEGO”. Por lo tanto, hemos elegido la tercera opción: Robótica Evolutiva Interactiva. En este enfoque, los niños desarrollan controladores de robots en el simulador. En cada fase de la evolución el niño elige entre diferentes comportamientos de robot mostrados en la pantalla. Cuando están satisfechos con el comportamiento del robot simulado, ellos transfieren el sistema de control desarrollado a un robot real LEGO, y continúan jugando con él en un entorno real.

La propuesta de la robótica evolutiva interactiva está inspirada en nuestros trabajos previos utilizando algoritmos genéticos interactivos para desarrollar controladores de robots simulados, expresiones faciales e imágenes artísticas (véase, por ejemplo, Pagliarini, Lund, Miglino & Parisi, 1996; Vucic & Lund, 1998). En este enfoque, no es necesario tener conocimientos sobre programación. Todo lo que el usuario final ha de hacer es elegir entre las soluciones propuestas gráficamente en la pantalla. La selección ya no está basada en una función de idoneidad sino que es ejecutada directamente por el usuario final.

Sorprendentemente, observamos que los niños, utilizando nuestra herramienta, han sido capaces de producir la mayoría de los comportamientos de robots sencillos que han sido desarrollados por investigadores en robótica evolutiva.

CONCLUSIONES

En un contexto educativo, hay esencialmente dos modos de aprovechar la capacidad de proceso y almacenamiento de un ordenador: a) producir sistemas basados en el conocimiento (tales como servicios de Internet WWW, enciclopedias multimedia, etc.) en los que el usuario navegue y recupere textos, imágenes, sonidos...; b) construir un laboratorio simulado donde sea posible aumentar el conocimiento mediante aplicación de procesos similares al método científico: formulando hipótesis sobre un fenómeno y poniendo a prueba estas hipótesis mediante experimentos. Las herramientas construidas de acuerdo con el primer enfoque pueden facilitar el aprendizaje de las ciencias sociales, el segundo enfoque es más apropiado para la enseñanza tecnológica y los contenidos científicos.

El sistema del laboratorio simulado es una implementación directa de la perspectiva constructivista en educación (Piaget 1966; Papert 1980, 1986; Harel & Papert, 1990). De acuerdo con Piaget y Papert, los individuos seleccionan activamente los aspectos relevantes de su entorno, manipula objetos concretos, y asimilan nuevo conocimiento por medio de la observación de los efectos de estas acciones. En este sentido el individuo construye una representación de la realidad. Es la participación activa del estudiante el aspecto más atractivo de los juegos de simulación por ordenador. No obstante, al mismo tiempo los entornos software de simulación tradicionales atrapan al usuario en un mundo idealizado donde aspectos importantes y difusos del entorno físico son a menudo ignorados. En este documento hemos descrito cómo usar un ordenador para dar vida a objetos en un mundo físico. En este sentido, todo objeto del entorno es visto como un pequeño sistema inteligente que puede ser estudiado en interacción con el resto del mundo físico y con otros sistemas inteligentes. Desde este punto de vista, el ordenador puede ser visto como un puente entre las estructuras formales puramente abstractas (programas informáticos) y los aspectos claves no deterministas del mundo físico real

APÉNDICE A: HERRAMIENTAS PARA ROBÓTICA

Hay varias propuestas de hardware para usar la robótica en currículos educativos. En general, podemos agrupar estos planteamientos de hardware de la siguiente manera: 1) adquisición de un robot con una morfología predefinida, y 2) construcción de un robot a partir de pequeñas piezas. Por ejemplo, el robot Khepera (fabricado por K-Team, Suiza), mencionado anteriormente, es un ejemplo del 1), aunque es posible añadir módulos extras (por ejemplo, garras o sistemas de visión) al robot básico. Con habilidades de ingeniería se pueden también construir módulos personales para añadir al robot Khepera como nosotros hicimos con los módulos de escucha. Sin embargo, para la mayoría de los usuarios, este robot, como la mayoría de las máquinas preensambladas, tendrá una morfología predefinida.

