

# Robótica modular y locomoción



**Juan González Gómez**  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Módulos
3. Osciladores
4. Locomoción en 1D
5. Locomoción en 2D
6. Simulación
7. Conclusiones y trabajo futuro

# El problema de la locomoción (I)

- Desarrollo y construcción de un robot móvil lo más versátil posible capaz de desplazarse de un punto a otro con independencia del terreno



## Arquitectura

### Nivel superior

- Percepción del entorno
- Planificación de trayectorias
- Navegación
- Toma de decisiones

### Nivel inferior

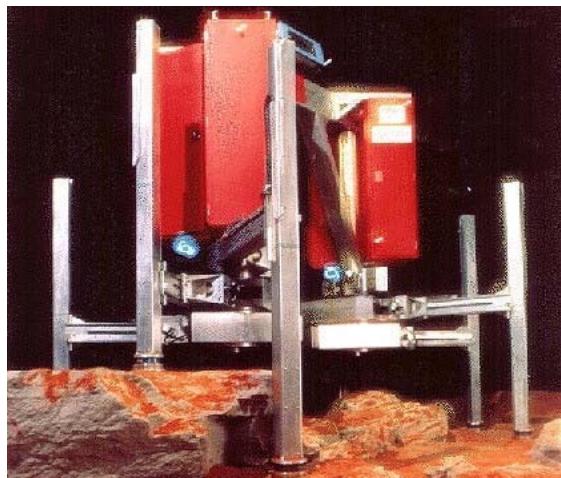
- Coordinación
- Morfología
- Modos de caminar

## Problema de la locomoción (II)

### Enfoque clásico:

- Estudiar el terreno
- Diseñar la mecánica
- Implementar Modos de caminar

- NASA interesada en este problema
- Exploración de planetas
- Ej. Robots Ambler y Dante II



(**Ambler**, Krotkov et al, 1989)



(**Dante II**, Bares et al, 1994)

# Problema de la locomoción (III)

Vídeos: 1,2

## Enfoque bio-inspirado:

- Copiar a los animales de la naturaleza

*Boston Dynamics*

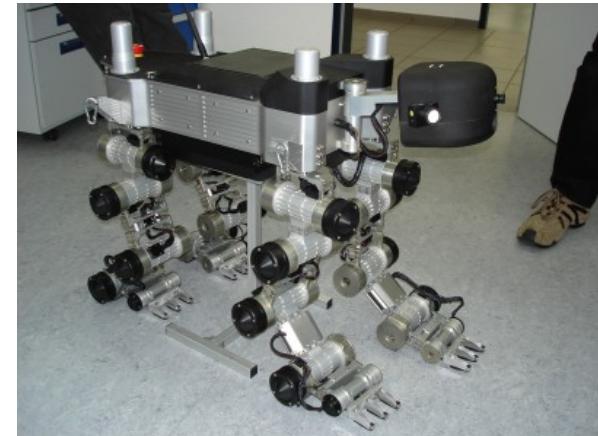


**(BigDog, Raibert et al. 2008)**

*Robotic Lab at DFKI Bremen*



**(Scorpio, Dirk et al. 2007)**



**(Aramies, Sastra. 2008)**

# Problema de la locomoción (IV)

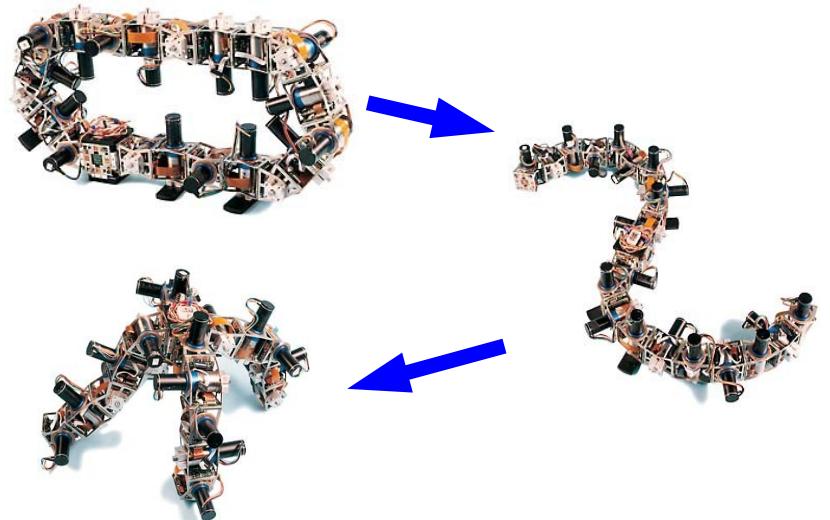
## Enfoque nuevo: Robots modulares auto-configurationables

- Los robots cambian su forma para adaptarse al terreno



*Auto-configuration simple en Polybot G1. De rueda a serpiente*

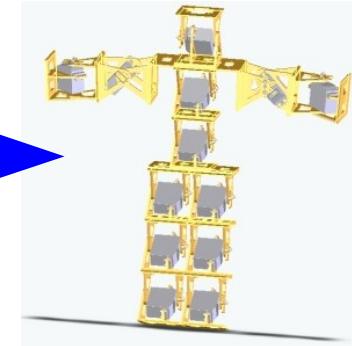
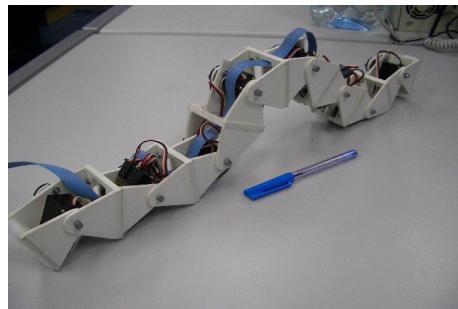
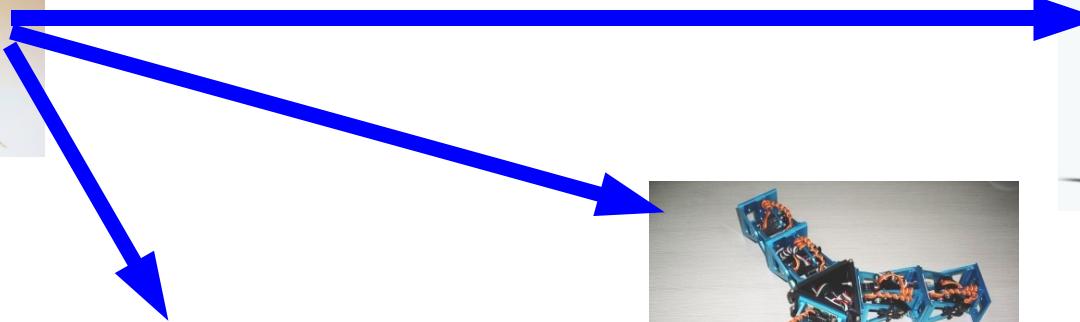
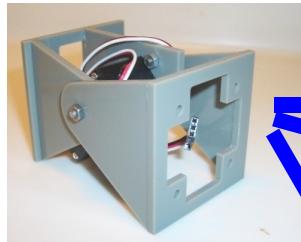
*Auto-configuration compleja: de rueda a serpiente y luego a robot de cuatro patas*



**(Polybot G1, Yim et al. 1997)**

**(Polybot G2, Yim et al. 2000)**

# Robótica modular

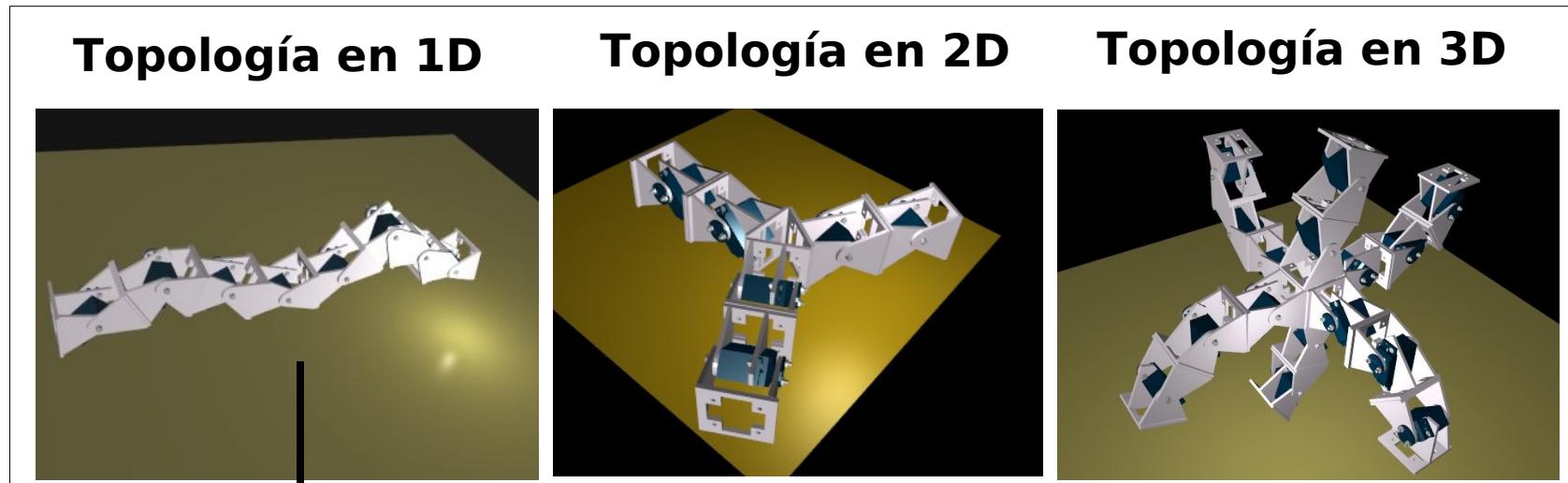


- Dos aspectos importantes
  - **Morfología** del robot
  - **Controlador** de la locomoción

# Morfología (I)

- Cada morfología tiene sus propias capacidades locomotivas
- El número de posibles configuraciones crece exponencialmente con el número de módulos
- Necesario establecer una clasificación

## Clasificación de robots modulares

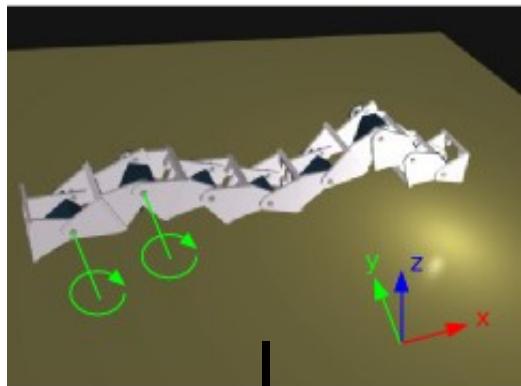


Robots ápodos

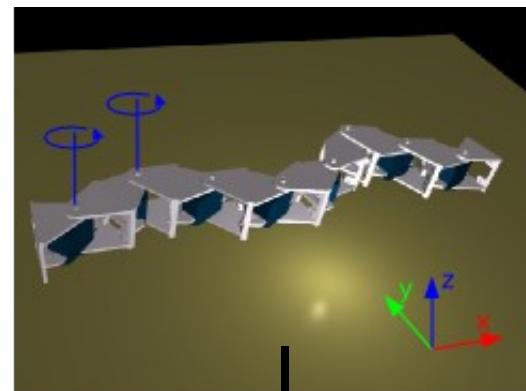
# Morfología (II)

