

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

MEMORIA TITULACIÓN

---

# Diseño y construcción de plataforma para estudios en enjambre de robots.

---

*Autor:*  
Sebastián SÁEZ

*Supervisores:*  
Dra. María José ESCOBAR  
Dr. Juan Cristobal ZAGAL  
Dr. Pablo PRIETO

*Memoria para optar al grado de Bachiller en Ciencias de la Ingeniería y  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería Electrónica.*

*en el*

Síntesis de Máquinas Inteligentes  
Ing. civil Mecánica, Universidad de Chile

24 de mayo de 2013

UNIVERSITY NAME (IN BLOCK CAPITALS)

## *Abstract*

Faculty Name

Ing. civil Mecanica, Universidad de Chile

Bachiller en Ciencias de la Ingeniería y Licenciado en Ciencias de la Ingeniería  
Electrónica.

**Diseño y construcción de plataforma para estudios en enjambre de robots.**

by Sebastián SÁEZ

Desarrollo de una plataforma, de bajo costo, que permita estudiar el comportamiento de grupos de robots. Para que la plataforma funcione es necesario el diseño y construcción de los robots , implementar sistema de tracking 2D, armar la red de comunicación (XBee) y construir el software de control.

# *Agradecimientos*

The acknowledgements and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor...

# Índice general

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>II</b>
<b>List of Figures</b>	<b>V</b>
<b>List of Tables</b>	<b>VI</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>VII</b>
<b>Physical Constants</b>	<b>VIII</b>
<b>Symbols</b>	<b>IX</b>
<b>1. Robot</b>	<b>1</b>
1.1. Desarrollo tecnológico desde Chile . . . . .	1
1.2. ¿Qué es un robot? . . . . .	2
1.2.1. Automodelamiento . . . . .	3
<b>2. Swarm</b>	<b>6</b>
2.1. Comportamiento colectivo en la naturaleza . . . . .	6
2.2. Robots para construir un enjambre . . . . .	7
2.2.1. Kilobot . . . . .	7
2.2.2. Organismo Multibot . . . . .	8
2.2.3. E-puck . . . . .	9
2.2.4. 3pi Robot . . . . .	10
2.3. Necesidades de mercado . . . . .	11
2.3.1. Usos Académico . . . . .	12
2.3.2. Usos Militar . . . . .	12
2.3.3. Usos Doméstico . . . . .	12
<b>3. MODI</b>	<b>13</b>
3.1. Setup . . . . .	13
3.2. Construcción . . . . .	14
3.2.1. Fabricación Digital vs Análoga . . . . .	14
3.2.2. Software CAD . . . . .	16

**A. Appendix Title Here**

**17**

**Bibliografia**

**18**

# Índice de figuras

1.1. Digesting Duck . . . . .	2
1.2. Roomba y KUKA . . . . .	3
1.3. Automodelado . . . . .	4
1.4. Automodelado . . . . .	4
1.5. AutomodeladoLIPSON . . . . .	5
2.1. swarm . . . . .	6
2.2. swarm . . . . .	8
2.3. swarm . . . . .	8
2.4. swarm . . . . .	9
2.5. swarm . . . . .	11
2.6. nicho . . . . .	12
3.1. Setup . . . . .	13
3.2. modi . . . . .	14
3.3. modi2 . . . . .	15
3.4. modirev1 . . . . .	15
3.5. modirev1 . . . . .	16

# Índice de cuadros

# Abbreviations

**LAH** List Abbreviations **Here**



# Physical Constants

$$\text{Speed of Light } c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ ms}^{-\text{S}} \text{ (exact)}$$

# Symbols

$a$	distance	m
$P$	power	W ( $\text{Js}^{-1}$ )
$\omega$	angular frequency	$\text{rads}^{-1}$

*For/Dedicated to/To my...*

# Capítulo 1

## Robot

### 1.1. Desarrollo tecnológico desde Chile

Hacer Robots en Valparaíso no es una tarea sencilla, la falta de lugares especializados para comprar dificulta contar con los componentes necesarios para construir una máquina.

Al comienzo de este proyecto se trabajó en Santiago, en conjunto con la Universidad de Chile (UCHile) bajo la tutela del Doctor Juan Cristóbal Zagal en el Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes. Por parte de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM), se trabajó con la Doctora María José Escobar, del Departamento de Electrónica y luego se incorporó el Doctor Pablo Prieto del Departamento de Diseño de Productos. El financiamiento para realizar este prototipo ha sido por parte de las dos Instituciones, Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Chile.

Durante el proceso de desarrollo se tuvieron que hacer diversas compras de materiales, pero los lugares más recurrentes al momento de hacerlas fueron Olimex y Casa Royal. La primera es una empresa dedicada a traer productos para hacer prototipos y construir máquinas, la segunda cuenta con varios insumos básicos para trabajar en desarrollo de circuitos electrónicos. Ambas empresas se encuentran en Santiago, por lo que trabajar en esta ciudad es de gran ayuda para reducir los tiempos en desarrollo.

Luego de armar un primer robot básico funcional, con materiales disponibles en Santiago de Chile, se hizo una búsqueda de componentes en tiendas especializadas que permiten comprar por internet. Existen varias (ver anexo 1) pero las más importantes para este proyecto fueron: Sparkfun y Seeedstudio.

## 1.2. ¿Qué es un robot?

Un robot puede ser un software solamente o tener además una extensión física que le permita interactuar con la realidad y realizar tareas de forma autónoma. Etimológicamente, el término robot se le atribuye al dramaturgo checo Karel Čapek, que en su obra *R.U.R* en 1921 (*Rossum's Universal Robots*) utilizó la palabra “robotnik” para referirse a ayudantes artificiales. Luego fue el escritor Isaac Asimov (1920-1992) quien, gracias a su obra, difundió la palabra robótica haciendo referencia a la ciencia encargada de estudiar a los robots. La robótica contempla el estudio de al menos 6 áreas: La mecánica, la electrónica, el control automático, la física y la matemática.

En la historia hay varios intentos por construir estos ayudantes artificiales. A principios del siglo XVIII, Jacques de Vaucanson creó un autómatas capaz de tocar la flauta, así como un pato mecánico que continuamente seguía su ciclo biológico.

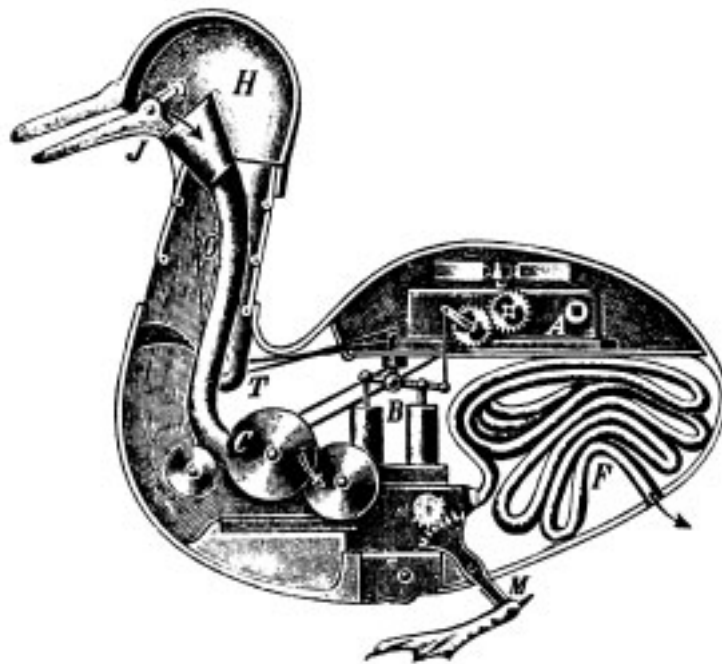


FIGURA 1.1: Digesting Duck, creado por Jacques de Vaucanson en 1739. Imagen extraída de Wikipedia.

En la actualidad las empresas KUKA, Honda y Sony, entre otras, construyen robots especialmente diseñados para la industria. Los robots que se utilizan en la industria, y los pocos que han llegado al hogar, son controlados por un algoritmo. Este es parte de un software que escribe una persona, donde se detalla la tarea que el robot debe realizar; tiene un modelo de los motores, partes y piezas para que así la máquina tenga información de como es, y pueda ejecutar la tarea para la cual se le programó. Si se interfiere con el entorno del robot, por ejemplo moviendo 1 [cm], fuera del rango de

los sensores, el perno que debe apretar algún robot industrial que ensambla autos, este no podrá “encontrarlo”. Los robots comerciales que existen hoy en día no son capaces de adaptarse a cambios en el entorno y menos ser capaces de generar una imagen de sí mismos que les permita entender qué sucede y recuperarse de fallas.



FIGURA 1.2: **Izquierda:** Robot Roomba, primer Robot domestico vendido en chile, Imagen extraida de <http://www.irobotchile.cl>. **Derecha:** Robot industrial KUKA KR 1000 TITAM, Imagen extraida de <http://www.turbosquid.com>.

Un algoritmo debe tener un modelo detallado de los motores y sensores que posee el robot, y es tarea del programador hacer la abstracción necesaria para poder darle sentido al movimiento del conjunto de motores. Si hablamos de un robot de 4 extremidades, el programador debe ser capaz de indicar la secuencia de activación de cada motor para así primero hacer que el robot mueva una extremidad y luego con la suma de las 4 lograr desplazarse.

### 1.2.1. Automodelamiento

Juan Cristobal Zagal y Hod Lipson [1] exploraron el comportamiento de un robot capaz de entrar en un proceso de self-reflection. Ellos estudiaron a un robot al cual se le programaron dos controladores, uno primitivo (primitive controller) y uno reflexivo (reflective controller) que puede observar al primero.

El controlador reflexivo es capaz de determinar el control primitivo sin tener acceso directo a sus estados internos si no que haciendo uso de ingeniería inversa al leer los input/output de éste. Acá se implementa como comportamiento que el robot (e-puck) debe alejarse de luces rojas y acercarse a azules. Se logra con una exploración mínima posible de hardware.

El diagrama del algoritmo que controla todo el proceso que se implementa como comportamiento para recuperarse de fallas puede verse en el anexo.

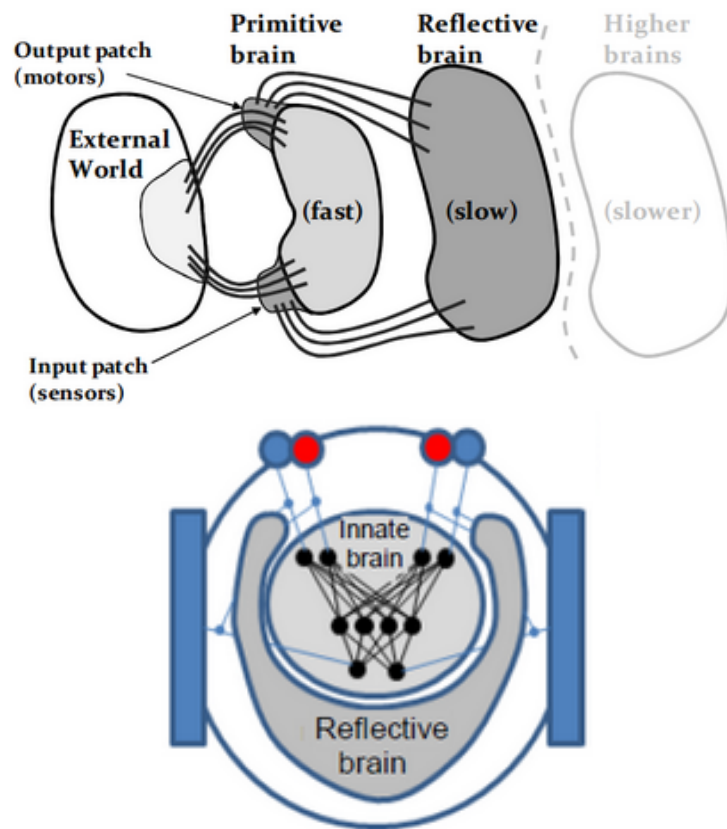


FIGURA 1.3: **Arriba:** Arquitectura de cerebros anidados usado en el trabajo de J.Zagal y H.Lipson, basado en modelos de M. Minsky. **Abajo:** Modelo de cerebros implementado en robot e-puck. Ambas imágenes pertenecen a Juan Cristóbal Zagal.

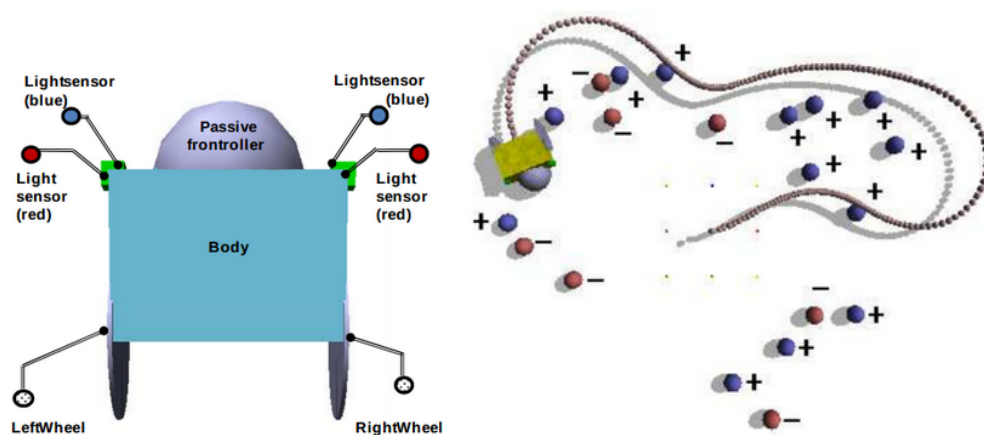


FIGURA 1.4: **Izquierda:** Arquitectura de cerebros anidados usado en el trabajo de J.Zagal y H.Lipson, basado en modelos de M. Minsky. **Derecha:** Modelo de cerebros implementado en robot e-puck. Ambas imágenes pertenecen a Juan Cristóbal Zagal.

J. Bongard., V. Zykov y H. Lipson., logran que un robot se recupere de una falla inesperada de forma autónoma. Dicen que el robot puede recuperarse de manera autónoma haciendo uso de su (propio al robot) Self-modeling. Concretamente implementan sus algoritmos en un robot de 4 patas que utiliza una relación entre sus sensores y motores para indirectamente inferir su propia estructura.

Si se remueve una extremidad, el robot es capaz de generar una nueva forma de caminata que le permita cumplir con su misión que es avanzar. En la figura 1.5, se describe un esquema del algoritmo. El robot realiza una acción física (A), al azar, luego se ejecuta la mejor acción que se encuentre en (C). A continuación genera varios auto-modelos que coincidan con las lecturas de los sensores obtenidas en (B). Aún no sabe cual es el modelo, por lo que en (C) genera varias acciones posibles que acotan la búsqueda de modelos. Después de varios ciclos de (A) a (C), el modelo obtenido se utiliza en (E) para generar la secuencia de locomoción. La mejor secuencia de locomoción es probada físicamente en el robot. Se refina el modelo volviendo al paso (B) y en (D) pueden crearse nuevos comportamientos.

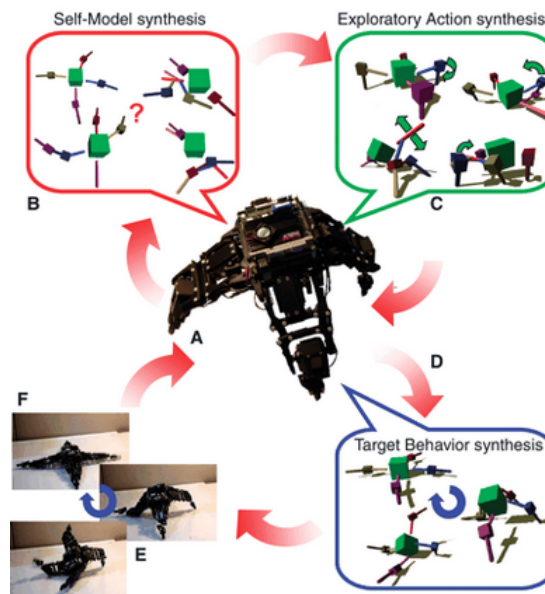


FIGURA 1.5: Esquema del algoritmo que puede usar un robot para desplazarse haciendo uso de Automodelos. Imagen obtenida desde <http://creativemachines.cornell.edu>



## Capítulo 2

# Swarm

### 2.1. Comportamiento colectivo en la naturaleza



---

FIGURA 2.1: Bandada de auklets, teniendo comportamiento de enjambre. Imagen extraída de Wikipedia.

Existen casos de enjambres, los más típicos son las hormigas y abejas, pero los hay en peces, aves e incluso los mamíferos. Son sistemas donde nadie está a cargo y aún así ejecutan una tarea grupal. Las hormigas son un gran ejemplo. Al momento de construir su nido, no tienen un arquitecto o ingeniero estructural que esté dando órdenes, simplemente cada una sabe que tiene que hacer. No hay un director orquestando la construcción desde lo alto, en vez de esto lo que ocurre es un comportamiento emergente. También conocido como inteligencia de enjambre.

Otro tipo de comportamiento colectivo son las migraciones, desplazamientos periódicos que efectúan aves, peces, langostas y mamíferos de un hábitat a otro. Cada individuo activo en la migración sigue al grupo, los más pequeños como el plancton o anfibios aprovechan las corrientes de aire o agua, y las aves, más grandes, aprovechan los vientos y corrientes ascendentes. Hay diversas finalidades detrás de la migración, algunas especies lo hacen para escaparse de los crudos inviernos o secos veranos; mientras que otras, como las tortugas marinas, por una necesidad reproductiva emprenden un largo viaje de más de 10.000 millas, a lo largo de todo el Atlántico Norte.

Lograr que un enjambre de robots tenga un comportamiento emergente como el de las colonias de abejas es la piedra filosofal de los investigadores de esta área. Uno de los más destacados investigadores del área, James McLurkin, experto en robótica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) dice que para lograrlo es necesario un software que ejecute tareas individuales y que de alguna forma se cumpla con una tarea grupal. He aquí una importante razón para desarrollar estudios sobre enjambres de robots, ya que aún no está claro cómo se coordina la naturaleza para llevar a cabo tales tareas.

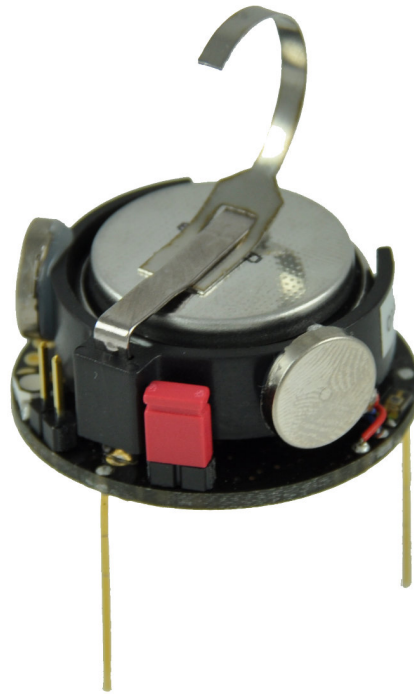
## **2.2. Robots para construir un enjambre**

Imaginemos una situación hipotética donde un edificio es destruido, la búsqueda de sobrevivientes no es una tarea fácil, implica que rescatistas ingresen al lugar corriendo grave peligro, usualmente buscando a las víctimas en condiciones de poca visibilidad. Esto mismo podría ser ejecutado por un enjambre robótico que esté programado para buscar gente y que de manera colectiva recorra un área mucho mayor que 2 o 3 personas. Incluso un robot del mismo enjambre puede fallar, pero al ser un sistema distribuido el enjambre continúa funcionando, es un sistema muy robusto.

A continuación algunos robots que pueden ser utilizados para hacer un Robot Swarm junto con las información técnica disponible.

### **2.2.1. Kilobot**

El proyecto Kilobot, es un sistema de bajo costo escalable para demostrar comportamientos colectivos. Actualmente existen varios grupos que están investigando algoritmos para enjambres de robots, por esto que diseñaron Kilobot que es un robot de bajo costo, accesible, que permite hacer pruebas en cientos o miles de robots.



---

FIGURA 2.2: Kilobot. Imagen extraida de <http://www.k-team.com>.

### 2.2.2. Organismo Multibot

S. Kornienko, O. Kornienko, A. Nagarathinam y P. Levi., exploran el trabajo colaborativo en robots para un mejor rendimiento y mayor fiabilidad a nivel macroscopico. En este articulo demuestran sus últimos trabajos en sistemas colectivos y lo más sorprendente es que logran la agregación y desagregación autónoma para así obtener un organismo multibot. [2]

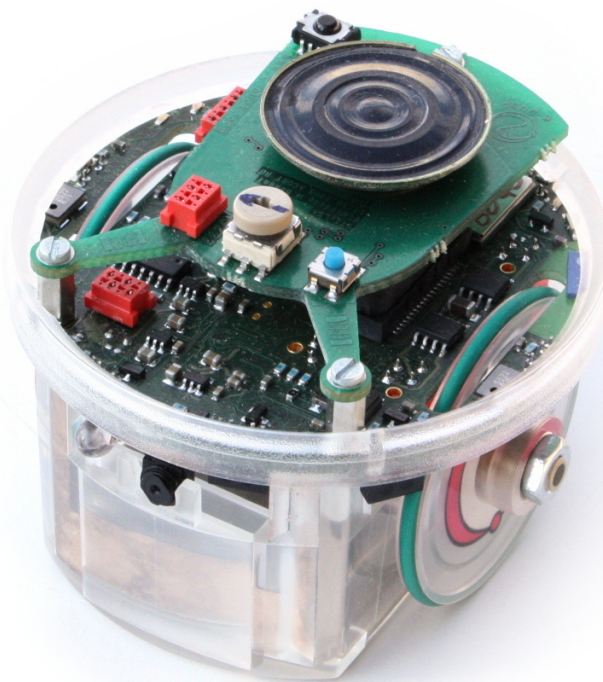


---

FIGURA 2.3: Organismo Multibot. Imagen extraida de <http://ieeesbcet.org/>

### 2.2.3. E-puck

Uno de los robots más utilizados por los científicos en el mundo para estudios y publicaciones es el E-puck. Este robot es compacto, tiene forma de cilindro con un diámetro de 7 [cm] y para moverse hace uso de sus dos ruedas, dejándolo en la categoría de robot con desplazamiento diferencial. Originalmente fue diseñado para educar en el área de la micro ingeniería por Michael Bonani y Francesco Mondala en el laboratorio ASL del Profesor Roland Siegwart en Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) en Suiza. El e-puck es open hardware, software es de código abierto, lo construyen y venden varias empresas. Para comunicarse con una computador incorporan un módulo Bluetooth conectado a uno de sus dos puertos serie. Existen varios tipos de accesorios, entre los que destacan un Zigbee para comunicaciones, un módulo con varias cámaras y LEDs RGB como sistema de comunicación visual. Su precio a la fecha en Gctronic es 912 USD. Para comprarlo hay que encargarlo desde Suiza.



---

FIGURA 2.4: E-puck. Imagen extraida de Wikipedia

#### Detalles técnicos

- Diámetro: 70 mm
- Alto: 50 mm

- Peso: 200 g
- Máxima velocidad: 13 cm/s
- Autonomía: 2 horas moviéndose
- dsPIC 30 CPU @ 30 MHz (15 MIPS)
- 8 KB RAM
- 144 KB Flash
- 2 step motors
- 8 sensores de proximidad y luz (TCRT1000)
- color camera, 640x480
- 8 LEDs en un aro + un LED en el cuerpo + un LED en frente
- Acelerómetro 3D
- 3 micrófono
- 1 parlante

#### 2.2.4. 3pi Robot

Pololu, la misma marca que tiene desarrollo de varios tipos de motores para robótica y PCB para controlarlos, diseño el 3pi Robot. Es un robot bastante más económico que el e-puck, cuyo valor es 99.95USD ref. Sparkfun. También tiene dos ruedas para desplazarse de forma diferencial, 5 sensores de reflectancia, un LCD de 8x2 caracteres, un buzzer y tres botones para que el usuario pueda programarlos. Todos estos dispositivos están conectados a un microcontrolador ATmega328. Su velocidad es de 90 cm/s.

El 3pi fue diseñado especialmente como un robot seguidor de líneas y solucionador de laberintos. Existen varios videos que muestran la asombrosa velocidad de estos robots para solucionar un laberinto. Se programa en C, pero como posee un microcontrolador ATmega es posible hacer uso del bootloader Arduino y programarlo con ese IDE. Usa 4 baterías AAA y trae 4 LEDs.

Para el modelo que se planteó en este trabajo hace falta un módulo de comunicación inalámbrica, y el 3pi no tiene. Para usar esta alternativa es necesario sumarle a su precio 26USD, que es el precio del módulo XBee 1[w] serie 2 que se vende en Sparkfun.

#### Detalles técnicos

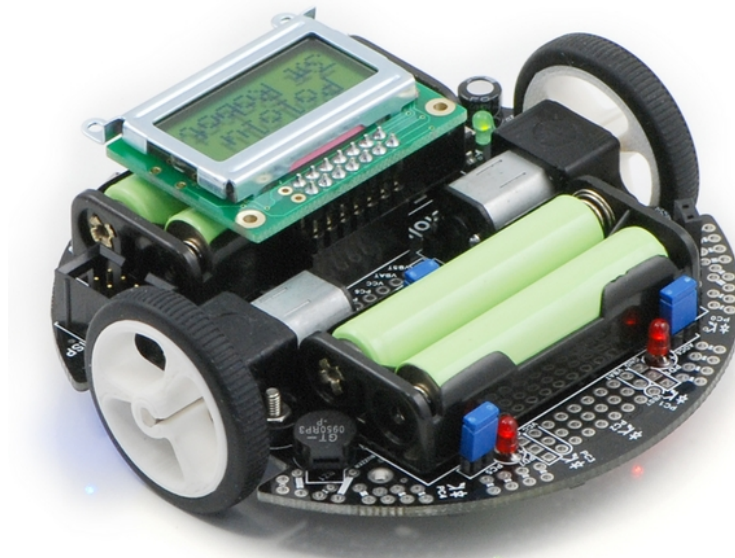


FIGURA 2.5: 3pi Robot, simple y económico pero no tiene comunicación inalámbrica.  
Imagen extraída de <http://www.skpang.co.uk>

- Procesador ATmega328
- TB6612FNG Motor Driver
- 2 canales de motores.
- 3 - 7V voltaje de operación
- 80kHz max PWM frequency

### 2.3. Necesidades de mercado

De los robots estudiados destaca en sus prestaciones el e-puck, pero este tiene dos grandes problemas para ser usado por gente que no es especialista en robots. Uno es que tiene demasiado hardware, lo que tiende a confundir y aumentar costos. Dos, que para su comunicación inalámbrica hace uso de Bluetooth, protocolo que no soporta las redes Mesh para hacer de manera simple el control de muchos dispositivos en una red. Hace falta un robot capaz de controlarse de forma inalámbrica, simple de construir y fácil de usar. Además debe ser económico para poder construir varios. Se pretende hacer uso de tecnologías como impresoras 3D y de desarrollo como el Open Hardware.

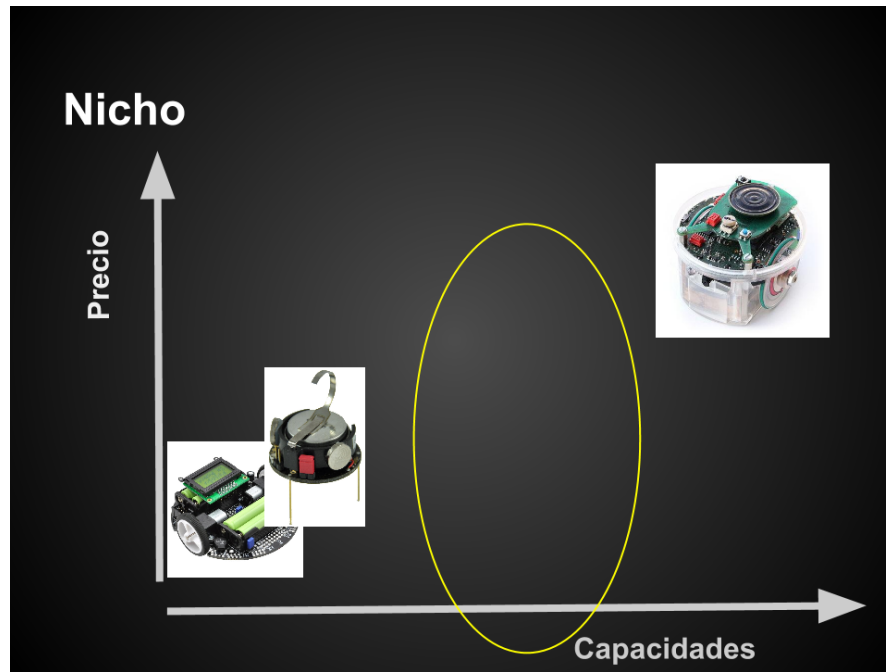


FIGURA 2.6: Nicho de mercado

### 2.3.1. Usos Académico

Un enjambre de robots puede presentar muchas ventajas dentro del aula. Si se tiene un sistema de fácil uso para los alumnos, el profesor puede asignar una tarea a un grupo de estudiantes donde cada uno tiene la responsabilidad de controlar o programar un robot para que el conjunto logre una meta determinada como ordenar unos bloques o hacerse cargo de regar un pequeño huerto. Abusando un poco del concepto de la colectividad, incluso pueden generarse tareas donde cada colegio se especializa en un tipo de tareas para luego juntar los distintos robots y probar cómo interactúan.

Tener un setup con robots que demuestren un comportamiento colectivo puede ser muy ventajoso para ayudar a niños con trastornos como el Asperger a practicar sus habilidades para reconocer estos mismo comportamientos.

### 2.3.2. Usos Militar

### 2.3.3. Usos Doméstico

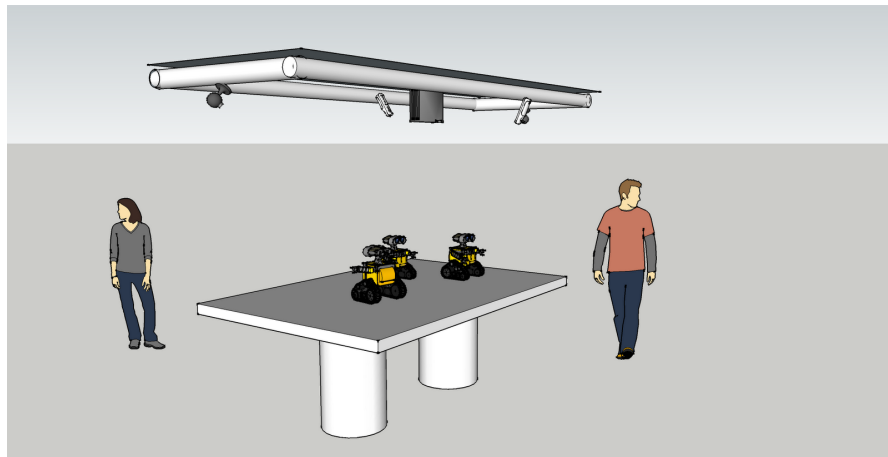


## Capítulo 3

# MODI

### 3.1. Setup

Se desea hacer realizar una investigación sobre el comportamiento colectivo de un grupo de robots, en el mundo real sin hacer uso de simuladores. Por esto es necesario contar con un lugar físico donde poder activar los robots. Además para simplificar cada uno de los robots, estos no tienen sensores internos por lo que hay una cámara montada sobre el plano de movimiento de los robots, para hacer Seguimiento Visual.



---

FIGURA 3.1: Setup a montarse para hacer estudios de grupos de robots.

La función principal de MODI es ser una plataforma móvil de fácil acceso. Existe un repositorio en GitHub donde se tienen los códigos actualizados para controlar y construir robots MODI.

**Las funciones principales que se desarrollaron**



- Carga Autónoma con celda solar.
- Seguimiento de grupo.
- Control individual del color de cada MODI.
- Movimiento simple de cada robot de forma independiente.

## 3.2. Construcción

### 3.2.1. Fabricación Digital vs Análoga

Cuando se quiere pasar una idea al mundo real es necesario un proceso de fabricación. Dependiendo de la cantidad de herramientas que se tenga es más o menos fácil la tarea. Desde el comienzo hasta hace un par de años, quienes se dedican a construir robots, debían construir de manera “artesanal” donde es imposible que las piezas queden todas iguales y el tiempo empleado era bastante. Hoy en día existe una gran alternativa que surge como un nuevo paradigma, la Fabricación Digital. Las llamadas impresoras 3D, que no son más que un extrusor montado en un sistema con ejes que le dan 3 grados de libertad, permiten desde un modelo hecho en un computador, obtener un modelo real en plástico. También existe otro tipo de máquinas que permite hacer diseños en 2D, estas son las cortadoras LASER. La primera versión de MODI fue construido usando planchas de madera MDF y acrílico, cortados en LASER.

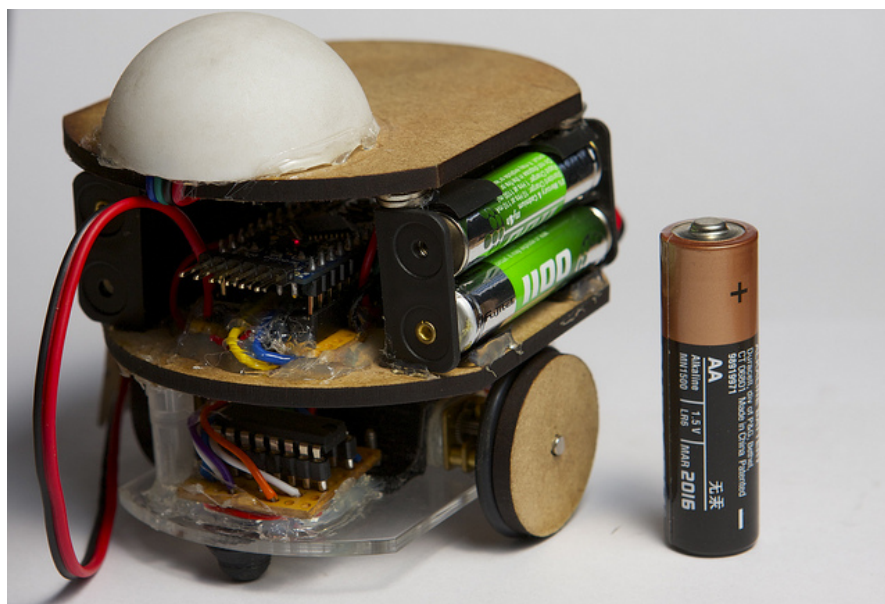


FIGURA 3.2: Primera versión robot MODI, tiene un Arduino mini pro, Xbee, usa pilas AAA y parte del chasis es de Madera MDF de 3[mm] cortado con LASER

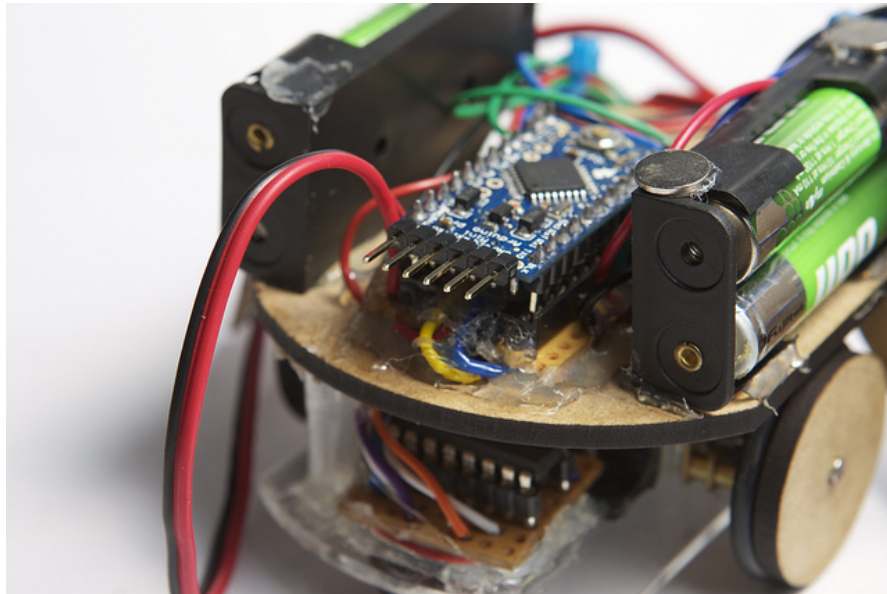


FIGURA 3.3: MODI, primera versión basada en gran parte en Fabricación Análoga.

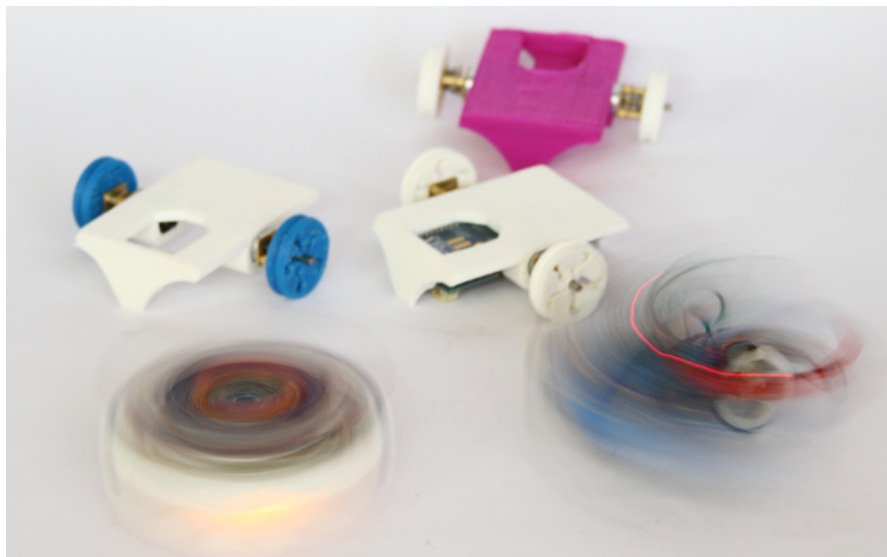


FIGURA 3.4: Primera versión de MODI usando técnica de *Fabricación Digital* con chasis de plástico construido con una MakerBot Replicator 1



FIGURA 3.5: Mapa actual de lugares en el mundo que cuentan con un FabLab. En Chile a la fecha existen 3. Imagen obtenida desde <http://fablabamersfoort.nl/fablabs/>

### 3.2.2. Software CAD

CAD hace referencia a sus siglas del inglés, Computer-aided design, y se refiere a un diseño asistido por herramientas computacionales. Profesionales como ingenieros, arquitectos y del área del diseño por lo general son los que hacen más uso de estas herramientas.

Según Wikipedia, "... se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D). Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica..."

Durante el transcurso del proyecto se trabajó con 3 softwares CAD. El primero fué SketchUp 8 de Google, que permite fácilmente hacer bocetos de lugares y cuenta con una importante biblioteca de modelos para incluir en el diseño.

## 3.5

## Apéndice A

# Appendix Title Here

Write your Appendix content here.

# Referencias

- [1] Juan Cristóbal Zagal and Hod Lipson. Self-reflection in evolutionary robotics: resilient adaptation with a minimum of physical exploration. In Franz Rothlauf, editor, *GECCO (Companion)*, pages 2179–2188. ACM, 2009. ISBN 978-1-60558-505-5. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/gecco/gecco2009c.html#ZagalL09>.
- [2] S. Kernbach, P. Levi, E. Meister, F. Schlachter, and O. Kernbach. Towards self-adaptation of robot organisms with a high developmental plasticity. In *Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns, 2009. COMPUTATIONWORLD '09. Computation World.*, pages 180–187, 2009. doi: 10.1109/ComputationWorld.2009.11.