

---

# Robótica Modular y locomoción: Aplicación a Robots Ápodos

D. Juan González Gómez  
Tesis Doctoral



Director: Dr. Eduardo Boemo Scalvinoni

---

# **Contenidos**

- 1. Introducción**
2. Clasificación
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

# El Problema de la locomoción

- *Diseñar y construir un robot capaz de desplazarse desde un punto a otro con independencia del terreno*

- **Nivel Superior:**

- Percepción del entorno
- Planificación de trayectorias
- Navegación
- Estrategias de decisión

- **Nivel Inferior:**

- Coordinación de las articulaciones
- Morfología del robot (patas, ruedas...)
- Modos de caminar

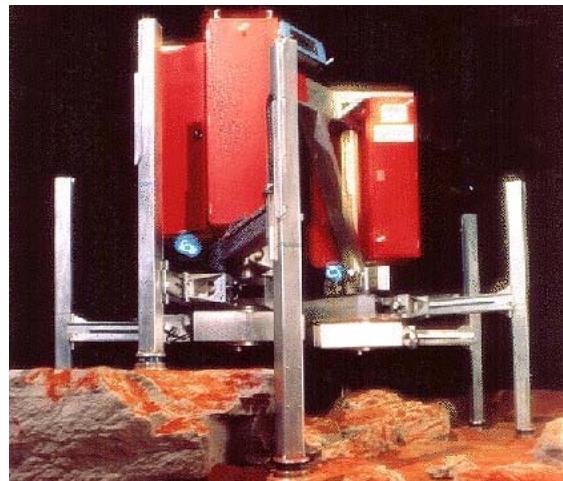


Ámbito de esta tesis

## El Problema de la locomoción (II)

### Enfoque clásico:

- Estudiar entorno
- Diseñar la morfología del robot
- Realizar los modos de caminar

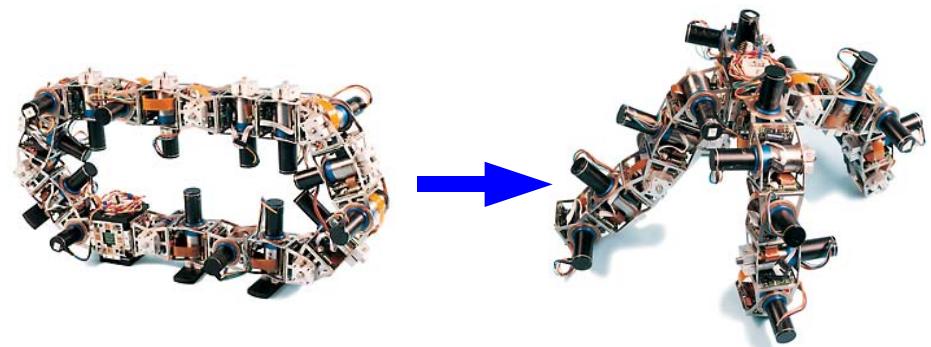


(CMU Ambler, Krotkov et al)

### Nuevo enfoque: (Yim, 1995)

Robótica modular Auto-configurable

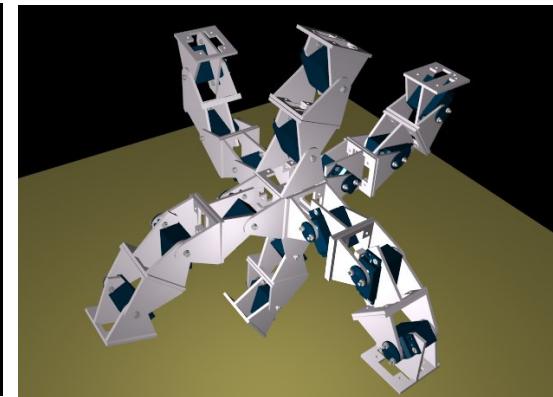
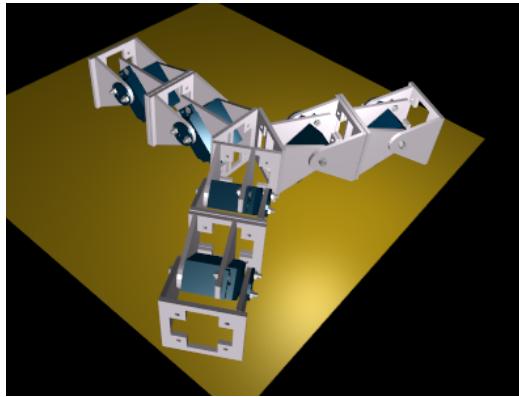
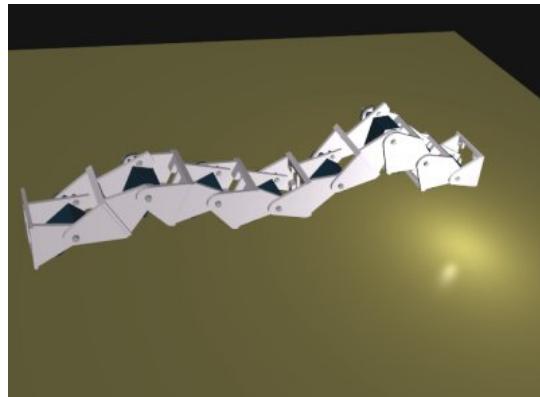
- Robots creados a partir de módulos
- Adaptan su morfología al terreno



(Polybot, Yim et al)

## Robótica modular y locomoción

- Estudio de la locomoción de las configuraciones
- Crecimiento exponencial con módulos
- Clasificación
- Ámbito de esta tesis: Topologías de 1D



## Controladores

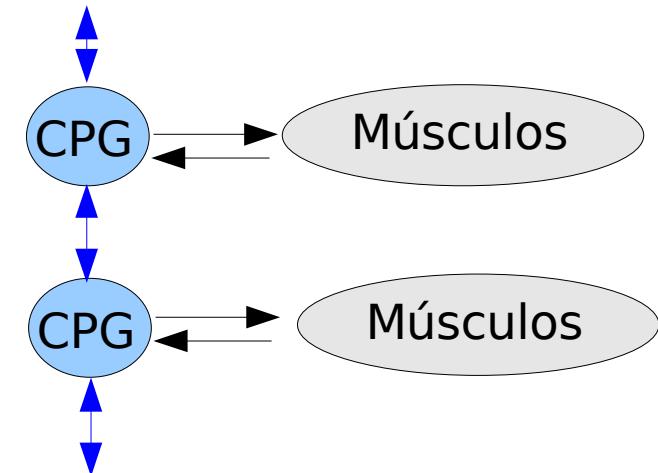
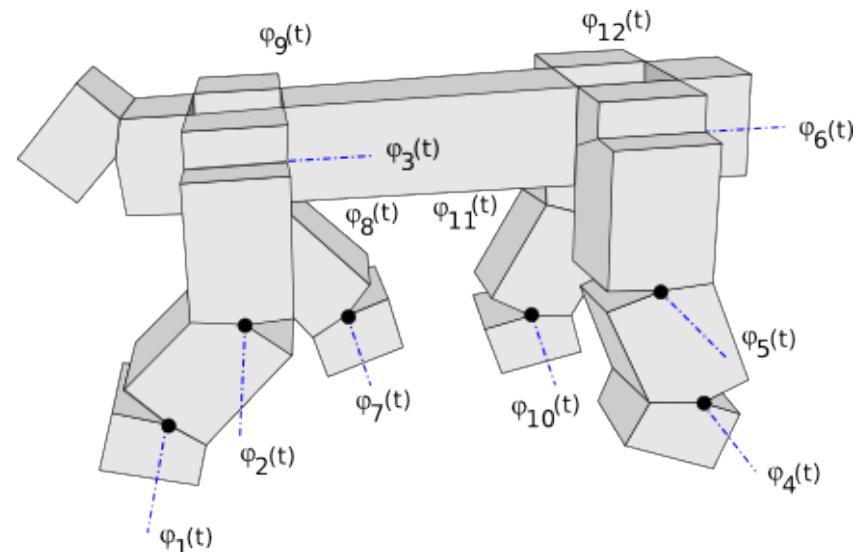
- Cálculo de la posición de las articulaciones:  $\varphi_i(t)$

- **Enfoque clásico:**

- Cinemática inversa
- Definir trayectoria de puntos y obtener los ángulos
- Inconvenientes: muchas operaciones, válido para una morfología concreta

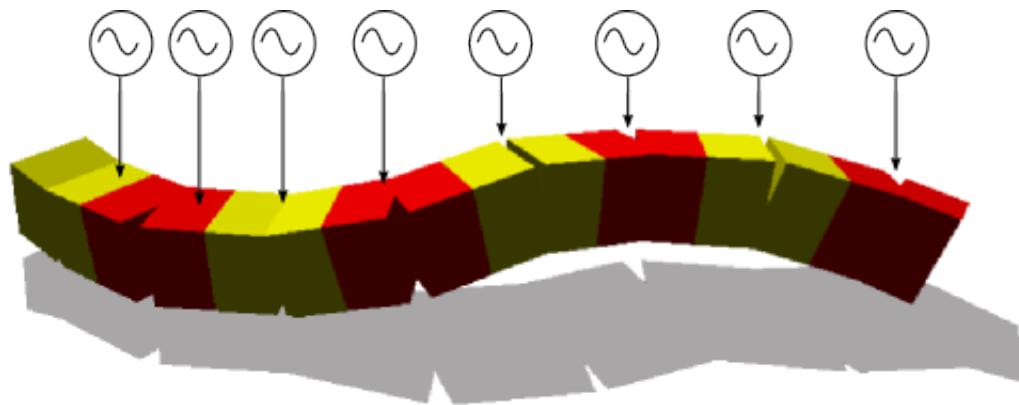
- **Enfoque Bio-inspirado:** CPGs

- Actúan directamente sobre los músculos
- Sincronización entre ellos

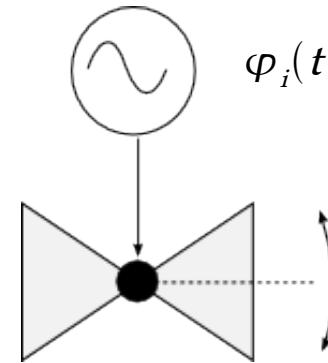


## Generadores sinusoidales

- **Otro Enfoque:** Generadores sinusoidales
- Cada generador actúa sobre un módulo



- Coordinación
  - Encontrar los valores de los parámetros de los generadores

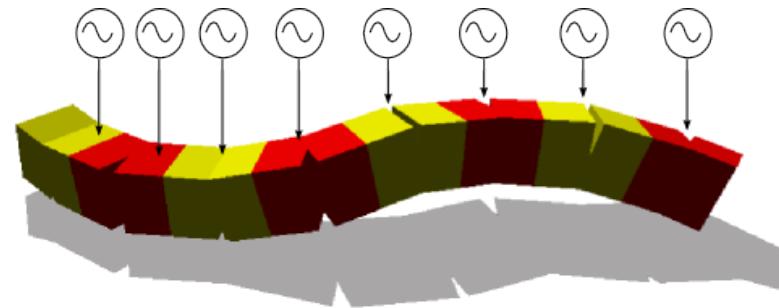


$$\varphi_i(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_i\right) + O_i$$

- **Ventajas:**
  - Implementación en diferentes tecnologías
  - Simples
  - Pocos cálculos

## Objetivos

- Viabilidad del modelo
- Modos de caminar
- Caracterización
- Configuraciones mínimas
- Cinemática

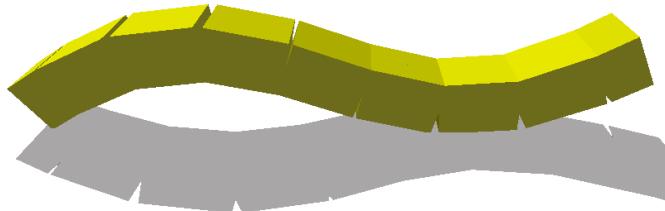


**Estudio del problema de la locomoción de los robots ápodos modulares con topología de 1D, de M módulos, en una y dos dimensiones**

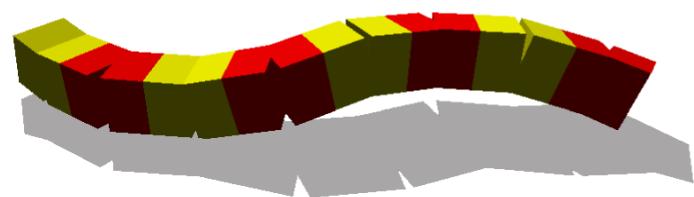
## Restricciones

- Grupos de estudio:

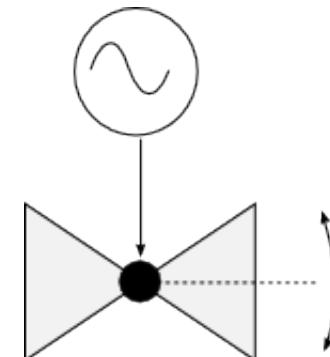
Conexión cabeceo-cabeceo



Conexión cabeceo-viraje



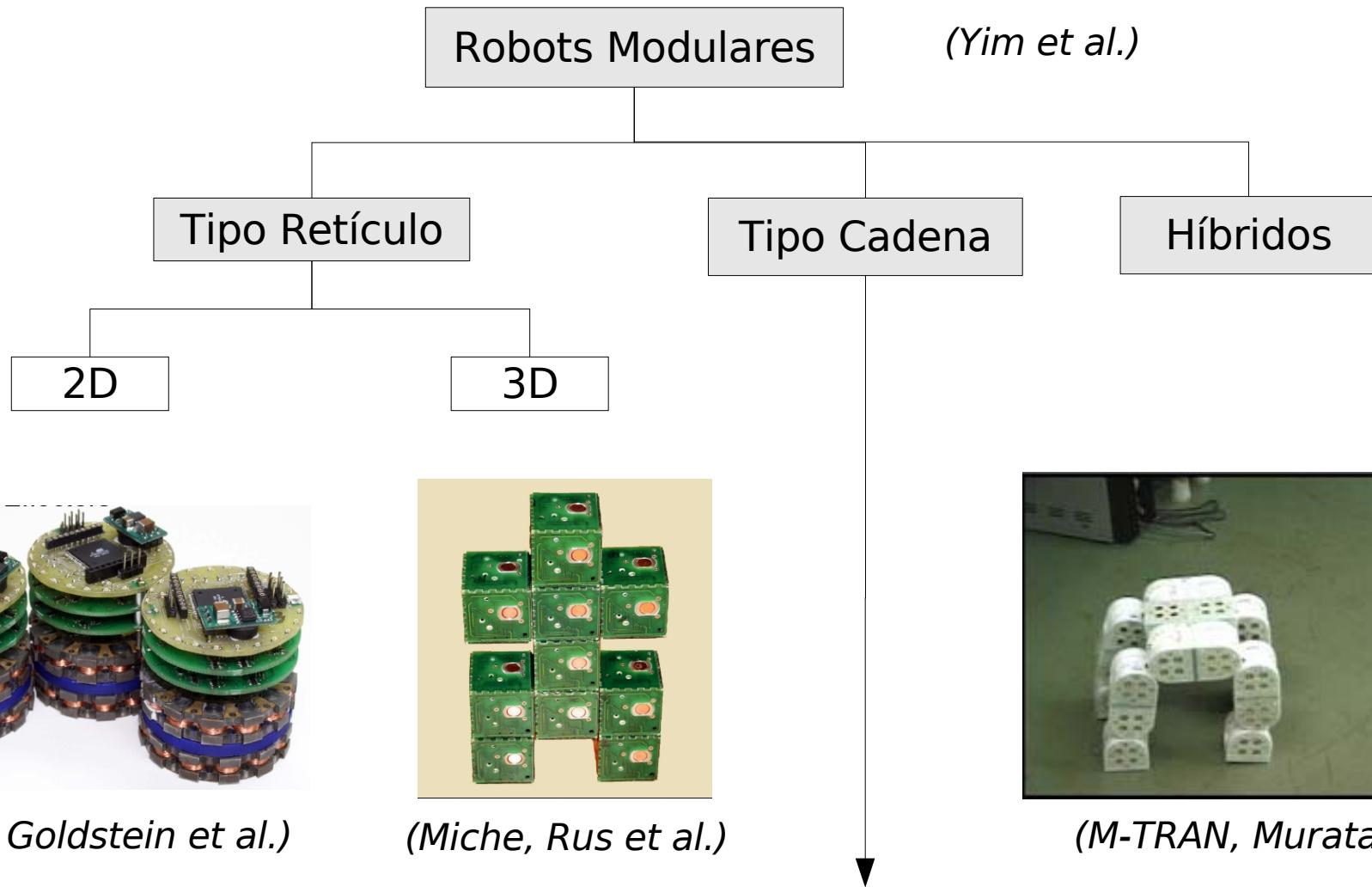
- Régimen permanente
- Superficie homogénea y sin obstáculos
- Control en bucle abierto
- Módulos sin sensores



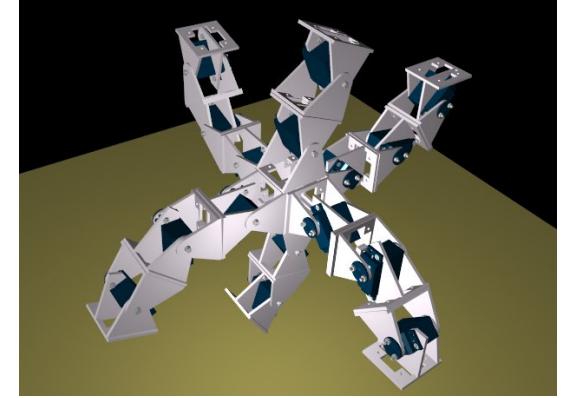
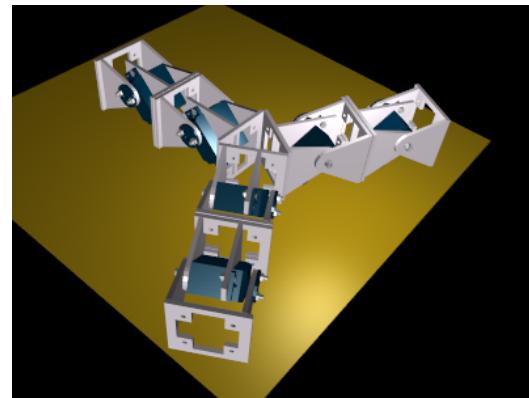
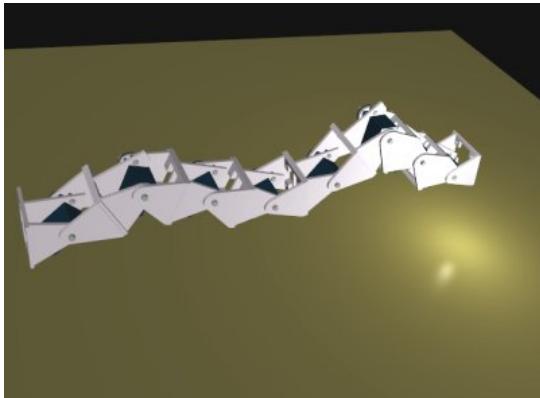
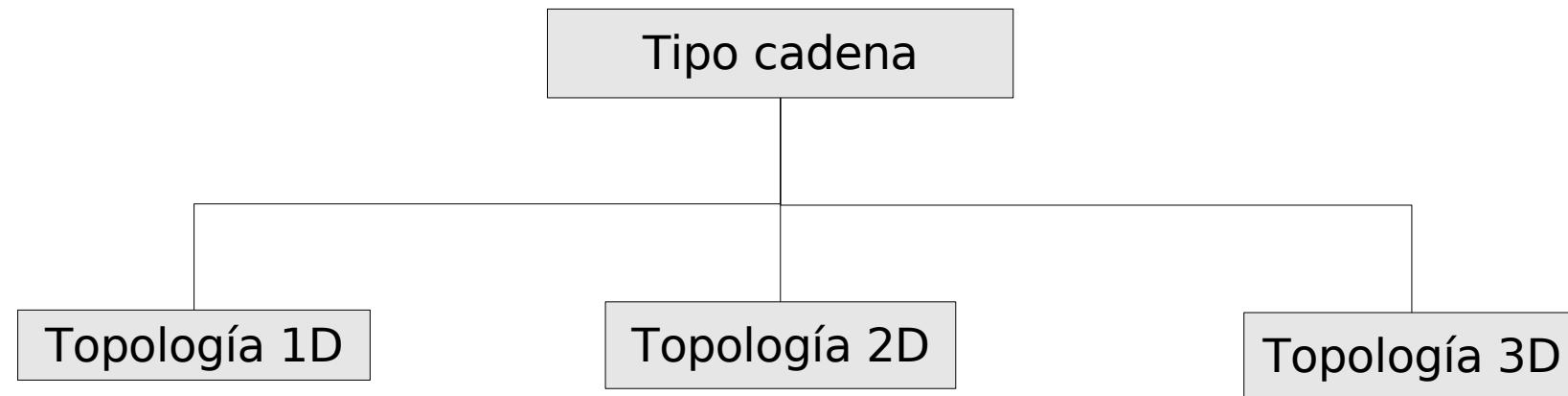
## Contenidos

1. Introducción
2. **Clasificación de robots modulares**
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

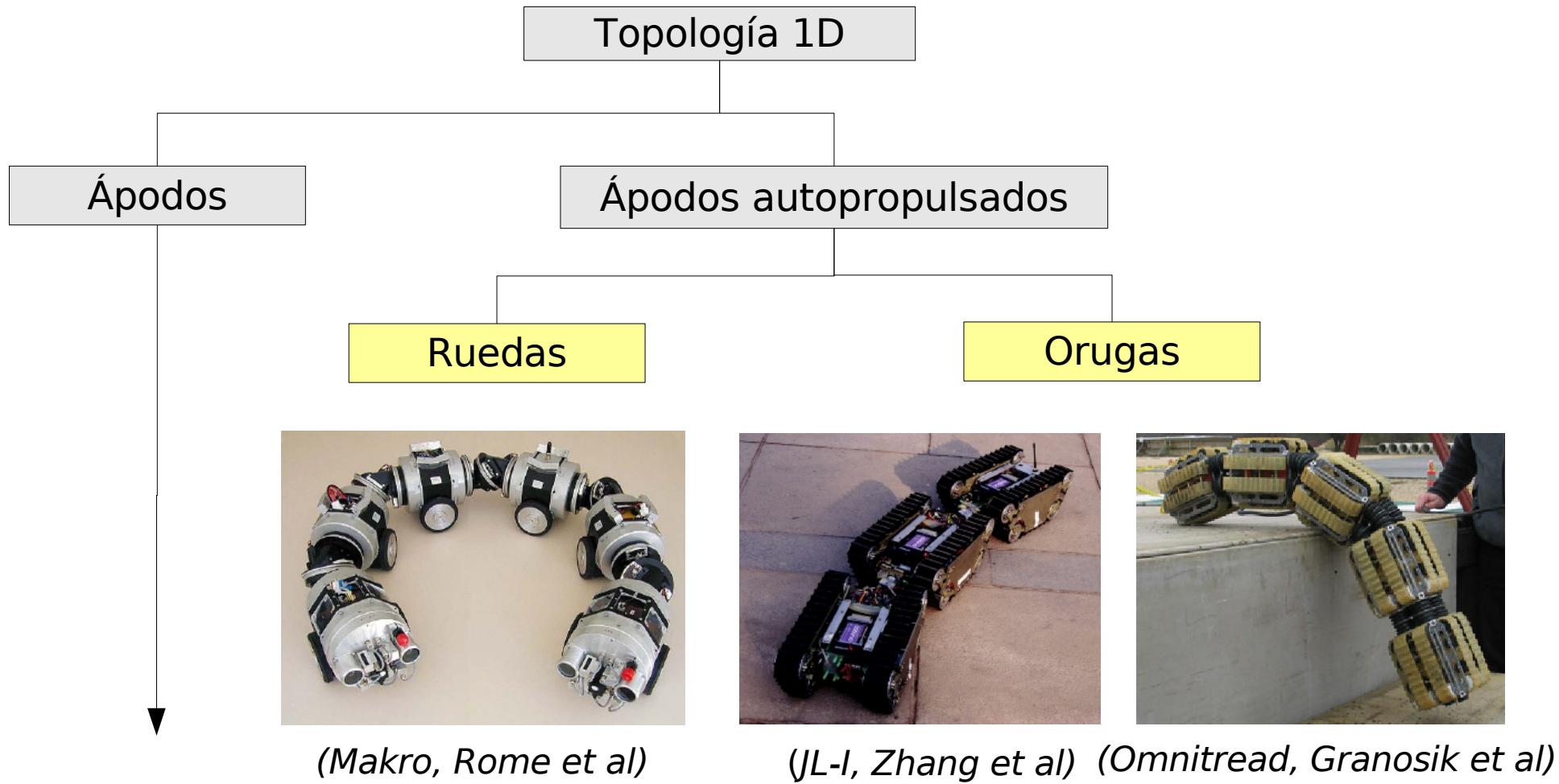
## Clasificación de los robots modulares



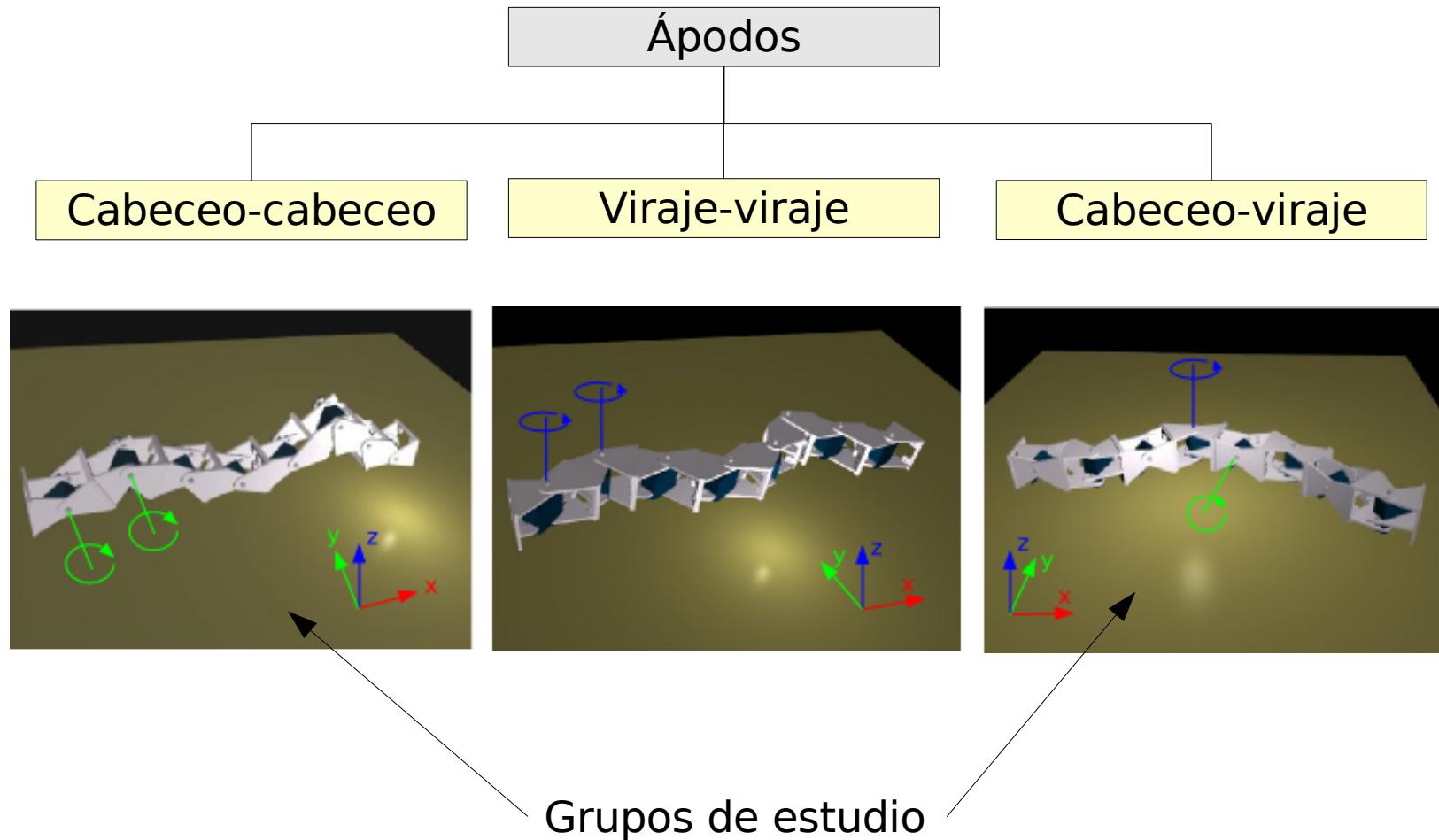
## Clasificación de los robots modulares (II)