## Clasificación de los robots con topología en 1D (Robots ápodos)

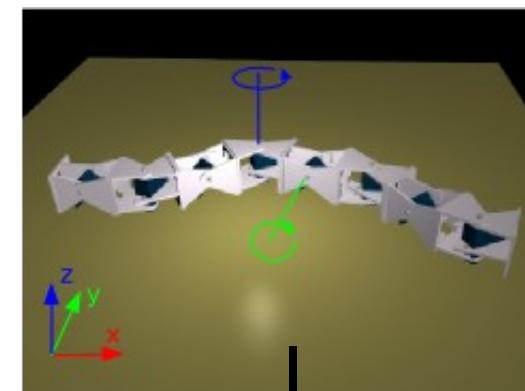
**Cabeceo-cabeceo**



**Viraje-viraje**



**Cabeceo-viraje**

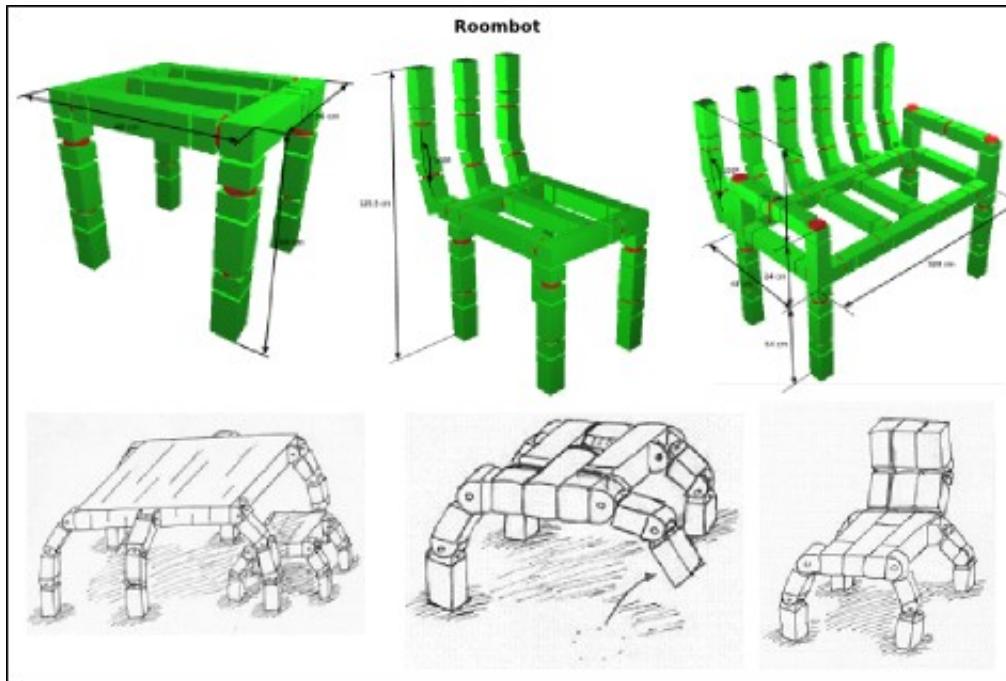


Para el estudio  
de la locomoción  
en 1D

Estos robots necesitan  
pieles artificiales  
especiales o ruedas  
pasivas para  
desplazarse

Para el estudio  
de la locomoción  
en 2D

# Robots modulares y objetos sólidos

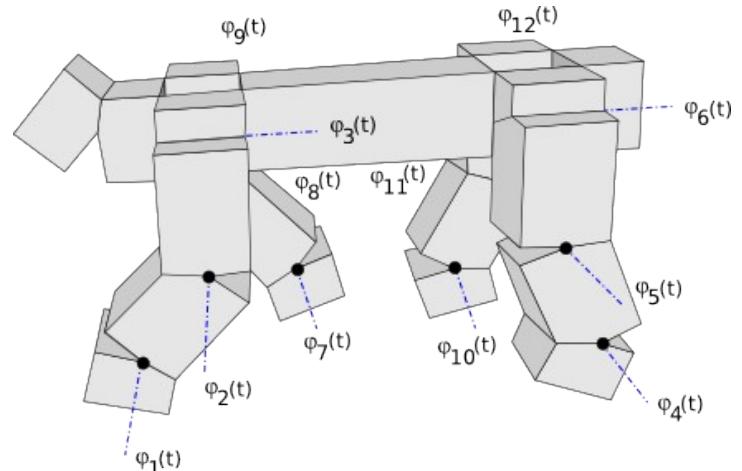


- Creación de objetos sólidos a partir de módulos
- Ej. **RoomBot**, (Arredondo et al.). Bioinspired Robotics Lab at EPFL
- Muebles auto-configurables capaces de moverse :-)

# Controladores de locomoción

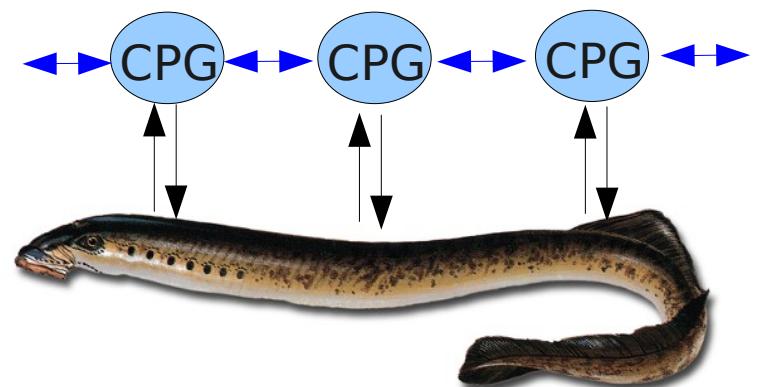
- **Problema de la coordinación:**

Cálculo de los ángulos de las articulaciones para moverse de diferentes maneras:  $\varphi_i(t)$



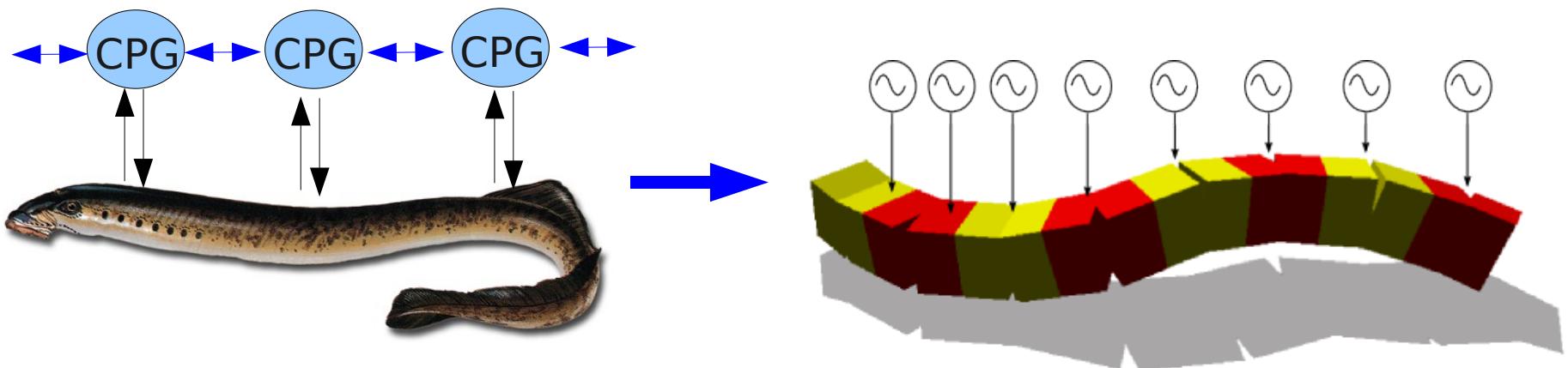
- **Enfoque clásico:** Modelado matemático
  - Cálculo mediante cinemática inversa
  - Desventajas: Ecuaciones sólo válidas para morfologías específicas

- **Controladores bio-inspirados:** CPGs
  - Generadores centrales de patrones
  - Controlan las actividades rítmicas de los músculos
  - Ej. Locomoción de la Lamprea

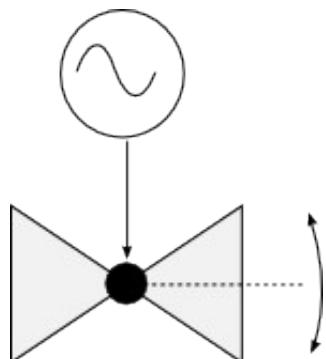


# Osciladores sinusoidales

- Los CPGs los remplazamos por un modelo simplificado



- Osciladores sinusoidales:



$$\varphi_i(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_i\right) + O_i$$

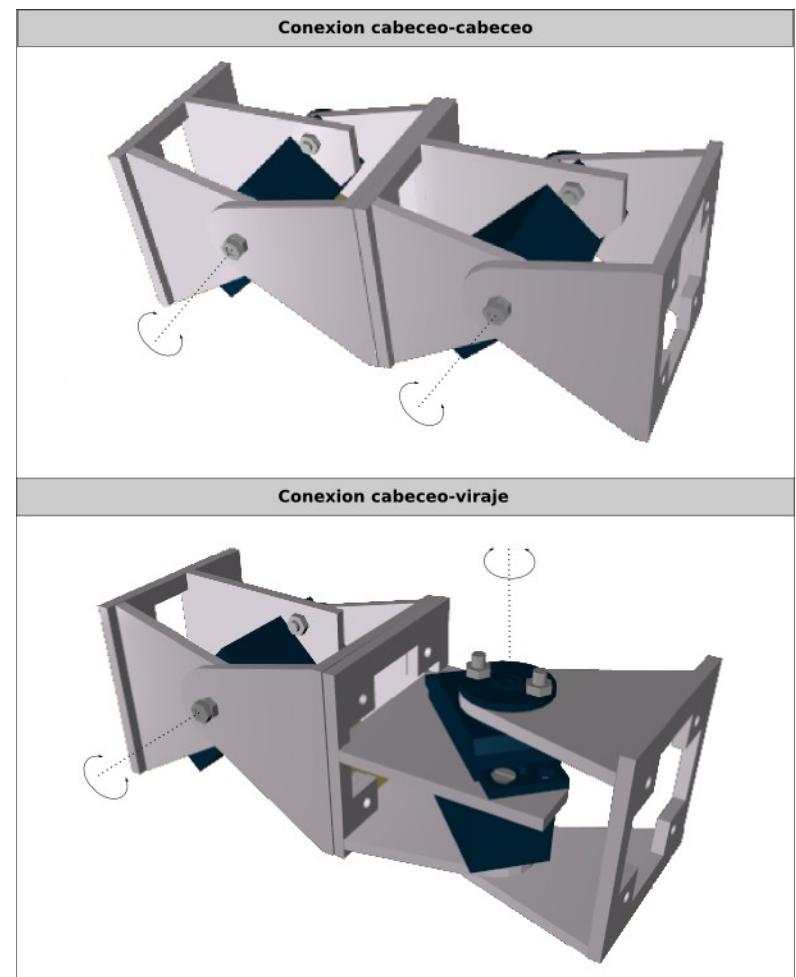
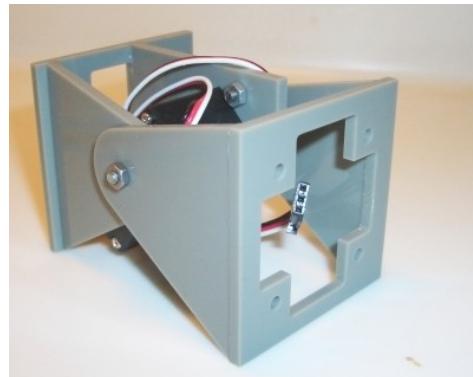
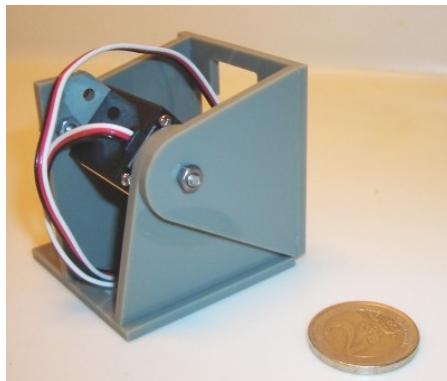
- **Ventajas:**
  - Pocos recursos necesarios para su implementación

