








Ortesis robótica para el manejo de espasticidad en niños

Alberto Isaac Pérez Sanpablo

Departamento de Control Automático, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN
Laboratorio de Análisis de Movimiento, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra

Proyecto INR09/17, CONACYT-FONCICYT-267734





2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

1









Equipo de trabajo

Instituto Nacional de Rehabilitación, México

Laboratorio de Análisis de Movimiento

- Quiñones-Urióstegui I
- Pérez Sanpablo AI

División de Investigación en Ingeniería Médica

- Gutiérrez-Martínez J

Laboratorio de Ortesis y Prótesis

- Rodríguez-Reyes C

División de Rehabilitación Pediátrica

- Arellano-Saldaña ME
- Meneses Peñaloza A

CINVESTAV, México

Departamento de Control Automático

- Ibarra Zannatha JM

Universidad RWTH-Aachen, Alemania


Departamento de Ingeniería de Rehabilitación y Prevención,

- Disselhorst-Klug C
- Romero-Ávila E




2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

2



Contenido

- Objetivo
- Antecedentes
- Metodología
 1. Modelado y caracterización de espasticidad
 2. Detección y predicción de espasticidad
 3. Diseño y desarrollo de órtesis robótica
 4. Identificación paramétrica y control
 5. Integración y evaluación de órtesis robótica
- Resultados
- Discusión y conclusiones



2022 Ricardo Flores Magón
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

3




Objetivo




2022 Ricardo Flores Magón
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

4



Desarrollar una órtesis robótica capaz de detectar alteraciones en la actividad muscular-dependiente de la velocidad (AMV) durante movimiento voluntario del codo en niños con parálisis cerebral espástica (PC) para coadyuvar al manejo de la espasticidad



5



Antecedentes



6




Espasticidad

Incremento en la actividad muscular-dependiente de la velocidad

Tríceps



Bíceps





2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Bar-On L y cols, *Biomed Res. Int.*, 2015. Jalaledini K y cols, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2016.
 Gracias JM, *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 2015. van den Noort JC y cols, *Eur. J. Neurol.*, 2017.

7




Evaluación Movilización Pasiva

Resistencia $f_e = f_s$ (1)

$T_e = f_e * l$ (1.1)



Escala Modificada de Ashworth
Escala Modificada de Tardieu

- Articulación inmóvil
- Sin resistencia

v_l : lento

v_m : rápido (>> caída libre)



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Voerman GE y cols, *Disability and Rehabilitation*, 2005. Bar-On, L. *Biomed Res. Int.*, 2015.
 Wood DE y cols, *Disability and Rehabilitation*, 2005. Burridge JH y cols, *Disability and Rehabilitation*, 2005.

8

Bundesministerium für Bildung und Forschung

RWTH AACHEN UNIVERSITY

CINVESTAV Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONACYT Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

SALUD

SECRETARÍA DE SALUD

Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Evaluación

$$\tau = \tau_{int} + \tau_{ref} \quad (2)$$

$T_{int} = T_m(\ddot{q}) + T_b(\dot{q}) + T_k(q) \quad (2.1)$

$T_m(\dot{q}) = l\ddot{q} \quad (2.1.1)$

$T_b(\dot{q}) = b\dot{q} \quad (2.1.2)$

$T_m(q) = kq \quad (2.1.3)$

Intrínseco

Propiedades visco-elásticas e inerciales

$T_{ref} = T_v + T_f \quad (2.2)$

$T_v = f(\dot{q}) \quad (2.2.1)$

$T_f = h \quad (2.2.2)$

Reflejo

1) Reflejo de estiramiento **dependiente de la velocidad**

2) Incremento de actividad de fondo independiente de velocidad

2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Bar-On L y cols, *Biomed Res. Int.*, 2015. Jalaleddini K y cols, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2016.
 Gracias JM, *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 2015. van den Noort JC y cols, *Eur. J. Neurol.*, 2017.

9

Bundesministerium für Bildung und Forschung

RWTH AACHEN UNIVERSITY

CINVESTAV Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONACYT Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

SALUD

SECRETARÍA DE SALUD

Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra

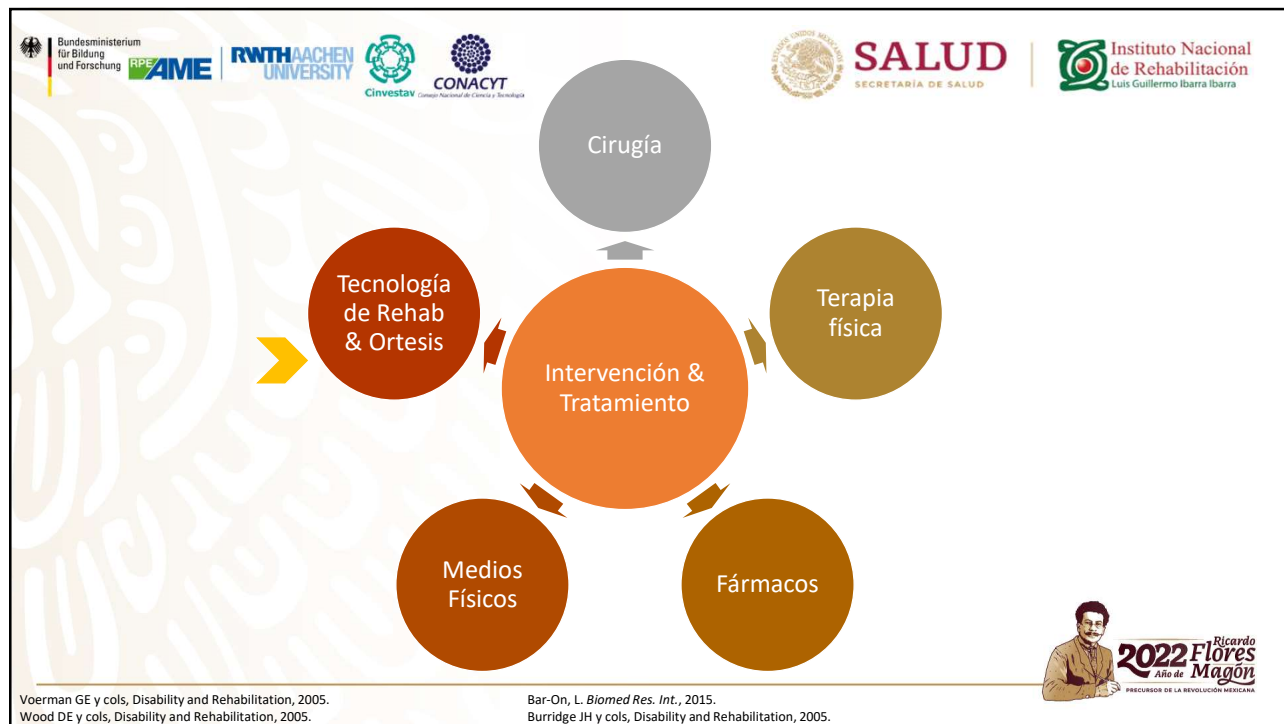
Evaluación

- Clínica
- Instrumentada
 - Movimiento Pasivo
 - Métodos biomecánicos vs neurofisiológicos
 - Movimiento Pasivo
 - Componente intrínseca vs refleja
 - Modelado y descomposición
 - Modelos computacionales
 - Movimiento activo
 - Fuera de línea: Modelos computacionales
 - En línea: presente*

2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Bar-On L y cols, *Biomed Res. Int.*, 2015. Jalaleddini K y cols, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2016.
 Gracias JM, *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 2015. van den Noort JC y cols, *Eur. J. Neurol.*, 2017.

10



11

Tecnologías para Rehabilitación

Ortesis

- Simples
- Alinear / estabilizar

Exoesquelétos & Robots para Rehabilitación

- Complejos
- Terapia y asistencia

The slide features two images: a purple and white knee brace on the left, and a person using a robotic exoskeleton on the right. Logos at the top are the same as in slide 11. Text at the bottom right: Ricardo Flores Año de Magón PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA.

12

Robots para Rehabilitación y exoesqueletos

Pérez y cols. Capítulo 14. Robótica en Ingeniería Biomédica. En Gutiérrez y cols. Ingeniería Biomédica, Fundamentos. [En Proceso]

2022 Flores
 Año de Magón
 PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

13

Metodología

2022 Flores
 Año de Magón
 PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

14

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Modelado y caracterización de movimiento y coordinación muscular normal y patológica

Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

15

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Modelado

- Implementación MoBL ARMS (OpemSim) en MSMS
- Comparación
 - Flex - Ext
 - Fuerza muscular activa f^M
 - Longitud de fibra muscular \tilde{z}^M

- Medición
 - Error cuadrático medio (RMSE)
 - Correlación

Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Delp SL, y cols, IEEE Trans Biomed Eng, 2007
 Seth A, y cols, PLOS Comput Biol, 2018
 Davoodi R, USC Biomed Eng Dep

Saul KR, y cols, Comput Methods Biomech Biomed Eng, 2016
 Perez-SanPablo AI, y cols, IEEE Colomb Conf Robot Autom, 2016

16

Caracterización

Caracterización Movimiento Voluntario de Codo

- Dinámica $I\ddot{q} + b\dot{q} + kq = T + T_{ext}$
 - Posición q
 - Velocidad \dot{q}
 - Aceleración \ddot{q}
 - Carga resistencia T_{ext}
- Coordinación Muscular
 - M. bíceps
 - M. supinador largo
 - M. tríceps







17

Registro

| Grupo | PC / No PC | Parámetro | Detalle |
|--|------------|---------------------------------------|---|
| N | 5 | Cinemática | Electrogoniómetro SG110 |
| Edad | > 8 años | EMG superficie | 4x amplificadores SX230FW |
| Género | H/M | Frecuencia de muestreo | 1,000 Hz |
| Gross Motor Function Classification System (GMFCS) | <3 | Bio-retroalimentación Flex-Ext | $\dot{q}_m = [30,50,80,100] \text{ } ^\circ/\text{s}$ |
| Manual Ability Classification System (MACS) | <3 | Resistencia Flex-Ext [Nm] | $T_{ext} = \begin{bmatrix} -0.4, -0.2, \\ 0.2, 0.4 \end{bmatrix}$ |
| Modified Tardieu Scale (MTS) | <3 | Repeticiones | 2 series + 1 min descanso |
| Modified Ashwoth Scale (MAS) | <3 | | |

18

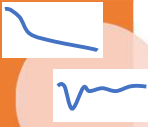




Procesamiento

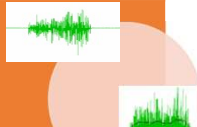
- Filtrado Butterworth PB4 6.6Hz
 $S_f(s) = B_{B4}^{-1}(s)$
- Velocidad Gradiente
 $\nabla f(t) = \frac{\delta q(t)}{\delta t}$
- Suavizado Butterworth PB4 6.6Hz
 $S_f(s) = B_4^{-1}(s)$

Cinemática




- Filtrado Butterworth PBA4 10-450Hz
 $S_f(s) = B_{BA18}^{-1}(s)$
- Rectificado
 $S_r(t) = |S(t)|$
- Suavizado
 $S_w(t) = (f * w)(t)$
- Normalizado
 $S_N(t) = \frac{1}{\|f\|}$


sEMG




von Werder SC, y cols, J of Elect and Kines 2016

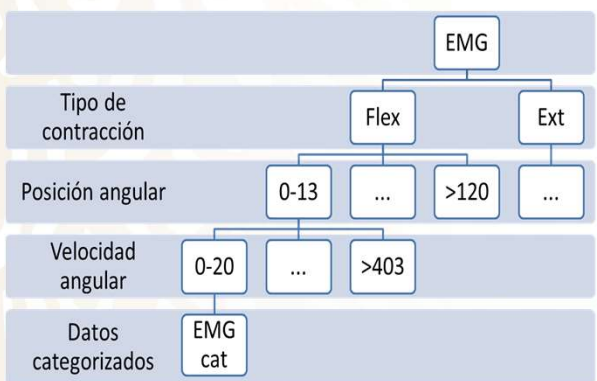


19





Categorización




Comparación Modelo vs Coordinación muscular normal

- Cálculo de **control muscular** (CMC) OpenSim
- Prueba de Wilcoxon ($p < 0.05$)

von Werder SC, y cols, J of Elect and Kines, 2016
Delp SL, y cols, IEEE Trans Biomed Eng, 2007

Seth A, y cols, PLOS Comput Biol, 2018
Perez-SanPablo AI, y cols, BMT 2018



20

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

Cinvestav

INR
LG II

CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Desarrollo de algoritmos para detección de incremento de actividad muscular dependiente de la velocidad

2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

21

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

Cinvestav

CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

SALUD
SECRETARÍA DE SALUD

Instituto Nacional
de Rehabilitación
Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Detección

Patrones cinemática y
coordinación muscular

Posición q [°]

Velocidad \dot{q} [°/s]

sEMG [adimensional]

tiempo [s]

➔

Actividad muscular
dependiente de velocidad γ

$$\gamma = f(sEMG, \dot{q}) \quad (4.1)$$

Velocidad \dot{q} [°/s]

von Werder SC, y cols, J of Elect and Kines, 2016

Delp SL, y cols, IEEE Trans Biomed Eng, 2007

Seth A, y cols, PLOS Comput Biol, 2018

Perez-SanPablo AI, y cols, BMT 2018

2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

22















Desarrollo de ortesis robótica



2022 **Ricardo Flores Magón**
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

23


Diseño

Usuarios

- Pacientes (5)
- Familiares (5)
- Profesionistas (18)
 - Médicos (9)
 - Ortesistas (3)
 - Biomédicos (6)

Criterios (Casa de Calidad)

- Usuario
- Económicos
- Técnicos



2022 **Ricardo Flores Magón**
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

24

SALUD
SECRETARÍA DE SALUD

Instituto Nacional
de Rehabilitación
Luis Guillermo Ibarra

Diseño

Control bio-cooperativo

Dispositivos


2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA


25

Identificación paramétrica y Control

2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

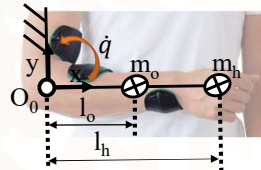
26





Identificación

Modelo no actuado



$$H(q)\ddot{q} + F\dot{q} + G(q) = T$$

$H(q)$: inercia
 F : fricción
 $G(q)$: gravedad
 T : par


Modelo actuado

$$\left[J_m + \frac{J_L}{r^2} \right] \ddot{q} + \left[B + \frac{F_L}{r^2} \right] \dot{q} + \frac{g(q)}{r^2} = T$$

J_m : inercia del motor
 J_L : inercia de la carga
 B : amortiguamiento del motor
 F_L : fricción de la carga
 $g(q)$: fuerzas gravitacionales
 r : razón de engranes
 T : par

Si $r \gg 1$


$$J\ddot{q} + B\dot{q} = T \quad (6.2)$$




2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Kelly R, y cols, C of Robot Manip in Joint Space, Springer, 2005

27





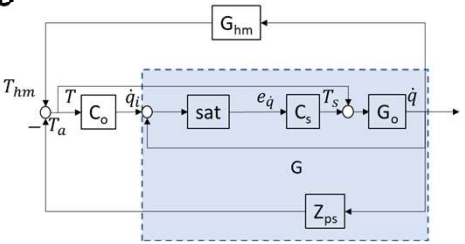
Control

Modelo con controlador de lazo externo

$$T = T_{hm} - T_a \quad (6.3)$$


- T_{hm} : par usuario
- T_a : par órtesis
- G_{hm} : dinámica interacción usuario-órtesis
- C_o : control lazo externo
- \dot{q}_i : velocidad deseada
- G : dinámica órtesis
- \dot{q} : velocidad órtesis

Órtesis sin control lazo externo ($T = T_{hm}$)



Órtesis con control lazo externo


- $e_{\dot{q}}$: referencia de velocidad
- C_s : control interno servo
- T_s : par servo
- Z_{ps} : inercia sensor



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Kelly R, y cols, C of Robot Manip in Joint Space, Springer, 2005

28



Control

Control lazo externo

Proporcional integral

$$C_o(s) = \frac{k_i}{s} + k_p$$

- Sat: $k_p, k_i < 682$ EX-106
- Modelo dinámico del sistema lazo cerrado


$$H(s) = \frac{C_o G}{1 + C_o G}$$

- Ecuación característica

$$\Delta(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

Estabilidad

- s_1, s_2 : raíces
- sobre amortiguado ($\zeta > 1$)
- $k_i \gg k_p$
- s_1, s_2 : reales negativas sistema estable



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Kuo, BC, Golnaraghi F, Aut Contr Sys, Wiley 2010

29



Integración y evaluación



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

30

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Integración

Implementación (Matlab R2019b)

- Dinámica (q, \dot{q}, T)
 - $fs = 30.1\text{Hz}$
- Act. muscular (m. bíceps)
 - $fs = 102.4\text{Hz}$

Interfaz SmartMove

- Configuración
 - Inicializar
 - Limites de seguridad
 - comportamiento
- Biorretroalimentación

31


Bundesministerium für Bildung und Forschung

Evaluación

| Experimental | | Simulación | |
|---|--|---|--|
| Implementación | Matlab | Implementación | Simulink |
| N | 1 voluntario adulto | N | 13 pediátricos |
| Descripción | sano | Descripción | No PC:8, PC:5 |
| N pruebas | 4 | N pruebas | 8 |
| k_p | 0, 227, 454, 682 | k_p | 227 |
| k_i | 0, 682, 682, 682 | k_i | 682 |
| N ciclos por prueba | 6 | N ciclos por prueba | 8 |
| Bio retroalimentación | Posición | Bio retroalimentación | Posición |
| Vel deseada \dot{q}_d | 9, 81, 153°/s | Vel deseada \dot{q}_d | 30, 50, 80, 100 °/s |
| Dinámica (fs=30.1 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> Posición (q) Velocidad (\dot{q}) | Cinemática (fs=30.1 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> Posición (q) Velocidad (\dot{q}) |
| Cinética (fs=30.1 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> Par (T) registrado | Cinética (fs=30.1 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> Par (T) calculado G'(s) |
| Actividad muscular (fs=102.4 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> M. bíceps | Actividad muscular (102.4 Hz) | <ul style="list-style-type: none"> M. bíceps |

Kuo, BC, Golnaraghi F, Aut Contr Sys, Wiley 2010

32




Evaluación

- Identificación de eventos
- Validación: Perfil
 - Posición
 - Velocidad
 - Actividad Muscular dependiente de velocidad
 - Par
- Factor Humano Máximo (HFM)

$$HFM = \frac{\max |T_{T_a \neq 0}|}{\max |T_{T_a = 0}|}$$
 - Par máximo con actuación

$$\max |T_{T_a \neq 0}|$$
 - Par máximo sin actuación

$$\max |T_{T_a = 0}|$$



33



Resultados



34

Bundesministerium für Bildung und Forschung **RPE/AME** | **RWTH AACHEN UNIVERSITY**

Cinvestav | **INR LG 11** | **CONACYT** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Modelado y caracterización de movimiento y coordinación muscular normal y patológica

2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

35

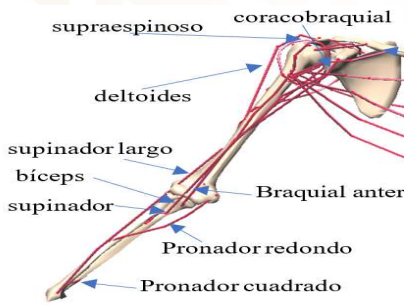
Bundesministerium für Bildung und Forschung **RPE/AME** | **RWTH AACHEN UNIVERSITY** | **Cinvestav** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología | **CONACYT**

SALUD SECRETARÍA DE SALUD | **Instituto Nacional de Rehabilitación** Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Modelado

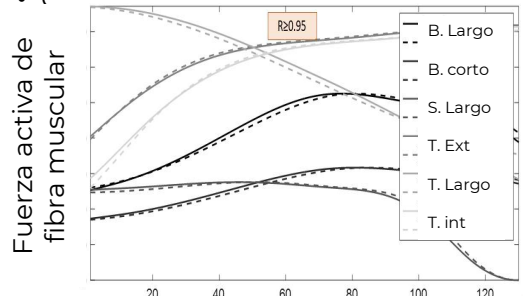
Implementación MoBL ARMS MSMS

- Músculos 12
- Actuadores 21



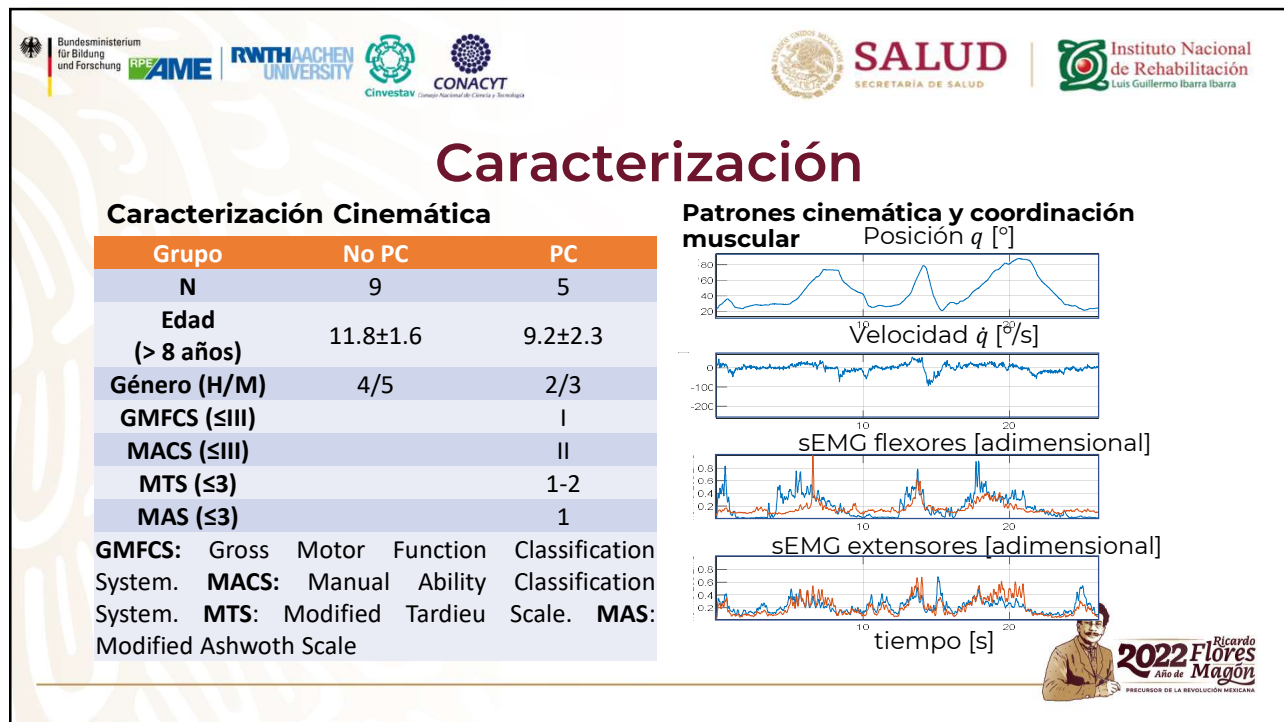
Comparación OpemSim vs MSMS

- L. fibra muscular \tilde{f}^M RMSE ≤ 0.0037
- F. muscular activa f^L RMSE ≤ 22.01
- Correlación $D \geq 0.95$

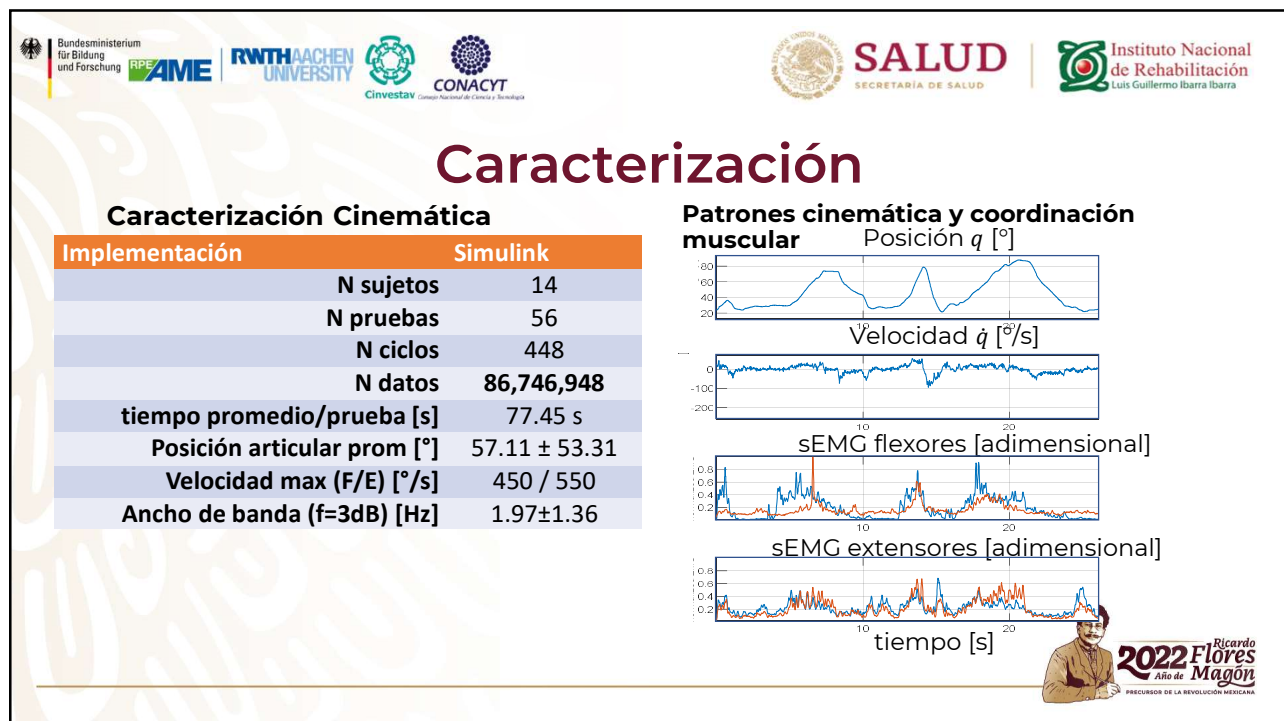


2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA


36







37





38



Bundesministerium für Bildung und Forschung

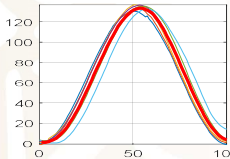





Caracterización

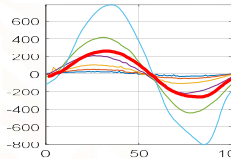
Control muscular (CMC, OpenSim)

Ángulo [°]



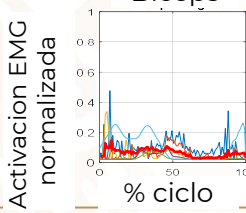
% ciclo

Velocidad [°/s]



% ciclo

Bíceps



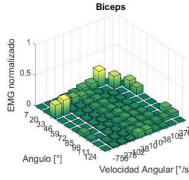
Activación EMG normalizada

% ciclo

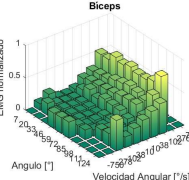
Comparación Modelo vs Coordinación muscular normal

- Categorización: Diferencias 6.31% (P=80%)


Modelo



Real




- Diferencias significativas ($p < 0.01$)








2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

39




Bundesministerium für Bildung und Forschung

Desarrollo de algoritmos para detección de incremento de actividad muscular dependiente de la velocidad



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

40

Detección de espasticidad

Actividad muscular dependiente de la velocidad $\gamma = f(sEMG, \dot{q})$

Orden n **1-5**

Sensibilidad P100

Orden n

Especificidad n=2

Percentil P

$\gamma = sEMG |\dot{q}^n|$

actividad muscular dependiente de velocidad

2022 Ricardo Flores Magón
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

41

Detección de espasticidad

| Detección | |
|---------------------------|-------------|
| Número de eventos | 4 |
| Validación | |
| ID Paciente | 3 |
| Espasticidad (MTS) | 2 |
| Posición [°] | 39.8±19.0 |
| Velocidad [°/s] | -302.1±56.9 |
| Reducción velocidad [°/s] | 60.3±36.1 |

Posición q [°]

Velocidad \dot{q} [°/s]

sEMG [adimensional]

AMV γ

2022 Ricardo Flores Magón
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

42

Desarrollo de ortesis robótica

2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

43

Ortesis Robótica

Diseño (criterios)

- Usuario
 - Confort
 - Volumen
 - Rango de movimiento
- Técnicos
 - Electrodo
 - Control bio-cooperativo
 - Actuador

| Columna # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| Correlación | | | | | | | | | | | | | | | |
| Positiva | + | | | | | | | | | | | | | | |
| Negativa | - | | | | | | | | | | | | | | |
| No Correlación | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| Relación | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fuerte | ● | | | | | | | | | | | | | | |
| Moderada | ○ | | | | | | | | | | | | | | |
| Débil | ◊ | | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección de mejora | | | | | | | | | | | | | | | |
| Maximizar | ▲ | | | | | | | | | | | | | | |
| Objetivo | □ | | | | | | | | | | | | | | |
| Minimizar | ▼ | | | | | | | | | | | | | | |
| Requisitos del usuario | | | | | | | | | | | | | | | |
| comodidad | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| detección de separación | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| diámetro | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| rango de movimiento | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| seguridad | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| estabilidad | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| resistencia | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| tamaño | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| latencia | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| actuador | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| controlador | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| control de abrigo | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| Robusta a perturbaciones | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| Electrodo | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| normalidad | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |

44


Detección de espasticidad

| Características | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| ROM [°] | 100 |
| Vmax [°/s] | 546 |
| Carga max [Nm] | 0.6 (546°/s) a 10.9 (0°/s) |
| Ancho de banda de cinemática [Hz] | 30.1 |
| Ancho de banda de sEMG | 50 a 500 Hz |
| Temperatura de operación | -5 a 45 °C |
| Seguridad | Límites de ROM, velocidad, fuerza. |





45


Identificación paramétrica y Control

46




Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



SALUD

SECRETARÍA DE SALUD



Instituto Nacional
de Rehabilitación
Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Detección de espasticidad

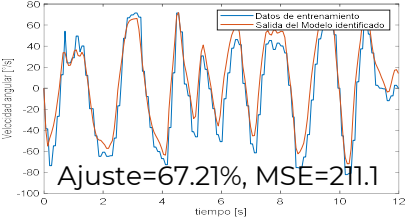
- Identificación paramétrica (adulto)

$$\hat{G}(s) = \frac{b}{s+a}$$

$$J = \frac{1}{b} = 0.0014 \text{ kg m}^2$$

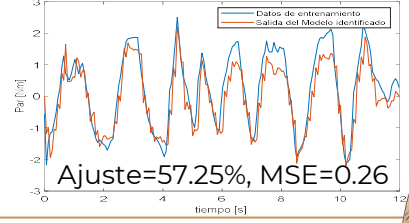
$$B = \frac{a}{b} = 0.0283 \text{ kgm/s}$$
- Control PI
 $k_i=682$ y $k_p = 150$
 Sobre amortiguado $\zeta = 1.32$, $\omega_n = 6.03$
- Estabilidad
 $s_1 = -2.76$, $s_2 = -13.16$

Modelo directo órtesis $G(s)$ orden 1




Ajuste=67.21%, MSE=271.1

Modelo inverso órtesis $G'(s)$ orden 2



Ajuste=57.25%, MSE=0.26



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

47



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung








Integración y evaluación



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

48



Bundesministerium für Bildung und Forschung








Implementación

Interfaz gráfica App Matlab


- 1) biorretroalimentación
- 2) configuración
 - a) Inicializar componentes
 - b) Límites de seguridad ROM
 - c) Modalidad
 - I. Movilización pasiva
 - II. Movimiento activo










2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

49



Bundesministerium für Bildung und Forschung

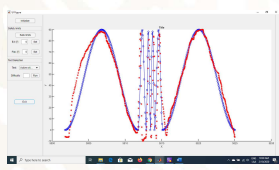




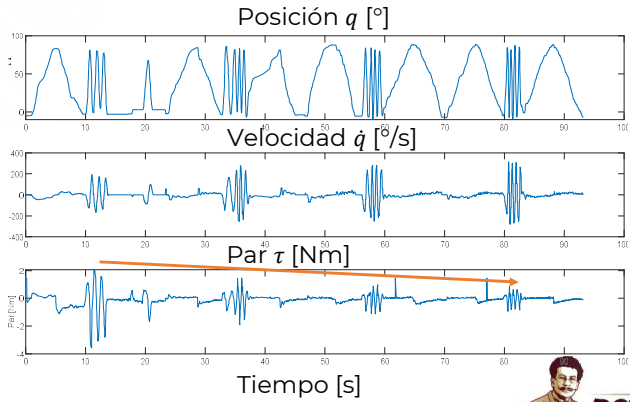




Evaluación Experimental

- Adulto sano
- N falsos positivos=0

| k_p | k_i | HFM |
|-------|-------|------|
| 227 | 682 | 0.51 |
| 454 | 682 | 0.41 |
| 682 | 682 | 0.37 |

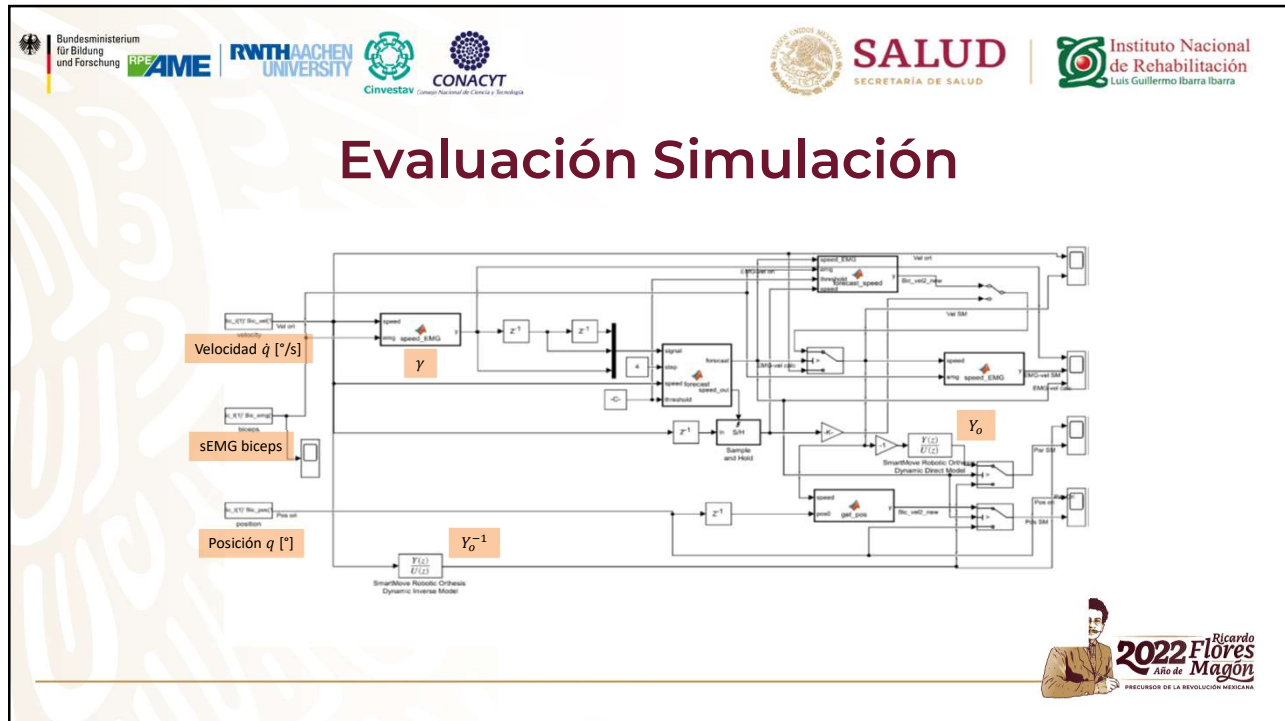




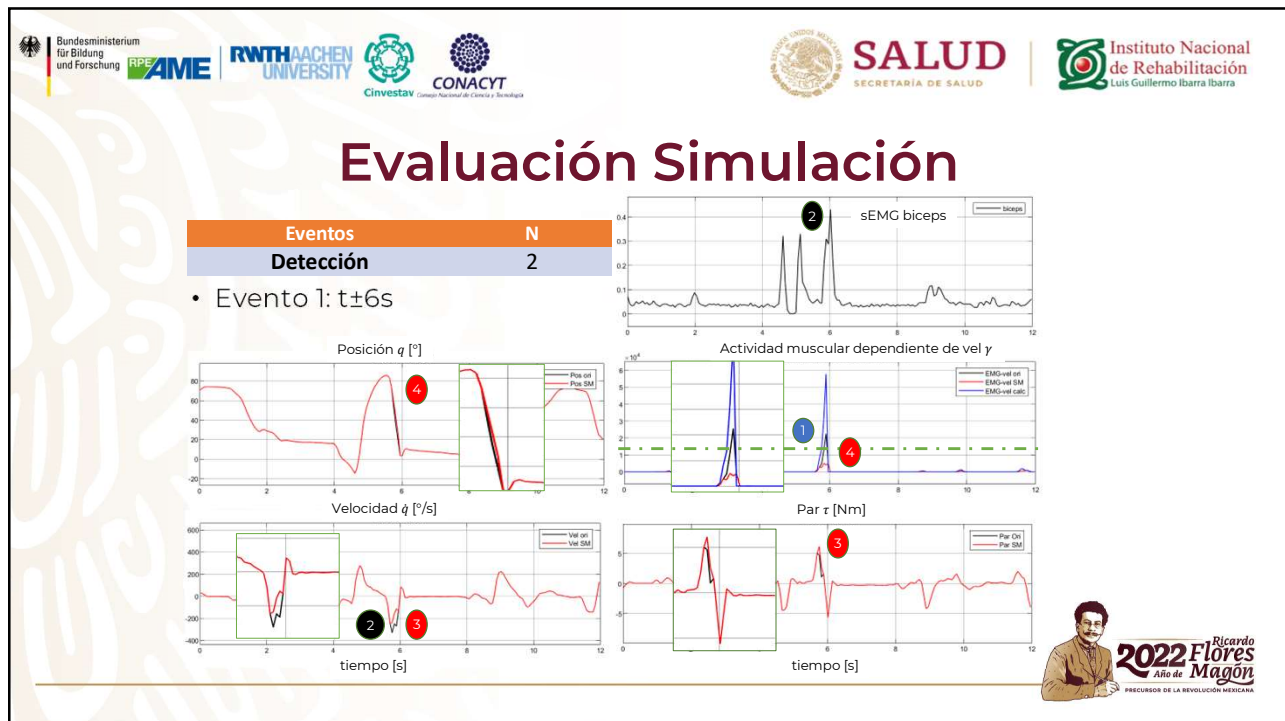


2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA









50




51



52


















Conclusiones



2022 *Ricardo Flores*
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

53


Conclusiones

LIMITACIONES

- Comprobar algoritmos en más individuos
- Evaluación experimental en individuos con PC

CONCLUSIONES

- Factibilidad para detección
- Utilidad potencial para manejo de espasticidad



2022 *Ricardo Flores*
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

54



Agradecimientos

smartMove 

Smart orthotic device to improve Movement capacity of patients suffering from spasticity

INR09/17 CONACYT-FONCICYT-267734



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

55



Referencias

- L. Bar-on, y cols, "Motorized versus manual instrumented spasticity assessment in children with cerebral palsy," pp. 145–151, 2016.
- J.-M. Gracies, "Coefficients of impairment in deforming spastic paresis," *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, vol. 58, no. 3, pp. 173–178, 2015.
- K. Jalaleddini, y cols, "A Subspace Approach to the Structural Decomposition and Identification of Ankle Joint Dynamic Stiffness," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 9294, no. c, pp. 1–1, 2016.
- J. C. van den Noort y cols, "European consensus on the concepts and measurement of the pathophysiological neuromuscular responses to passive muscle stretch," *Eur. J. Neurol.*, May 2017.
- G. E. Voerman, M. Gregoric, and H. J. Hermens, "Neurophysiological methods for the assessment of spasticity: the Hoffmann reflex, the tendon reflex, and the stretch reflex.," *Disabil. Rehabil.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 33–68, 2005.
- D. E. Wood, y cols, "Biomechanical approaches applied to the lower and upper limb for the measurement of spasticity: A systematic review of the literature," *Disabil. Rehabil.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 19–32, Jan. 2005.
- J. H. Burridge, y cols, "Theoretical and methodological considerations in the measurement of spasticity.," *Disabil. Rehabil.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 69–80, 2005.
- S. L. Delp, y cols, "OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 54, no. 11, pp. 1940–1950, Nov. 2007.
- A. Seth y cols, "OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement," *PLOS Comput. Biol.*, vol. 14, no. 7, p. e1006223, Jul. 2018.
- R. Davoodi, MSMS User 's Manual, Version 2. University of Southern California, Biomedical Engineering Department.
- K. R. Saul y cols, "Benchmarking of dynamic simulation predictions in two software platforms using an upper limb musculoskeletal model.," *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 5842, no. May 2016, pp. 1–14, 2014.
- S. C. F. A. von Werder y cols, "The role of biceps brachii and brachioradialis for the control of elbow flexion and extension movements," *J. Electromyography Kinesiol.*, vol. 28, pp. 67–75, Jun. 2016.
- R. Kelly, y cols, "Robot Dynamics," in *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, no. 9781852339944, London: Springer-Verlag, 2005, pp. 59–93.
- Kuo, BC, Golnaraghi F, *Aut Contr Sys*, Wiley 2010



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

56



Referencias

- [Perez-SanPablo AJ](#), et al. Número de solicitud: MX/a/2020/008874. Gaceta de la Propiedad Industrial México Fecha de Puesta en Circulación Solicitudes de Patente, de Registros de Modelo de Utilidad y de Diseños Industriales, Enero, 2021.
- Orozco-Soto S, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, Research in Computing Science, 2019
- [Perez-Sanpablo AJ](#), Disselhorst-Klug C, et al, Biosystems & Robotics. Wearable Robotics: Challenges and Trends, Springer, 2019
- Orozco-Soto SM, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, Biosystems & Robotics. Wearable Robotics: Challenges and Trends, Springer, 2019
- [Perez-SanPablo AJ](#), Disselhorst-Klug C, et al, International Conf on Electrical Eng, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2019
- Cadena-Vilchis EG, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, Global Med Eng Phys Exchan/Pan American Health Care Exchanges (GMEPE / PAHCE), 2019
- [Perez-SanPablo AJ](#), Romero-Avila E, et al, CCE, 2018
- [Perez-Sanpablo AJ](#), Ibarra-Zannatha JM, et al, Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad Iberdiscap, 2017.
- [Perez-Sanpablo AJ](#), Ibarra-Zannatha JM, et al, Iberdiscap, 2017b
- [Perez-Sanpablo AJ](#), Romero-Avila E, et al, Iberdiscap 2017
- [Perez-Sanpablo AJ](#), Ibarra-Zannatha JM, et al, IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA), 2016
- [Perez-SanPablo AJ](#), Romero-Avila E, et al, Biomedical Engineering /Biomedizinische Technik, 2018a
- Romero-Avila E, [Perez-SanPablo AJ](#), et al, Biomedical Engineering /Biomedizinische Technik, 2018
- [Perez-SanPablo AJ](#), Romero-Avila E, et al, Biomedical Engineering /Biomedizinische Technik, 2018b
- [Perez-SanPablo AJ](#), Romero-Avila E, et al, Biomedical Engineering /Biomedizinische Technik, 2018c
- Romero-Avila E, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, XXVII Congress of the International Society of Biomechanics (ISB2019), 2019
- Romero-Avila E, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, International Neurorehabilitation Symposium (INRS), 2019
- Romero-Avila E, [Perez-Sanpablo AJ](#), et al, GMEPE / PAHCE, 2019



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

57



Gracias por su atención



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

58

Bundesministerium für Bildung und Forschung **RPE/AME** | **RWTH AACHEN UNIVERSITY** | **Cinvestav** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología | **CONACYT** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

SALUD SECRETARÍA DE SALUD | **Instituto Nacional de Rehabilitación** Luis Guillermo Ibarra Ibarra

Preguntas

X SEMINARIO DE AUTOMÁTICA
27 AL 30 DE SEPTIEMBRE

ISA G A 100 Años

2022 Ricardo Flores
Año de **Magón**
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

59

albperéz@inr.gob.mx

SALUD SECRETARÍA DE SALUD

2022 Ricardo Flores
Año de **Magón**
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

60