

TRABAJO FIN DE GRADO

DINÁMICA DIRECTA DE LA MARCHA HUMANA POR MÉTODOS DE CONTROL



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
FERROL

❑ AUTOR

- Santiago Rodríguez Díaz

❑ TUTORES

- Javier Cuadrado Aranda
- Urbano Lugrís Armesto

❑ JULIO, 2015

LIM



Laboratorio de Ingeniería Mecánica
Universidad de La Coruña

<http://lim.ii.udc.es>



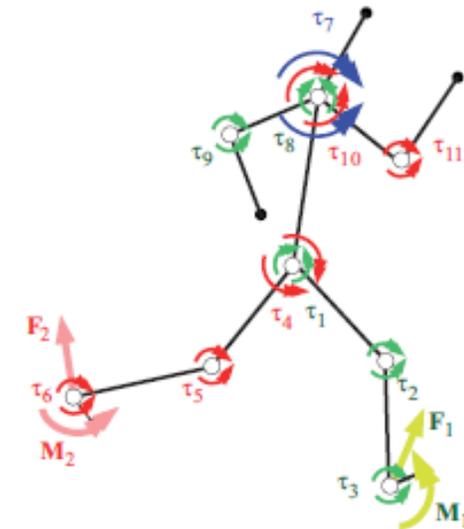
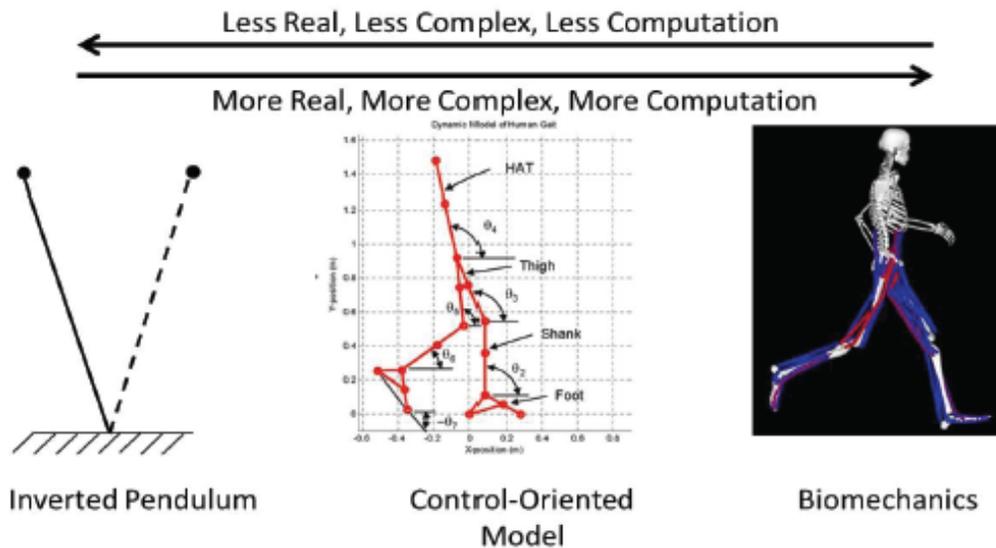
□ INTRODUCCIÓN

□ Motivación:

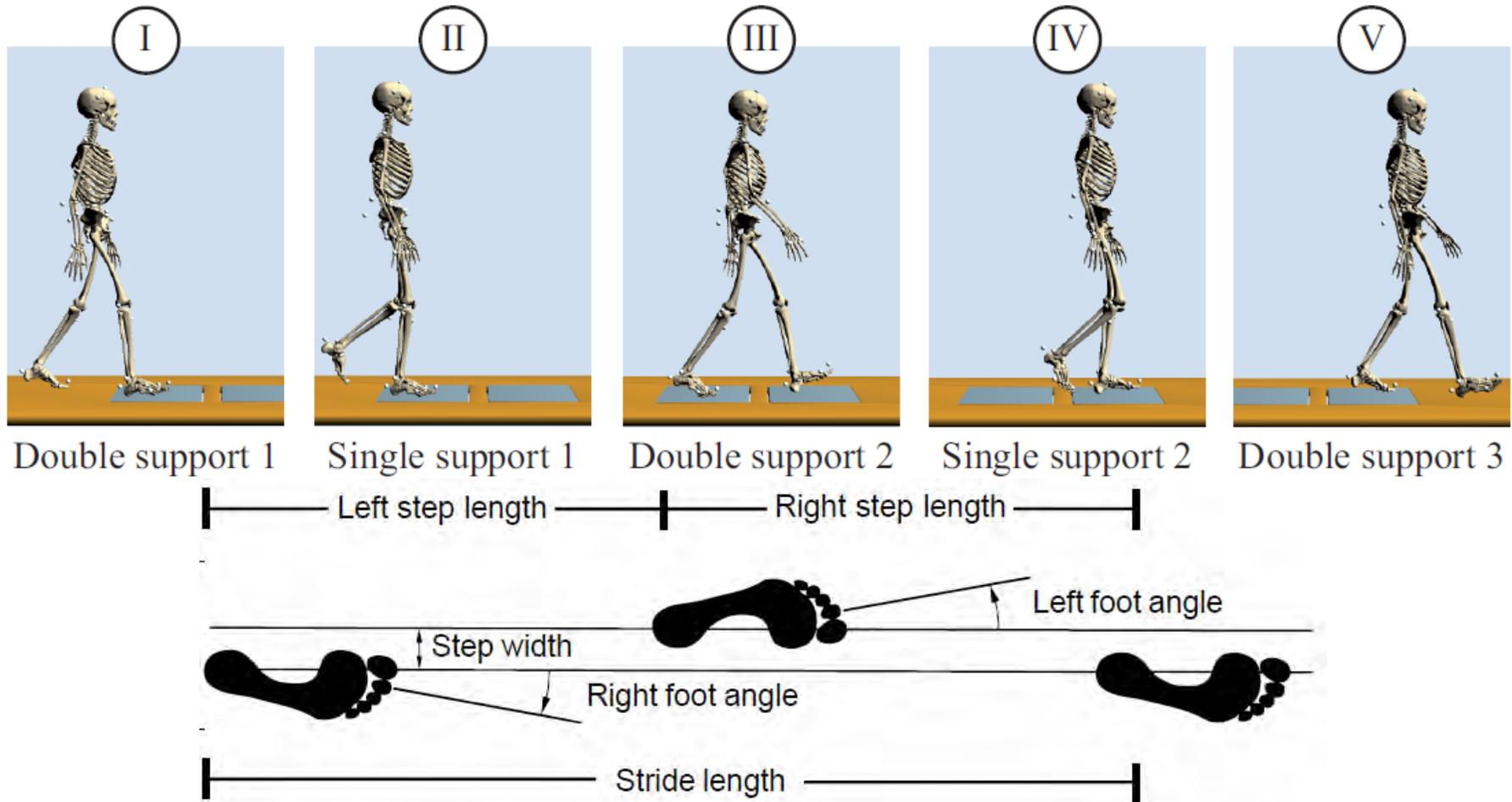
- Comprensión de la marcha normal y patológica.
- Aplicación médica.