## ÍNDICE

1. Introducción
2. **Módulos**
3. Osciladores
4. Locomoción en 1D
5. Locomoción en 2D
6. Simulación
7. Conclusiones y trabajo futuro

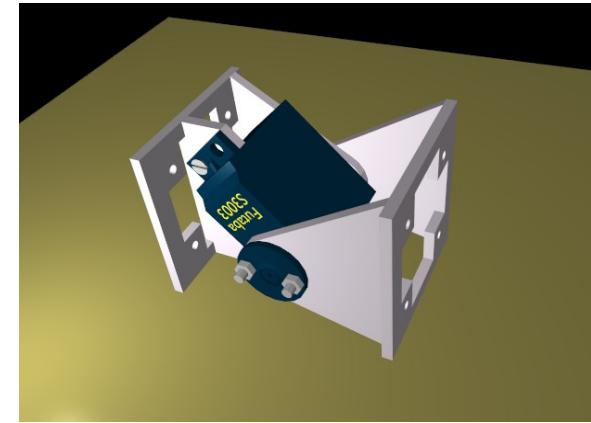
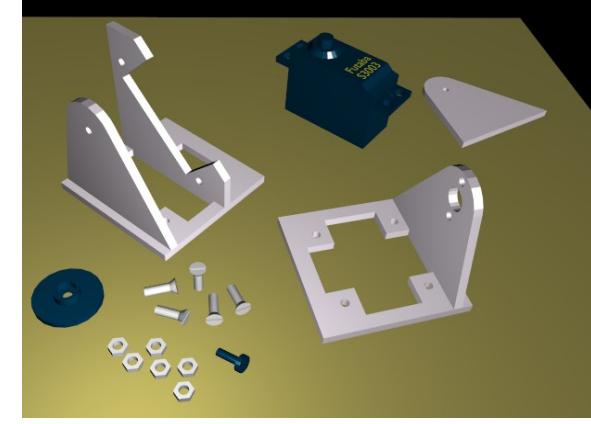
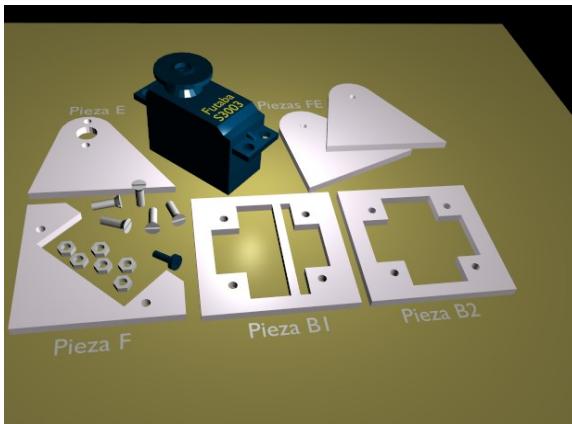
# Primera generación: Módulos Y1

- Un grado de libertad
- Fáciles de construir
- Baratos
- Servo: Futaba 3003
- Material: Plástico de 3mm
- Tamaño: 52x52x72mm
- Libres



# Construcción de los Módulos Y1

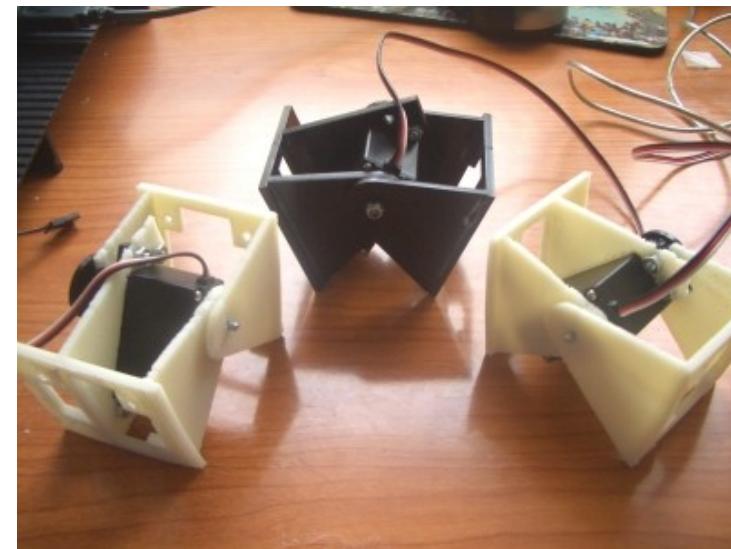
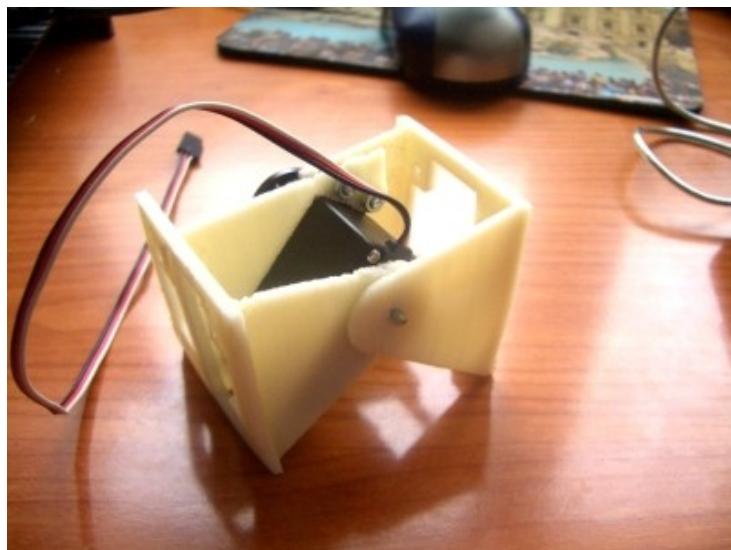
Demo qcad



- Cortar las piezas: Corte por láser, corte “a mano”
- Pegarlas
- Montar el servo

# Módulos REPY-1: Versión “imprimible”

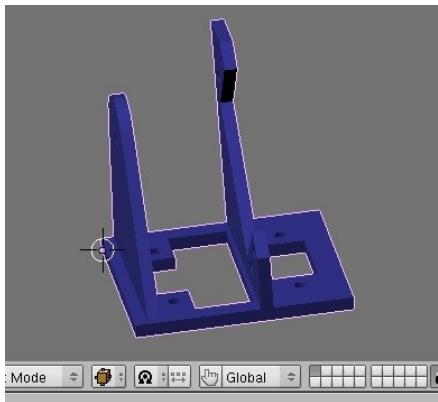
- Fabricación mediante una **impresora 3D** casera: Reprap
- Material: Plástico ABS (el mismo que usa Lego)
- Acabado “tosco”
- Cada módulo tiene dos partes: la cabeza y el módulo
- Tiempo de impresión: 1h y media (45 minutos cada pieza)
- Tiempo de montaje: 5 minutos
- Compatibles con los módulos Y1



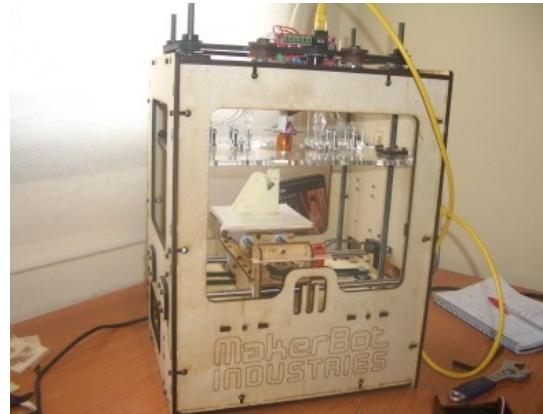
# Módulos REPY-1: Fabricación

Demo Blender

Pieza virtual  
(Blender)