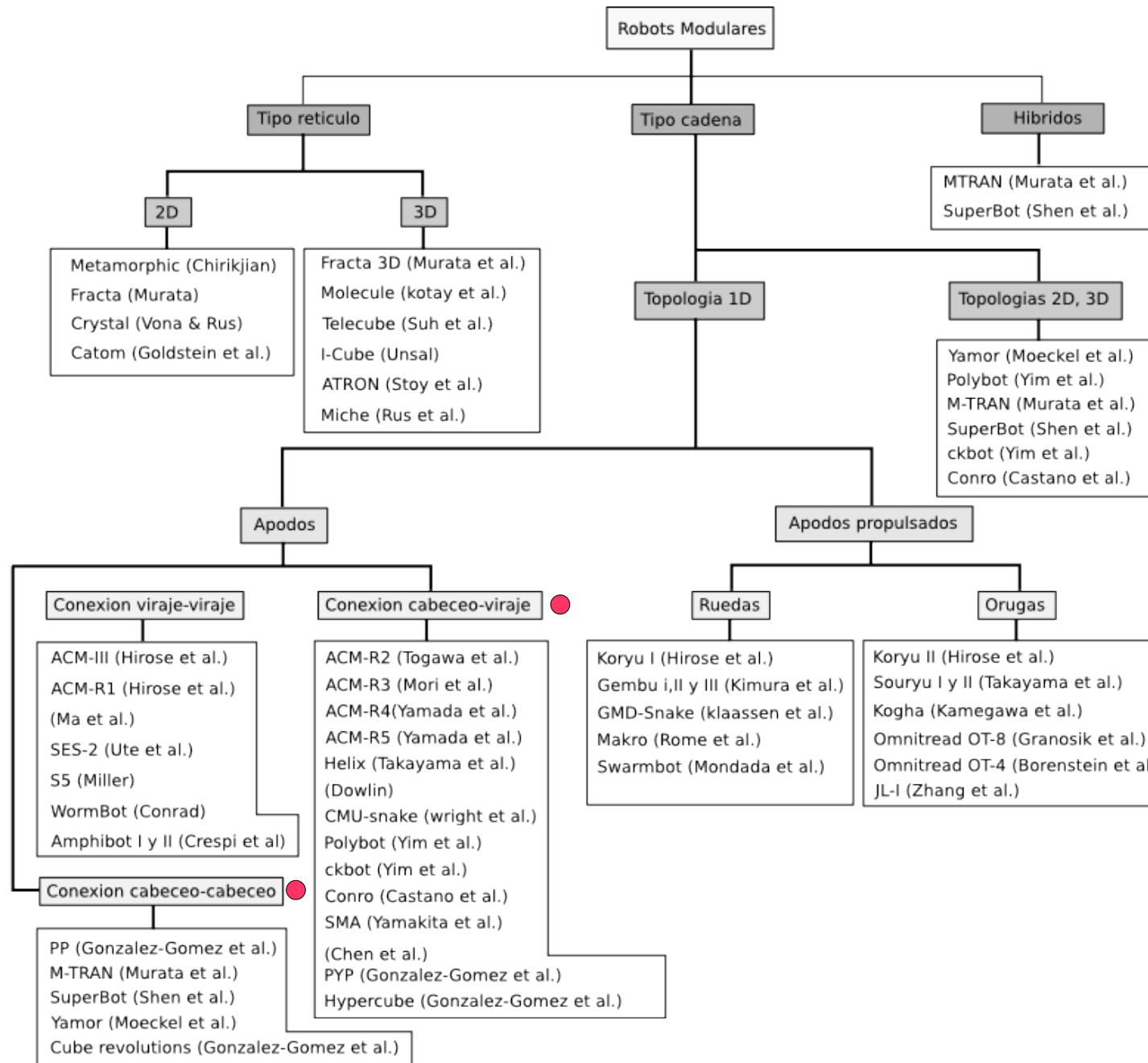


## Clasificación de los robots modulares (III)



## Clasificación de los robots modulares (IV)

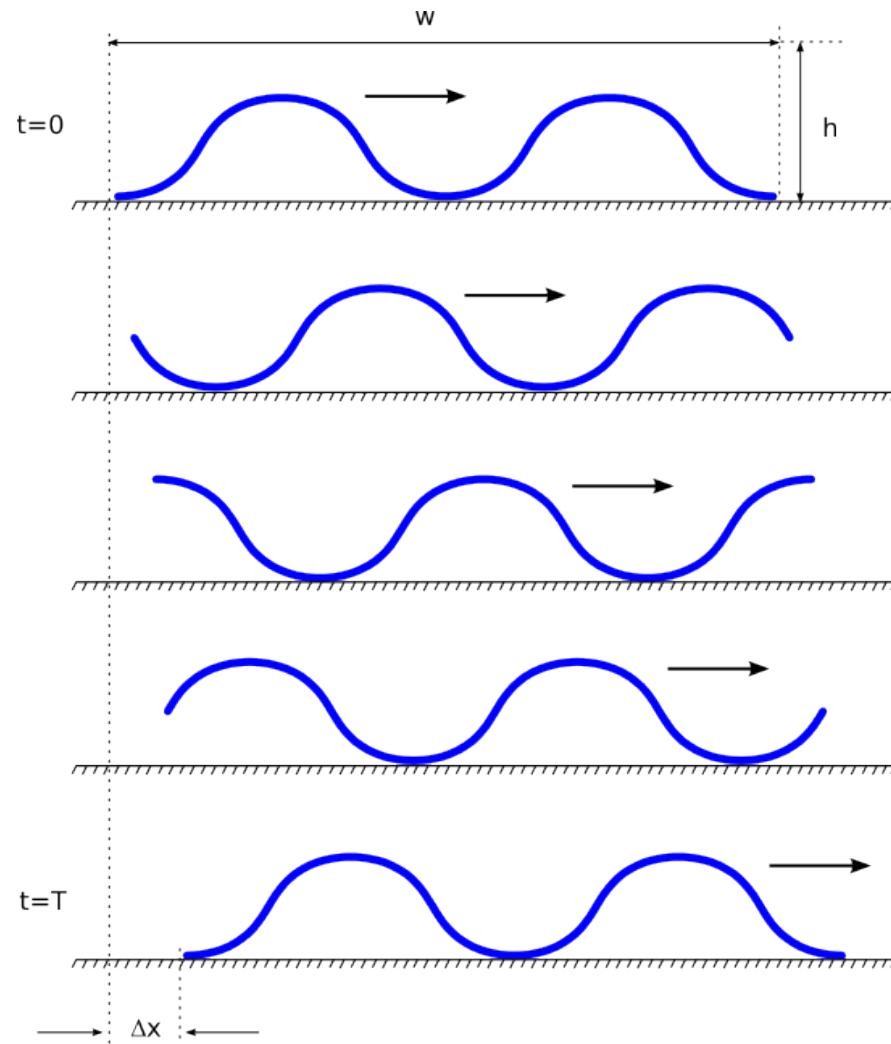




## Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. **Locomoción en 1D**
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

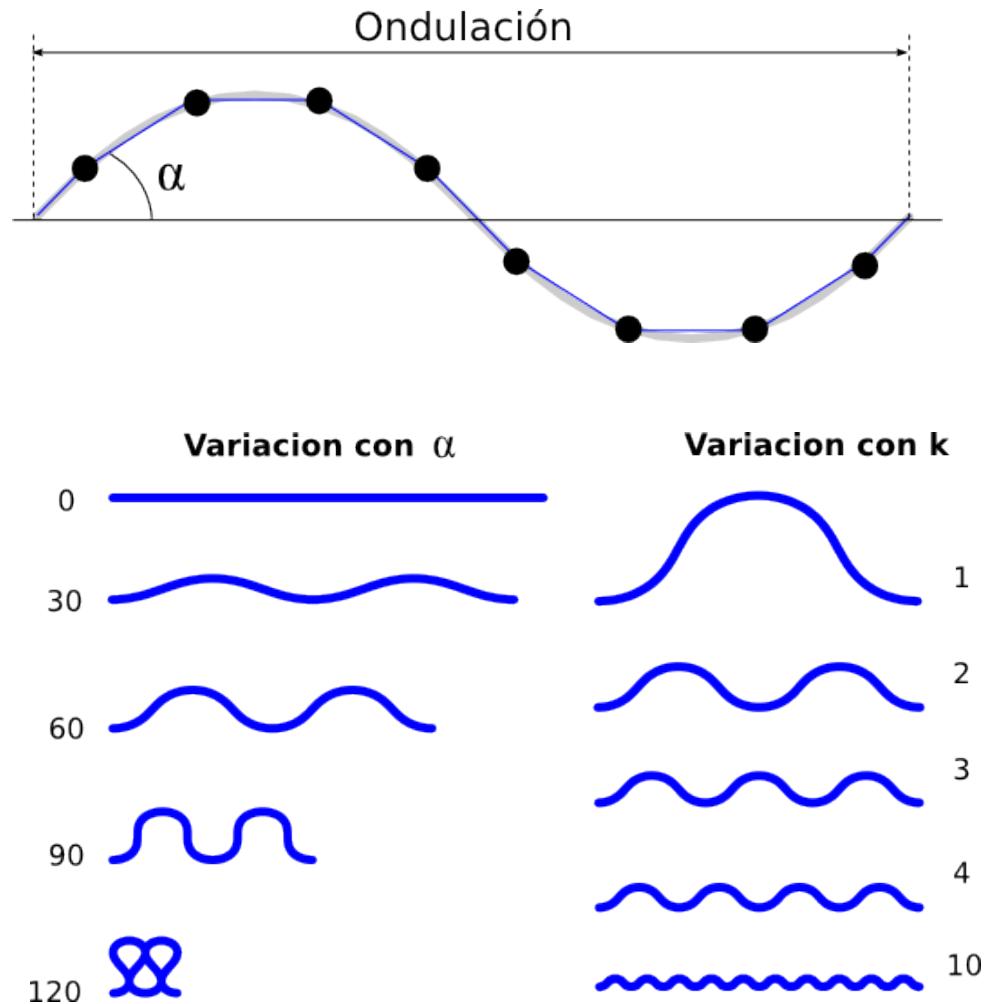
## Mecanismo de locomoción



- Propagación de ondas
- Onda corporal que se desplaza
- Paso:  $\Delta x$
- Dimensiones: anchura ( $w$ ) x altura ( $h$ )

## Forma de la onda corporal

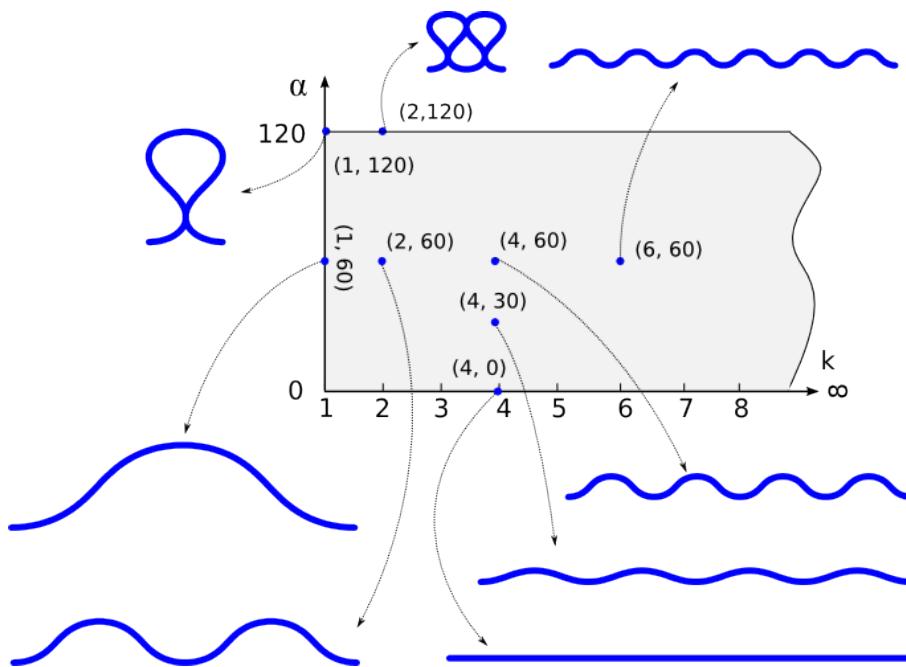
- **Curva serpentoide**
  - Continua/Discreta