□ Objetivo:

- Reproducir un movimiento capturado mediante dinámica directa.
- Ecuaciones del movimiento.
- Integración.



□ CARACTERÍSTICAS DE LA MARCHA



□ DEFINICIÓN DEL MODELO

□ Cadena compuesta por un conjunto de sólidos rígidos unidos mediante articulaciones ideales.

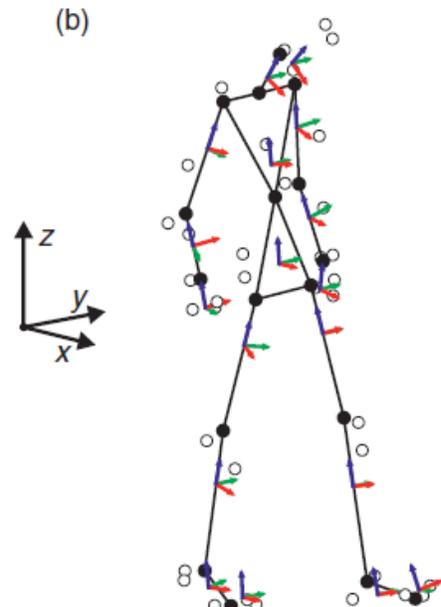
□ **Modelo 3D**

▪ 18 sólidos.



▪ 17 articulaciones

▪ 57 GDL.

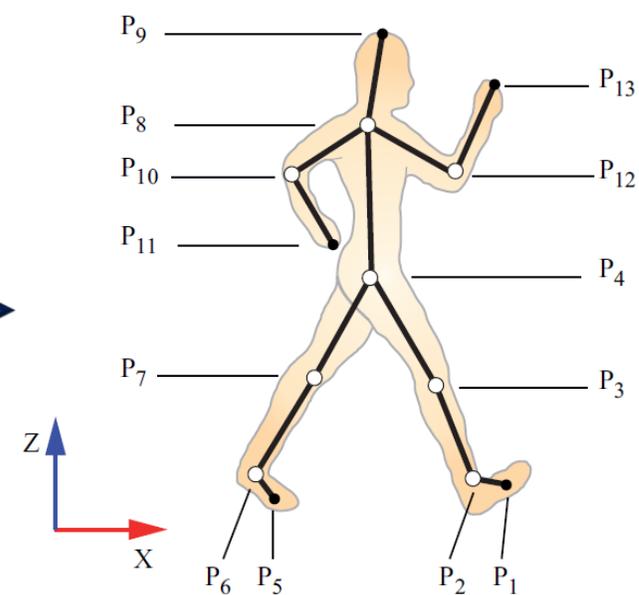


□ **Modelo 2D**

▪ 12 sólidos.

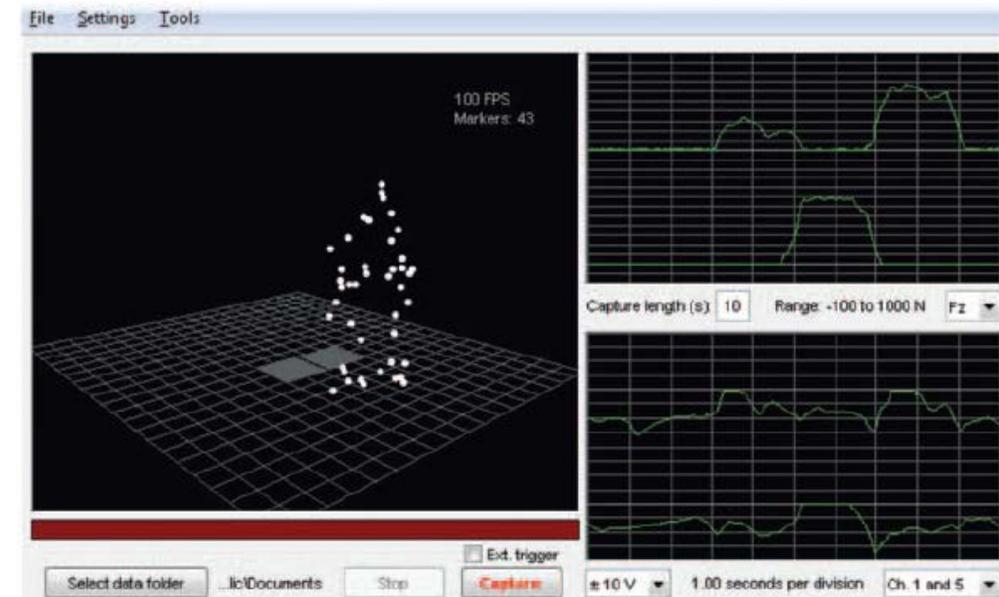
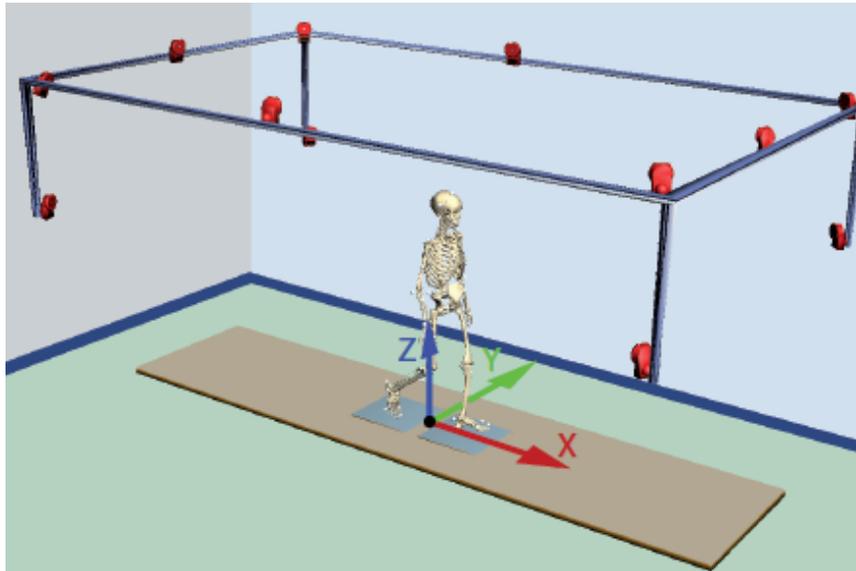
▪ 11 articulaciones

▪ 14 GDL



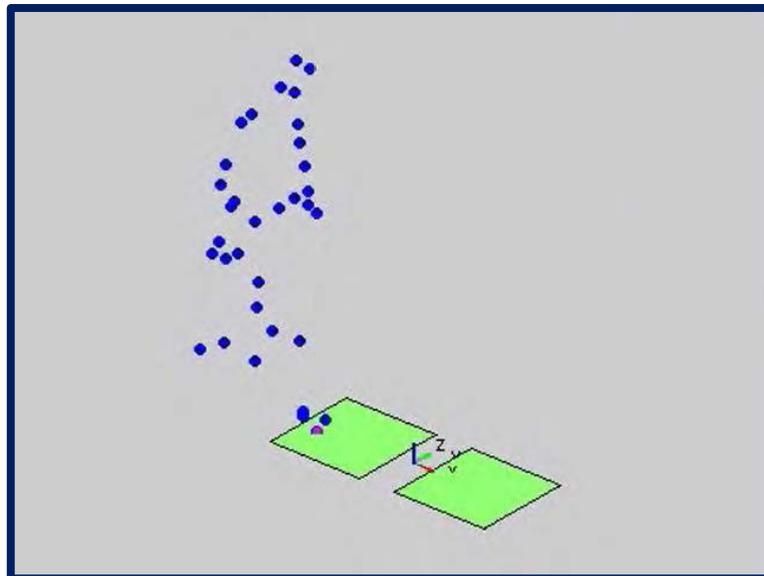
❑ OBTENCIÓN DE DATOS

- ❑ Sujeto con 37 markers en su cuerpo camina por una pasarela con dos placas de fuerza.
- ❑ El movimiento es capturado por un sistema óptico compuesto por 12 cámaras.
- ❑ Software: Computa la posición de los markers y proporciona su trayectoria.
- ❑ BSP: Escalado y medición



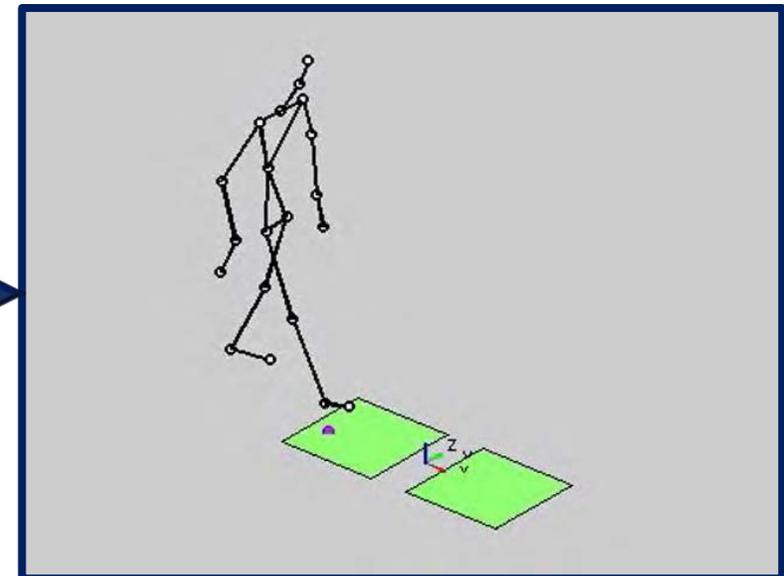
□ OBTENCIÓN DE DATOS: PARÁMETROS DE ENTRADA

□ Historia de posiciones de los markers.



Relaciones
algebraicas

□ Historias de posiciones de articulaciones y puntos extremos en coordenadas naturales (q_{3D}^*).



❑ OBTENCIÓN DE DATOS: PARÁMETROS DE ENTRADA



❑ Inconsistencia cinemática.

❑ Errores causados por:

- Movimiento de los markers.
- Ruidos en medición.
- Paso a 2D

- ❑ Modificación de la posición de las articulaciones para satisfacer restricciones.
- ❑ Problema de minimización.

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{q}) = (\mathbf{q} - \mathbf{q}^*)^T \mathbf{W}(\mathbf{q} - \mathbf{q}^*) \\ \text{st. } \Phi(\mathbf{q}) = 0 \end{cases}$$

$$\phi_1 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 - l_{12}^2$$

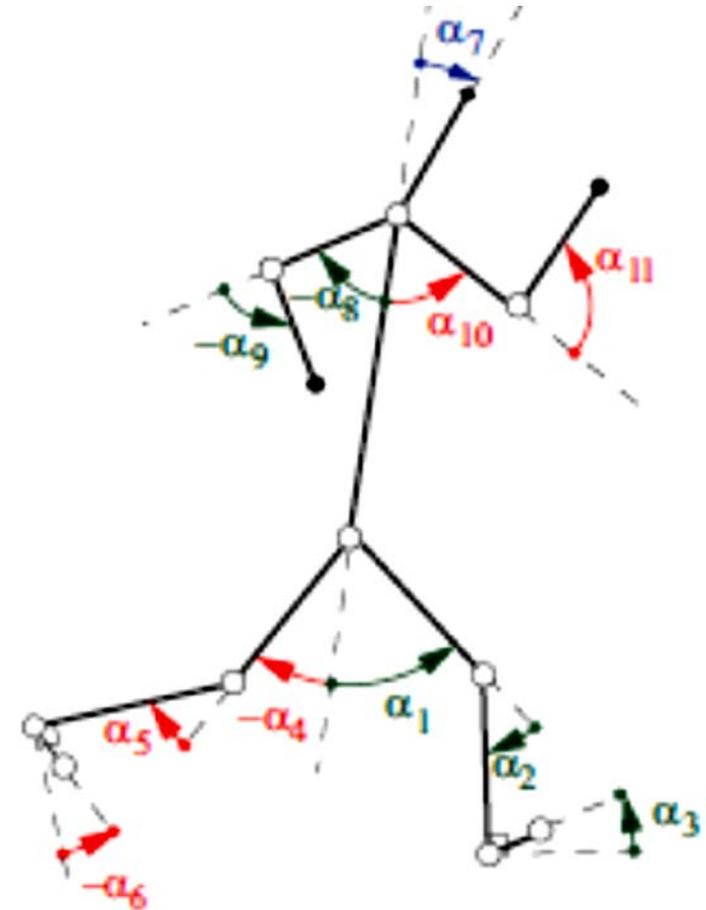
□ OBTENCIÓN DE DATOS: PARÁMETROS DE ENTRADA

Coordenadas naturales consistentes

Coordenadas independientes
 $z = \{x_4, y_4, \theta_1, \dots, \theta_{12}\}$

Filtrado de datos sobre variables independientes

Velocidades y aceleraciones (\dot{z}, \ddot{z})



□ DINÁMICA INVERSA: ECUACIONES DE NEWTON - EULER

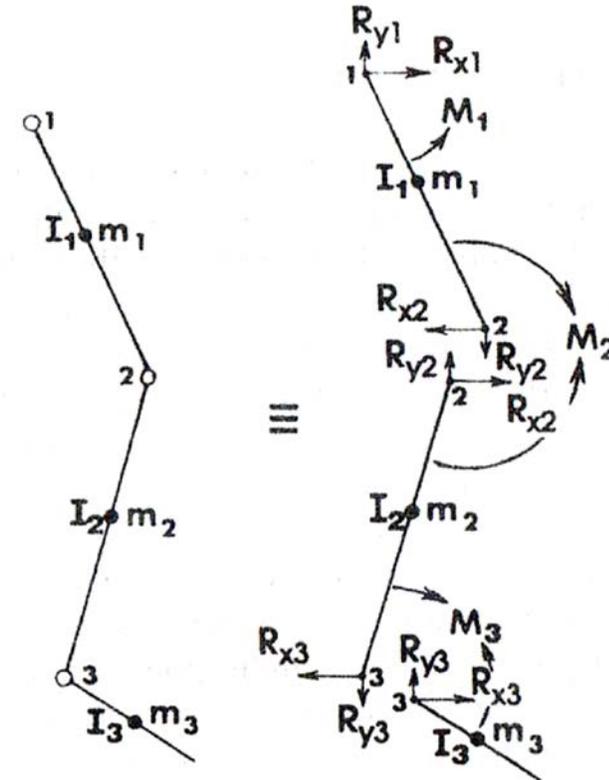
□ Se conoce:

- a_x, a_y = aceleración CDG.
- θ = ángulo en el plano.
- α = aceleración angular.
- R_{xd}, R_{yd} = fuerzas de reacción en la articulación distal.
- M_d = momento muscular en la articulación distal.

□ Se desconoce

- R_{xp}, R_{yp} = fuerzas de reacción en la articulación proximal.
- M_p = momento en la articulación proximal.

$$\square \sum F_x = ma_x; \quad \sum F_y = ma_y; \quad \sum M = I\alpha$$



□ DINÁMICA DIRECTA: ECUACIONES DE LAGRANGE

□ Energía cinética

$$T = \frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\alpha$$

□ Energía potencial

$$V = mgy_G$$

□ Función Lagrangiana.

$$L = T - V$$

□ Ec. Lagrange

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial z_i} = Q_i, (i = 1, \dots, n)$$

□ Sistema de ecuaciones

$$M(\mathbf{z})\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{Q}_w(\mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}) + \mathbf{Q}_v(\mathbf{z}) + \mathbf{Q}_c$$

□ Integración de la forma:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y})$$

□ Duplicación de variables

$$\mathbf{y} = \begin{Bmatrix} \mathbf{z} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{Bmatrix} \rightarrow \dot{\mathbf{y}} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{z}} \end{Bmatrix}$$

□ Posiciones y velocidades de las coordenadas independientes \mathbf{z}

□ DINÁMICA DIRECTA: CONTROLADOR

□ *Computed feedforward* (Lazo abierto)

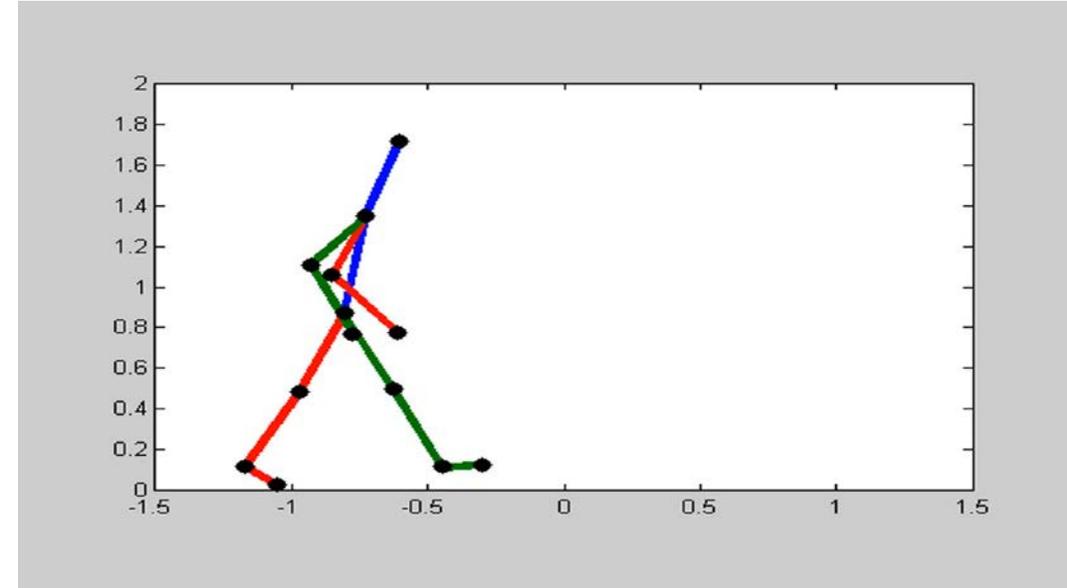
- $Q_c = M(z)\ddot{z} - Q_w(z, \dot{z}) - Q_v(z)$
- Sistema inestable: necesidad de un controlador.

□ El controlador debe seguir una trayectoria deseada (z_d).

□ *Feedback*: controlador PD.

- $Q_c = K_p(z_d - z_r) + K_v(\dot{z}_d - \dot{z}_r)$

□ CTC: *Computed Torque Control*.



□ DINÁMICA DIRECTA: CTC

$$\square Q_c = M(z_a) [\ddot{z}_d + K_v(\dot{z}_d - \dot{z}_r) + K_p(z_d - z_r)] - Q_w(\dot{z}_r, z_r) - Q_v(z_r)$$

$$\square M(z_r) \ddot{z}_r = Q_w(z_r, \dot{z}_r) + Q_v(z_r) + Q_c$$

$$(\ddot{z}_d - \ddot{z}_r) + K_v(\dot{z}_d - \dot{z}_r) + K_p(z_d - z_r) = 0$$

$$(\ddot{\epsilon}) + K_v(\dot{\epsilon}) + K_p(\epsilon) = 0$$

□ Para proporcionar una respuesta críticamente amortiguada: $K_{vi} = 2\sqrt{K_{pi}}$

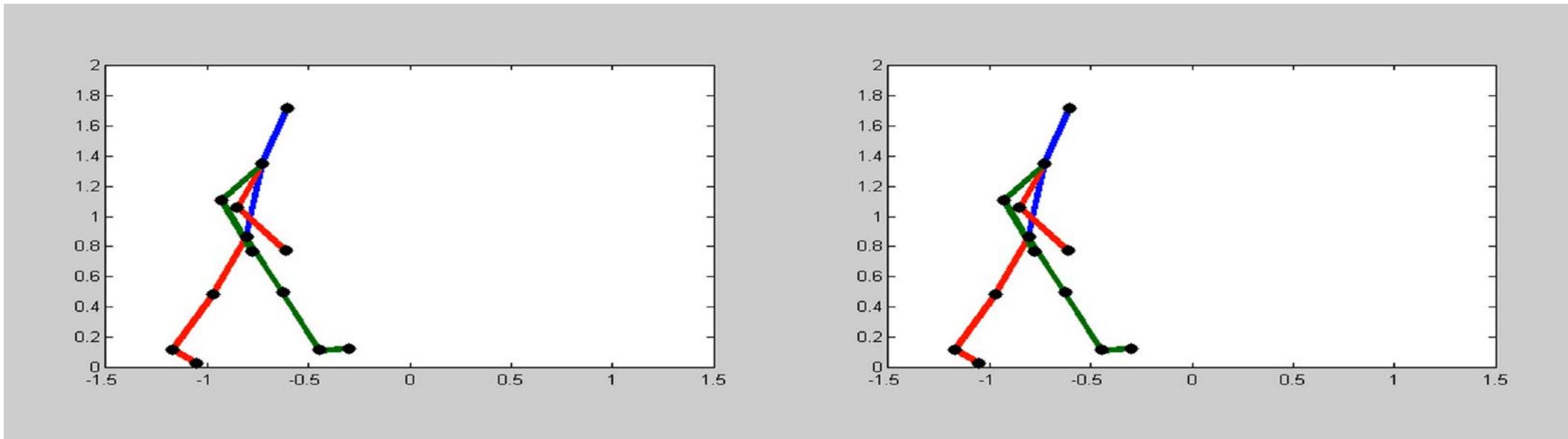
□ Podemos despejar e integrar las posiciones del sistema volviendo a emplear la duplicación de variables:

$$\ddot{z}_r = K_v(\dot{z}_d - \dot{z}_r) + K_p(z_d - z_r) + \ddot{z}_d$$

□ DINÁMICA DIRECTA: CTC

□ Movimiento de captura

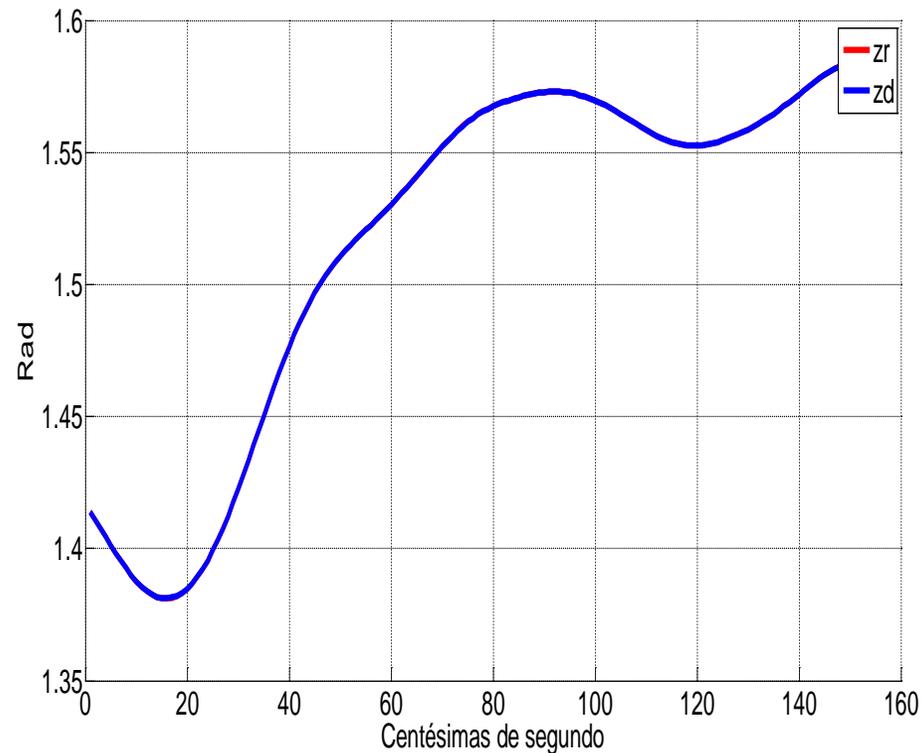
□ Dinámica directa con el integrador CTC



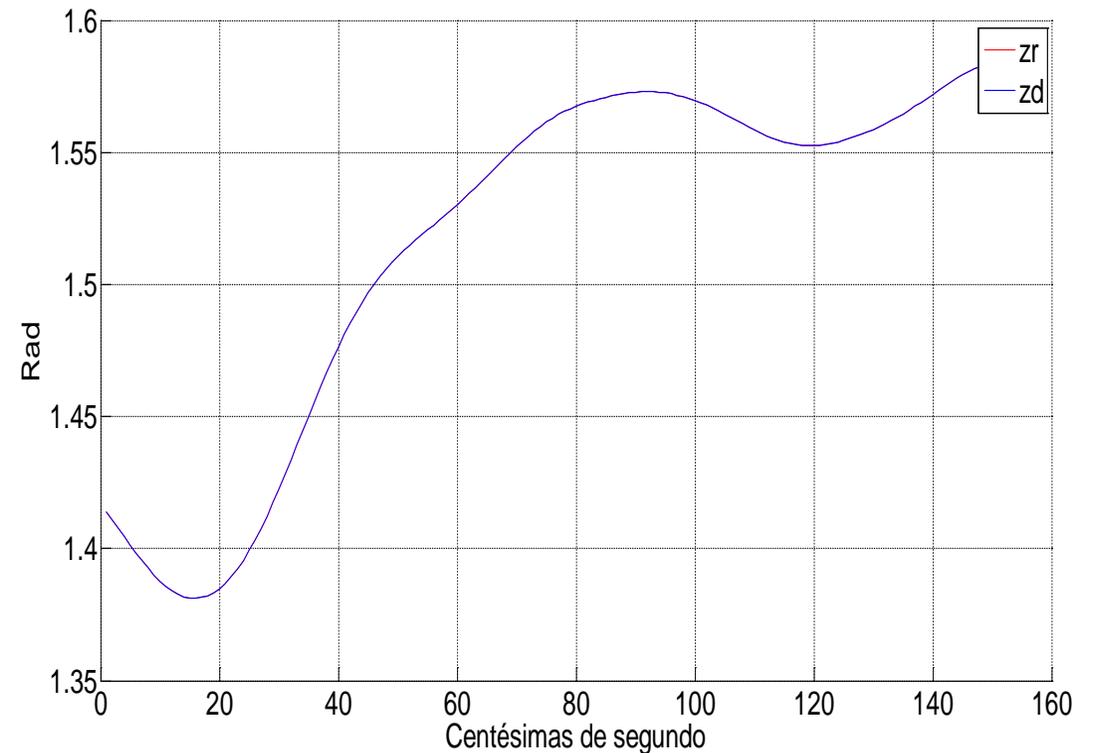
RESULTADOS

ERRORES EN POSICIÓN

Comparación en θ_1 . Gain = 0.0001



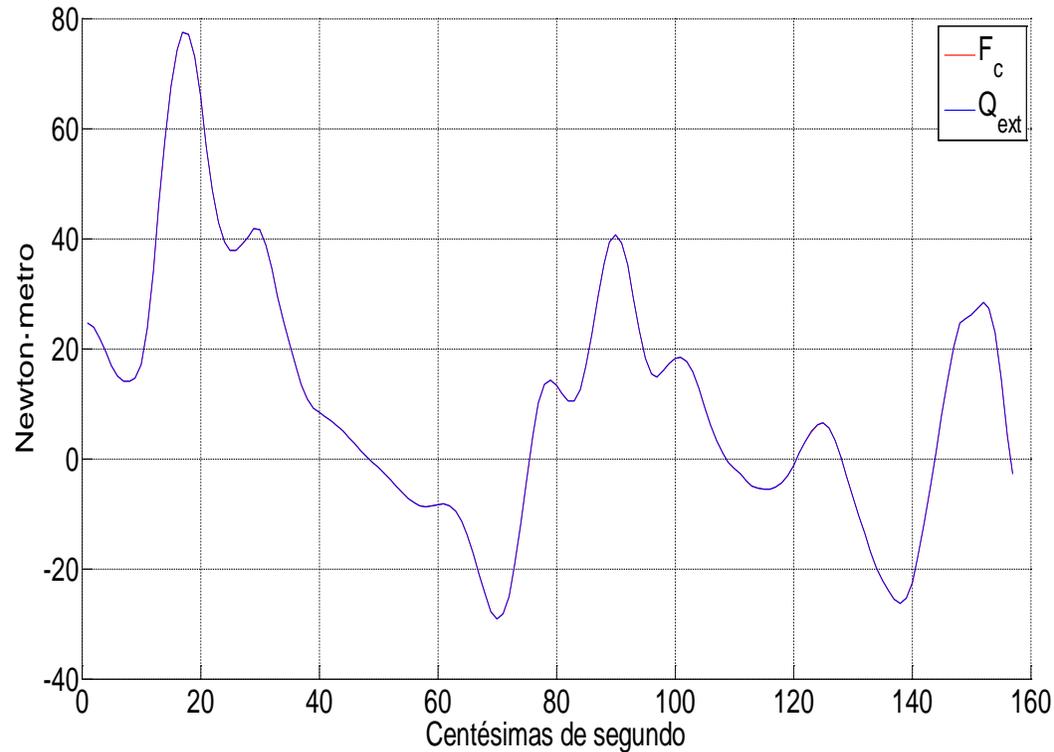
Comparación en θ_1 . Gain = 10000



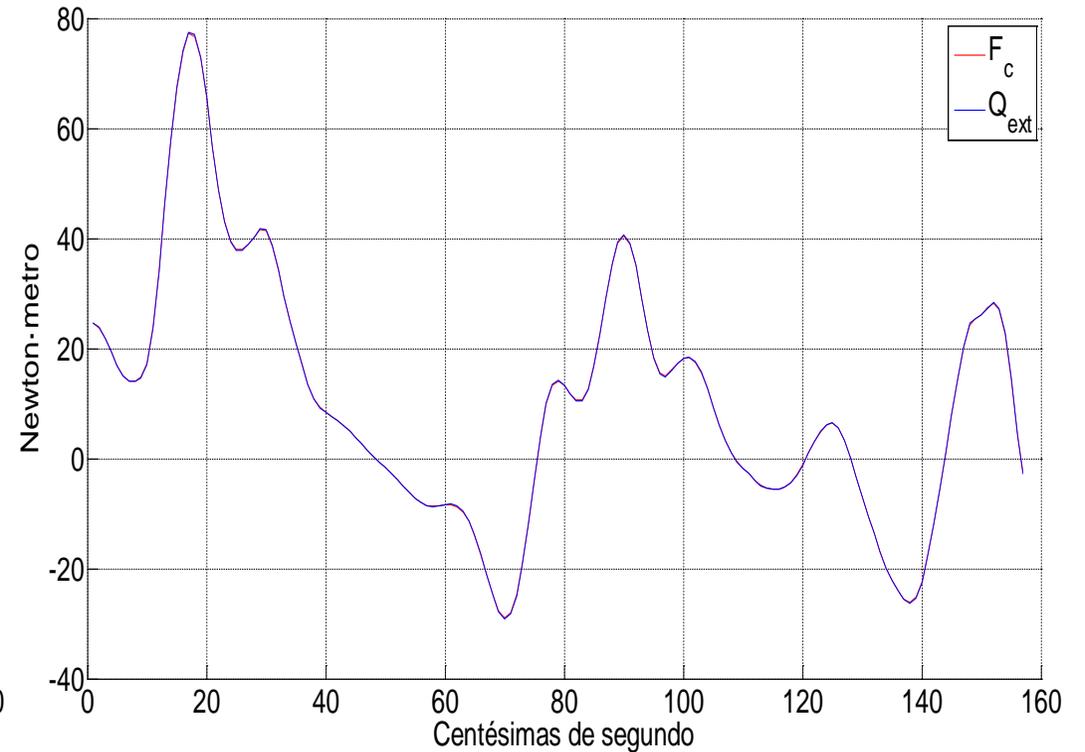
RESULTADOS

DIFERENCIAS EN FUERZAS

Comparación en θ_1 . Gain = 0.0001

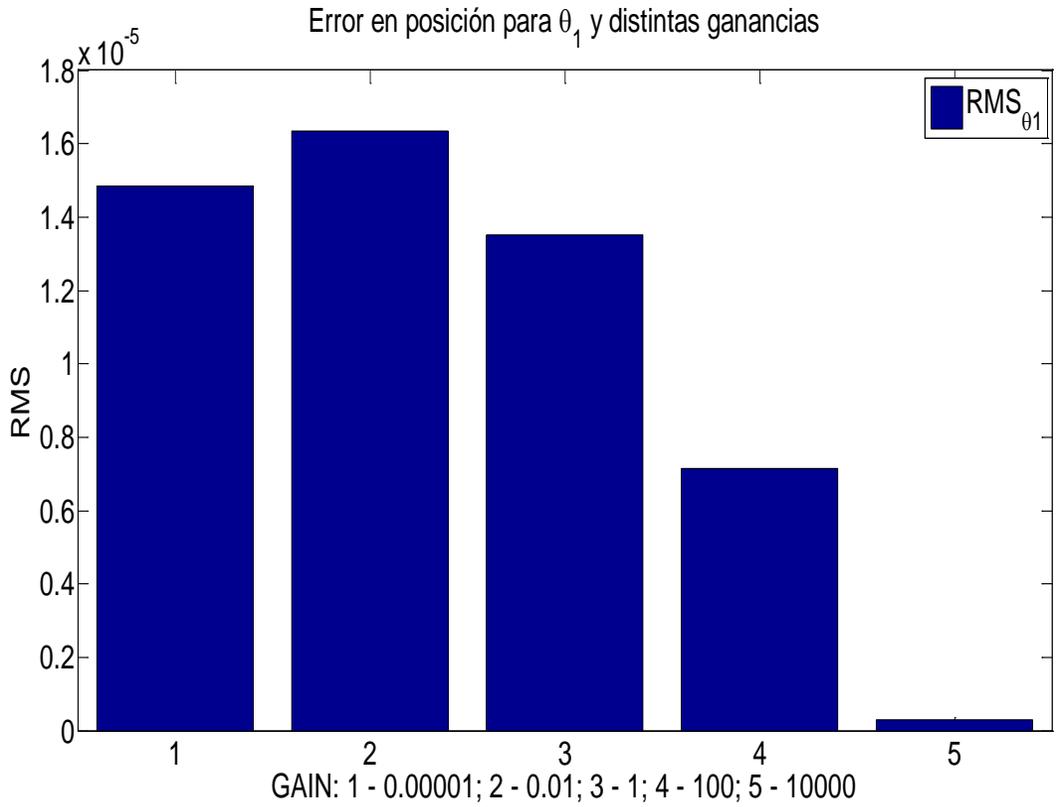


Comparación en θ_1 . Gain = 10000

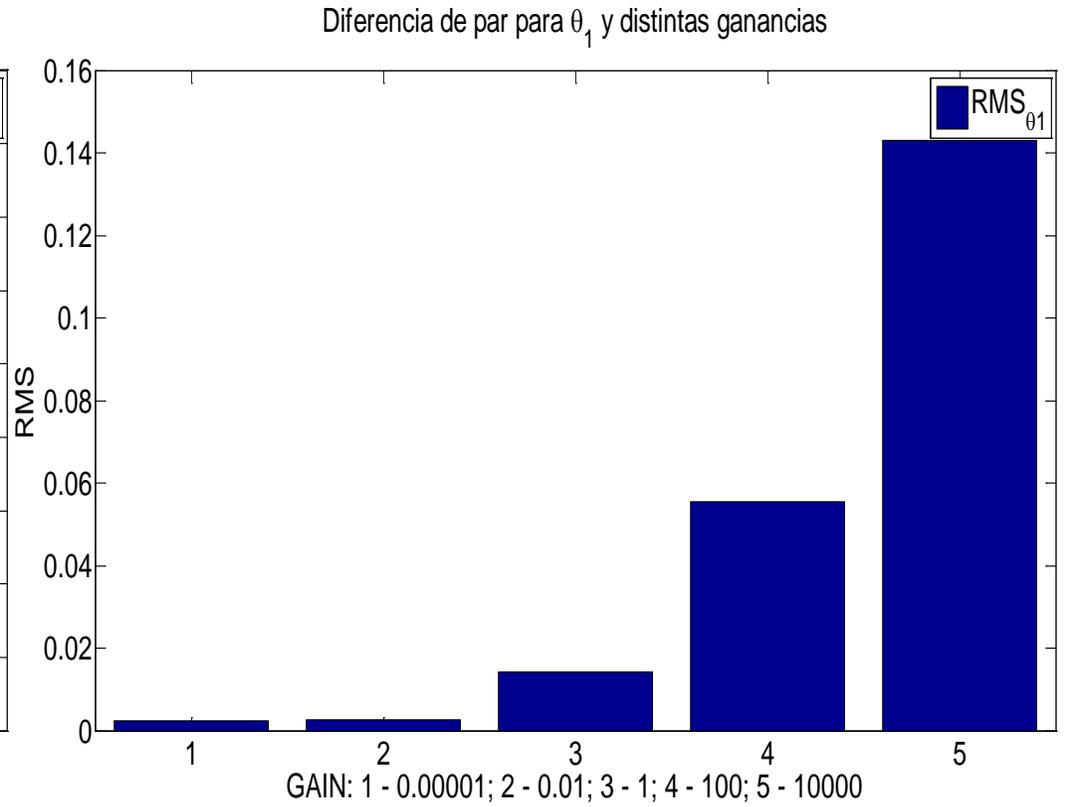


RESULTADOS

ERRORES EN POSICIÓN



DIFERENCIAS EN FUERZAS

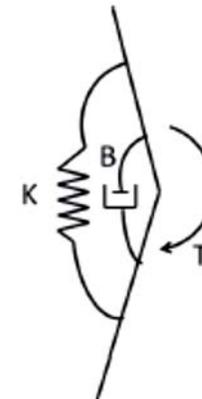
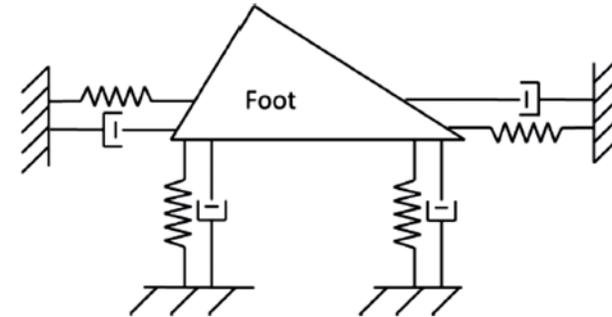


❑ CONCLUSIONES

- ❑ Pares articulares por dinámica inversa mediante Newton – Euler.
- ❑ Ecuaciones del movimiento de Lagrange de forma simbólica función de las 14 variables independientes.
- ❑ Integración de las Ecuaciones del movimiento empleando pares articulares de la dinámica inversa:
 - Inestabilidad por errores de integración.
 - Necesidad de un controlador
- ❑ CTC: controlador más adecuado.
 - Buen funcionamiento para diferentes ganancias.
 - A mayores ganancias mejor se adapta al seguimiento de la trayectoria.
 - A mayor ganancia, mayores diferencias de fuerzas.

❑ TRABAJO FUTURO

- ❑ Planteamiento 3D.
- ❑ Modelo de articulación.
- ❑ Implementación de un sistema infraactuado.
 - Modelo de contacto.
- ❑ Predicción del movimiento.
- ❑ Aplicaciones a otras situaciones: carrera, subir escaleras, etc.



TRABAJO FIN DE GRADO

DINÁMICA DIRECTA DE LA MARCHA HUMANA POR MÉTODOS DE CONTROL



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
FERROL

LIM



Laboratorio de Ingeniería Mecánica
Universidad de La Coruña

<http://lim.ii.udc.es>