Impresión



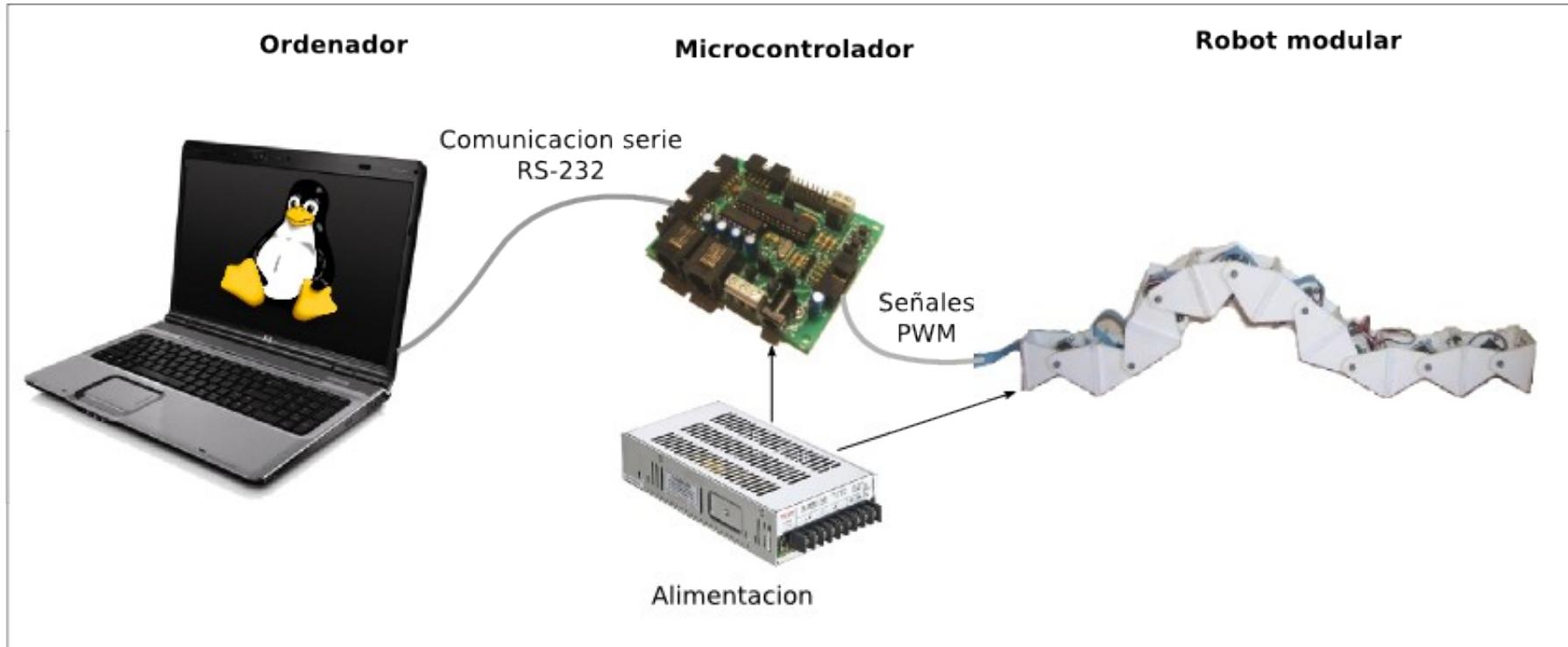
Pieza real



Montaje



# Electrónica y control

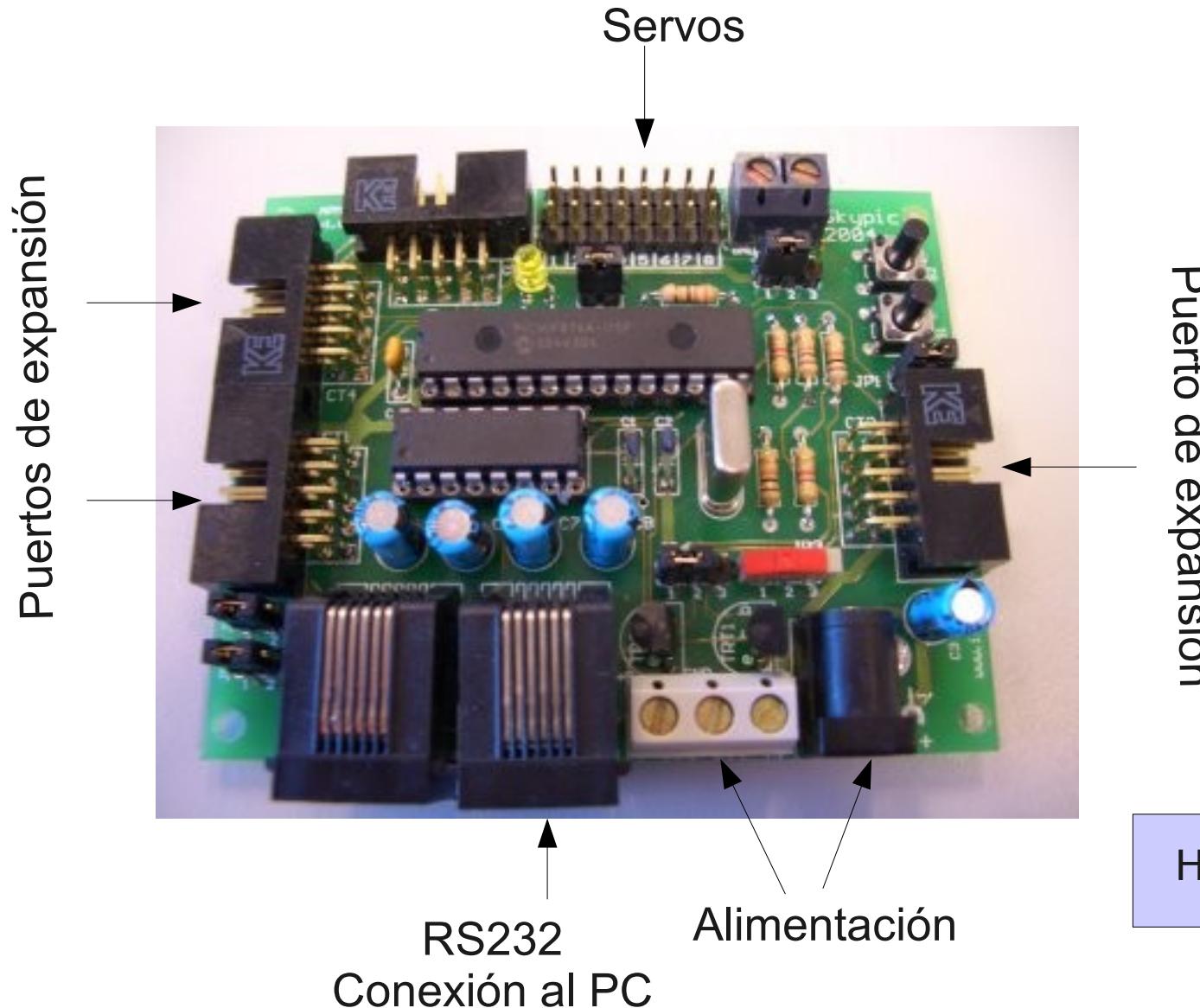


- Electrónica y alimentación fuera del robot
- Control desde el PC
- Esta primera versión se ha usado para probar la viabilidad de los controladores

# Electrónica: Tarjeta Skypic

Demo

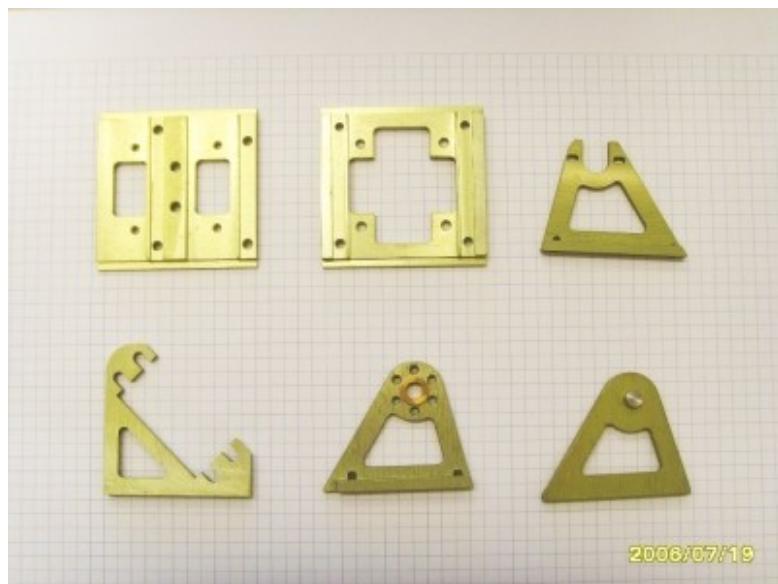
- Microcontrolador **PIC16F876A** de Microchip



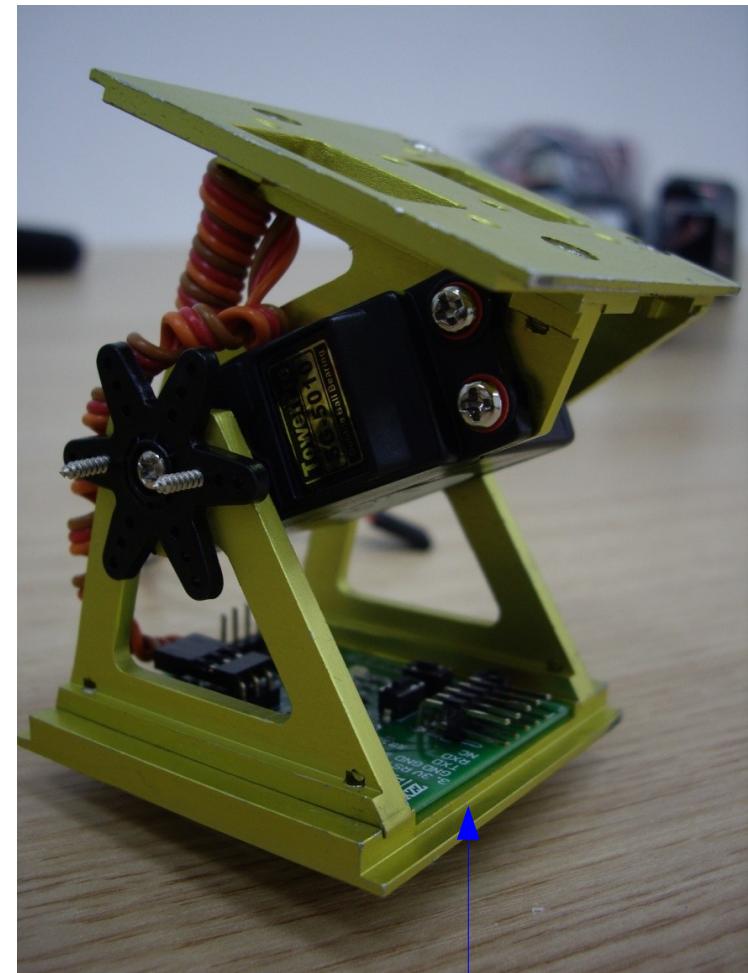
Hardware libre

## Segunda generación: Módulos Cube-M

- Hechos en aluminio
- Fáciles de montar
- Electrónica y sensores se pueden situar dentro
- Desarrollada en colaboración con la **Universidad de Hamburgo**



2006/07/19



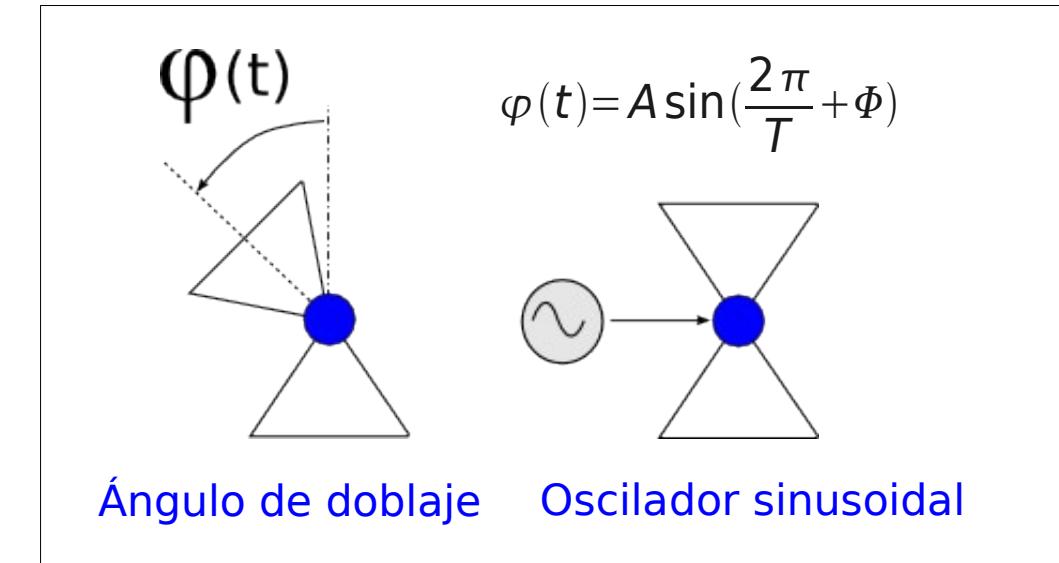
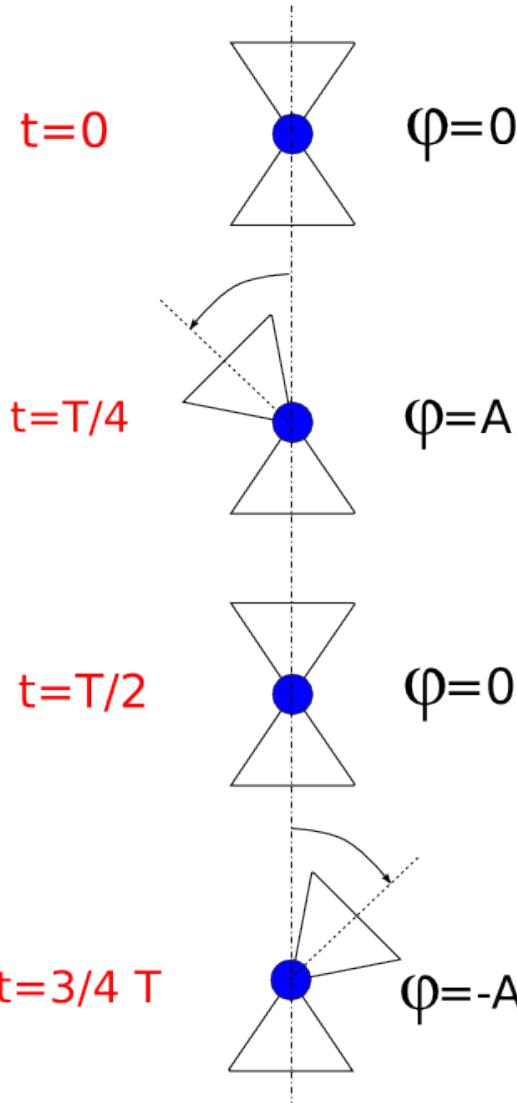
Electrónica

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Módulos
3. **Osciladores**
4. Locomoción en 1D
5. Locomoción en 2D
6. Simulación
7. Conclusiones y trabajo futuro