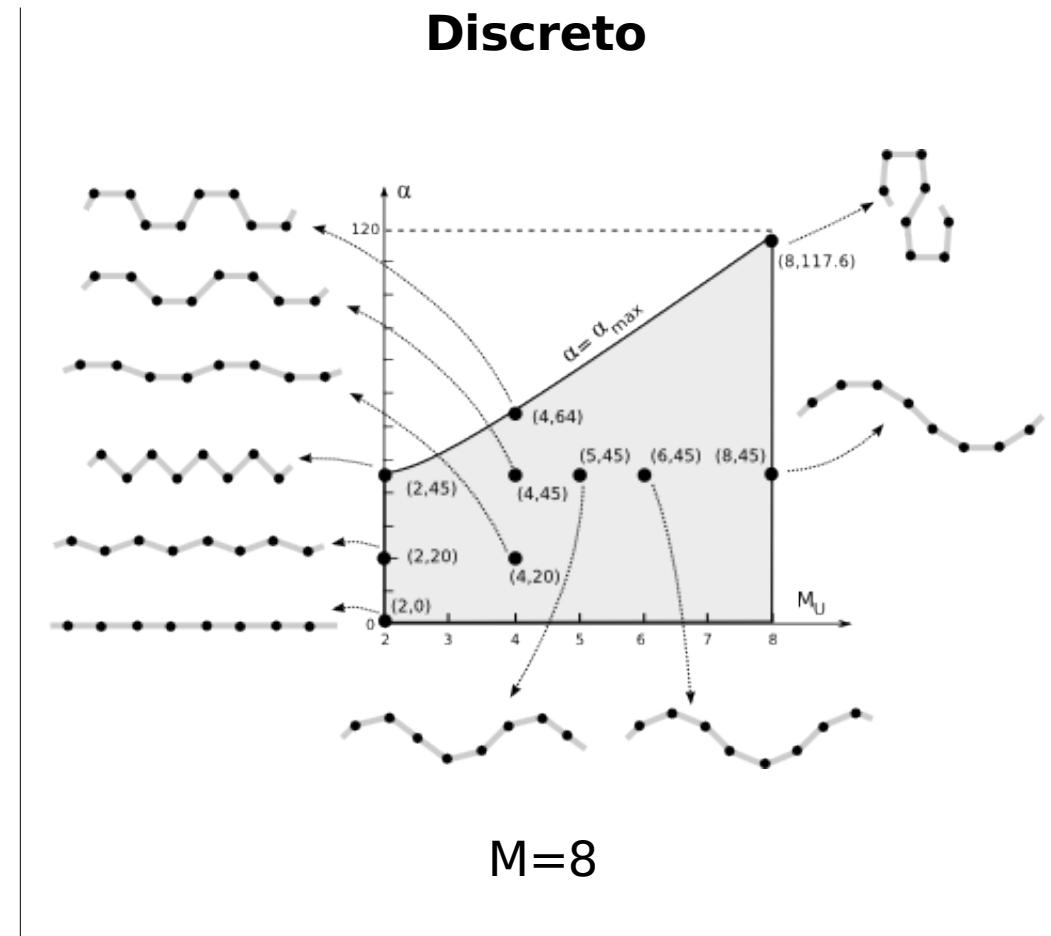
- **Parámetros:**
  - Ángulo de serpenteo:  $\alpha$
  - Número de ondulaciones:  $k$

## Espacio de formas

**Continuo**

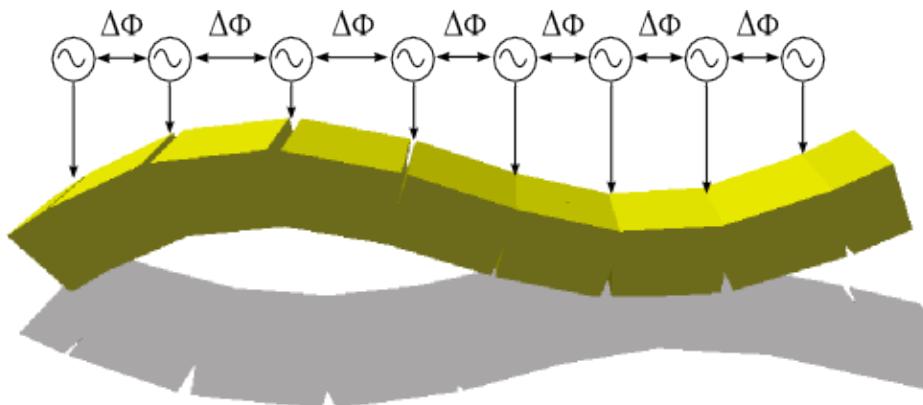


**Discreto**

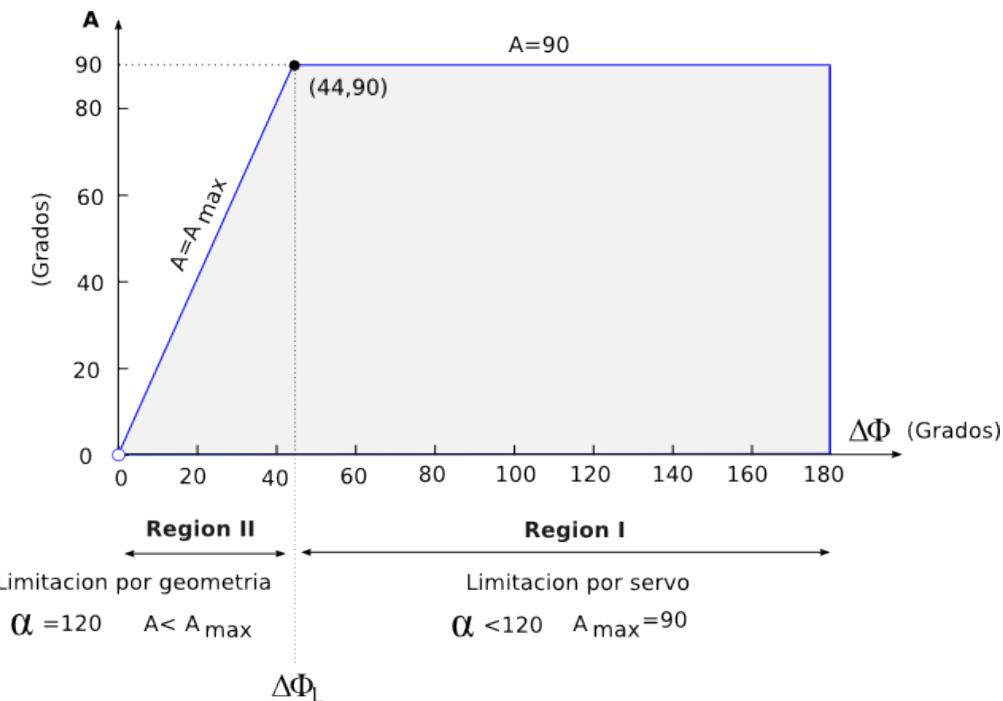


## Espacio de control

- M osciladores senoidales iguales
- Misma frecuencia
- Misma amplitud A
- Misma diferencia de fase  $\Delta\phi$
- Offset 0

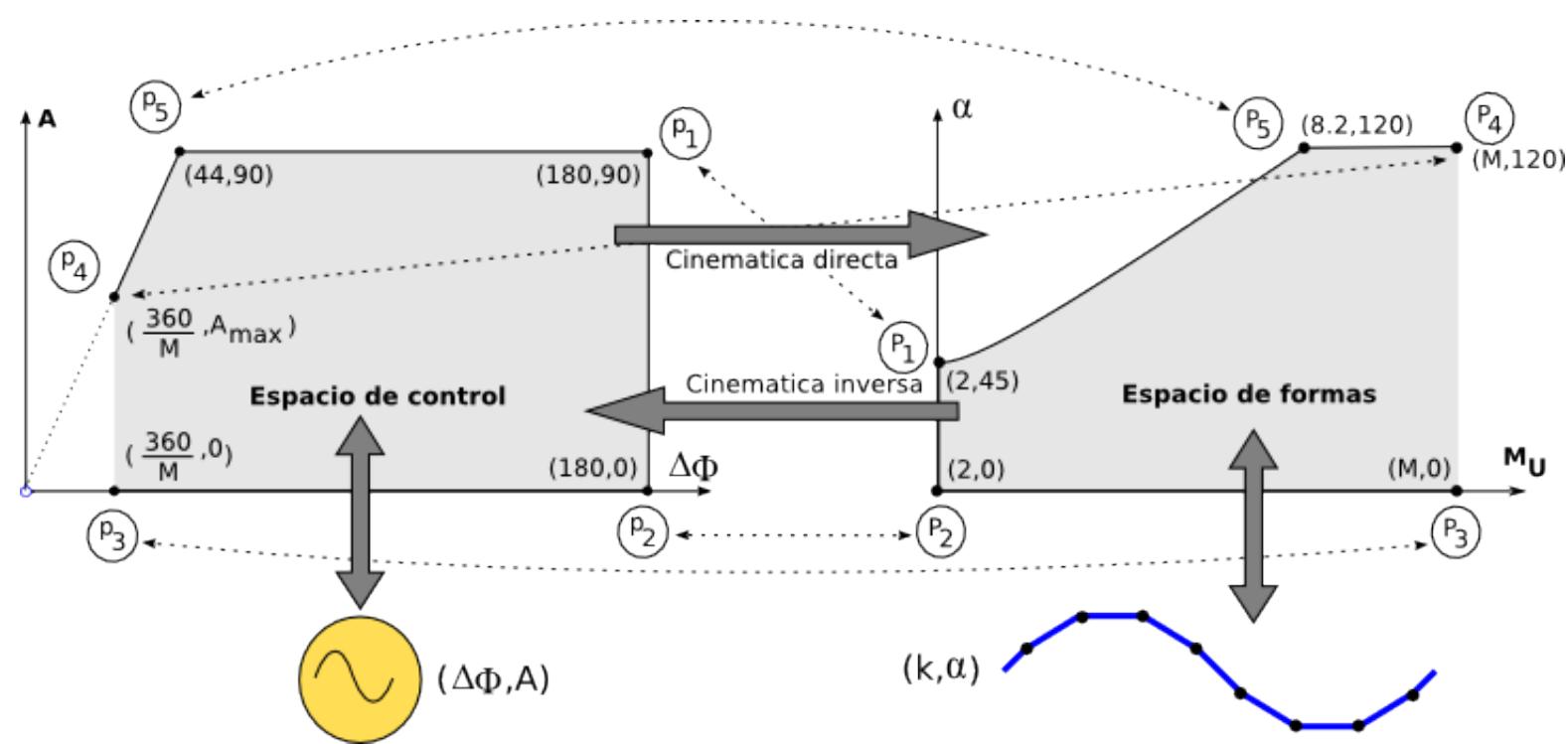


- Sólo dos parámetros:
  - Amplitud: A
  - Diferencia de fase:  $\Delta\phi$



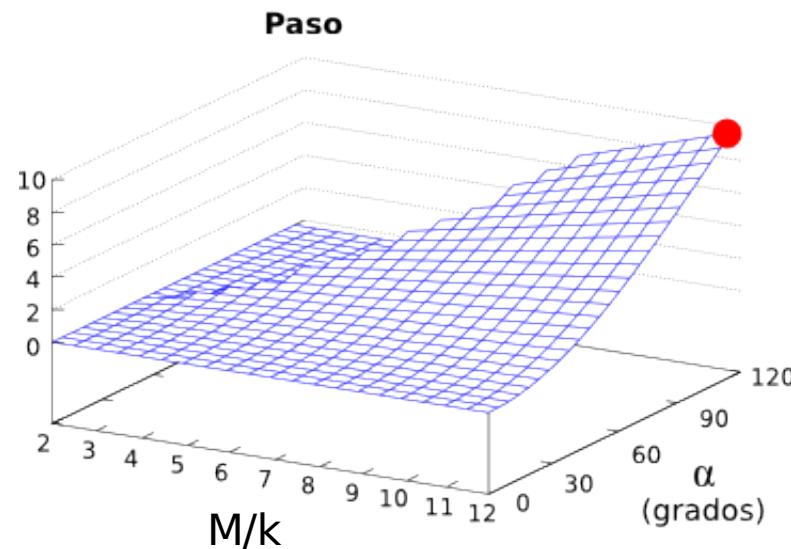
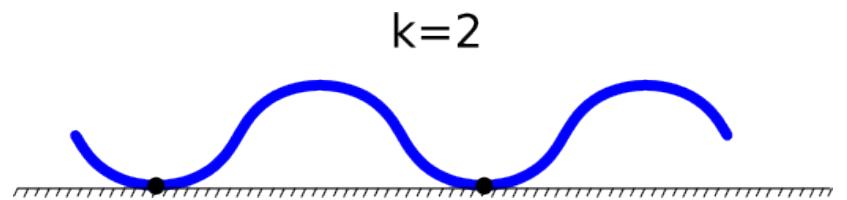
## Cinemática

- Problemas de cinemática directa e inversa
- Resolución mediante transformación entre los espacios
- En el espacio de formas establecemos las restricciones (dimensión y paso)



## Caracterización del paso

- Estabilidad:  $k >= 2$
- Ecuación del paso:  $\Delta x = \frac{1}{k} - \lambda$
- Deducidas partir de la forma del robot

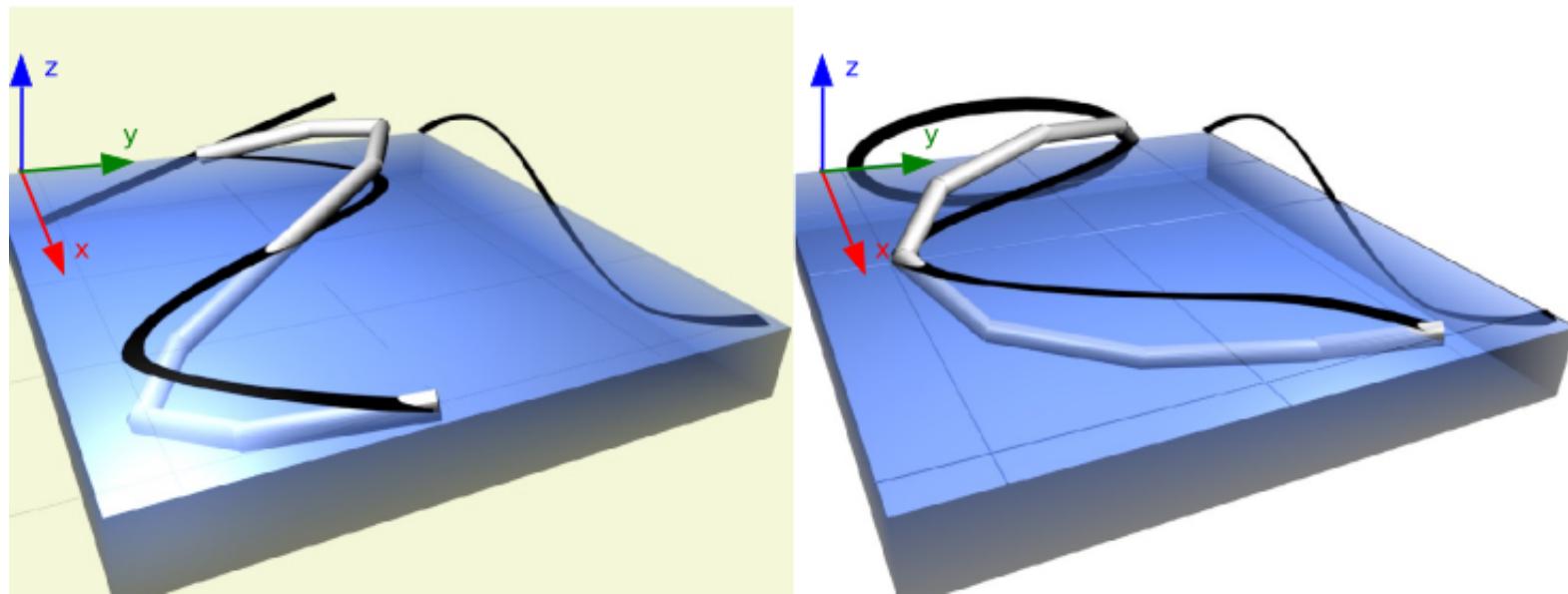


## Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. **Locomoción en 2D**
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. Conclusiones