A causa de su robustez o pequeño tamaño el robot Khepera es muy adecuado para su uso en el aula. El pequeño tamaño quiere decir que es bastante fácil construir varias configuraciones experimentales (sendas y estadios) para instalar en el aula. No obstante, el pequeño tamaño también supone que puede tener dificultades para funcionar en entornos más realistas. K-Team factura un robot de mayor tamaño llamado Koala, que es adecuado para funcionar en pasillos y algunas superficies. Tanto Khepera como Koala se programan en el lenguaje de programación C con un protocolo para comunicarse con otros dispositivos robot. Esto significa que estos robots son más adecuados para uso por estudiantes universitarios y licenciados, y para control de tareas en el mundo real. Hay un amplio número de diferentes robots en el mercado con similares características.



Figura 13. El kit LEGO MindStorms. (Copyright 1998. H. H. Lund)

En muchos casos, un robot con una morfología predefinida es inapropiado. Por ejemplo, si el currículo incluye enseñanza sobre engranajes, motores, sensores e ingeniería en general, es mejor dar al alumnado experiencia práctica permitiéndoles construir su propio robot físico. Hasta hace poco, este enfoque exigía que profesor y alumnos tuviesen aptitudes en ingeniería eléctrica. Un excelente estudio sobre este enfoque puede ser

encontrado en el libro de Joseph Jones y Anita Flynn “Mobile Robots: Inspiration to Implementation” (1993) en el que los autores proporcionan una descripción técnica del desarrollo del robot Rug Warrior y de diversos componentes. El Rug Warrior puede ser adquirido como un kit de montaje junto con el libro.

En nuestra opinión el camino más fácil para comenzar a experimentar con robots es construir máquinas LEGO con sensores, accionadores y capacidades de control. Esto se puede hacer con los sistemas LEGO Dacta, LEGO CodePilot, LEGO CyberMaster y LEGO MindStorms. Aquí veremos el sistema LEGO MindStorms. Este sistema consiste en un gran ladrillo LEGO con funciones de unidad de control, sensores LEGO (por ejemplo sensores de luz y de contacto) y motores LEGO. Es posible utilizar también otros sensores LEGO, como lo son el de temperatura y el angular. Utilizando estos componentes no es sólo posible construir tradicionales robots LEGO, sino que también darles funcionalidad. La unidad de control contiene baterías, así que puede ser autónomo sin conexión a un ordenador anfitrión. La unidad de control tiene tres entradas, en las que pueden ser conectados los sensores, y tres salidas para los motores. Los conectadores mantienen el diseño tradicional de LEGO, y de este modo son muy sencillos de usar realizando las conexiones del mismo modo que se coloca un ladrillo LEGO uno encima de otro. Esto permite al alumno construir un robot con la morfología elegida por el/ella misma, y modificar la morfología durante el proyecto. Durante la experimentación el niño puede usar el conocimiento adquirido para modificar el robot (utilizando diferentes sensores, colocando los motores en distintas posiciones, modificando la transmisión...). Los robots LEGO MindStorms se programan utilizando un lenguaje de programación gráfico (el uso del lenguaje es muy parecido a colocar las piezas de un puzzle), y puede ser utilizado por niños de hasta aproximadamente 11 años de edad. Para proyectos más avanzados, es posible diseñar programas de control más avanzados para robots utilizando compiladores de Windows tales como Visual Basic, Visual C++, y Visual Java++. Cuando el programa de control ha sido compilado en el PC, puede ser bajado a la construcción LEGO por medio de una comunicación por infrarrojos. A partir de este momento el robot funciona autónomamente.

APÉNDICE B – INFORMACIÓN ADICIONAL

El Web site del GRAL (grupo de investigación sobre Inteligencia Artificial) en el Consejo Nacional de Investigación (Italia) incluye buena información sobre vida artificial y robótica evolutiva, y es un buen punto de arranque <http://kant.irmkant.rm.cnr.it/gral.html>.

El siguiente Web site contiene un gran número de artículos científicos sobre vida artificial y robótica evolutiva:

<http://www.cogs.susx.ac.uk/users/ezequiel/alife-page/alife.html>.