# Oscilación de un módulo

Demo



## Parámetros:

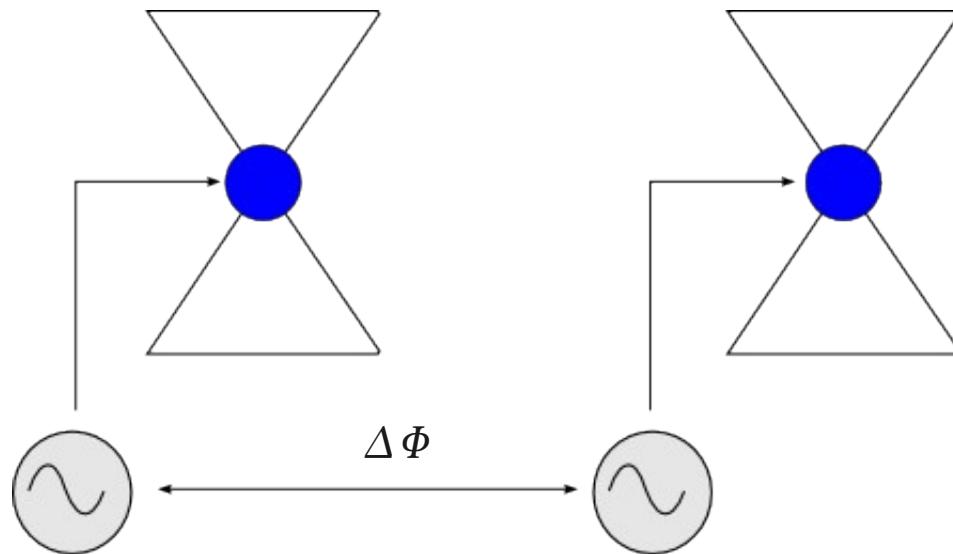
- Amplitud:**  $A$  Ángulo de doblaje máximo
- Periodo:**  $T$  Frecuencia de oscilación
- Fase inicial:**  $\Phi$  Ángulo de doblaje inicial

En régimen permanente la fase inicial no tiene importancia

# Oscilación de varios módulos (I)

$$\varphi_1(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \Phi_0\right)$$

$$\varphi_2(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \Delta\Phi + \Phi_0\right)$$



**Nuevo parámetro:**

- **Diferencia de fase:**  $\Delta\Phi$

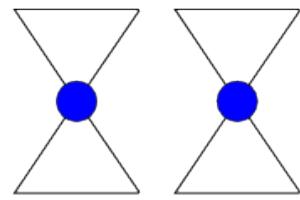
Establece el movimiento relativo de un módulo respecto a otro

# Oscilación de dos módulos (II)

Demo

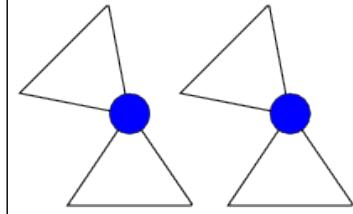
$\Delta\Phi=0$

$t=0$

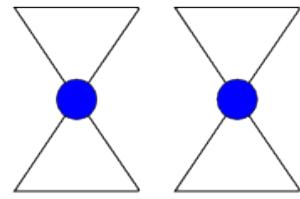


$\Delta\Phi=90$

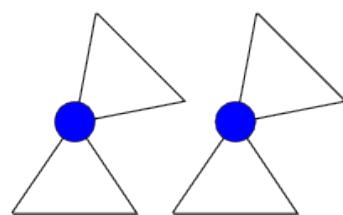
$t=T/4$



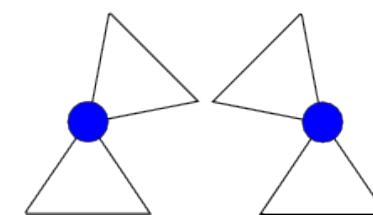
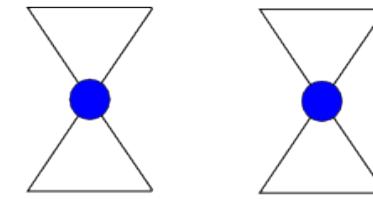
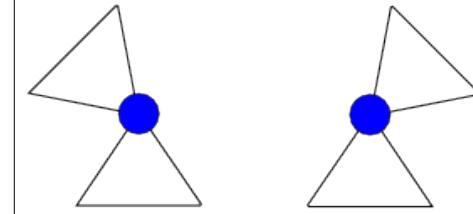
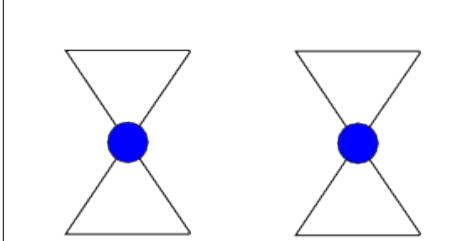
$t=T/2$



$t=3/4 T$



$\Delta\Phi=180$



## ÍNDICE

1. Introducción
2. Módulos
3. Osciladores
4. **Locomoción en 1D**
5. Locomoción en 2D
6. Simulación
7. Conclusiones y trabajo futuro

# Configuración mínima

**Problema de la configuración mínima:**

¿Cuántos módulos son necesarios para construir un robot modular con topología de 1D capaz de moverse en línea recta?

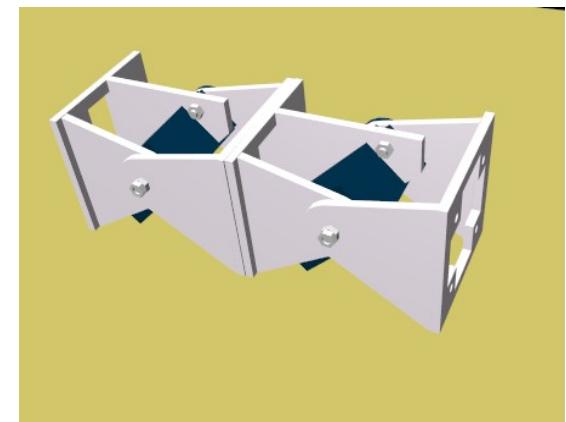
¿¿¿??

# Minicube-I

Demo

- **Morfología**

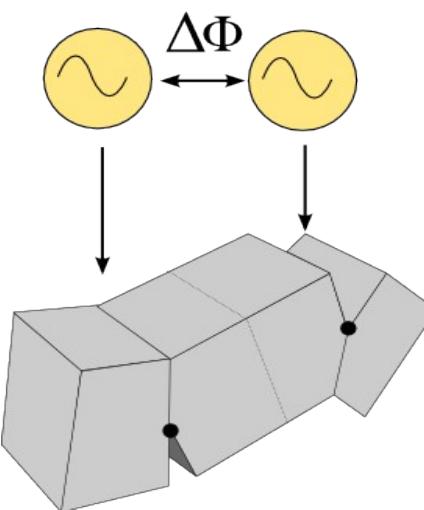
2 modules con conexión  
cabeceo-cabeceo



- **Controlador:**

- Dos generadores iguales
- Parámetros.

$$A, \Delta\Phi, T$$



# Minicube-I (I)

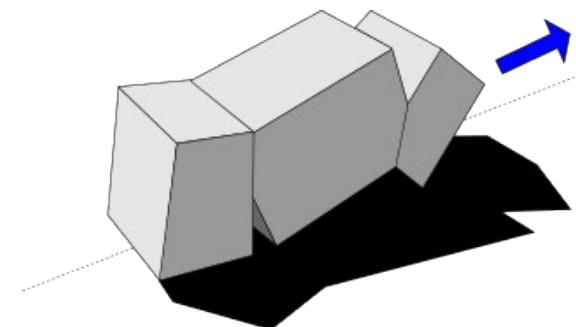
## Osciladores y locomoción:

- **Periodo** --> Velocidad
- **Amplitud** --> Paso
- **Diferencia de fase** --> Coordinación

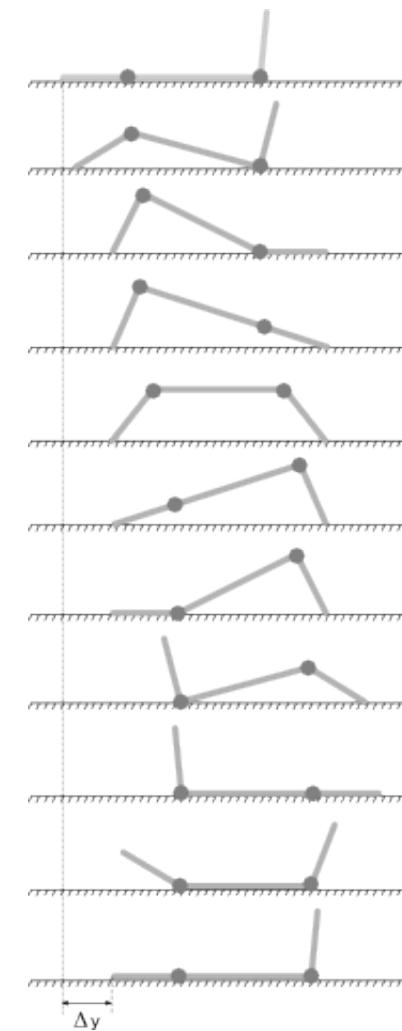
## Espacio de control

- Dos dimensiones:  $A, \Delta\Phi$
- Periodo lo tomamos constante

Valores típicos:  $A=40, \Delta\Phi=120$



Modelo alámbrico



# Oruga de 3 módulos

Demo

- **Morfología:** 3 Módulos Cube-M con conexión cabecero-cabece
- **Controlador:** 3 osciladores iguales



- Estudio de la locomoción de las orugas

## Mayor eficiencia:

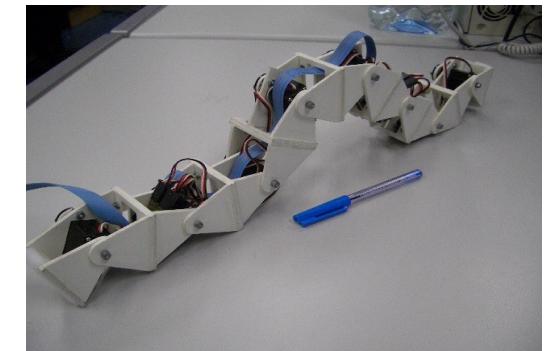
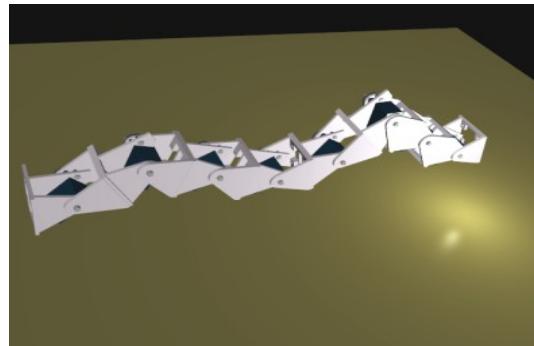
- $A=40$  grados
- $\Delta\Phi=125$

# Cube Revolutions (I)

Vídeo

- **Morfología:**

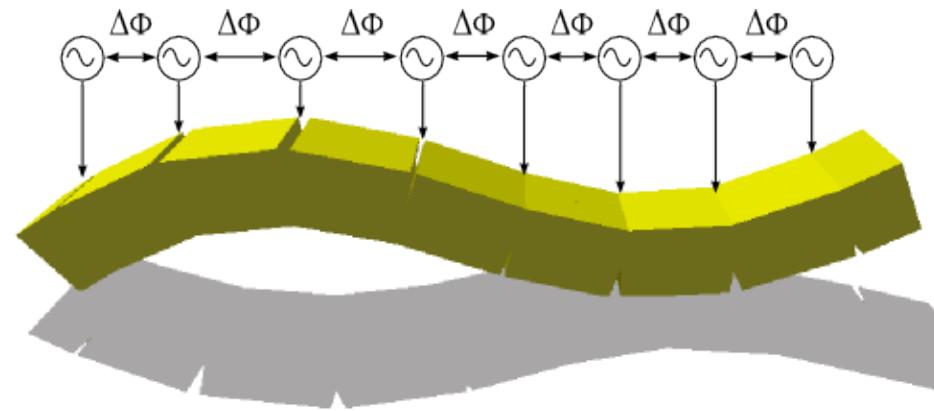
8 módulos con conexión  
cabeceo-cabeceo