## Mecanismo de locomoción

- Propagación de ondas
- Onda corporal tridimensional
- Dimensiones: anchura (w) x largo (lx) x altura (h)

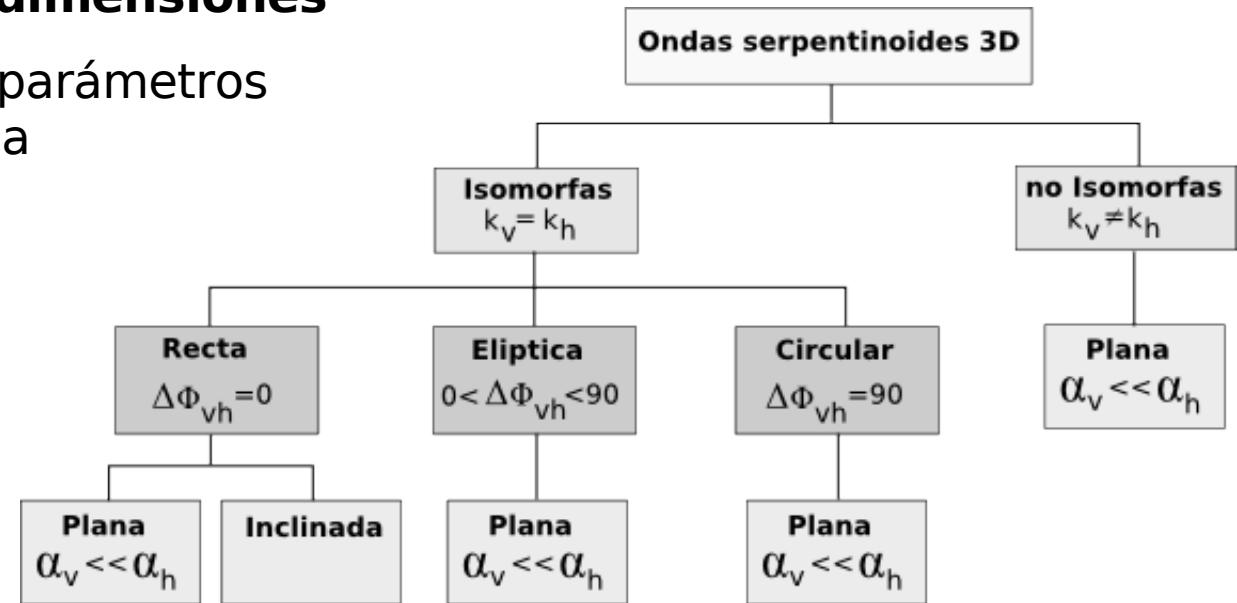


## Espacio de formas

- Superposición de dos ondas:
  - Onda vertical:  $\alpha_v, k_v$
  - Onda horizontal:  $\alpha_h, k_h$
  - Diferencia de fase entre ellas:  $\Delta\Phi_{vh}$
- Espacio de formas de **5 dimensiones**
- Las relaciones entre los parámetros determinan el tipo de onda

$$\alpha_v, \alpha_h, k_v, k_h, \Delta\Phi_{vh}$$

### TIPOS DE ONDAS

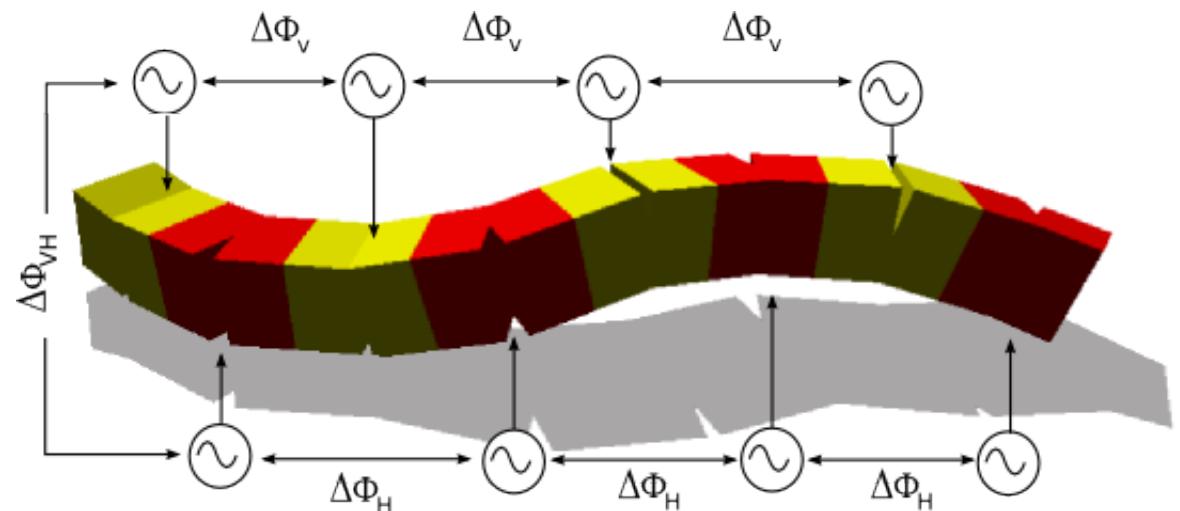


## Espacio de control

- Dos grupos de osciladores: verticales y horizontales
- Todos los horizontales son iguales:  $A_h, \Delta\Phi_h$
- Todos los verticales son iguales:  $A_v, \Delta\Phi_v$
- Diferencia de fase entre verticales y horizontales:  $\Delta\Phi_{vh}$
- Misma frecuencia para todos

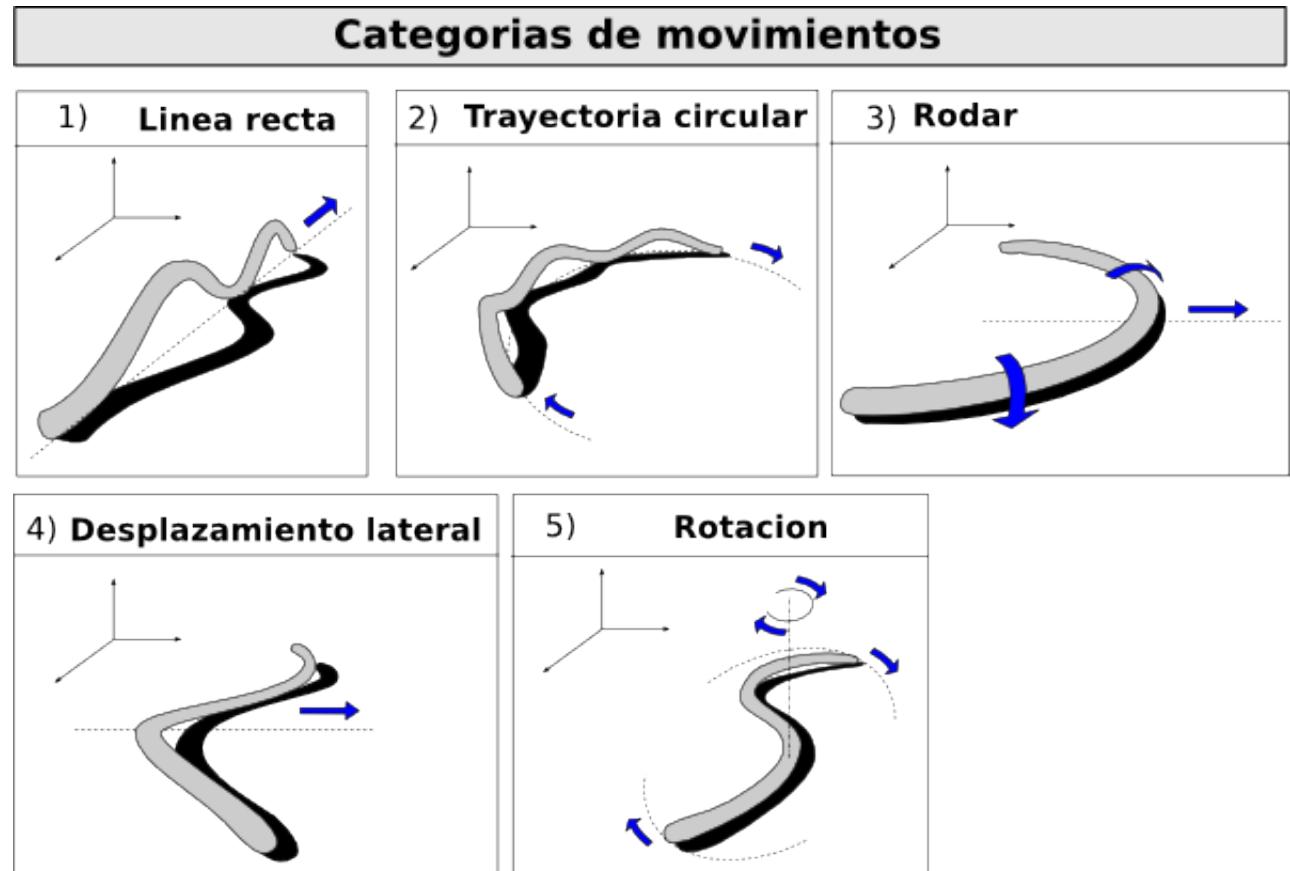
### Espacio de 5 dimensiones

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



## Modos de caminar

- Búsqueda mediante algoritmos genéticos
- 5 categorías de movimientos
- Caracterizados por las relaciones entre los parámetros de sus ondas



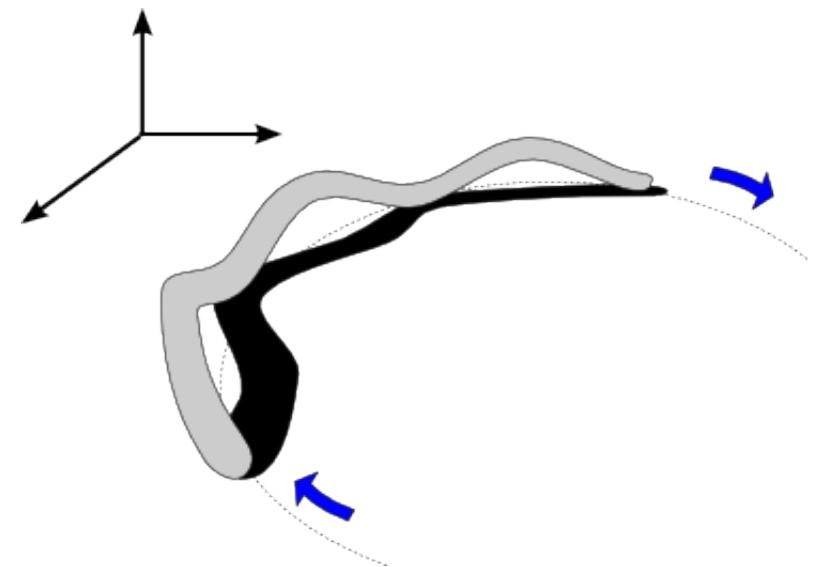
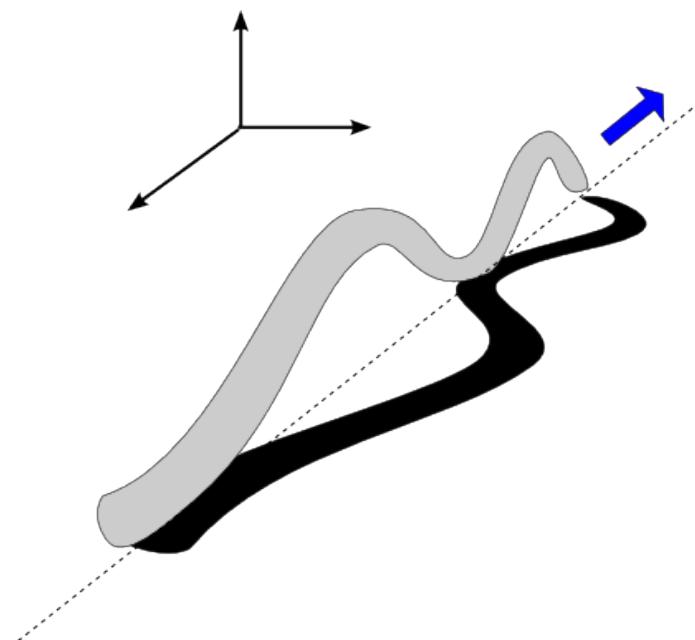
## Modos de caminar (II)

### Recto

- Módulos horizontales:  $\varphi_h = 0$
- Parámetros:  $\alpha_v, k_v$

### Trayectoria circular

- Módulos horizontales:  $\varphi_h \neq 0$
- Parámetros:  $\alpha_v, k_v, \alpha_h$



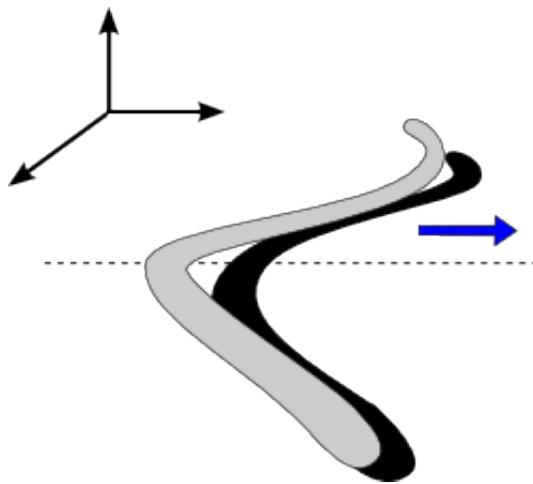
## Modos de caminar (III): Desplazamiento lateral

