

# Proyecto Fin de Carrera

## Estimación de esfuerzos musculares en el movimiento humano mediante técnicas de optimización



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

- **Autor:**
  - Antonio J. Rodríguez González
- **Tutor:**
  - Urbano Lugrís Armesto
- **Febrero 2015**



- **Introducción**
- **Modelo dinámico**
  - Elementos del modelo
  - Captura del movimiento
  - Variables del modelo
  - Análisis cinemático
  - Análisis dinámico
- **Músculos**
  - Modelo muscular
  - Técnicas de optimización
  - Resultados
- **Conclusiones y aplicaciones futuras**

# INTRODUCCIÓN

## ■ Objetivo:

Determinar el movimiento



Determinar fuerzas que lo producen

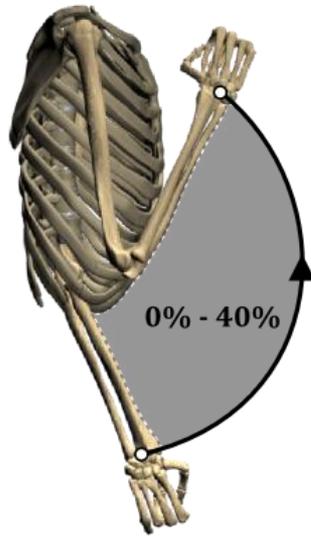


Estimar esfuerzos musculares que las realizan

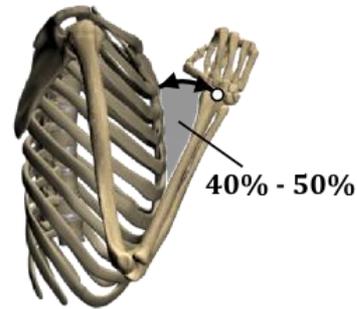


# INTRODUCCIÓN

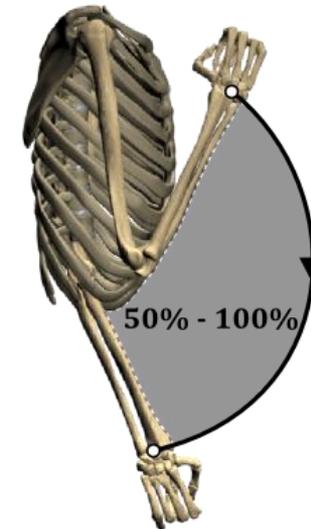
- **Movimiento estudiado**



FASE DE SUBIDA



FASE DE FLEXIÓN  
MÁXIMA

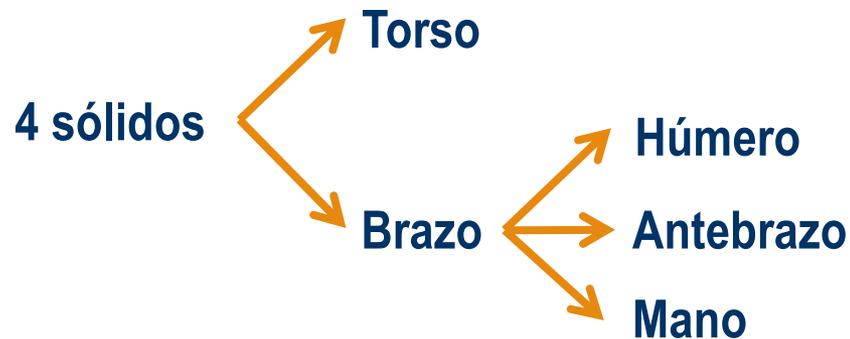
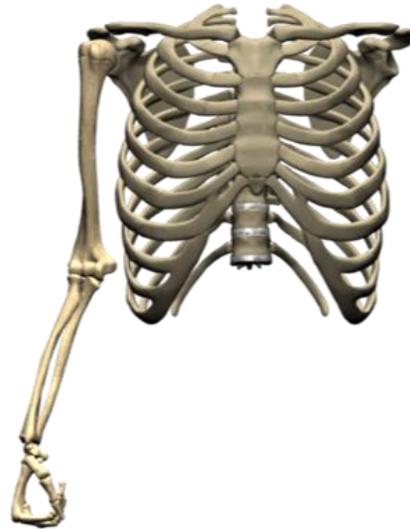


FASE DE BAJADA

- **Realización de un modelo polivalente**

# MODELO DINÁMICO

## ■ Elementos del modelo



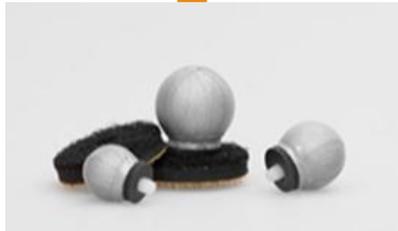
# MODELO DINÁMICO

Determinar posición y orientación de los elementos del modelo

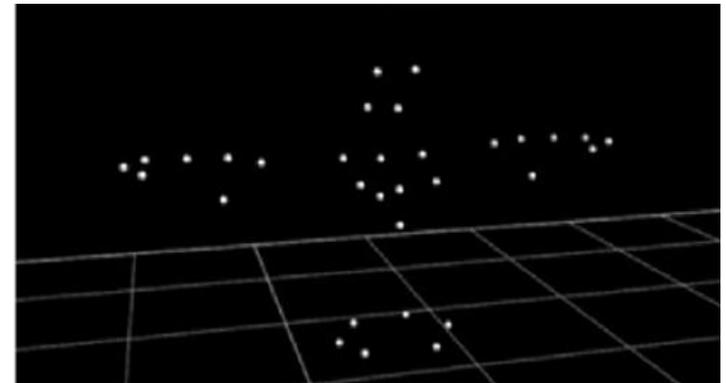
CAPTURA DEL MOVIMIENTO



Cámaras infrarrojas



Markers pasivos

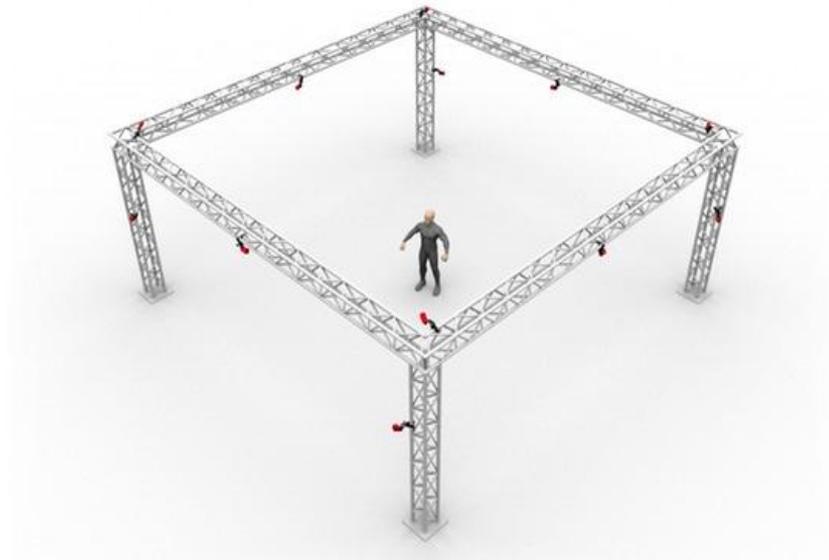


# MODELO DINÁMICO

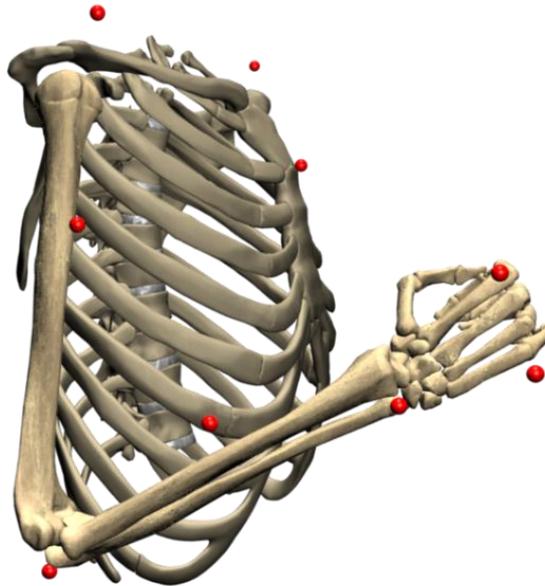
Determinar posición y orientación de los elementos del modelo



CAPTURA DEL MOVIMIENTO



- **Criterios para colocar los markers:**
  - Definir los sólidos del modelo: mínimo 3 puntos
  - Puntos reconocibles
  - Efecto piel: movimiento relativo entre piel y huesos



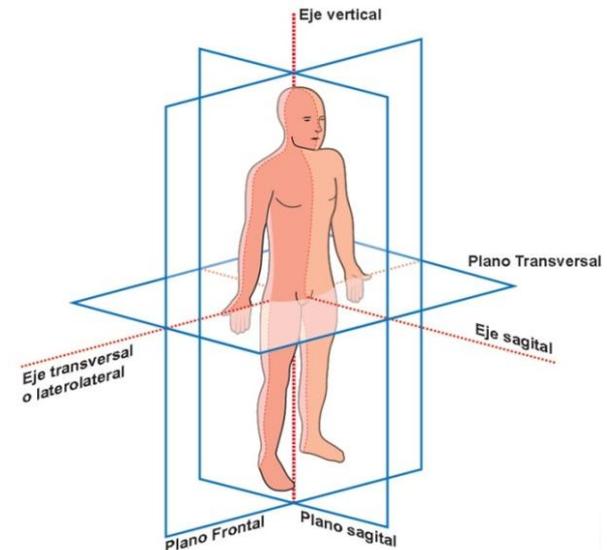
# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers



Posición y orientación de los sólidos del modelo

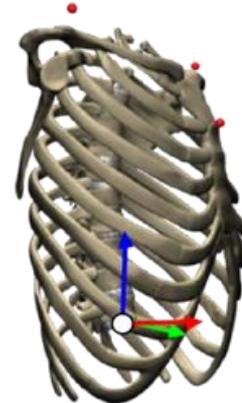
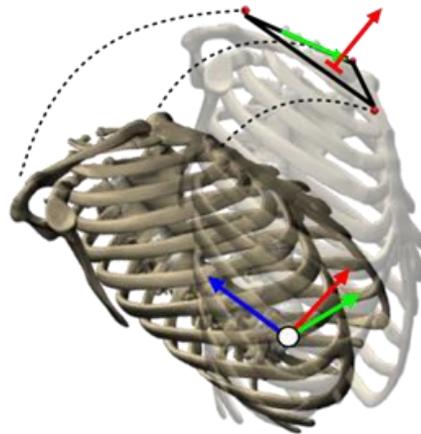
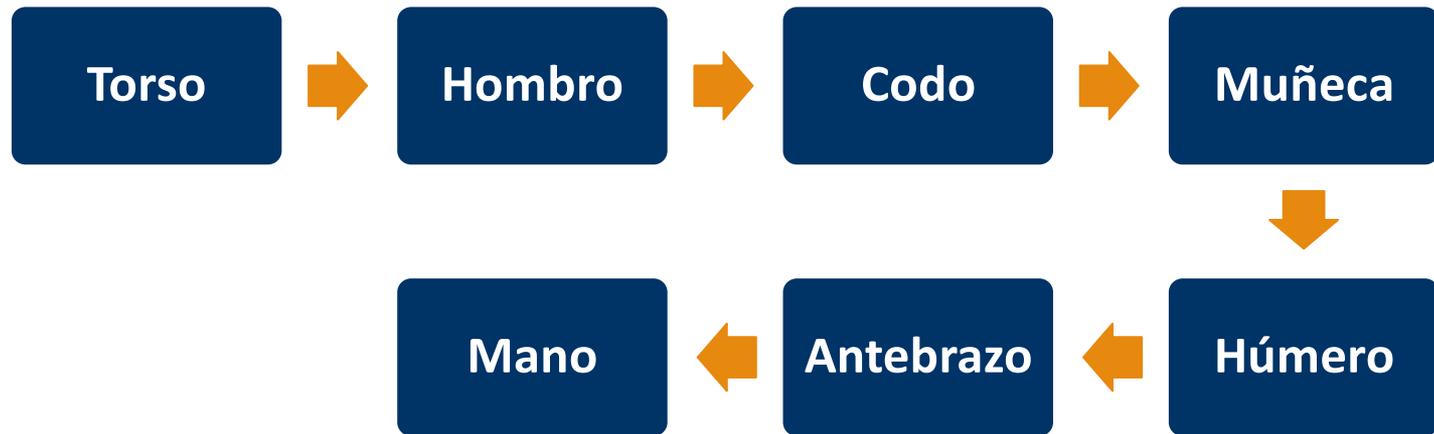
- Definición de cada sólido mediante coordenadas naturales:
  - 2 puntos + 2 vectores unitarios: húmero y antebrazo
  - 1 punto + 3 vectores unitarios: torso y mano
- Convención de ejes un sólido:
  - Planos anatómicos
  - Ejes anatómicos



# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

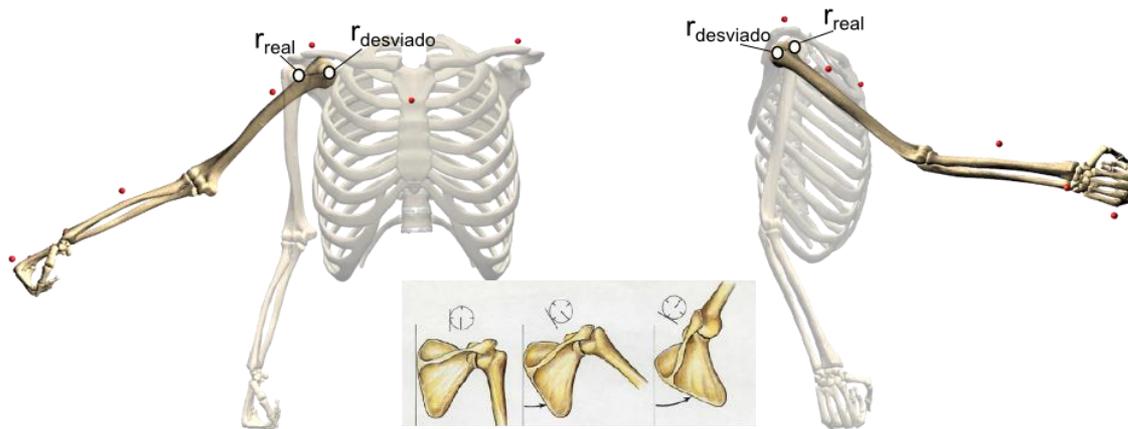
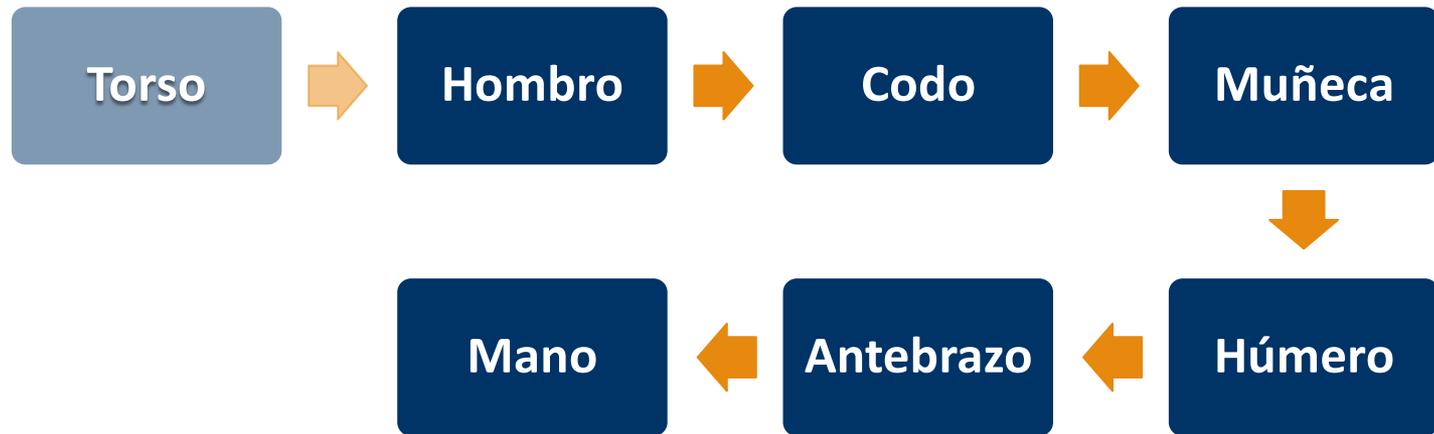
Posición y orientación de los sólidos del modelo



# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

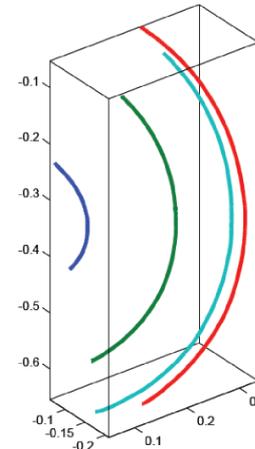
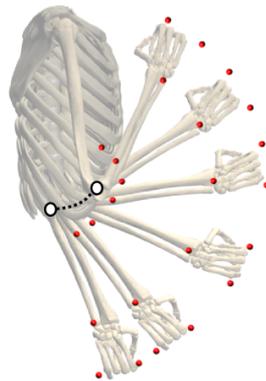
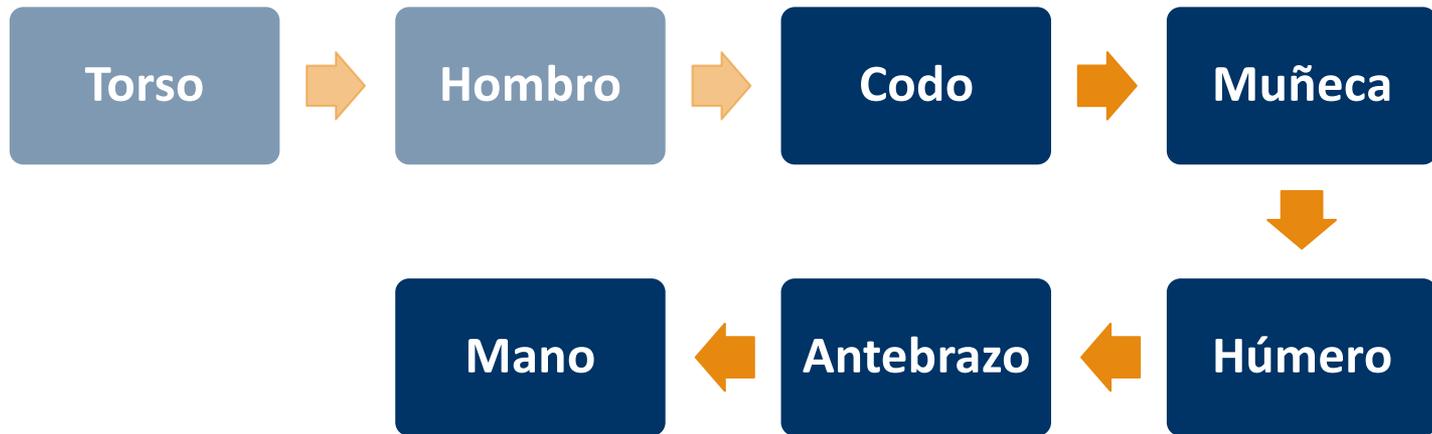
Posición y orientación de los sólidos del modelo



# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

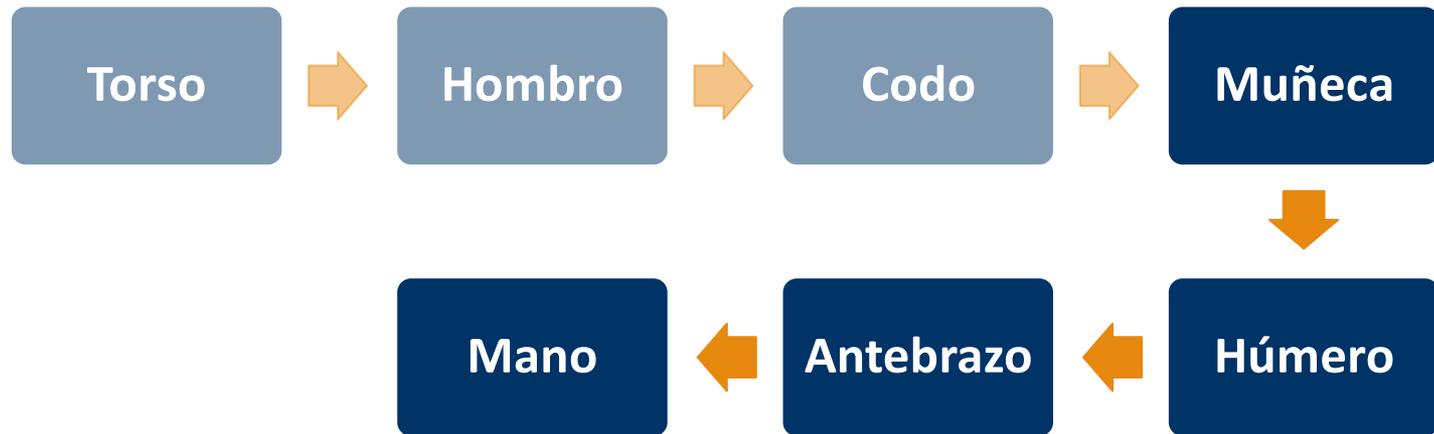
Posición y orientación de los sólidos del modelo



# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

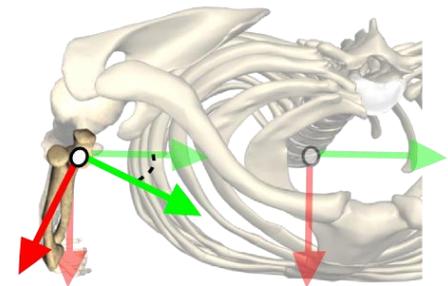
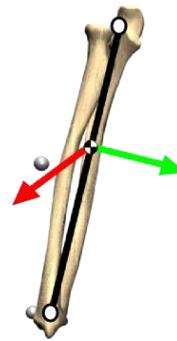
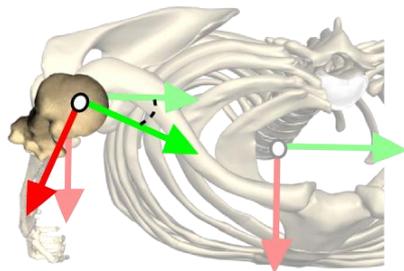
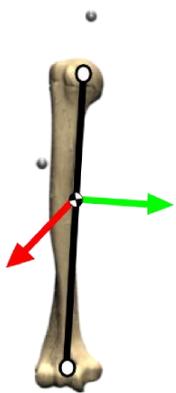
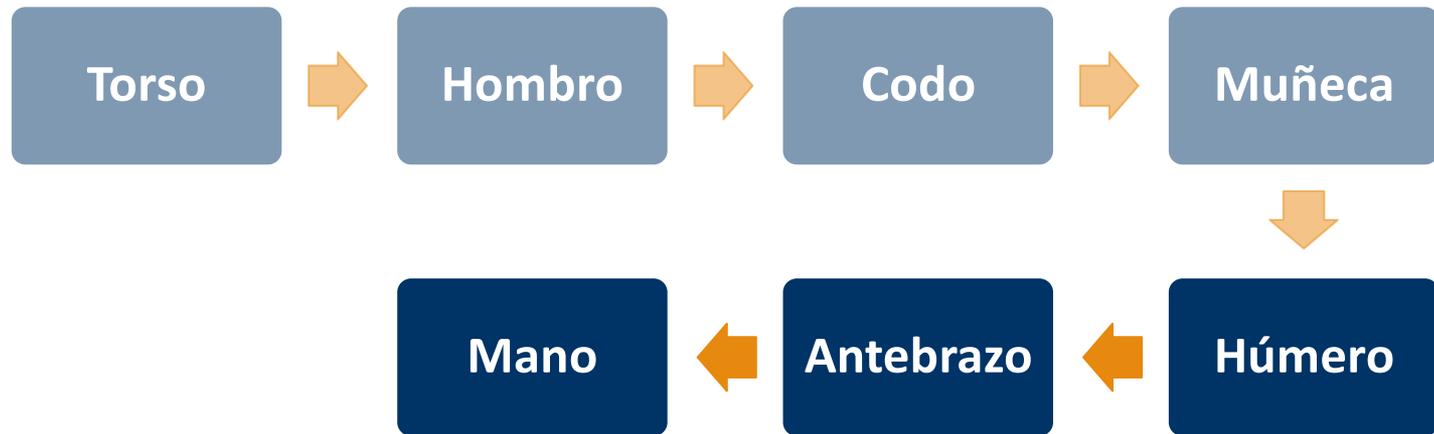
Posición y orientación de los sólidos del modelo



# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

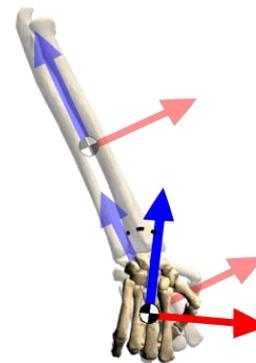
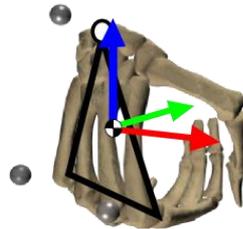
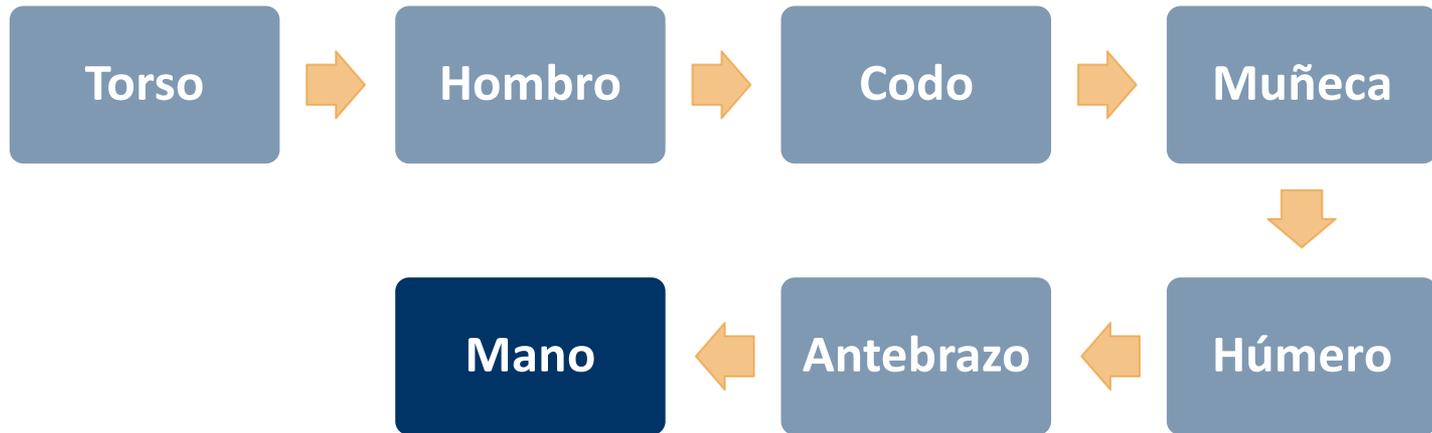
Posición y orientación de los sólidos del modelo



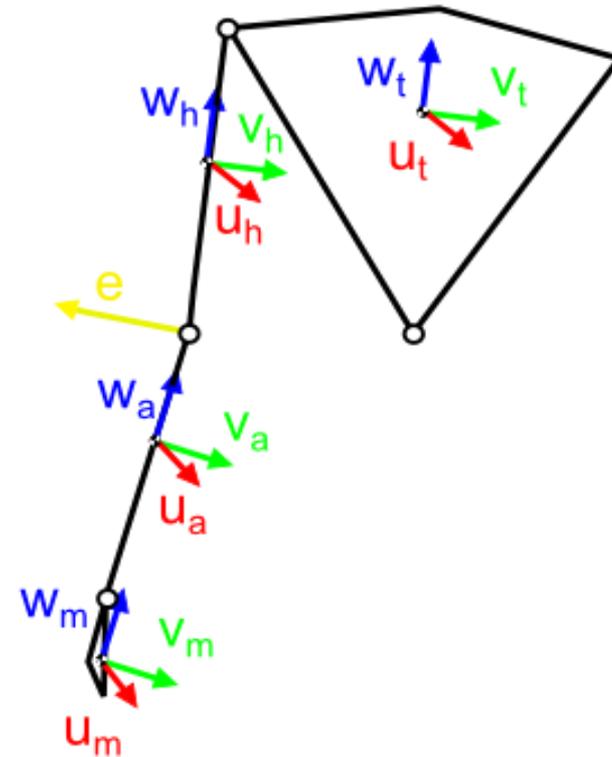
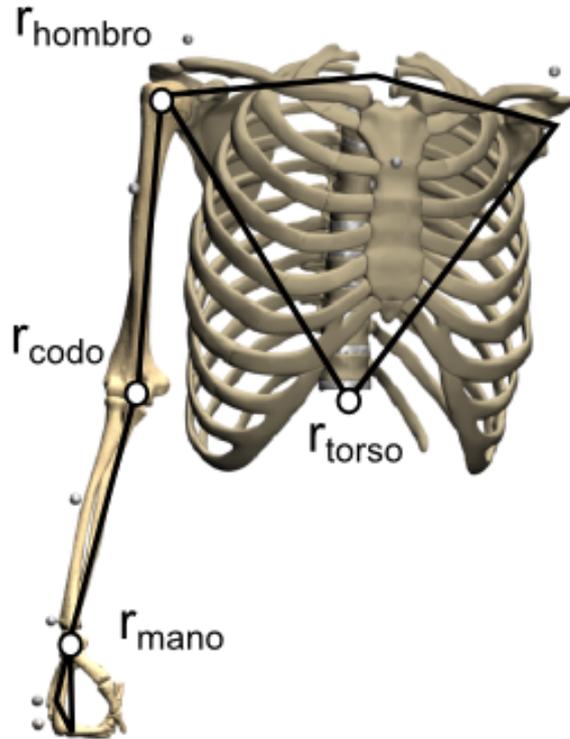
# MODELO DINÁMICO

Posición de los markers

Posición y orientación de los sólidos del modelo

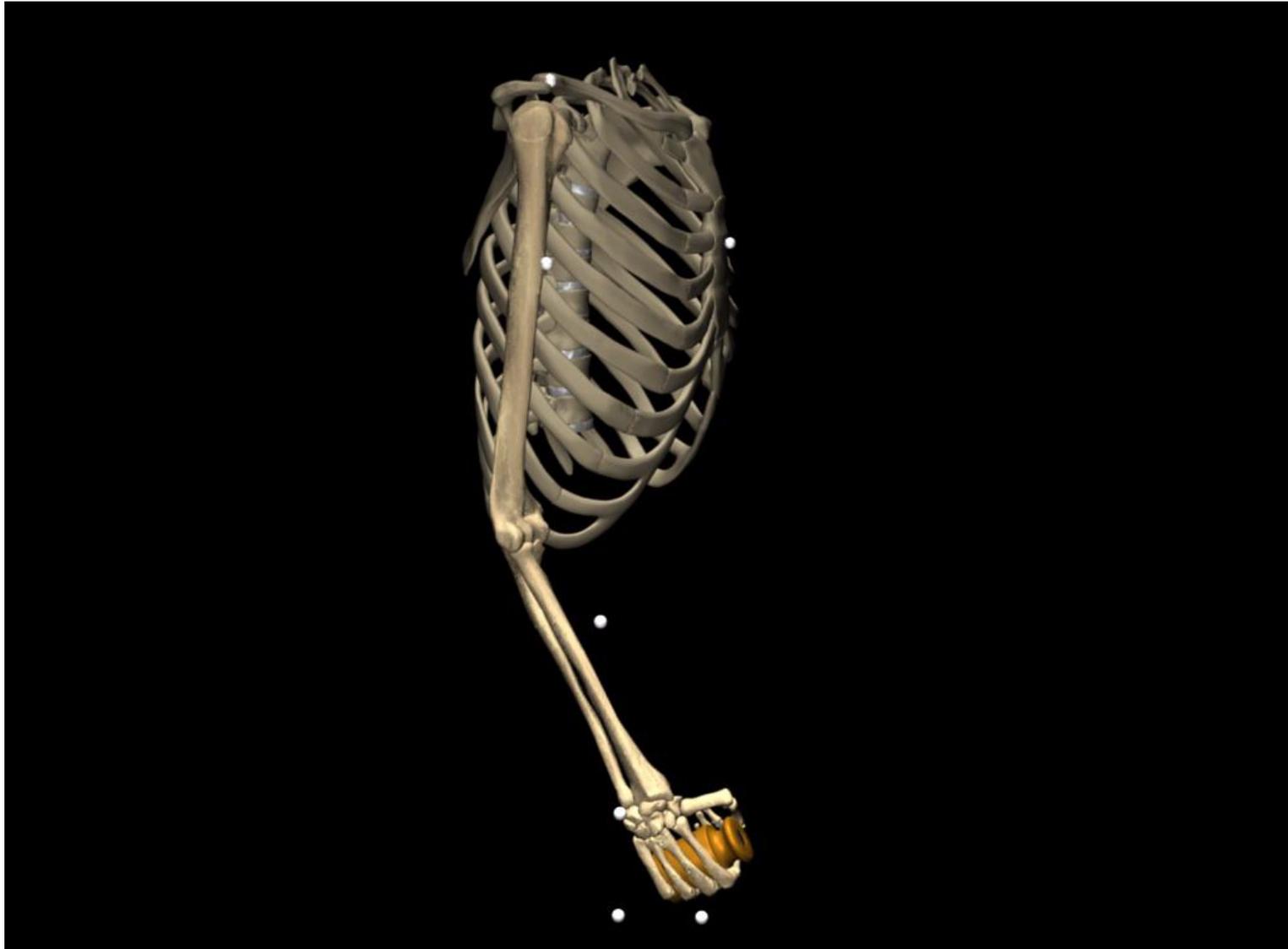


# MODELO DINÁMICO



$$q_d = \{ r_{codo} \quad r_{mano} \quad u_h \quad v_h \quad u_a \quad v_a \quad u_m \quad v_m \quad w_m \quad e \}$$

# ANÁLISIS CINEMÁTICO

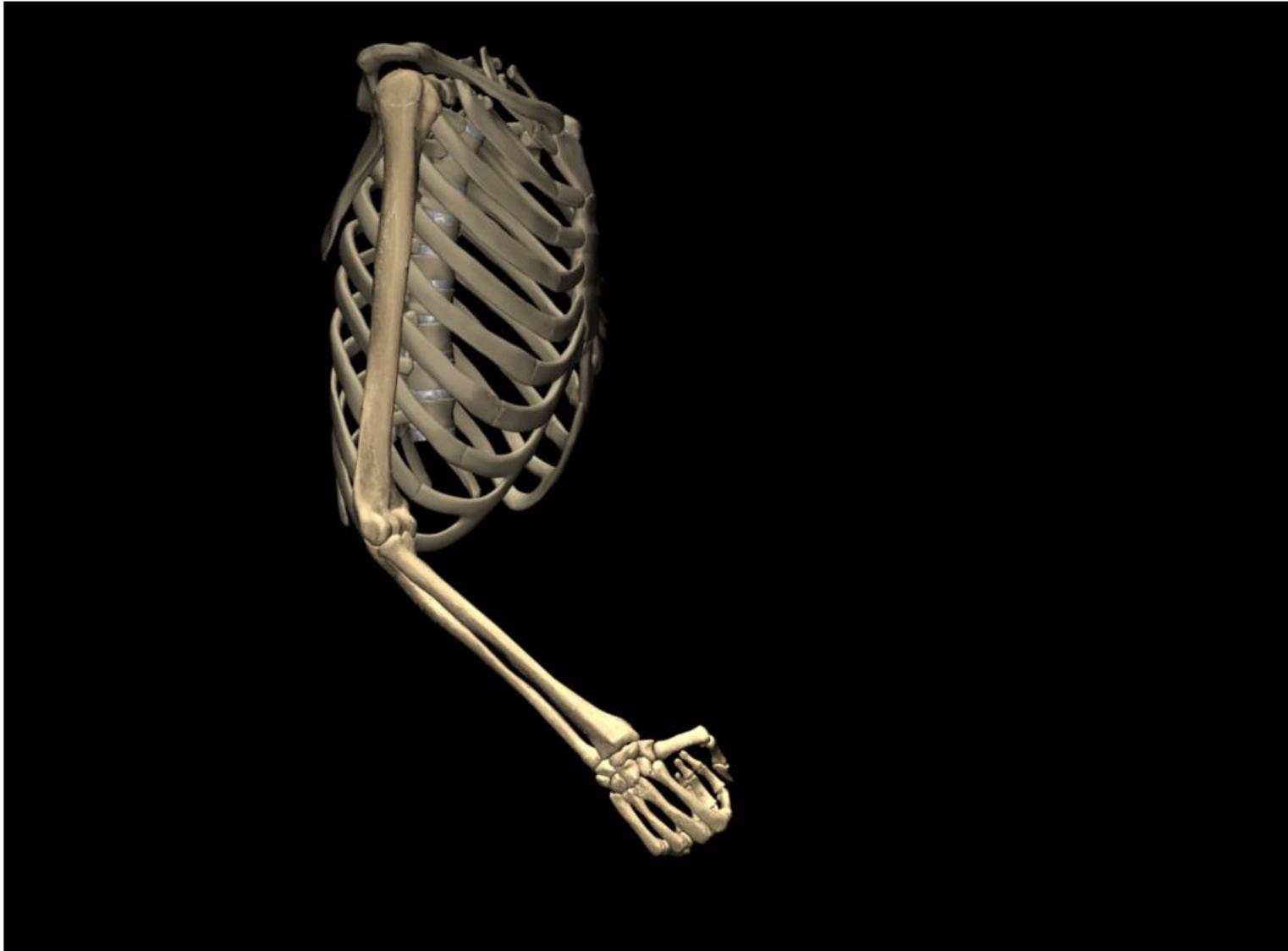


- Es necesario asegurar que se cumplen las condiciones de diseño del modelo, para lo que se definen las ecuaciones de restricción.
- Problema de consistencia cinemática

$$\min f(\mathbf{q}) = (\mathbf{q} - \mathbf{q}^*)^t \mathbf{W} (\mathbf{q} - \mathbf{q}^*)$$
$$S. t. \ \boldsymbol{\phi}(\mathbf{q}) = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} = \mathbf{0}$$

- Se obtienen un conjunto de variables consistentes con el comportamiento del modelo.

# ANÁLISIS CINEMÁTICO



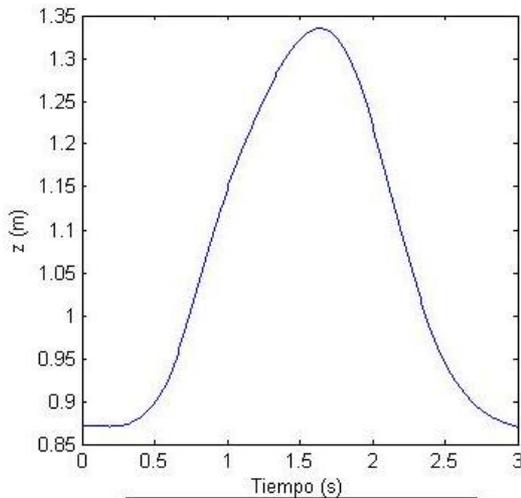
# ANÁLISIS CINEMÁTICO

Filtrado de datos

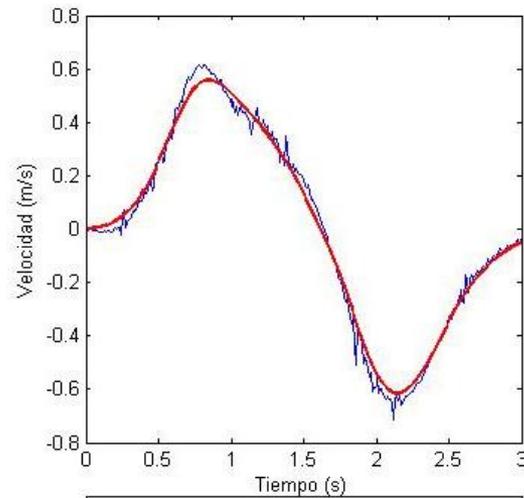


Sobre variables dependientes

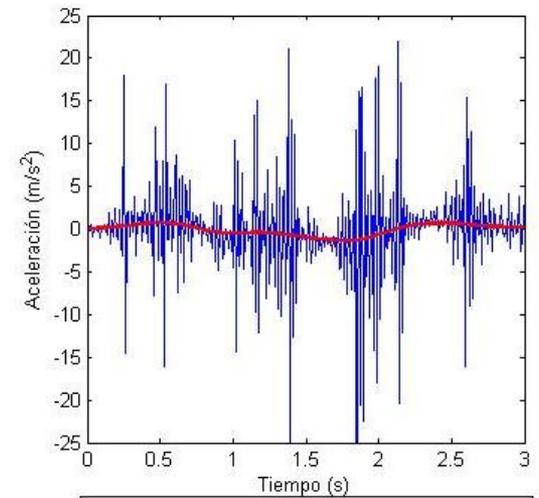
Sobre nuevas variables independientes



— Posición vertical de la muñeca



— Velocidad vertical de la muñeca  
— Velocidad vertical de la muñeca (filtrado)



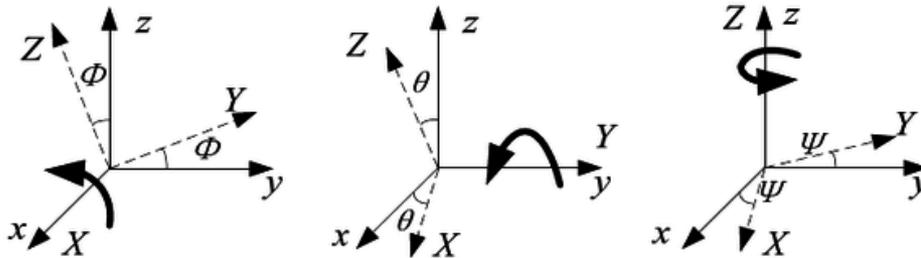
— Aceleración vertical de la muñeca  
— Aceleración vertical de la muñeca (filtrado)

# ANÁLISIS CINEMÁTICO

Variables independientes = posición del hombro + ángulos

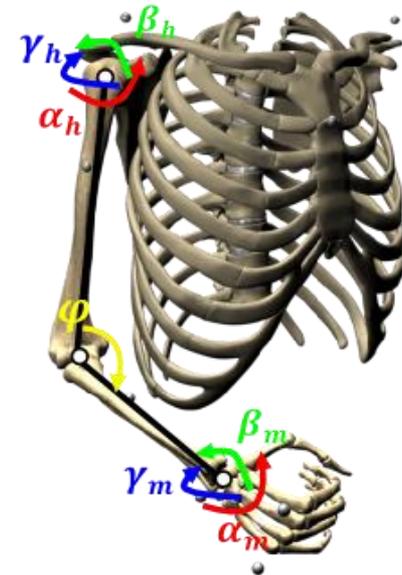
Definición matrices rotación de cada sistema

Ángulos de los pares esféricos

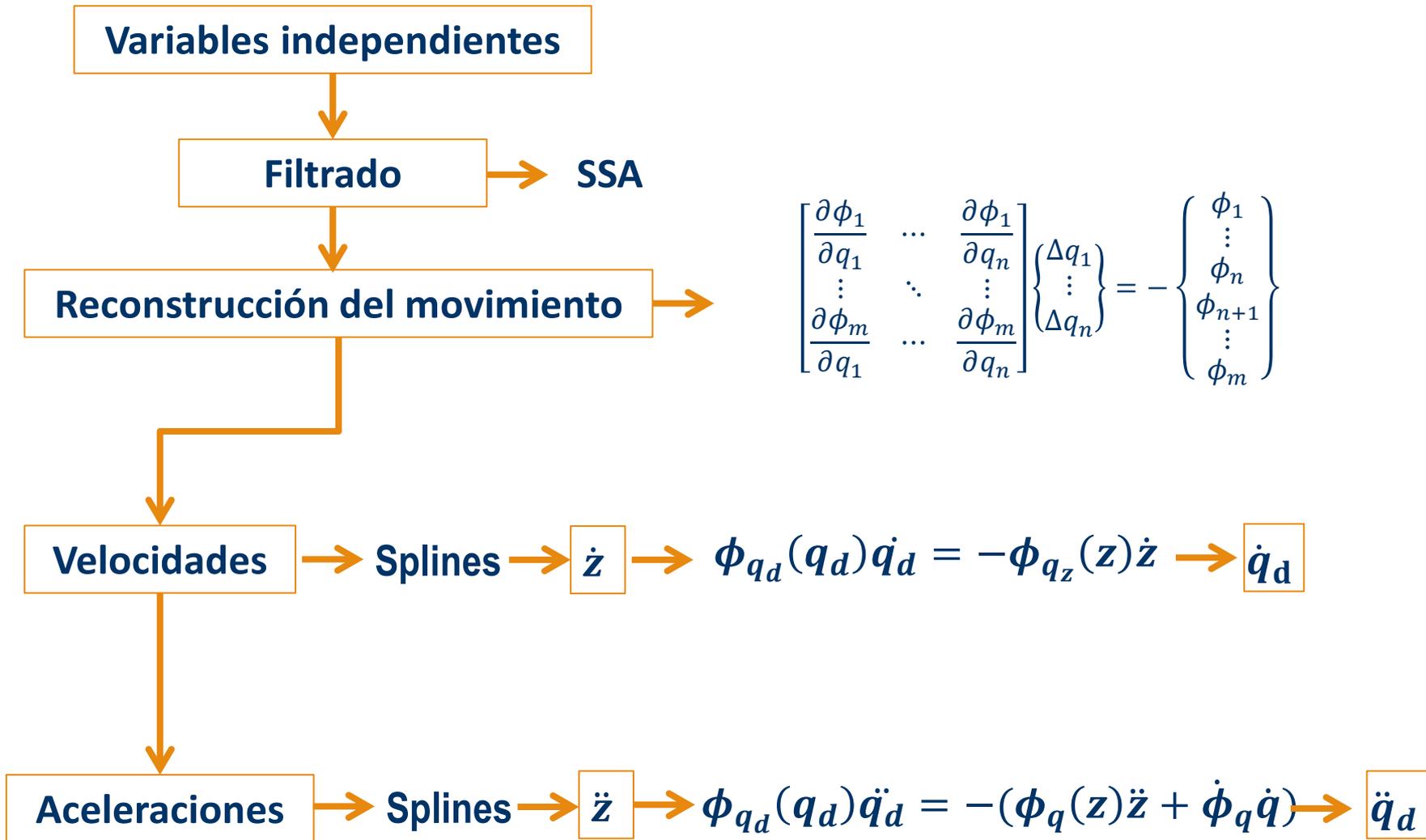


Posición relativa del húmero y antebrazo

Ángulo de giro del par de revolución



# ANÁLISIS CINEMÁTICO



# ANÁLISIS DINÁMICO

- Resolución de la dinámica inversa: matriz R

$$\begin{cases} M\ddot{q} + \phi_q^t \lambda = Q \\ \phi(q) = 0 \end{cases}$$

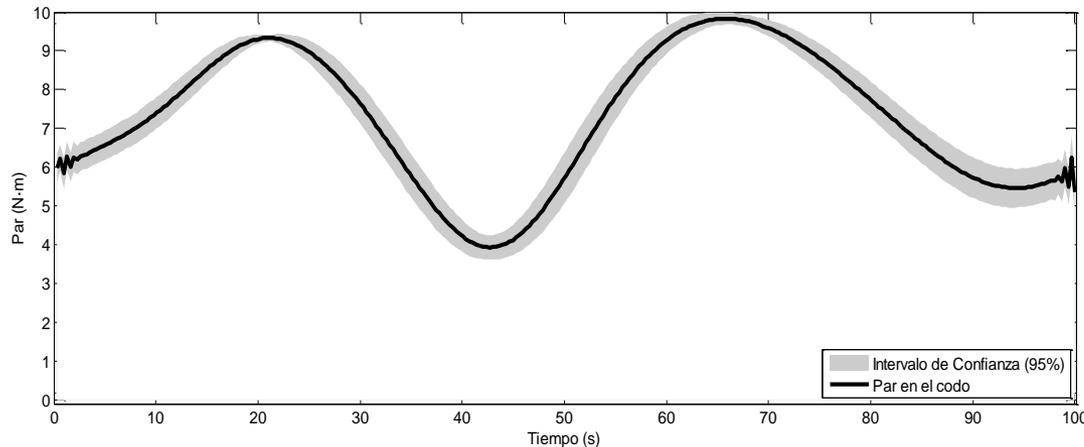
$$\begin{aligned} \dot{q} &= R\dot{z} \\ \ddot{q} &= R\dot{z} + R\ddot{z} \end{aligned}$$



$$Q_m = R^T(M\ddot{q} - \hat{Q})$$

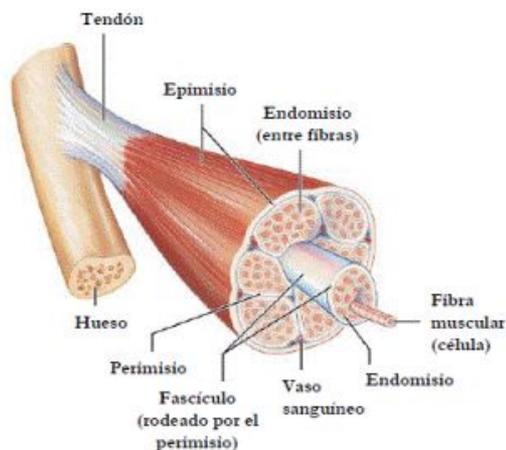


$$Q_m = \begin{Bmatrix} F_m \\ Q_h \\ Q_c \\ Q_m \end{Bmatrix}$$

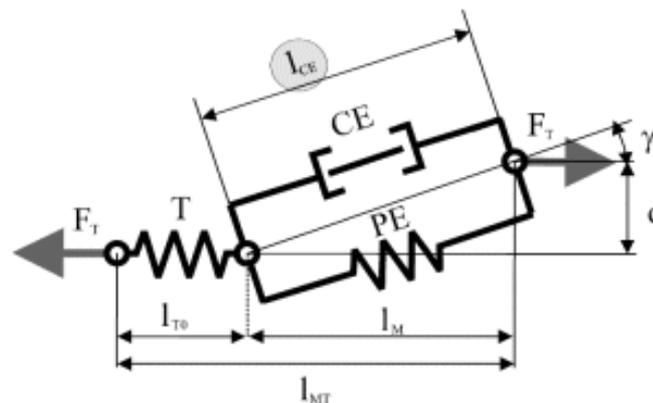


# MODELO MUSCULAR

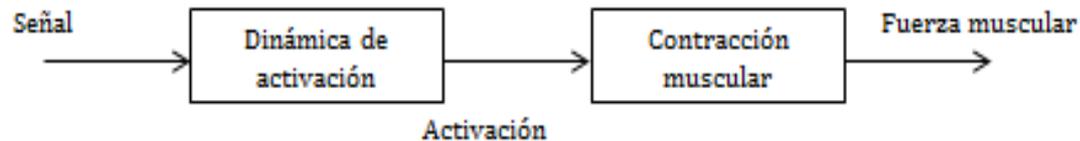
## ■ Morfología del músculo



## ■ Modelo de Hill

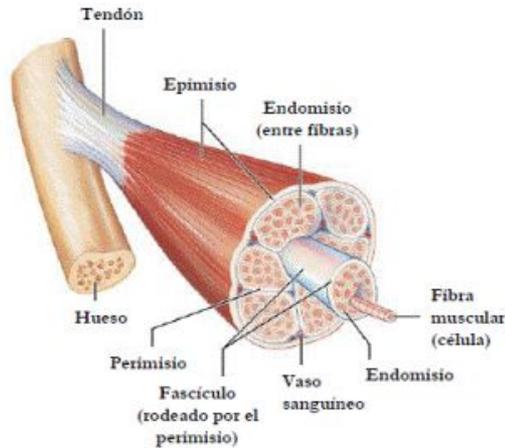


## ■ Dinámica de activación muscular

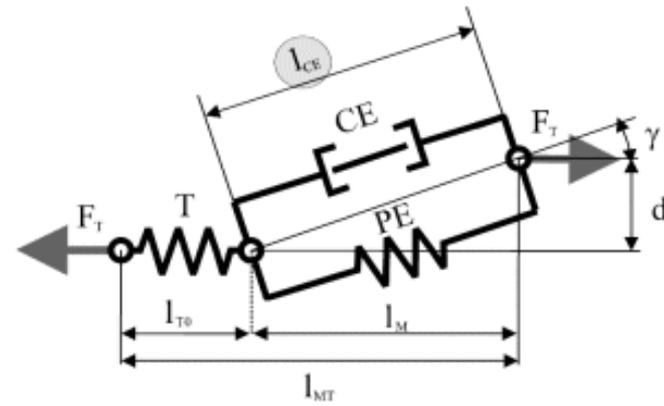


# MODELO MUSCULAR

## ■ Morfología del músculo



## ■ Modelo de Hill

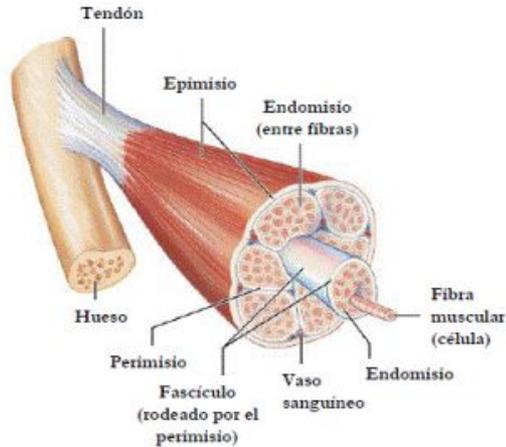


## ■ Dinámica de activación muscular

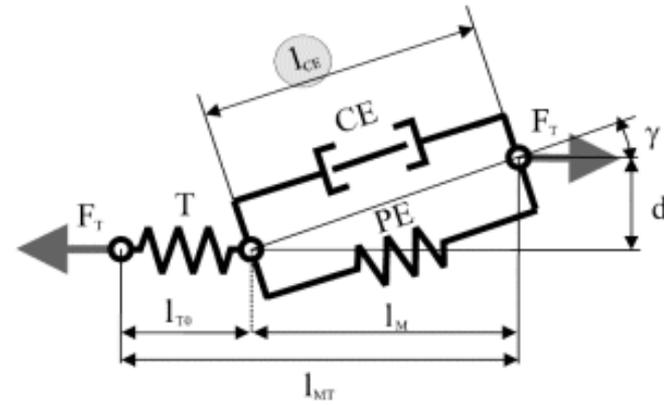
$$F_{CE}^M = F_0^M \cdot a \cdot f_l(\tilde{l}^M) \cdot f_v(\tilde{v}^M)$$

# MODELO MUSCULAR

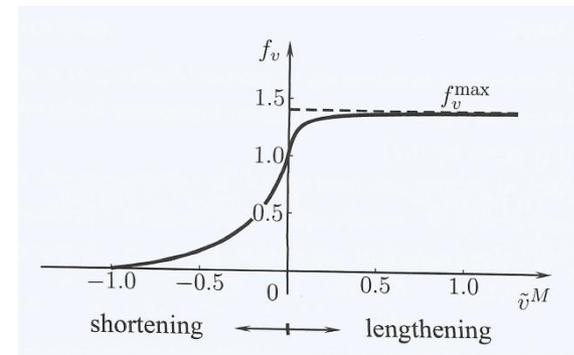
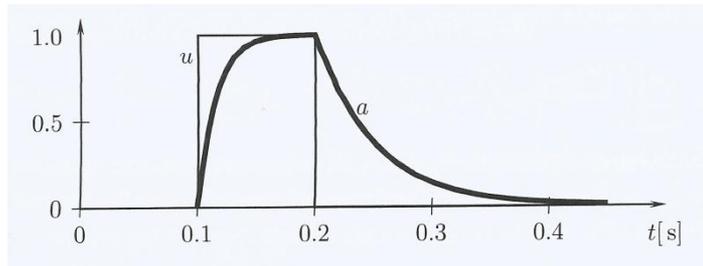
## ■ Morfología del músculo



## ■ Modelo de Hill



## ■ Dinámica de activación muscular



# MODELO MUSCULAR

## ■ Músculos considerados



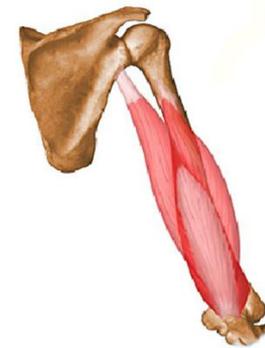
Bíceps



Braquial



Braquiorradial



Tríceps

## ■ Problema de la redundancia

- Método de reducción
- Técnicas de optimización
  - Optimización estática
  - Optimización dinámica
  - Optimización estático-fisiológica

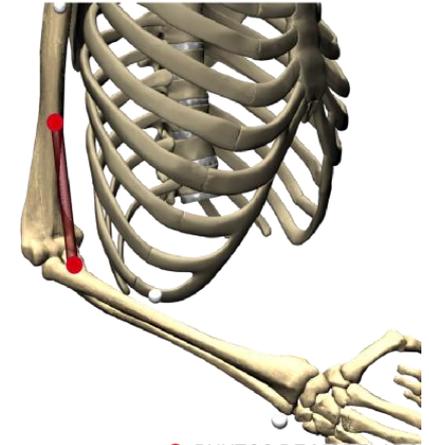
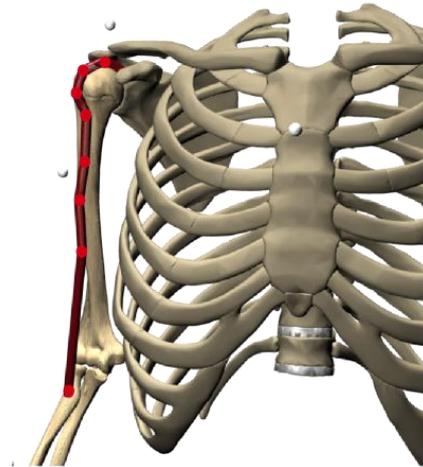
# MODELO MUSCULAR

## ■ Actuadores musculares

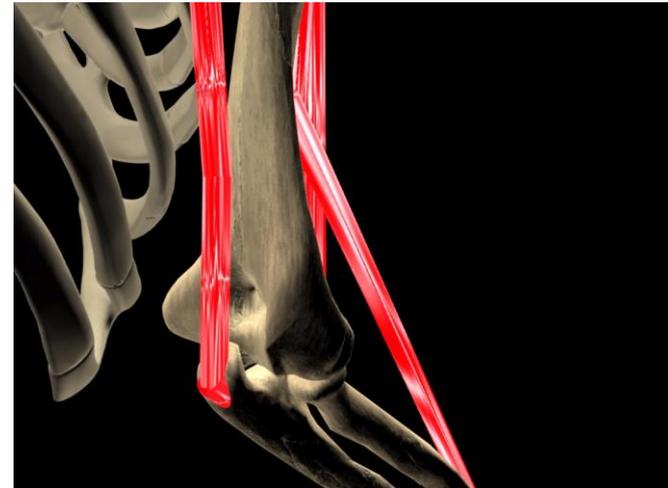
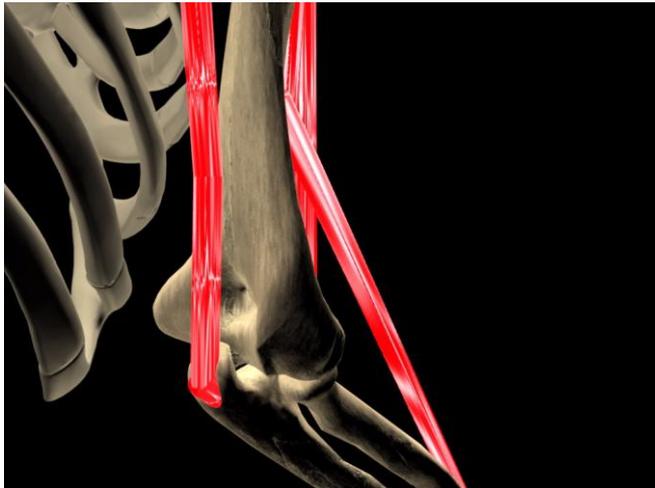
### ■ Puntos de modelado

- Origen
- Guiado
- Inserción

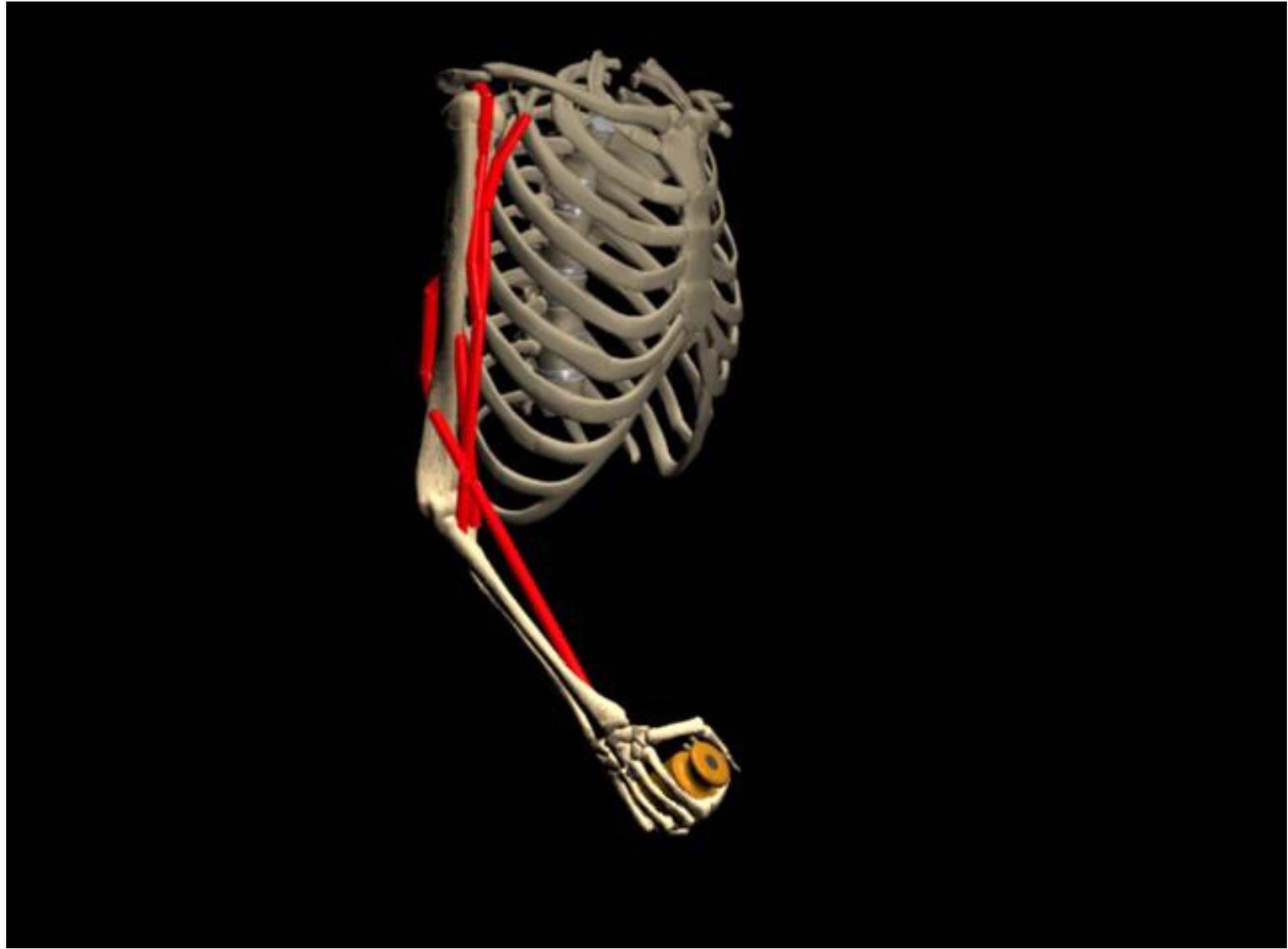
### ■ Wrapping



● PUNTOS DE MODELADO



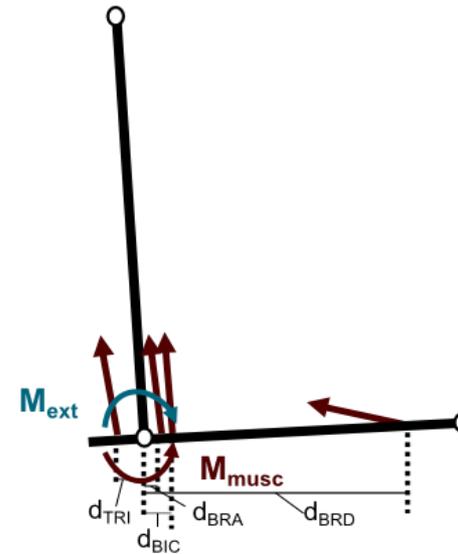
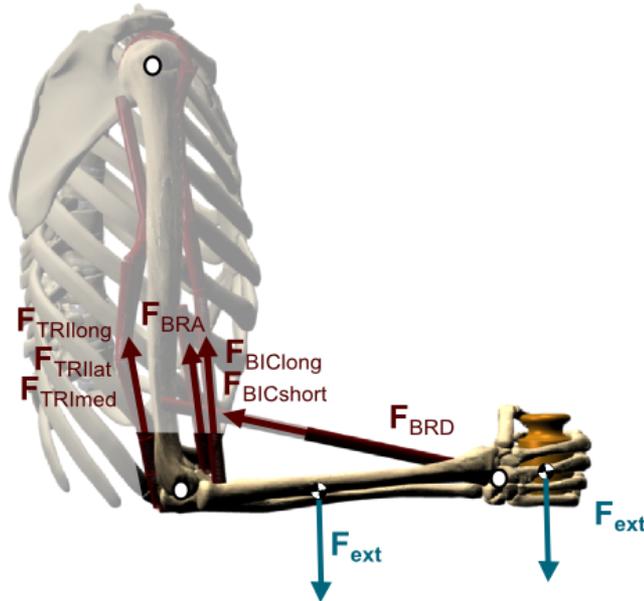
# MODELO MUSCULAR



# MODELO MUSCULAR

- Ecuación de restricción

- Brazos de momento



- Ecuación de restricción

$$M_c = \sum_{i=1}^7 (eC)_i F_{musc_i}$$

## ■ Criterios

- Criterio Lineal

$$\min \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{w_i}$$

- Criterio Polinómico

$$\min \sum_{i=1}^m \left( \frac{F_i}{w_i} \right)^p$$

- Criterio Min/Max

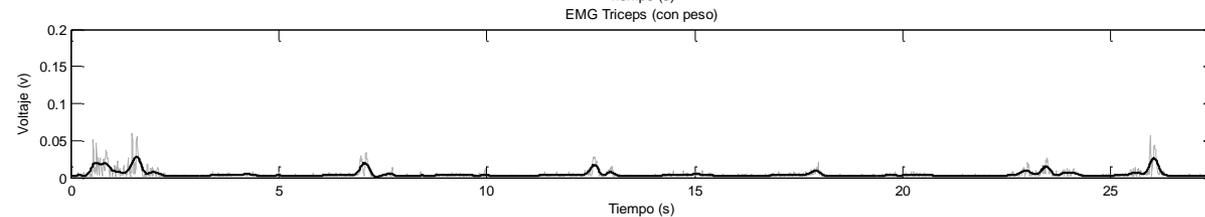
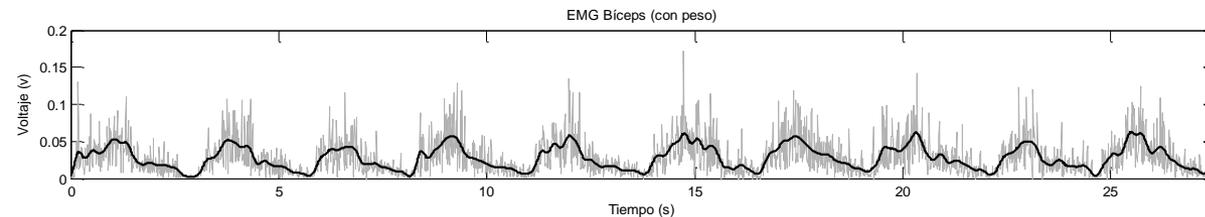
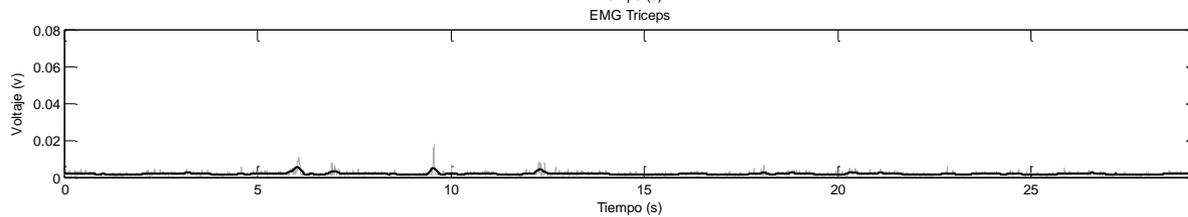
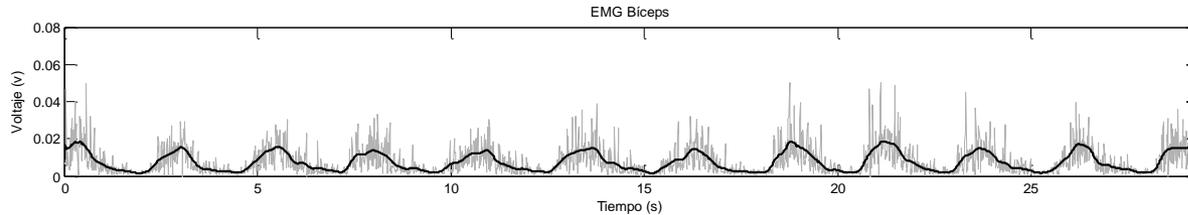
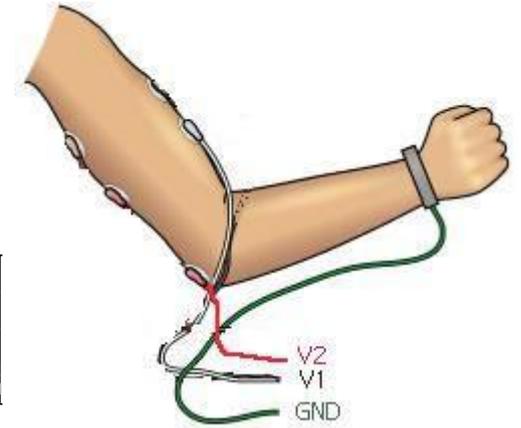
$$\min \max \left\{ \frac{F_i}{w_i} \right\}$$

- Criterio de Mínima Fatiga

$$\max \min \{T_i\}$$

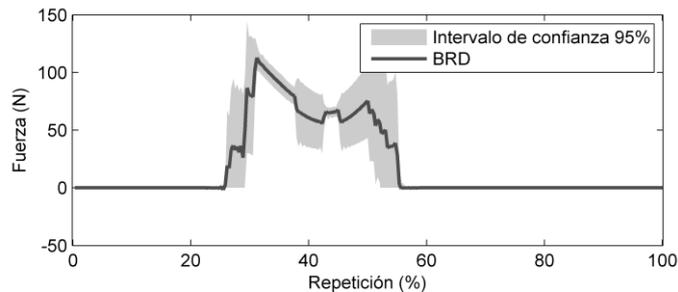
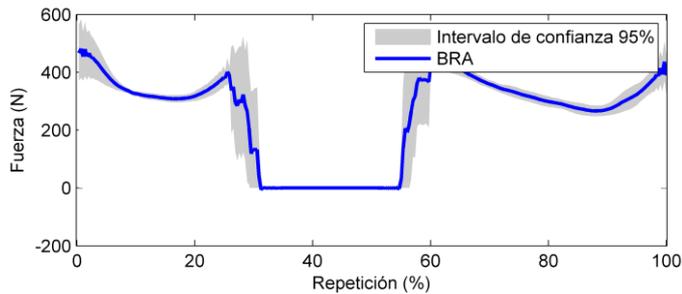
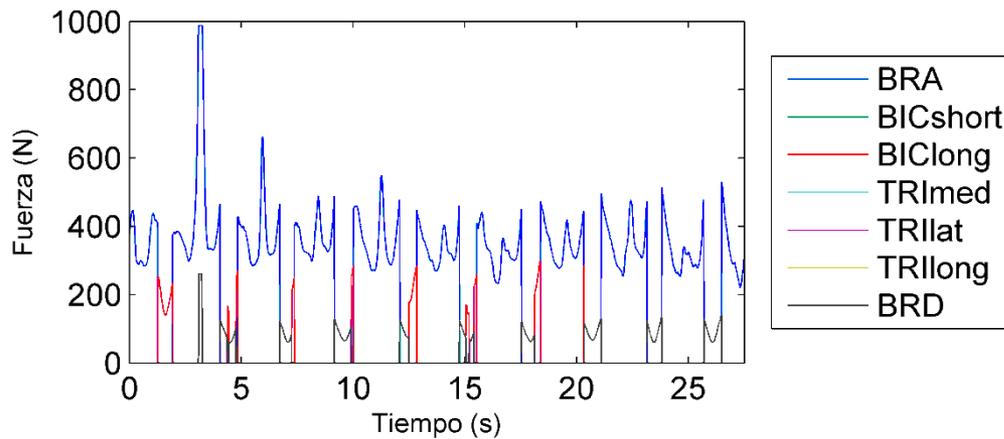
## ■ Electromiografía (EMG)

### ■ Validar los resultados obtenidos

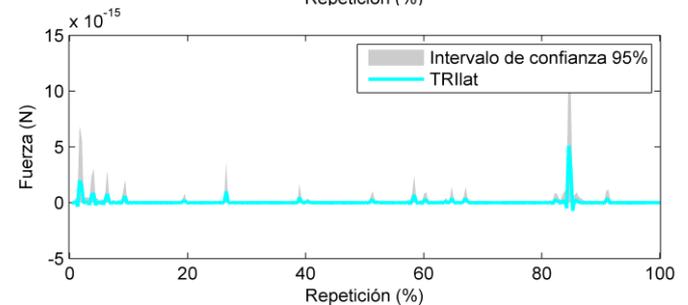
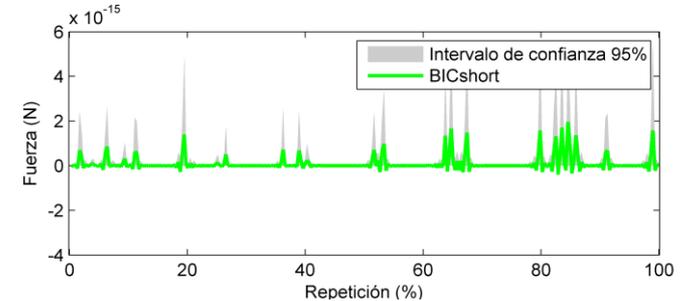
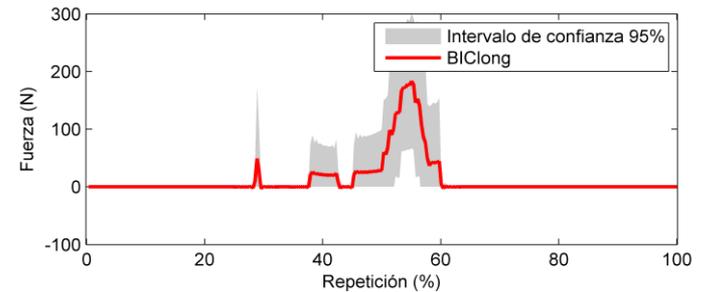


# RESULTADOS

## ■ Criterio lineal

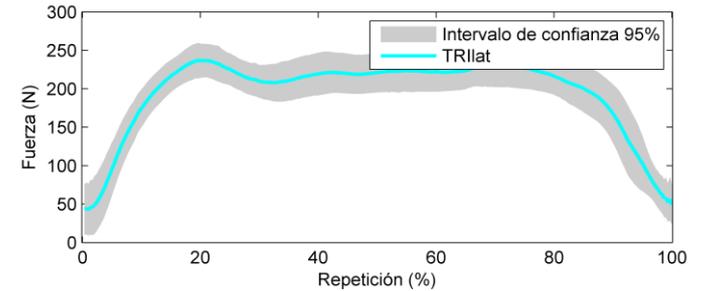
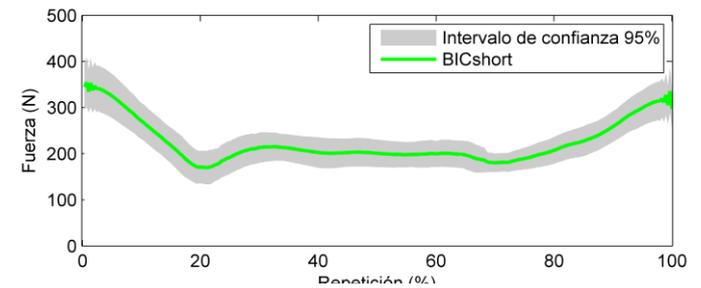
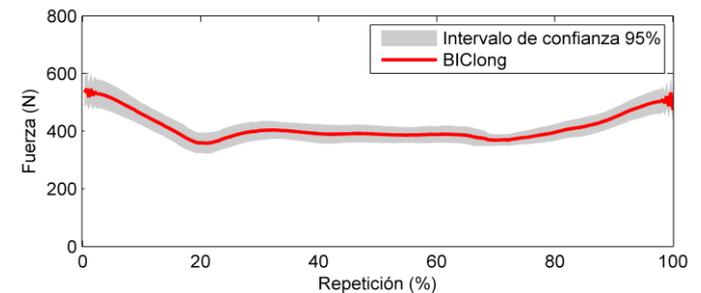
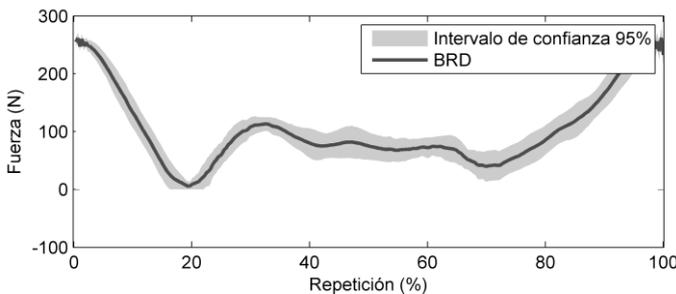
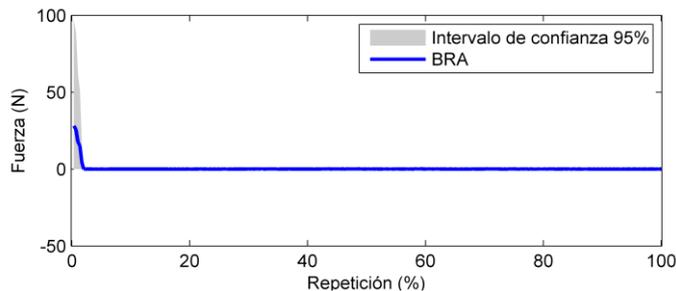
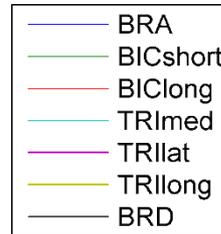
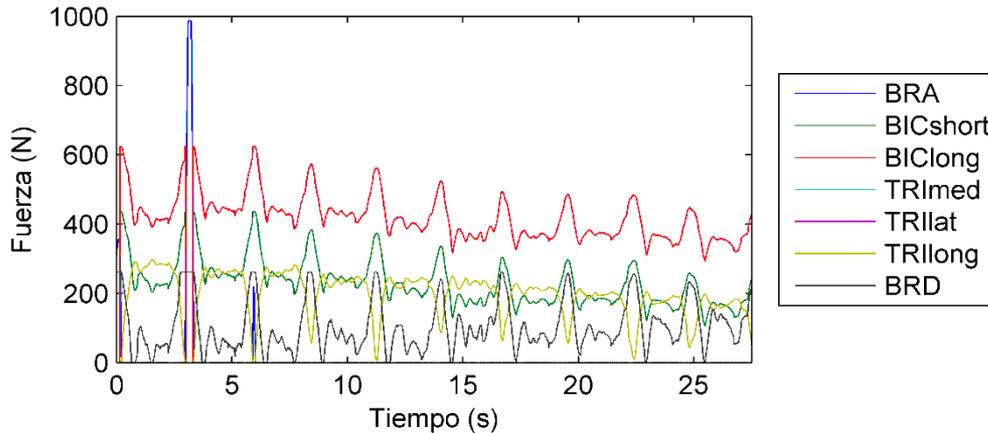


$$\min \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{w_i}$$



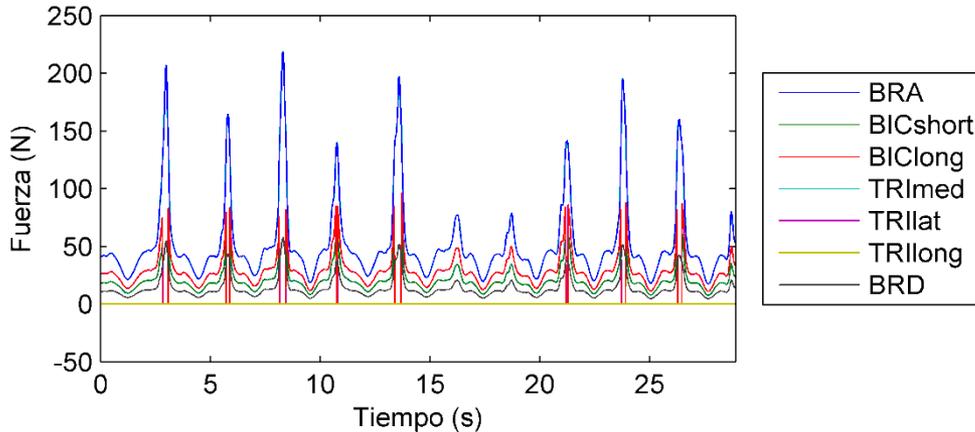
## ■ Criterio Polinómico

$$\min \sum_{i=1}^m \left( \frac{F_i}{w_i} \right)^p$$

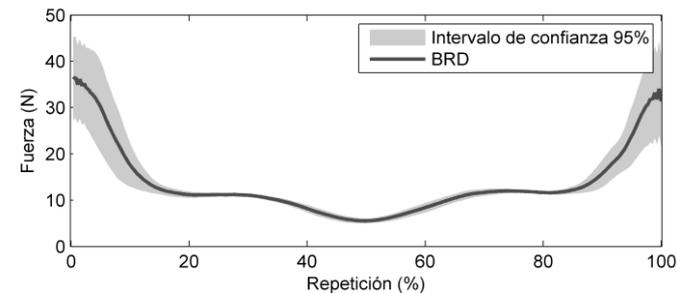
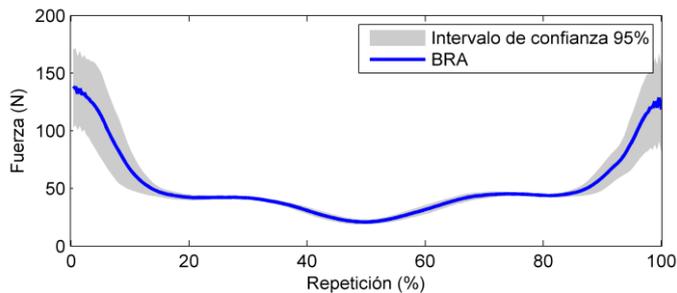
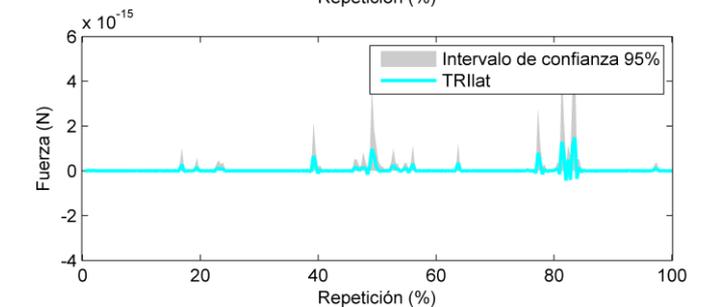
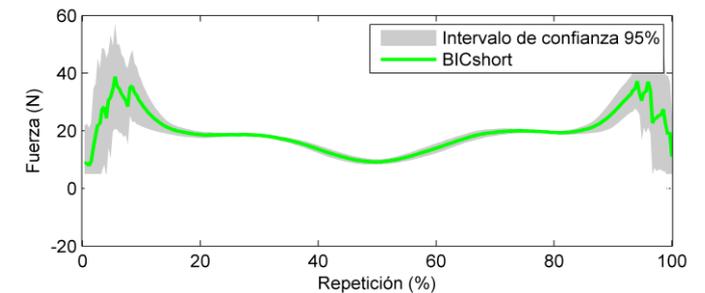
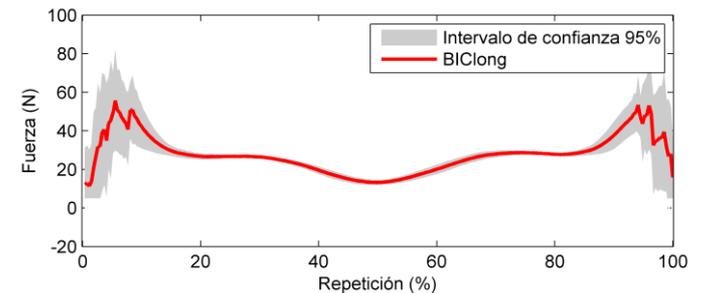


# RESULTADOS

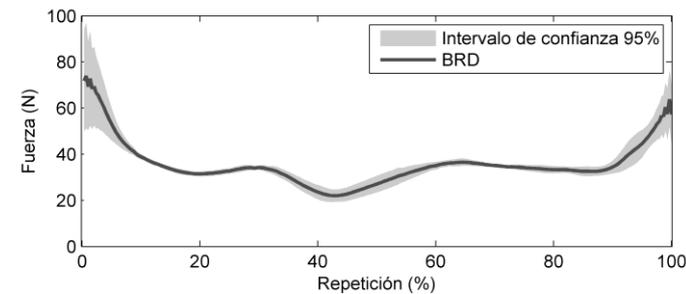
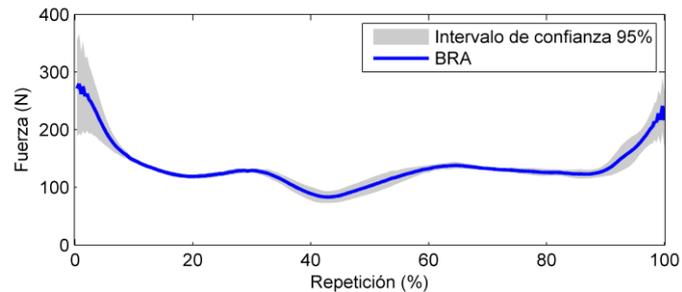
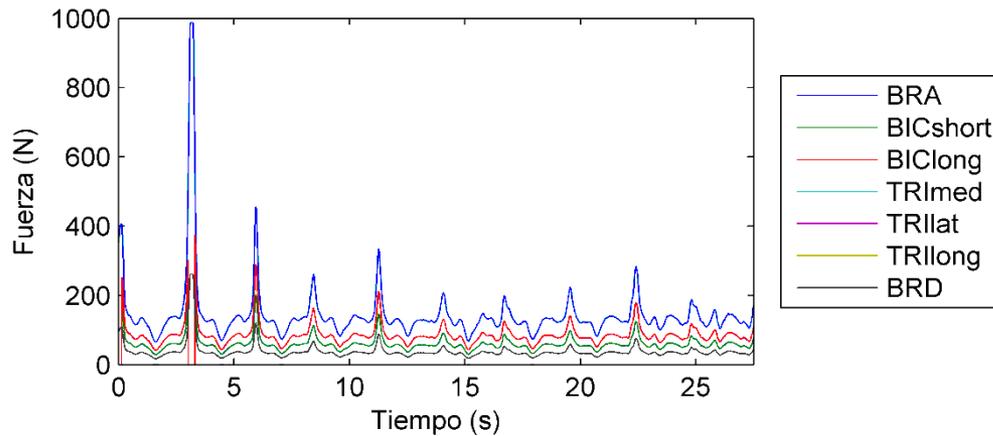
## ■ Criterio Min/Max



$$\min \max \left\{ \frac{F_i}{w_i} \right\}$$

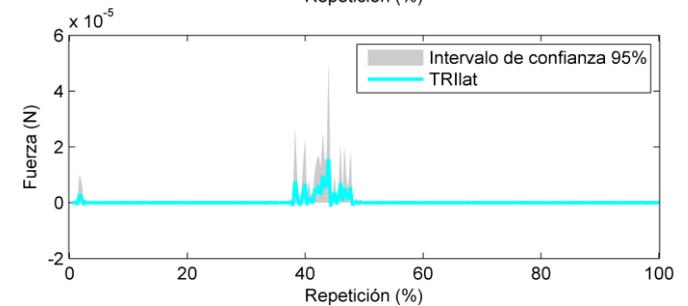
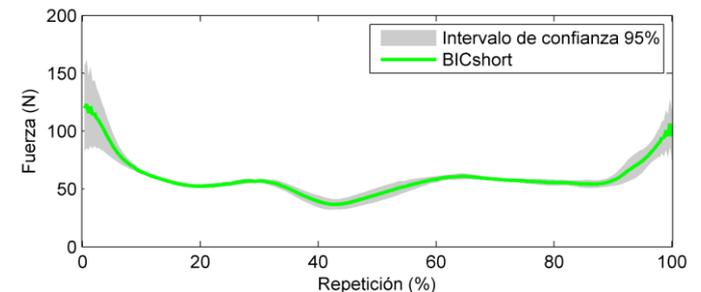
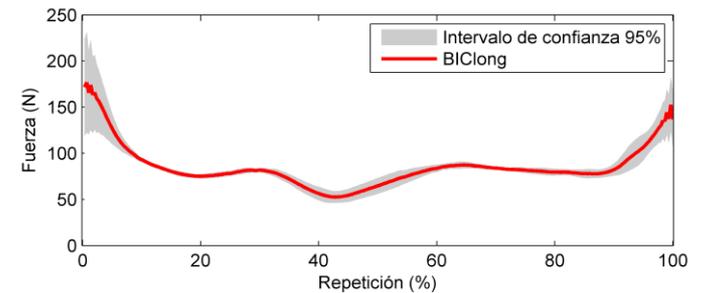


## ■ Criterio Mínima Fatiga



$$\max \min \{T_i\}$$

$$T_i = a_i \cdot \left( \frac{F_i}{F_{0i}} \cdot 100 \right)^{p_i}$$



## ■ Conclusiones

- Obtención de un modelo del brazo polivalente
- Análisis de los criterios de optimización

## ■ Aplicaciones futuras

- Introducir nuevas técnicas de optimización
- Incorporar un modelo del hombro
- Ampliación del modelo con más músculos
- Completar modelos de marcha humana
- Posibilitar el diseño de órtesis para el brazo

Estudiar  
cualquier  
movimiento  
del brazo