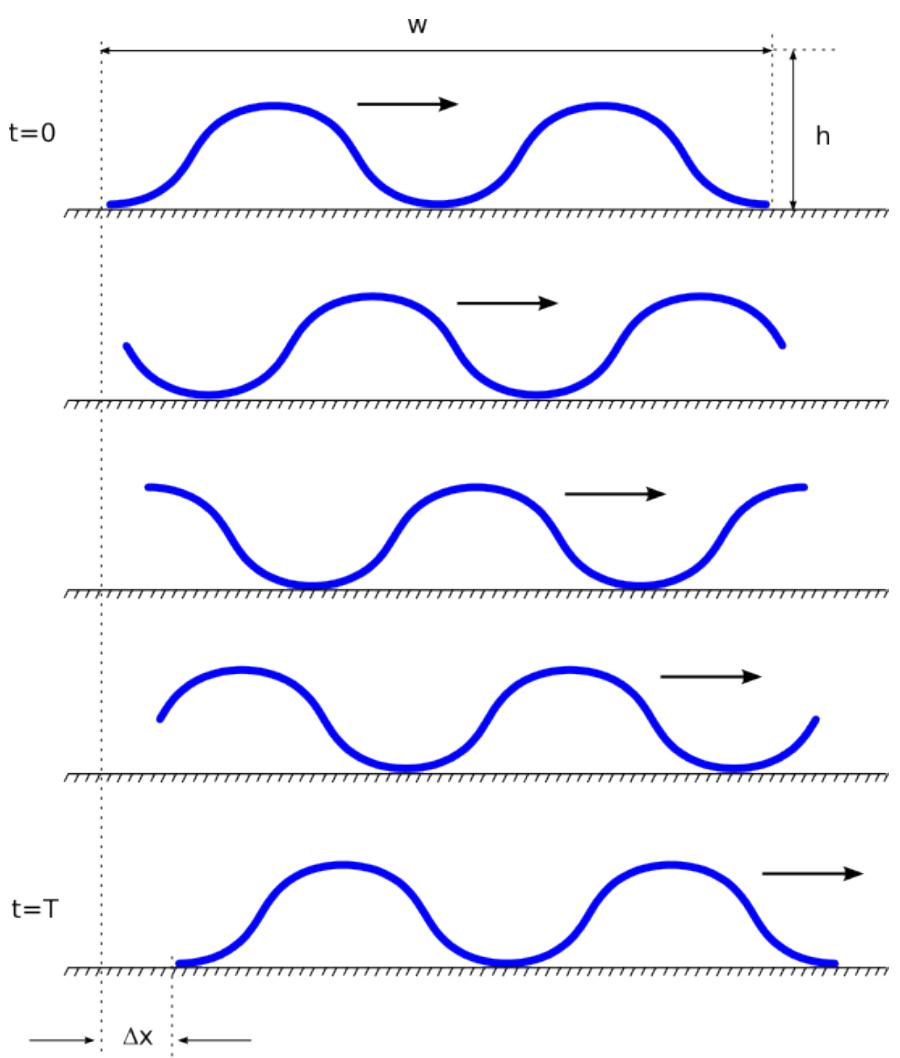
- **Control:**

- 8 generadores iguales
- Parámetros:

$$A, \Delta\Phi, T$$



# Mecanismo de locomoción



- **Mecanismo:** propagación de ondas
- **Forma del robot:** curva serpentinoide

## Algunas ecuaciones:

- **Paso:**  $\Delta x$
- **Velocidad media:**  $V = \frac{\Delta x}{T}$
- **Cálculo del paso:**

$$\Delta x = \frac{l}{k} - \int_0^k \cos(\alpha \cos(\frac{2\pi k}{l}s)) ds$$

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Módulos
3. Osciladores
4. Locomoción en 1D
5. **Locomoción en 2D**
6. Simulación
7. Conclusiones y trabajo futuro

# Configuración mínima

## Problema de la configuración mínima:

¿Cuántos módulos son necesarios para construir un robot modular con topología de 1D capaz de moverse en un plano?

¿Cuántos tipos de movimientos diferentes puede realizar?

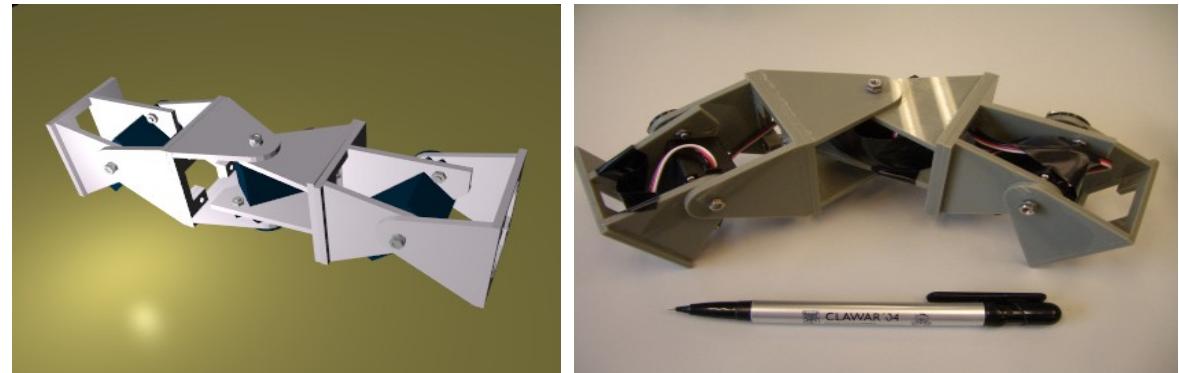
¿¿¿???

# Minicube-II

Demostración

- **Morfología:**

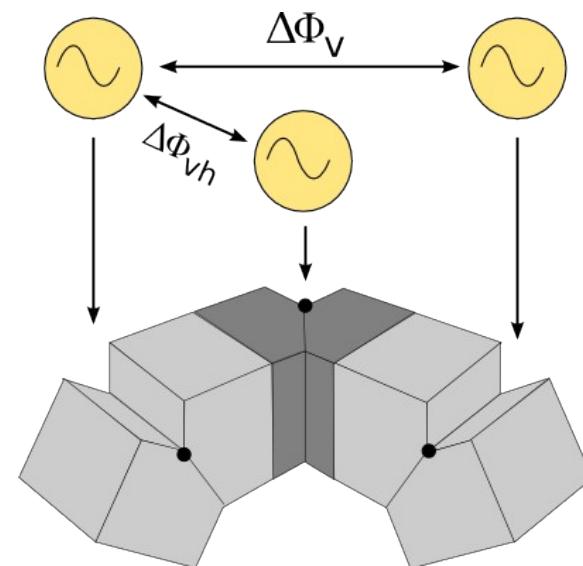
Tres módulos con conexión cabeceo-viraje



- **Control:**

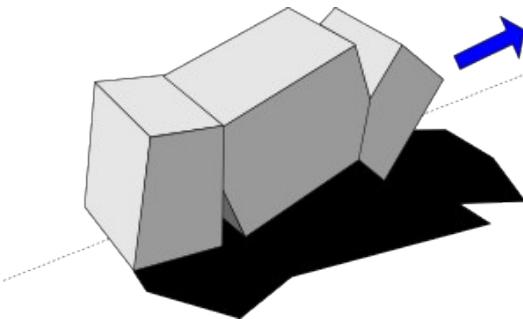
- Tres generadores sinusoidales
- Parámetros:

$$A_v, A_h, \Delta\Phi_v, \Delta\Phi_{vh}, T$$



# Minicube-II (II)

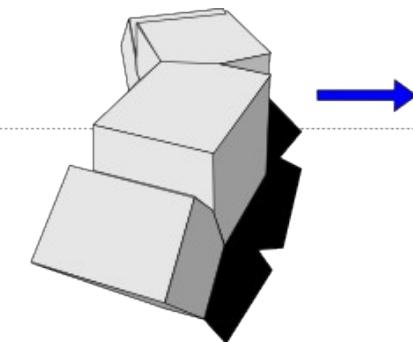
Línea recta



$$A_v = 40, A_h = 0$$

$$\Delta \Phi_v = 120$$

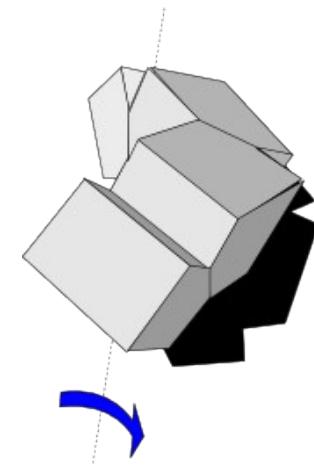
Desplazamiento lateral



$$A_v = A_h < 40$$

$$\Delta \Phi_{vh} = 90, \Delta \Phi_v = 0$$

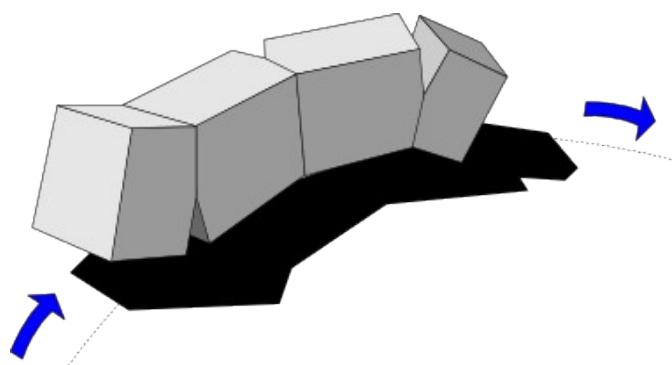
Radar



$$A_v = A_h > 60$$

$$\Delta \Phi_{vh} = 90, \Delta \Phi_v = 0$$

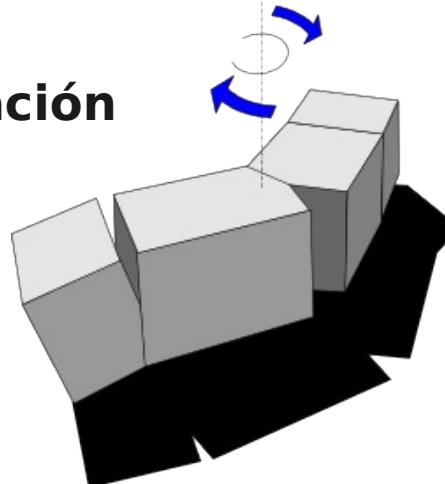
Arco



$$A_v = 40, A_h = 0$$

$$O_h = 30, \Delta \Phi_v = 120$$

Rotación



$$A_v = 10, A_h = 40$$

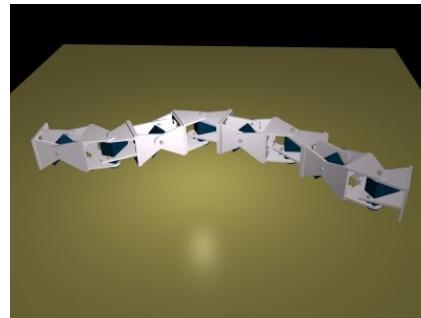
$$\Delta \Phi_{vh} = 90, \Delta \Phi_v = 180$$