Los robots LEGO MindStorms están descritos en <http://www.LEGOmindstorms.com/> y el uso de los robots LEGO MindStorms en investigación se describe en <http://legolab.daimi.au.dk/>

El trabajo de Papert y Resnick sobre constructivismo se encuentra en <http://el.www.media.mit.edu/groups/el/>

AGRADECIMIENTOS

Ole Caprani (LEGO Lab, Departamento de Informática, Universidad de Aarhus) encabezó el proyecto piloto de la Primera Liga LEGO. Los autores desean agradecer a sus coautores los escritos de referencia de este artículo. Muchas gracias a Richard Walker por su valiosa ayuda

BIBLIOGRAFÍA

- Bains, S. (1994). Even a Robot Cricket Always Gets Her Mate. *Science*, 266, 1809.
- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Harel, I. & Papert, S. (1991). *Constructionism*. N J: Ablex Publishing Corp.
- Hogg, D. W, Martin, F., & Resnick, M. (1991). *Braitenberg Creatures*. E&L Memo N° 13, MIT Media Lab. Cambridge, MA.
- Jones, J. L. & Flynn, A. M. (1993). *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. Wellesley, MA: A K Peters.
- Kafai, Y. & Resnick, M., (1996). *Constructionism in Practice: Designing, Thinking, and Learning in a Digital World*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lund, H. H. & Miglino, O. (1995). *Using Real Braitenberg Vehichles in an Educational Setting*. Neural Systems and Artificial Life Group, Institute of Psychology, National Research Council, Technical Reports 08-95.
- Lund, H.H., Webb, B., & Hallam, J. (1997). A Robot Attracted to the Cricket Species *Gryllus bimaculatus*. In *Proceedings of 4th European Conference on Artificial Life 1997*, Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- Lund, H.H., Webb, B., & Hallam, J. (1998). Physical and Temporal Scaling Considerations in a Robot Model of Cricket Calling Song Preference. *Artificial Life* 4(1), 95-107.

- Martin, F. (1996). Ideal and Real Systems: A study of notions. In Yasmin Kafai and Mitchell Resnick (eds.) *Undergraduates Who Design Robots. In Constructionism in Practice: Designing, Thinking, and Learning in a Digital World*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum
- Martin, F. G. (1994). *Circuits to Control: Learning Engineering by Designing LEGO Robots*. Ph. D. Thesis. MIT, Boston.
- Miglino, O., Lund, H. H., & Nolfi, S. (1995). Evolving Mobile Robots in Simulated and Real Environments. *Artificial Life* 2(4), 417-434.
- Miglino, O., Nafasi, K., & Taylor, C. (1995). Selection For Wandering Behavior in a Small Robot. *Artificial Life*, 2 (1), 101-116.
- Pagliarini, L., Lund, H. H., Miglino, O., & Parisi, D. (1996). *Artificial Life: A New Way to Build Educational and Therapeutic Games*. In *Proceedings of Artificial Life V*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. NY, New York: Basic Books.
- Papert, S. (1986). *Constructionism: A New Opportunity for Elementary Science Education*. A MIT proposal to the National Science Foundation.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1966) *La psychologie de L'enfant*. Paris: P.U.F.
- Resnick, M. (1988). *MultiLogo: A study of Children and Concurrent Programming*. Master Thesis MIT, Boston.
- Resnick, M. (1989). *LEGO, Logo, and Life*. In Langton C. (eds.) *Artificial Life*. Boston, MA: Addison-Wesley.
- Resnick, M. (1994). *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Vucic, V. & Lund H. H (1997). Self-evolving Arts --- Organisms versus Fetishes. *The Hungarian Journal of Modern Art*, 104, 69-79.

OHARRA

Este trabajo ha sido traducido por Koldo Olaskoaga profesor de tecnología en un centro público de enseñanza secundaria de Donostia (Euskal Herria).

E-mail robotek@donospat.net

Web <http://www.donospat.net/2000/>

(personal: <http://www.euskalnet.net/kolaskoaga/>)