### Normal

- Caracterización:

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

- DOF:  $\alpha_h, k$



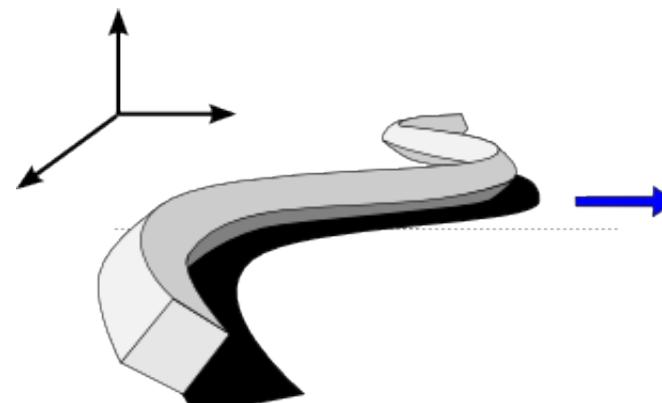
### Inclinado

### Nuevo

- Caracterización:

$$\begin{aligned}\alpha_h &= \alpha \cos \beta, \alpha_v = \alpha \sin \beta \\ k_v &= k_h = k, \Delta\Phi_{vh} \rightarrow 0\end{aligned}$$

- DOF:  $\alpha, \beta, k$

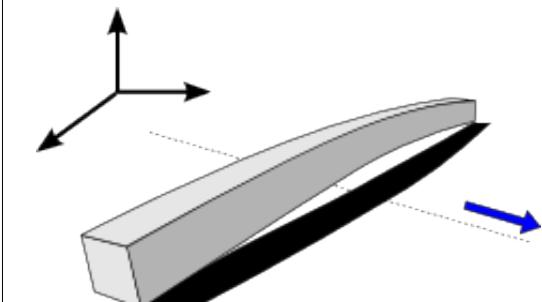


### Remero

- Caracterización:

$$\alpha_h = \alpha_v = \alpha, \alpha > \alpha_{min}, \Delta\Phi = 90^\circ$$

- DOF:  $\alpha$



## Modos de caminar (IV): Rotación

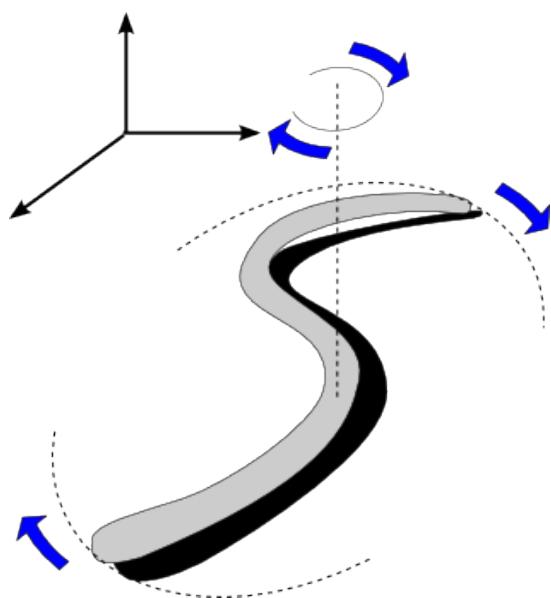
### Rotación en S

Nuevo

- Caracterización:

$$\alpha_v \rightarrow 0, k_v = 2k_h, \Delta\Phi_{vh} = 0$$

- DOF:  $\alpha_h, k_h$



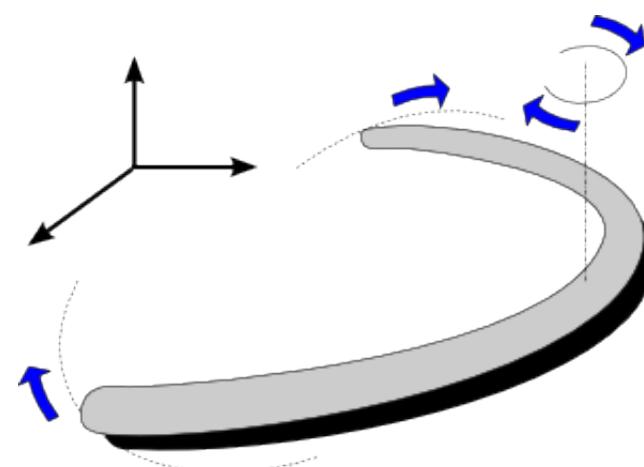
### Rotación en U

Nuevo

- Caracterización:

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

- DOF:  $\alpha_h, k_v$



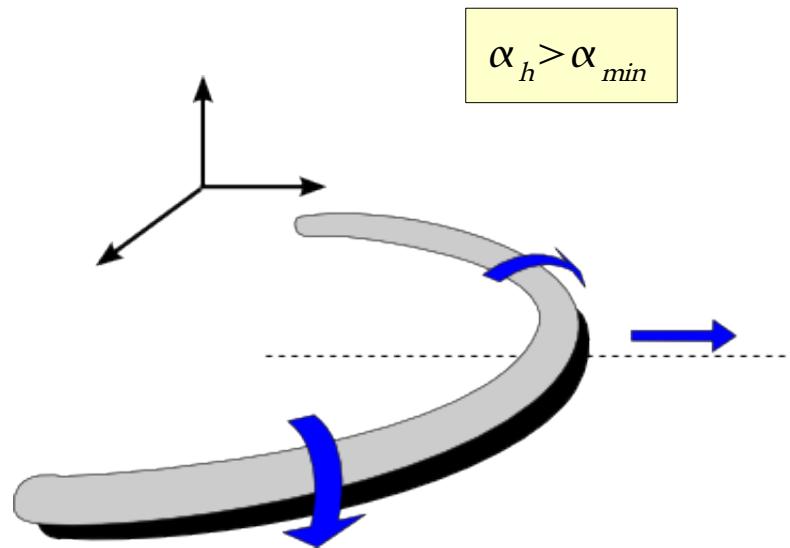
## Modos de caminar (V): Rodar

### Rodar

- Caracterización:

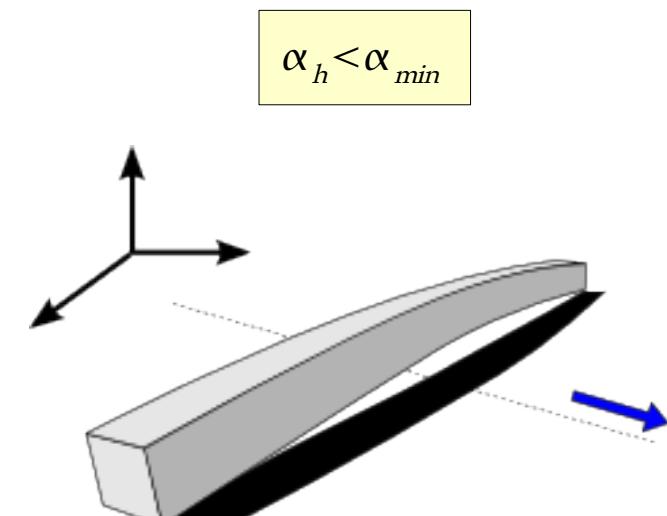
$$\alpha_v = \alpha_h, \alpha_h > \alpha_{min}, \Delta\Phi_{vh} = 90^\circ$$

- DOF:  $\alpha_h$



### Remero

- Si la sección es cuadrada, el movimiento es de rodar o remero, dependiendo del valor de  $\alpha_h$

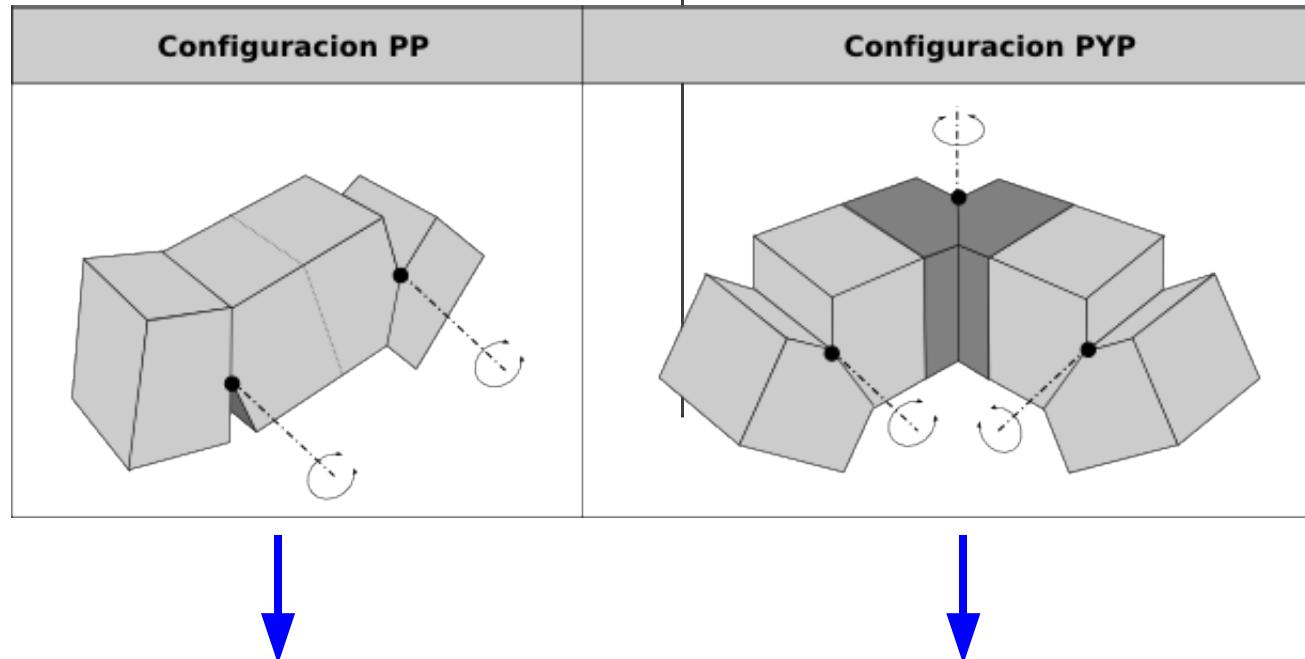


## Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. **Configuraciones mínimas**
6. Experimentos
7. Conclusiones

## Configuraciones mínimas

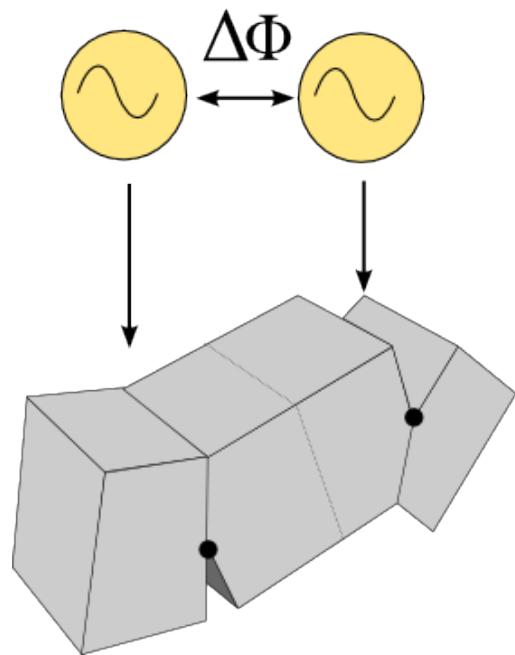
- Configuraciones con el menor número de módulos y que pueden desplazarse
- Búsquedas con algoritmos genéticos en el espacio de control



• Línea recta

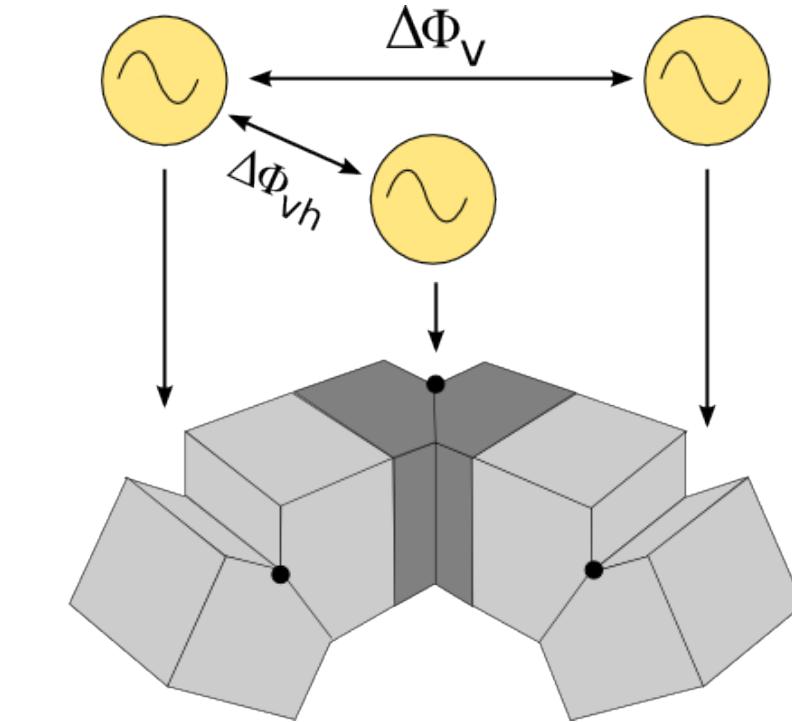
• 5 modos de caminar

## Espacio de control



- Espacio de 2 dimensiones

$$A, \Delta\Phi$$

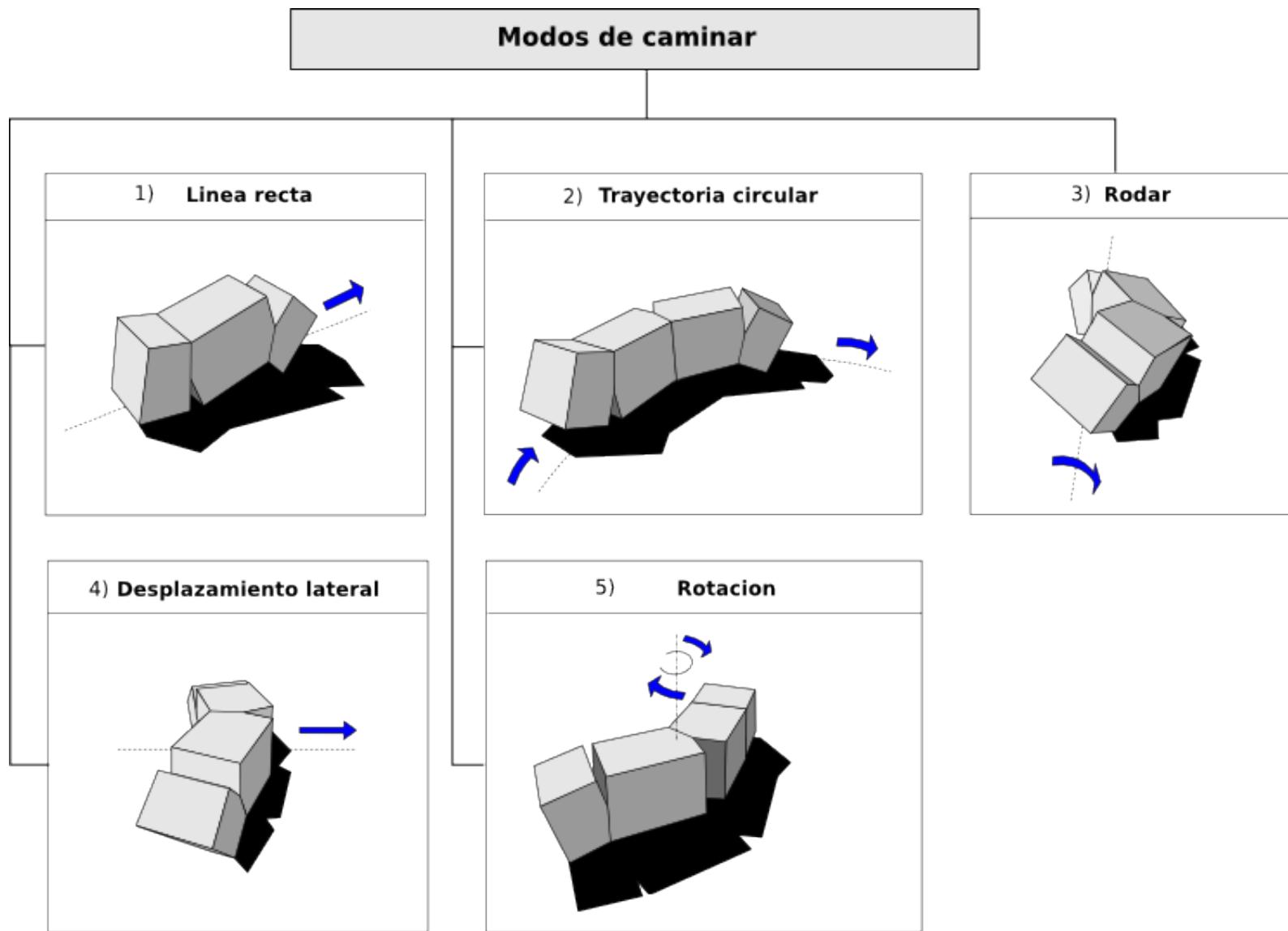


- Espacio de 4 dimensiones

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

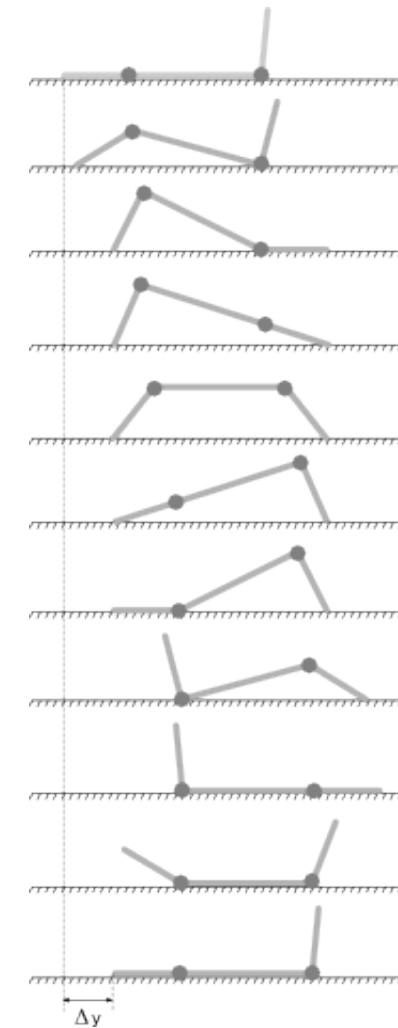
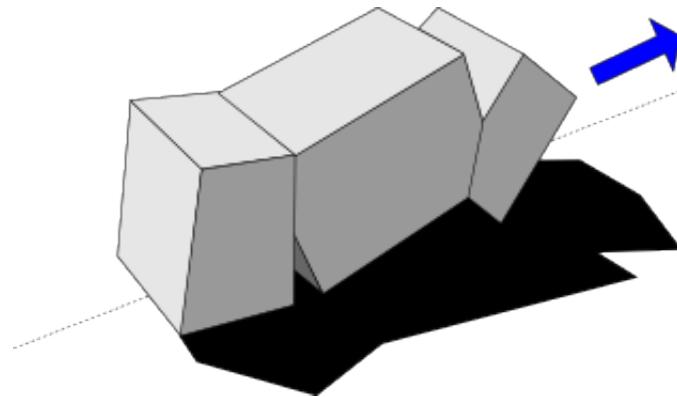
## 5.- Configuraciones mínimas

---



## Modos de caminar (II): Línea recta

- Estudio del modelo alámbrico
- Mejor coordinación:  $\Delta\Phi \in [108,110]$
- Paso máximo: Mejor coordinación + A=90



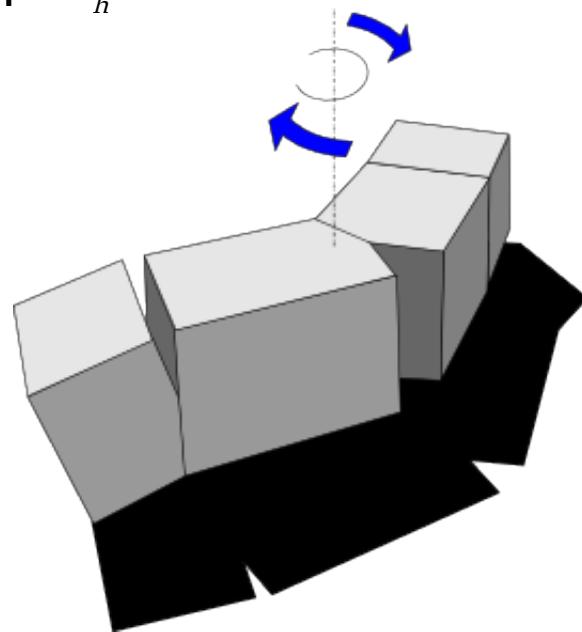
## Modos de caminar (III)

### Rotar

- Caracterización:

$$A_v \rightarrow 0, \Delta\Phi_v = 180, \Delta\Phi_h = 90$$

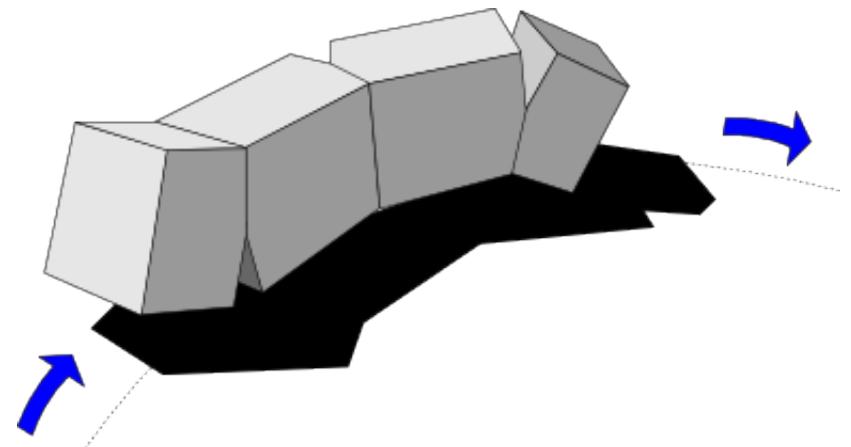
- DOF:  $A_h$



### Trayectoria en arco

- Caracterización:  $\varphi_h = A_h$

- DOF:  $A_v, A_h, \Delta\Phi_v$



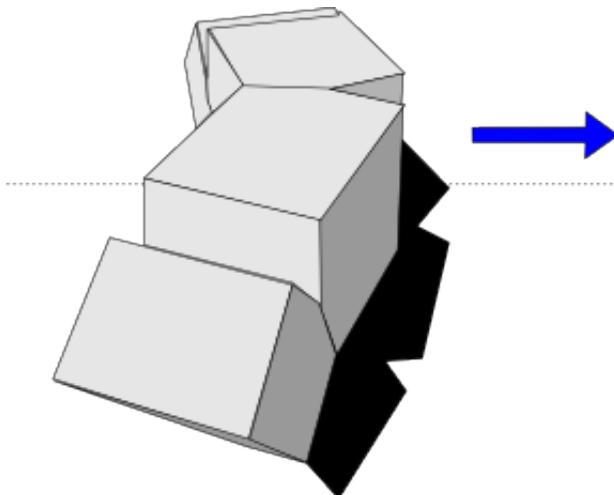
## Modos de caminar (VI)

### Lateral

- Caracterización:

$$A_v \rightarrow 0, \Delta \Phi_v = 0, \Delta \Phi_{vh} = 90, A_h < A_{min}$$

- DOF:  $A_h$

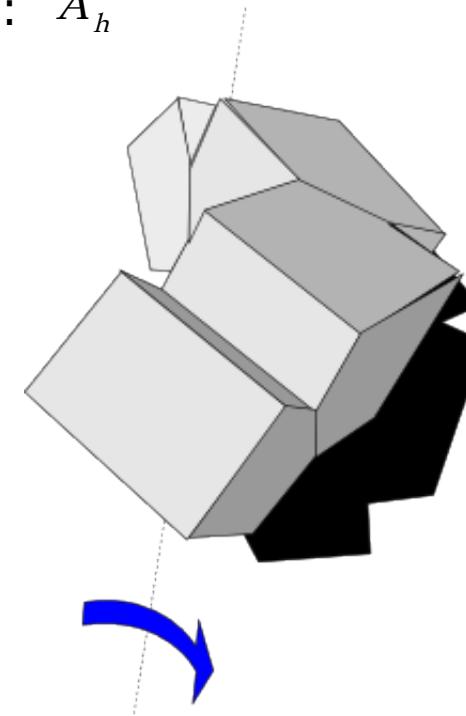


### Rodar

- Caracterización:

$$A_v = A_h, \Delta \Phi_v = 0, \Delta \Phi_{vh} = 90, A_h > A_{min}$$

- DOF:  $A_h$

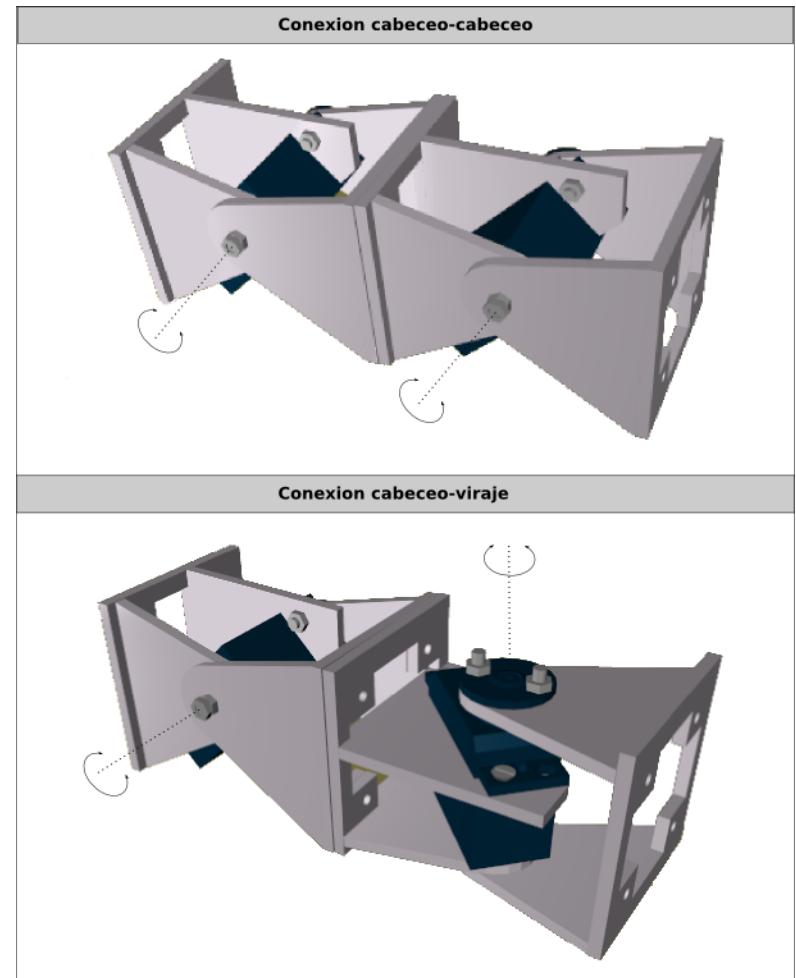
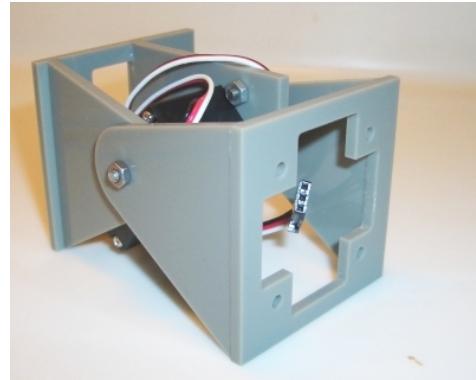
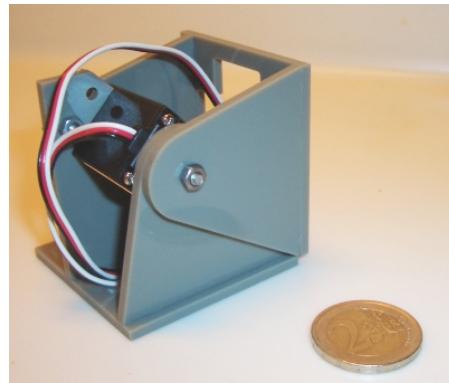


## Contenidos

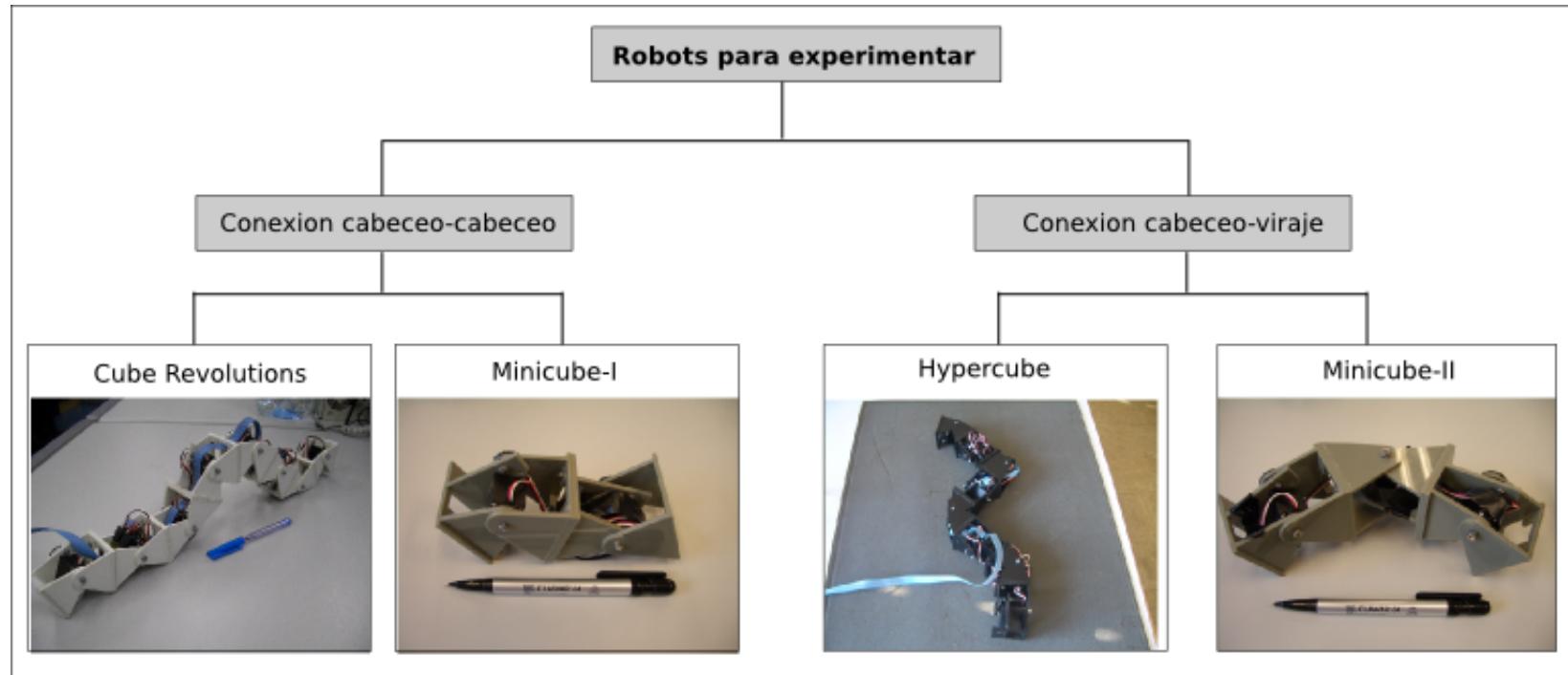
1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. **Experimentos**
7. Conclusiones

## Módulos Y1

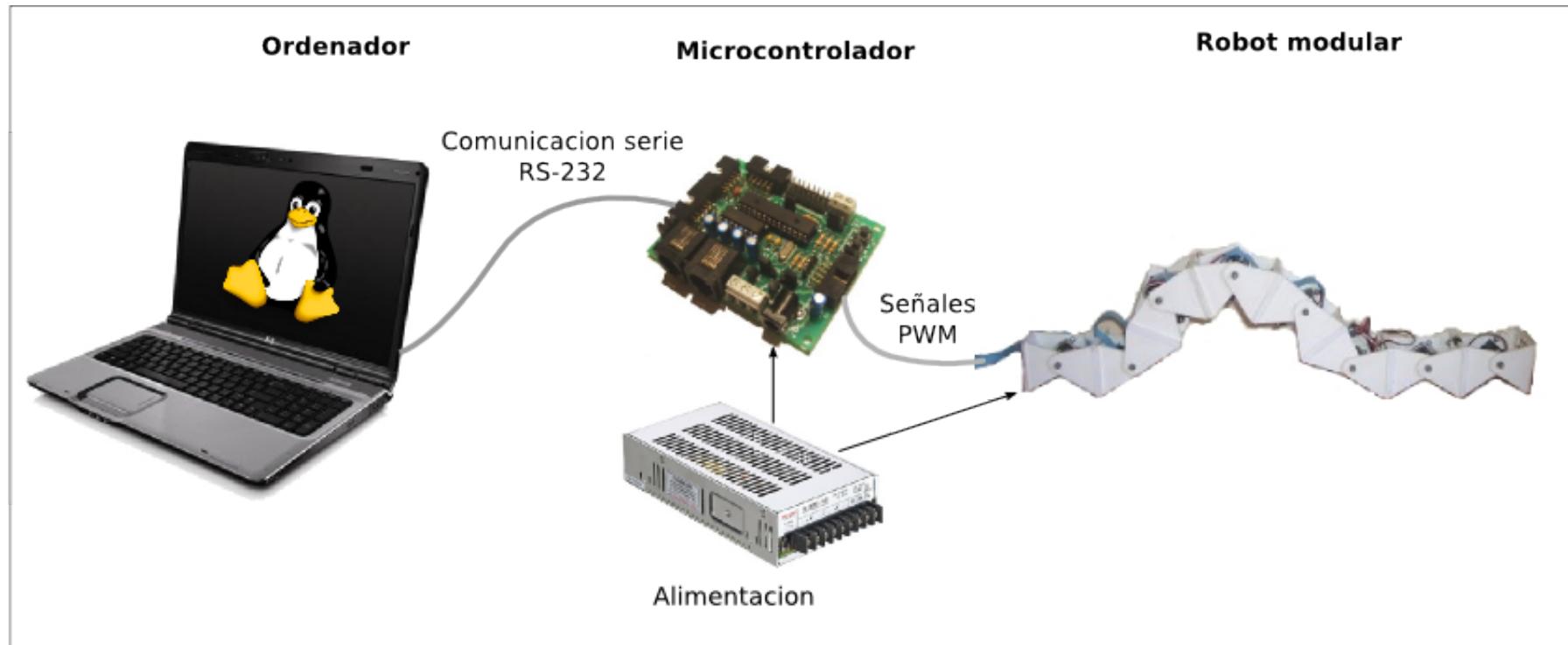
- Un grado de libertad
- Fácil construcción
- Baratos
- Libres



## Robots modulares

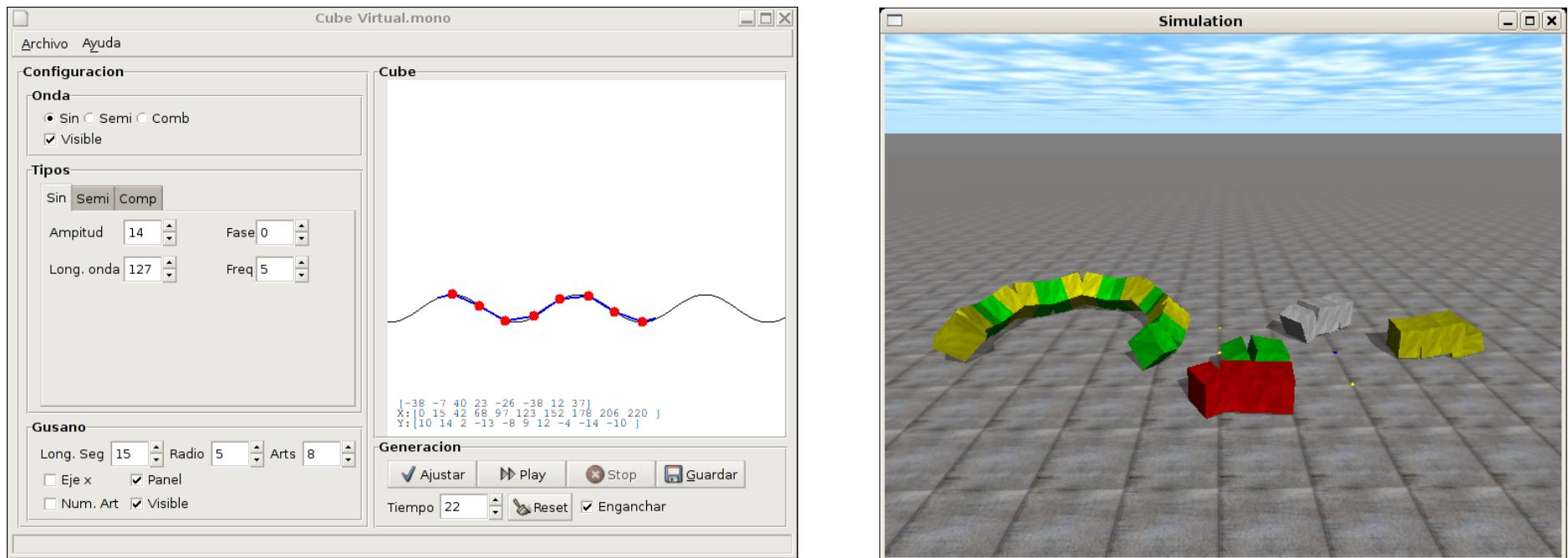


## Esquema de control



## Software

- Simulador para topologías de 1D (Basado en ODE)
- Algoritmos genéticos: PGAPack
- Modelos matemáticos en Octave/Matlab



## Descripción experimentos

- **Simulación:**

- Locomoción modelos continuos ( $M=32$ )
- Caso estudio ( $M=8$ )
- Configuraciones mínimas
- Obtención de datos experimentales
- Comparación con modelo teórico

- **Robots reales:**

- Comprobación del movimiento
- Descarte de soluciones

## Contenidos

1. Introducción
2. Clasificación de robots modulares
3. Locomoción en 1D
4. Locomoción en 2D
5. Configuraciones mínimas
6. Experimentos
7. **Conclusiones**

## Resumen

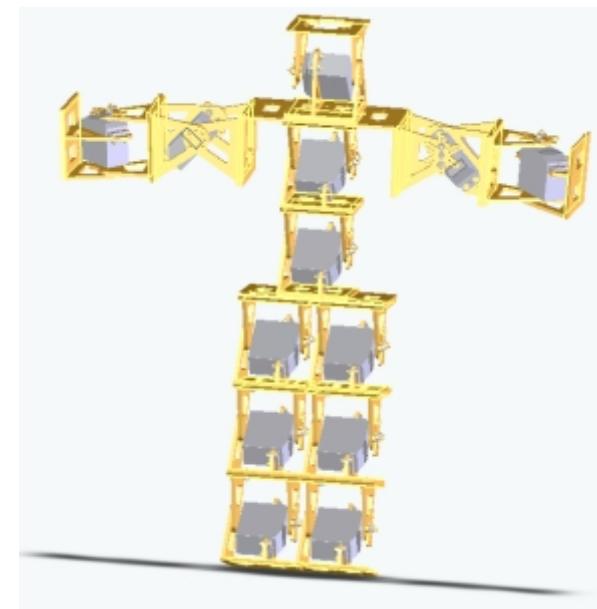
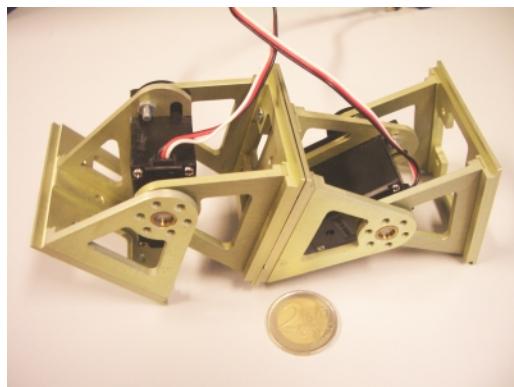
- Analizado el estado del arte
- Establecida una clasificación
- Hipótesis de partida: generadores sinusoidales
- Desarrollo de los modelos matemáticos
- Búsqueda de soluciones
- Comprobación mediante experimentos

## Principales aportaciones

- **Viabilidad** del modelo de generadores sinusoidales
- Al menos **5 modos de caminar**
- **Dimensión mínima** del espacio de control: 2 y 5
- Tres **nuevos modos de caminar**: Rotación (en S y en U) y Lateral inclinado
- **Configuraciones mínimas**
- **Relaciones** entre parámetros generadores y la cinemática
- Resumen en **27 principios de locomoción**

## Trabajos futuros

- Modelos energéticos
- Incorporación de realimentación
- Nuevos módulos: **GZ-I**
- Estudio locomoción topologías 2D
- Aplicación a orugas trepadoras
- Materialización de comportamientos (JDE)



---

# Robótica Modular y locomoción: Aplicación a Robots Ápodos

D. Juan González Gómez  
Tesis Doctoral



Director: Dr. Eduardo Boemo Scalvinoni

---