# Hypercube (I)

Demostración

- **Morfología:**

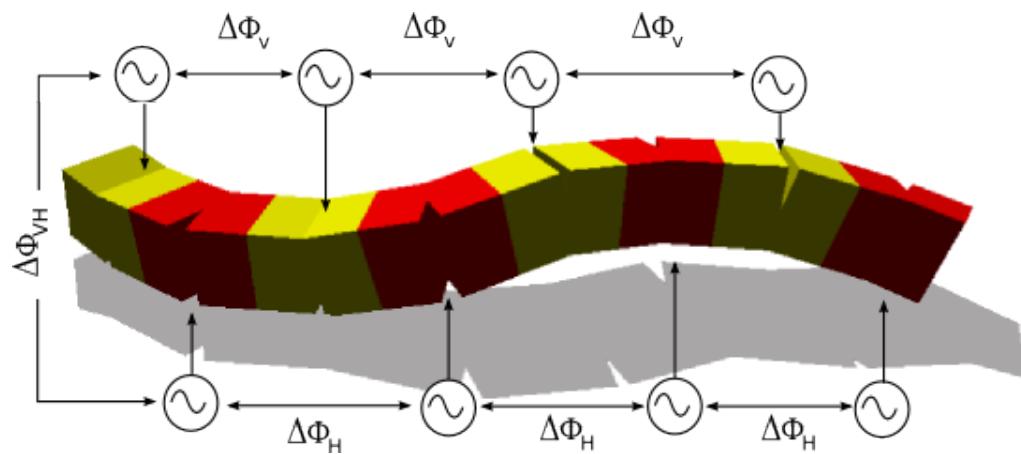
8 módulos con conexión  
cabeceo-viraje



- **Control:**

- 8 generadores iguales
- Parámetros:

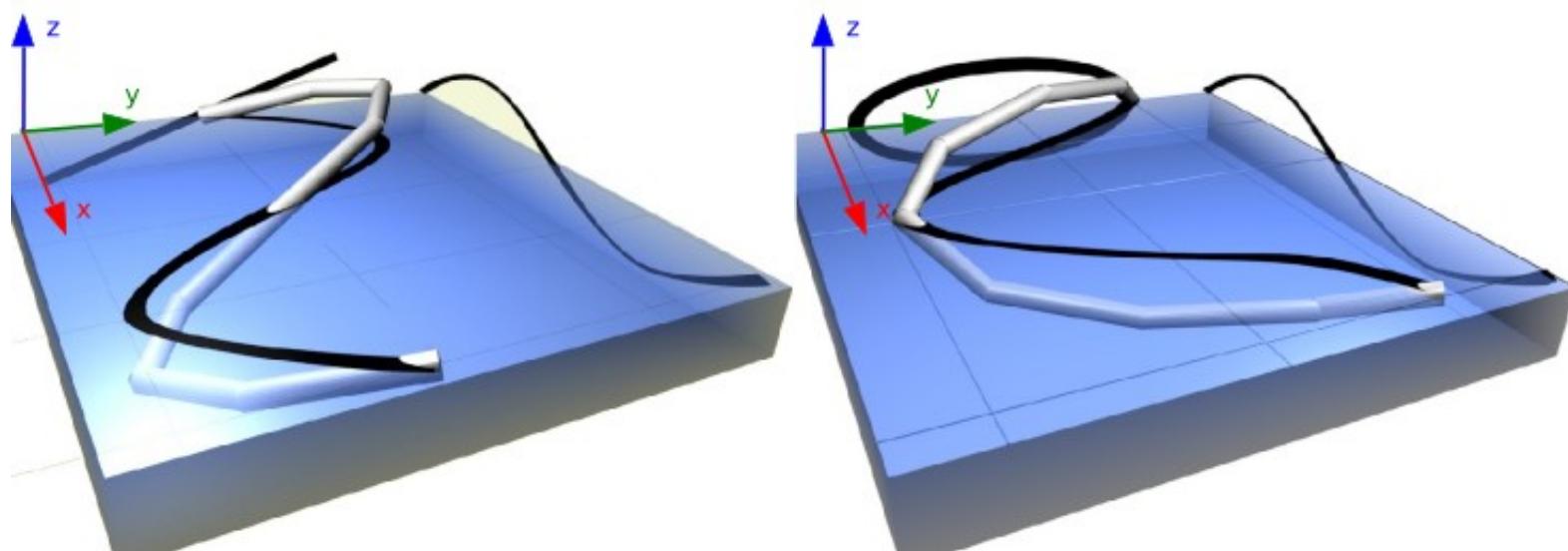
$$A_h, A_v, \Delta\Phi_h, \Delta\Phi_v, \Delta\Phi_{vh}, T$$



# Hypercube (II)

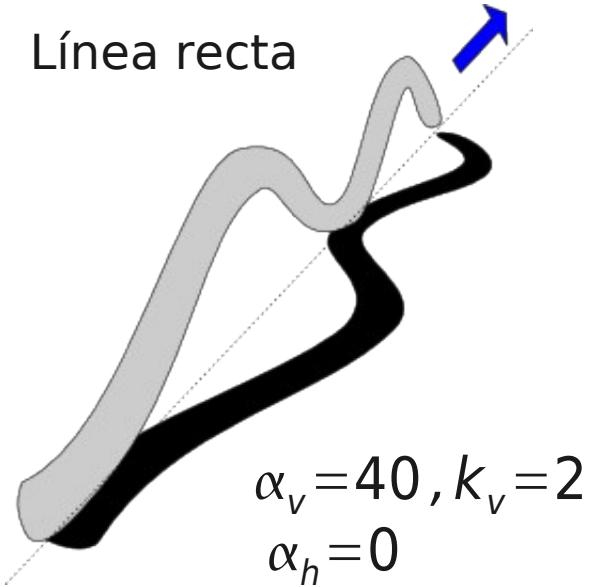
## Mecanismo de locomoción

- Onda corporal tridimensional



# Hypercube (III)

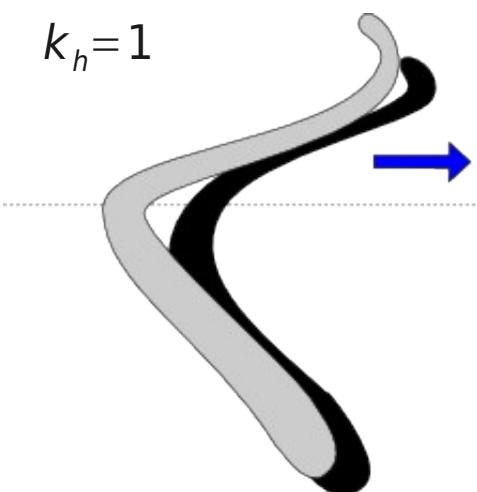
Línea recta



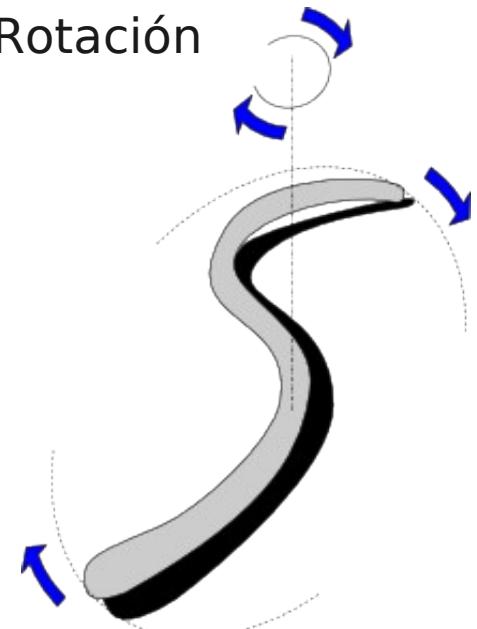
Desplazamiento lateral

$$\alpha_v \rightarrow 0, k_v = k_h, \Delta\Phi_{vh} = 90^\circ$$

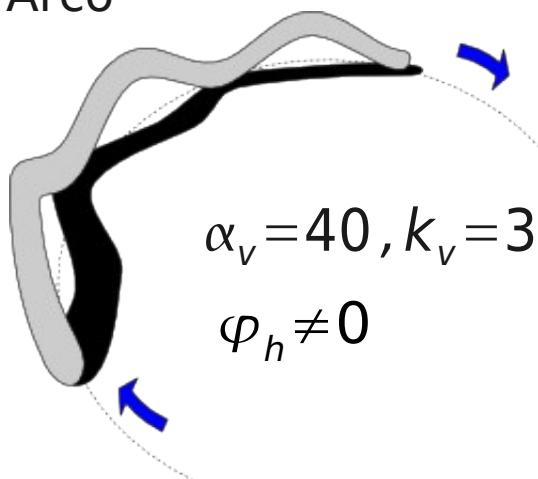
$$k_h = 1$$



Rotación

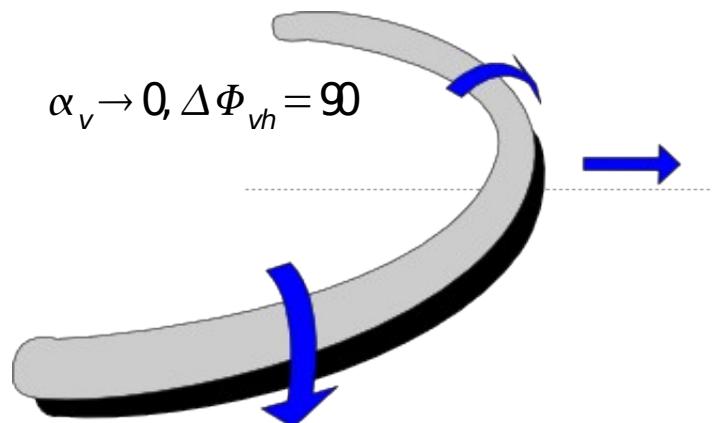


Arco

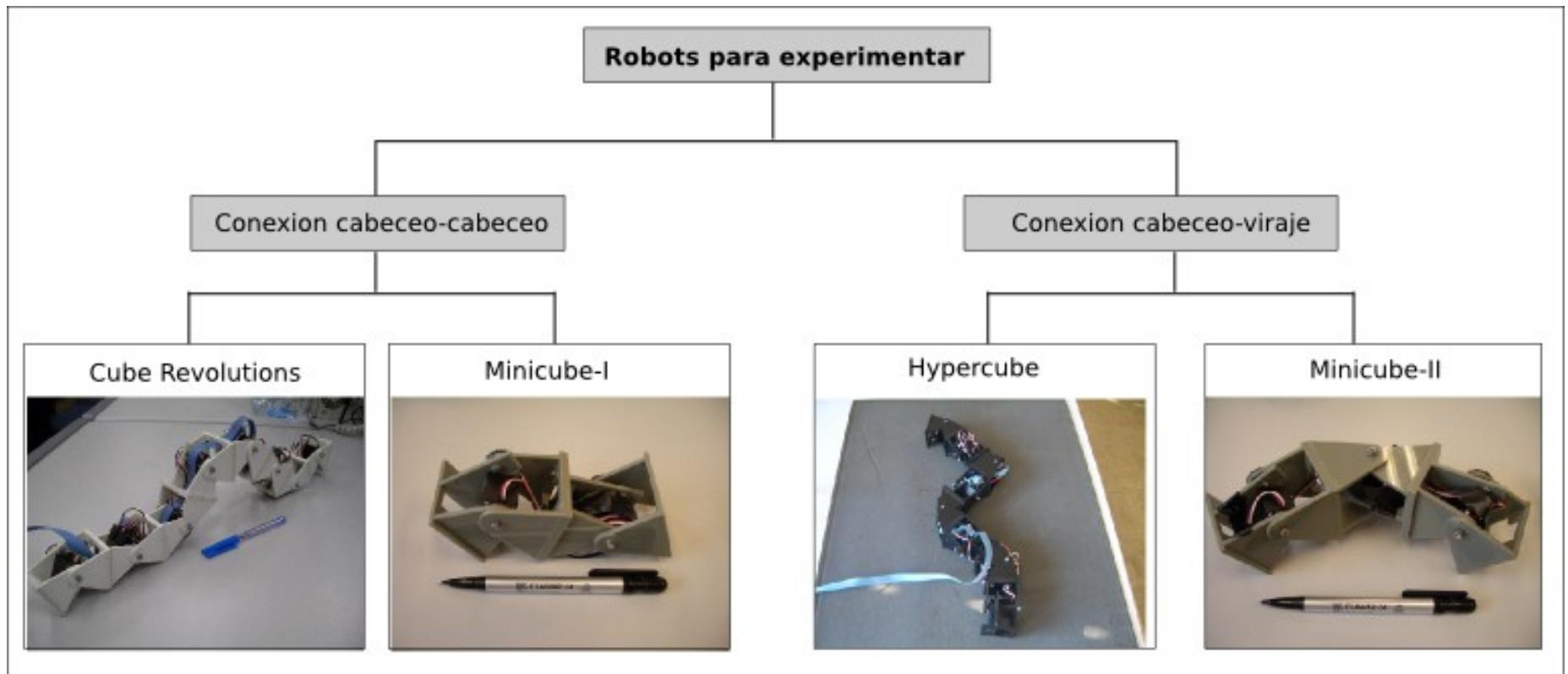


Rodar

$$\alpha_v \rightarrow 0, \Delta\Phi_{vh} = 90^\circ$$



# Resumen de los robots



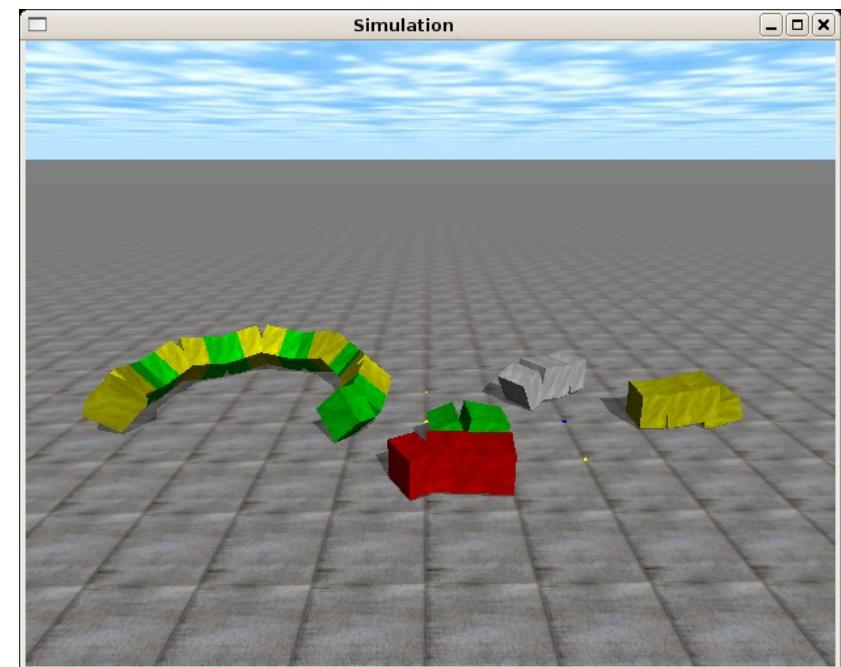
## ÍNDICE

1. Introducción
2. Módulos
3. Osciladores
4. Locomoción en 1D
5. Locomoción en 2D
6. **Simulación**
7. Conclusiones y trabajo futuro

# Simulación (I)

¿Cómo hemos encontrado las soluciones?

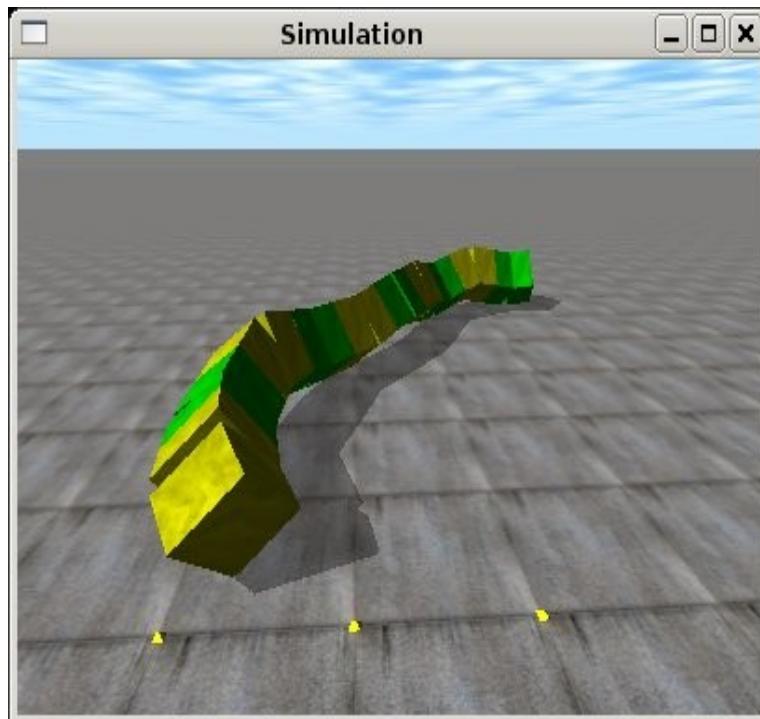
- Búsquedas en los espacios de control
- Utilización de algoritmos genéticos (PGApack)
- Función de evaluación: Paso del robot
- Motor físico: Open Dynamics Engine (ODE)
- Descarte de soluciones
- **Comprobación en robots reales**



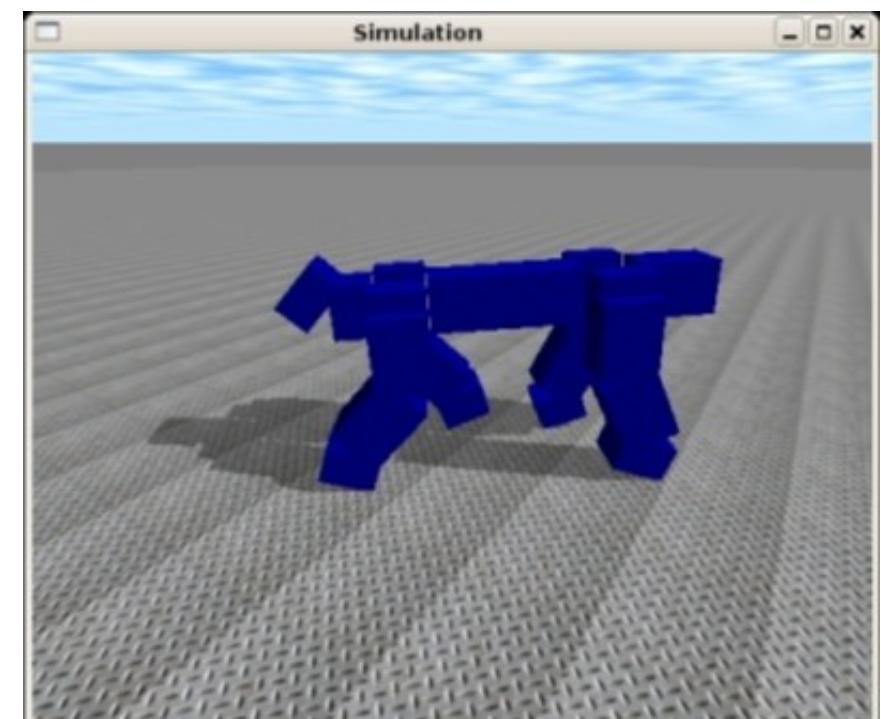
# Simulación (II)

Demostración

Cube-simulator



MRSuite



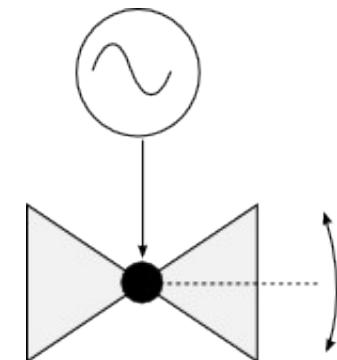
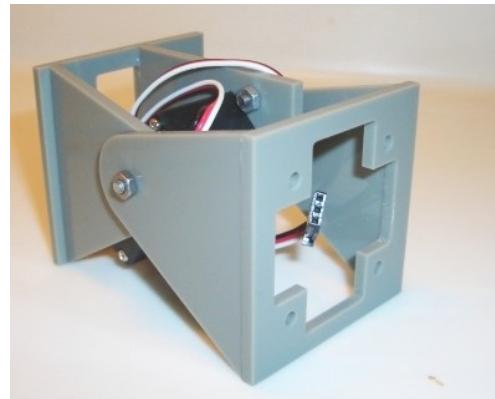
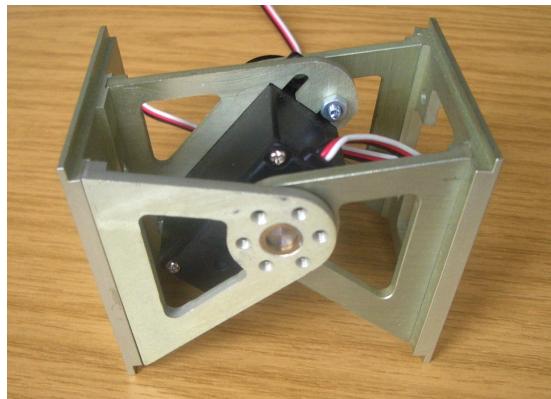
- Lenguaje: C
- Sólo topologías 1D
- Juan González

- Lenguaje: Python
- Topologías 1D y 2D
- Rafael Treviño

# Conclusiones

El modelo basado en **generadores sinusoidales es válido** para la locomoción de robots modulares con topología de 1D

- Requiere muy pocos recursos para su implementación
- Se consiguen movimientos muy suaves y naturales
- Se pueden realizar diferentes tipos de movimientos



$$\varphi_i(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_i\right) + O_i$$

# Trabajo actual

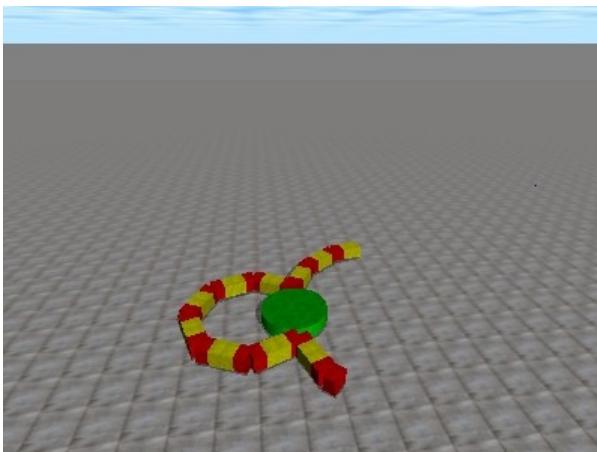
Locomoción de topologías 2D



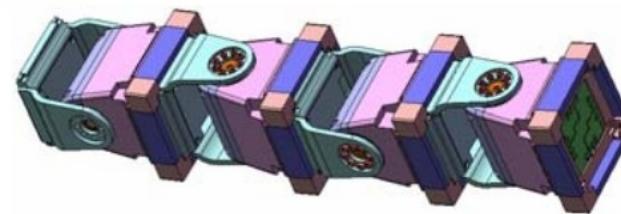
Orugas trepadoras



Agarre con robots modulares



Nuevos módulos



## Donde encontrar más información...

- Todo lo tengo publicado en mi página personal bajo licencia libre: artículos, planos, hardware, software, presentaciones, etc.

[www.pearobotics.com/juan](http://www.pearobotics.com/juan)

- O me podéis mandar un correo a mi dirección personal:

[juan@pearobotics.com](mailto:juan@pearobotics.com)

Muchas gracias por vuestra atención

:-)



# Robótica modular y locomoción



**Juan González Gómez**  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid