



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Ingeniería Mecatrónica

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN
MECATRÓNICA**

**“DISEÑO BIOMECÁNICO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE EXOESQUELETO ROBÓTICO DE LAS
EXTREMIDADES INFERIORES PARA AYUDAR A LA
MOVILIDAD DE PERSONAS CON PARAPLEJIA.”**

**CAJILEMA VELASCO MILTON PATRICIO
GUZMÁN PAILLACHO CARMEN ALEXANDRA**

TUTOR: ING. CONSTANTE PATRICIA





*Es tan
importante
poder caminar
como saber
a donde ir*



ANTECEDENTES

En nuestro país existe poco desarrollo e investigación en lo que se refiere a diseñar e implementar prototipos de exoesqueletos para las extremidades inferiores y en los que existen tienen limitaciones mecánicas o tecnológicas.



JUSTIFICACIÓN

En nuestra sociedad existe un interés en la integración de personas con discapacidad con el fin de obtener una adaptación social, profesional y personal (SENPLADES, 2014).



OBJETIVO GENERAL

- **Diseñar biomecánicamente e implementar un prototipo de exoesqueleto robótico de las extremidades inferiores para ayudar a la movilidad de personas con paraplejia.**





GENERALIDADES DE LOS EXOESQUELETOS

Un exoesqueleto sostiene al cuerpo de forma externa y se desarrollan para hacer posible que las personas con limitaciones de movimiento puedan caminar, lo que incrementa su fuerza y resistencia.



EXOESQUELETOS COMERCIALES



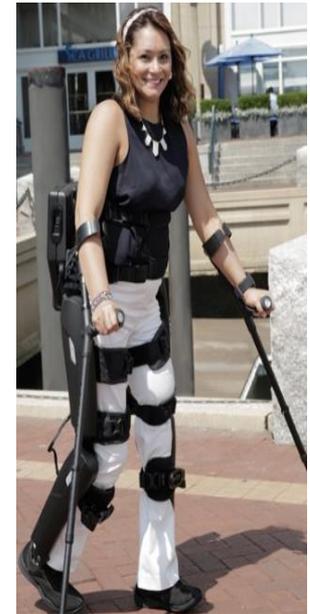
EXOCLIMBER



HAL



REX



REWALK



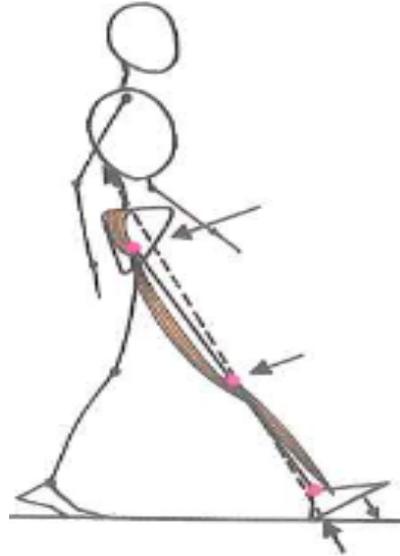
CICLO DE LA MARCHA

“Mientras el cuerpo se desplaza sobre la pierna de soporte, la otra se balancea hacia adelante como preparación para el siguiente apoyo.”

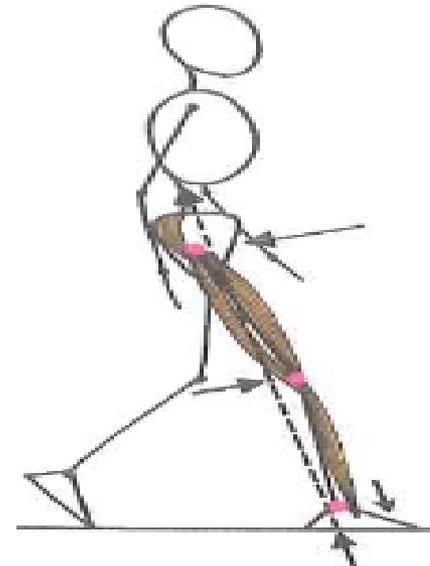
- 1. Fase de apoyo**
- 2. Fase de balanceo**



FASE DE APOYO

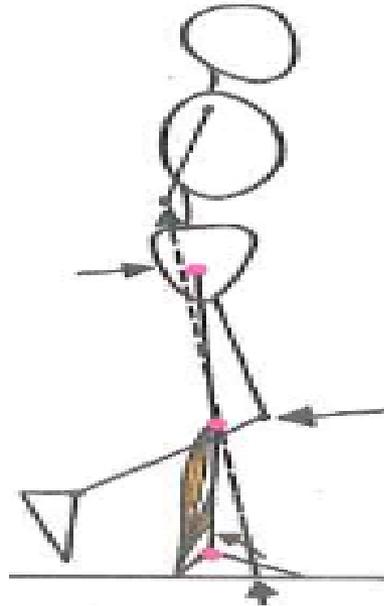


**CONTACTO
INICIAL**

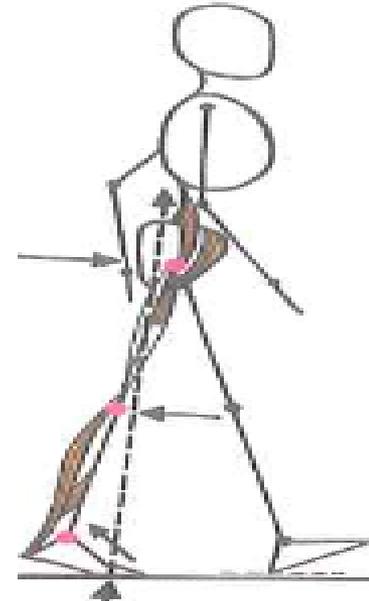


**RESPUESTA
DE CARGA**

FASE DE APOYO

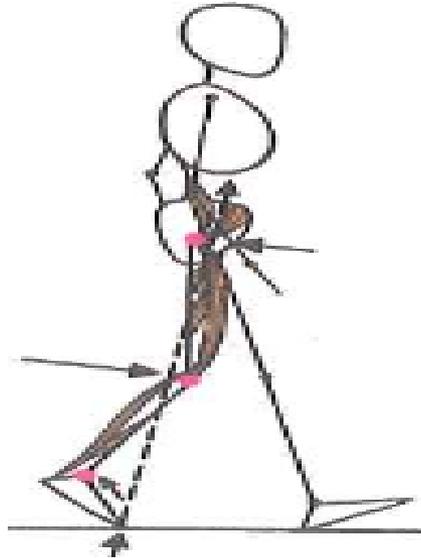


**SOPORTE
MEDIO**

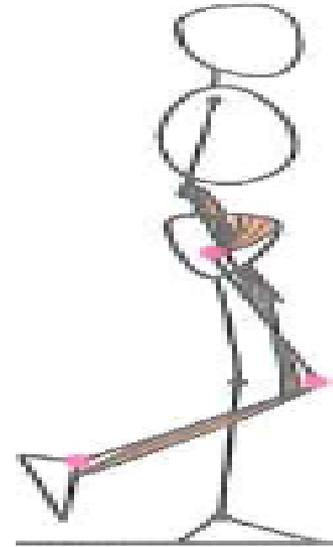


**SOPORTE
TERMINAL**

FASE DE BALANCEO



PREBALANCEO

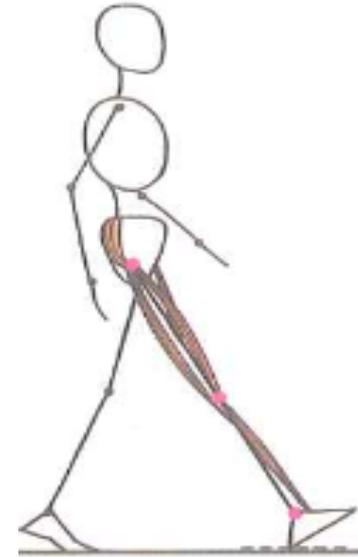


BALANCEO INICIAL

FASE DE BALANCEO



**BALANCEO
MEDIO**



**BALANCEO
TERMINAL**

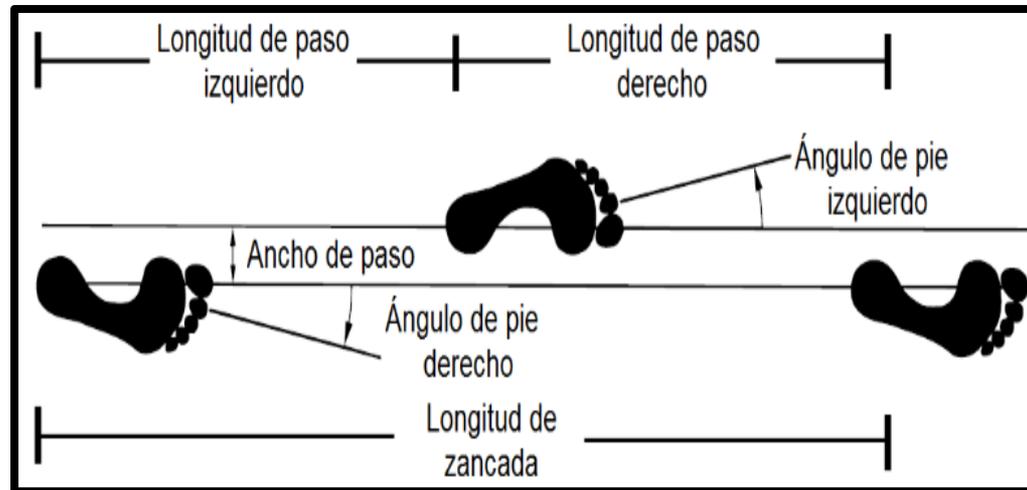


LA MARCHA HUMANA

“La marcha humana es un proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano, en posición erguida, se mueve hacia delante, siendo su peso soportado alternativamente por ambos pies”



COMPONENTES DE LA MARCHA



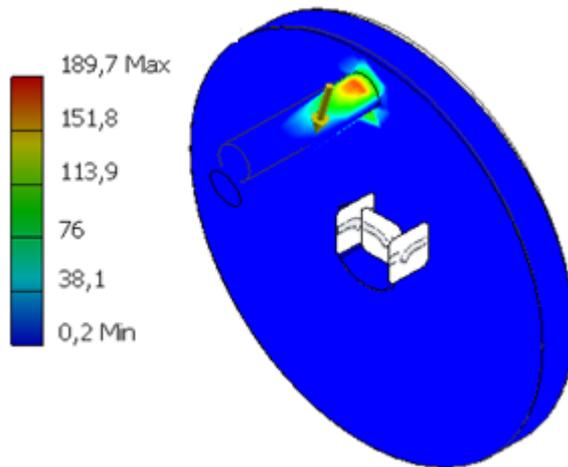


DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES



ANÁLISIS ESTÁTICO EN EL PASADOR

DESPLAZAMIENTO



Calculado: 195 MPa
Software: 189,7 MPa

$$S = \frac{\pi D^3}{32}$$

$$S = \frac{\pi(12)^3}{32} = 169.65 [mm^3]$$

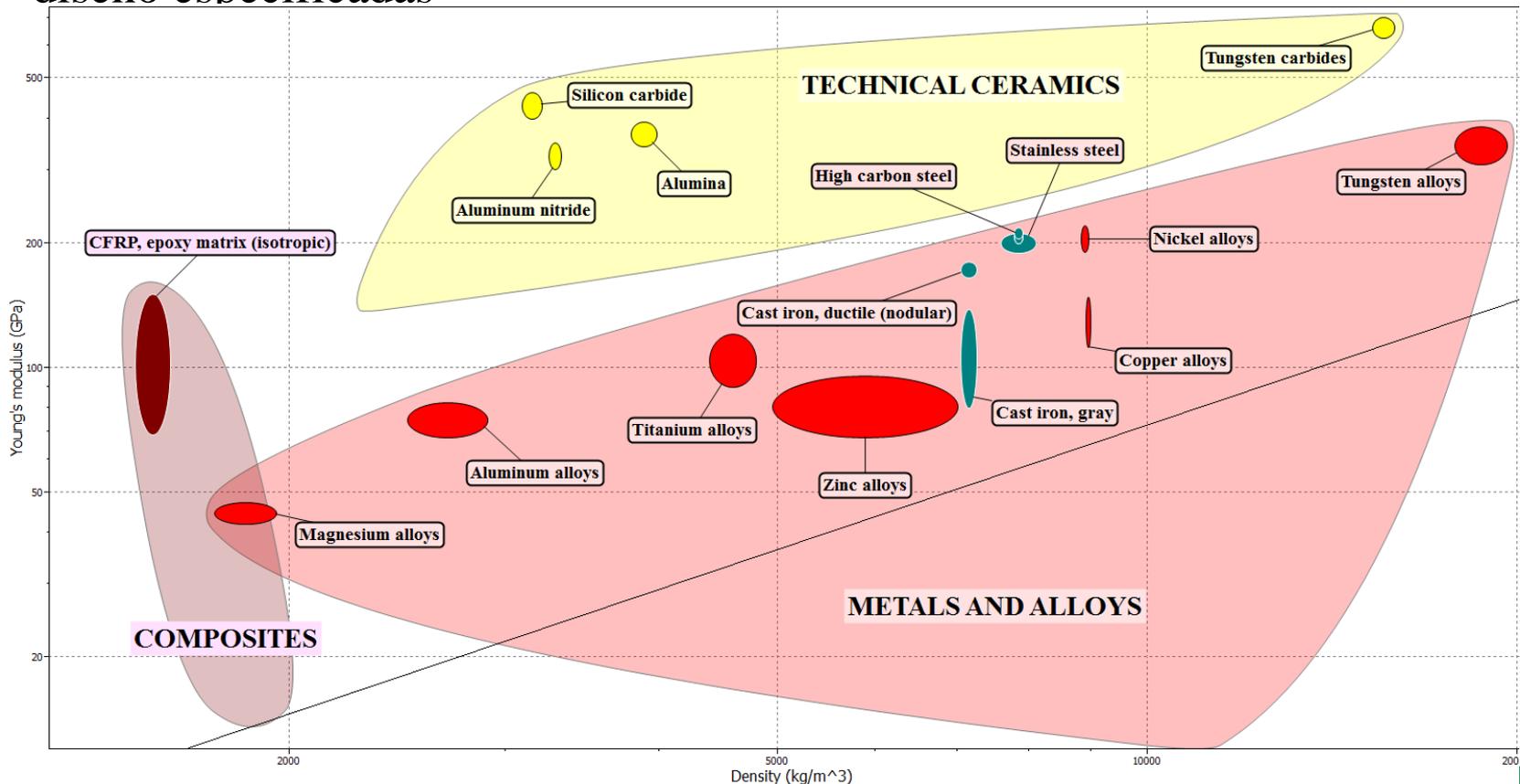
$$\sigma_{flex} = \frac{M_{max}}{S} = 78 [MPa]$$

$$\sigma_{flex} < \frac{S_u}{N}$$

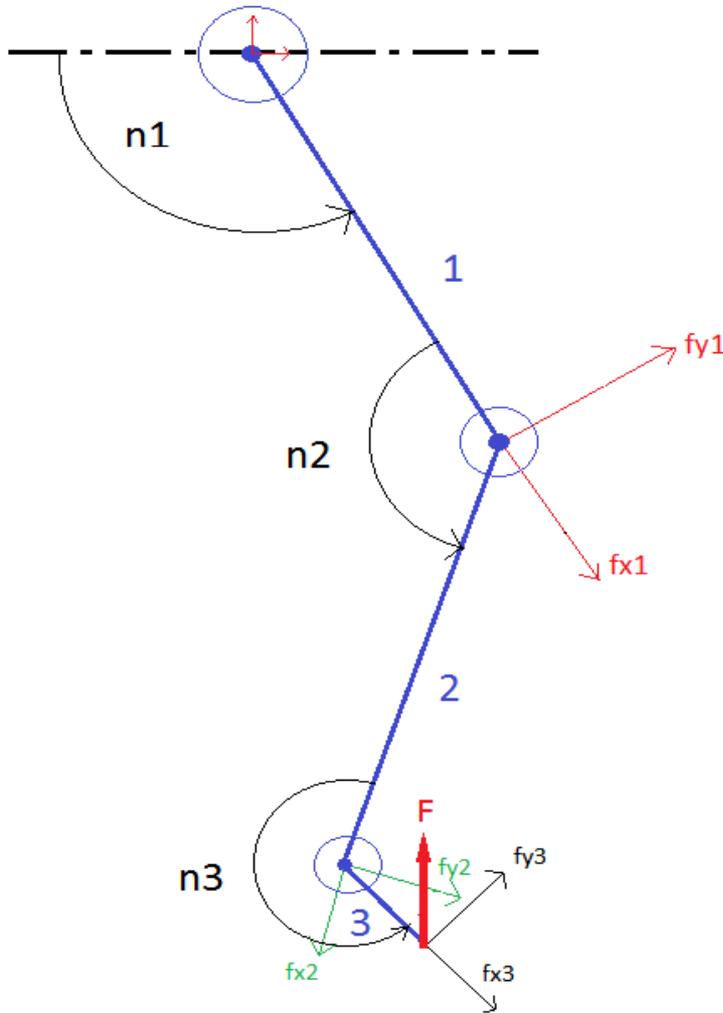
$$S_u > 195 [MPa]$$

SELECCIÓN DE MATERIALES

Mediante software se ingresa el valor mínimo Su calculado para obtener una lista de los posibles materiales a usar que cumplan las condiciones de diseño especificadas



SELECCIÓN DE ACTUADORES



El análisis que se realiza es con el objetivo de conocer los momentos de torsión que se crean en cada una de las articulaciones y estimar la fuerza mínima requerida para mover el miembro inferior junto con el exoesqueleto



Se plantea la sumatoria de fuerzas y momentos igualas a cero

$$f_i = f_{i+1}$$

$$n_i = n_{i+1} + P_{i+1} \times f_{i+1}$$

Para realizar la propagación de fuerzas y momentos se aplica una matriz de rotación de vectores [R] en cada operación.

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$f_i = [R] \times f_{i+1}$$

$$n_i = [R] \times n_{i+1} + L_{i+1} \times f_{i+1}$$





Desarrollando para los eslabones de nuestro interés:

Eslabón 3:

$$f_3 = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$n_3 = l_3 \times f_3$$

$$n_3 = l_3 \times \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$n_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_3 F_y \end{bmatrix}$$



Eslabón 2:

$$f_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 F_x - \sin \theta_3 F_y \\ \sin \theta_3 F_x + \cos \theta_3 F_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$n_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 \sin \theta_3 F_x + l_2 \cos \theta_3 F_y + l_3 F_y \end{bmatrix}$$

Eslabón 1:

$$f_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 F_x - \cos \theta_2 \sin \theta_3 F_y - \sin \theta_2 \sin \theta_3 F_x - \sin \theta_2 \cos \theta_3 F_y \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 F_x - \sin \theta_2 \sin \theta_3 F_y + \cos \theta_2 \sin \theta_3 F_x + \cos \theta_2 \cos \theta_3 F_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$n_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_x[l_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_3 (l_1 \cos \theta_2 + l_2)] + F_y[\cos \theta_3 (l_1 \cos \theta_2 + l_2) - l_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + l_3] \end{bmatrix}$$



SELECCIÓN DE ACTUADORES

Parámetros de diseño mecánico

De acuerdo a una investigación hecha por la revista de E-life, en conjunto con la Organización Mundial de la Salud (OMS) que ha investigado el crecimiento de la altura de la población mundial durante el último siglo y para Ecuador la estatura promedio de la población son las siguientes.

- Estatura máxima de 1.75m
- Estatura mínima de 1.60m
- Masa máxima de 90kg incluyendo la masa del exoesqueleto



SELECCIÓN DE ACTUADORES

Torque en las articulaciones de la extremidad inferior [N.m]			
Fase	Cadera	Rodilla	Tobillo
Contacto inicial	496	317	137
Respuesta a la carga	-431	-284	69
Soporte medio	196	-69	24.5
Soporte terminal	-214	23	72
Prebalanceo	187	-145	177

SELECCIÓN DE ACTUADORES

Analizando los datos obtenidos en la tabla anterior se observa que en la articulación de la cadera se produce un momento de torsión máximo de 496N, en la articulación de la rodilla un momento de torsión máximo de 317N y en la articulación del tobillo un momento máximo de 177N.



Actuador lineal

- Capacidad de carga 500 /750/900/1500 N
- Corriente a plena carga de 1,8 A
- Longitud de carrera 50/100/150/200/300 mm
- Velocidad 10mm/s

SELECCIÓN DE BATERÍAS

Se ha optado por utilizar las baterías LiPo por se caracterizan por ser ligeras, compactas y por poder almacenar una gran cantidad de energía. Además de que las baterías LiPo al estar compuestas por multitud de celdas se pueden encontrar de diferentes voltajes y amperajes con lo cual se ajuntan al presente proyecto.



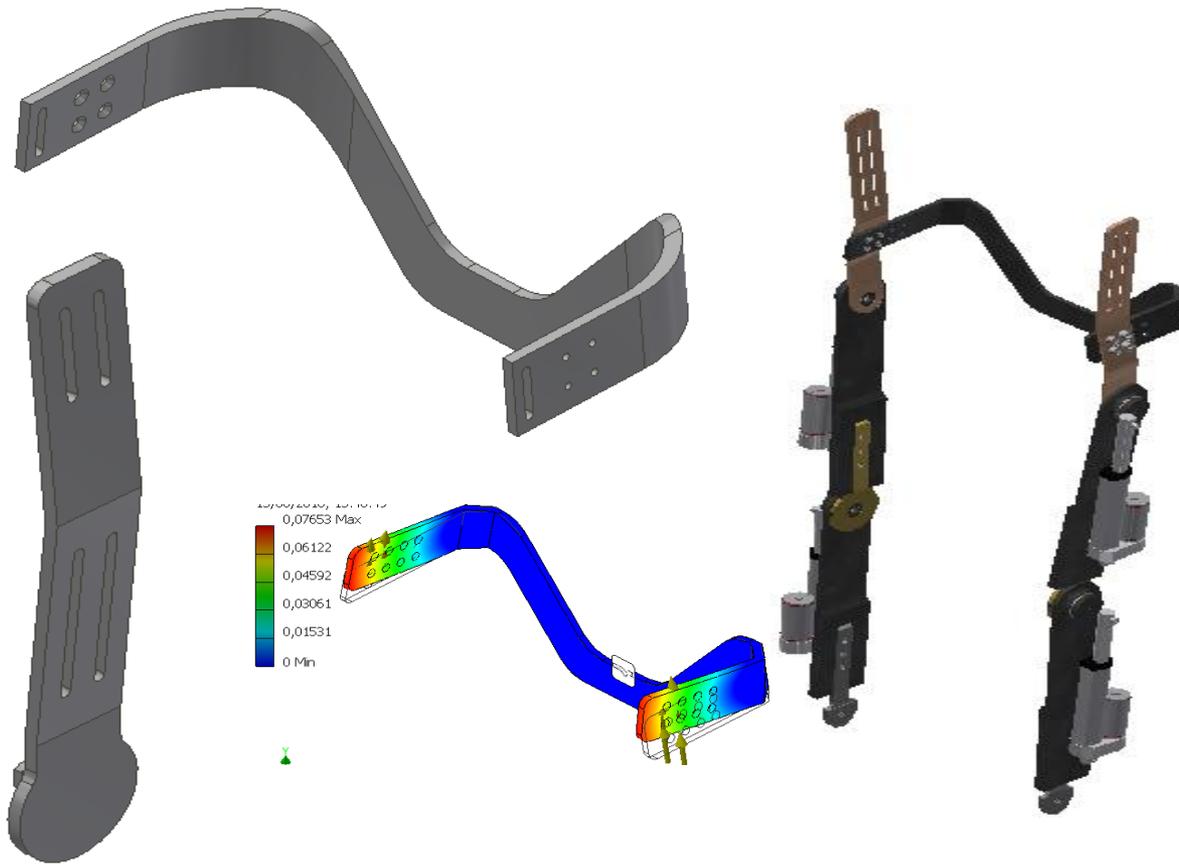


SELECCIÓN DE TARJETA CONTROLADORA

La tarjeta controladora para el presente proyecto se selecciono el Arduino mega 2560 debido a su bajo precio, bajo consumo energético, numero entradas y salidas analógicas lo que facilita el control de los actuadores y lectura de los sensores, fácil adquisición en el mercado nacional además de que posee una amplia gama de sensores y escudos compatibles con Arduino.

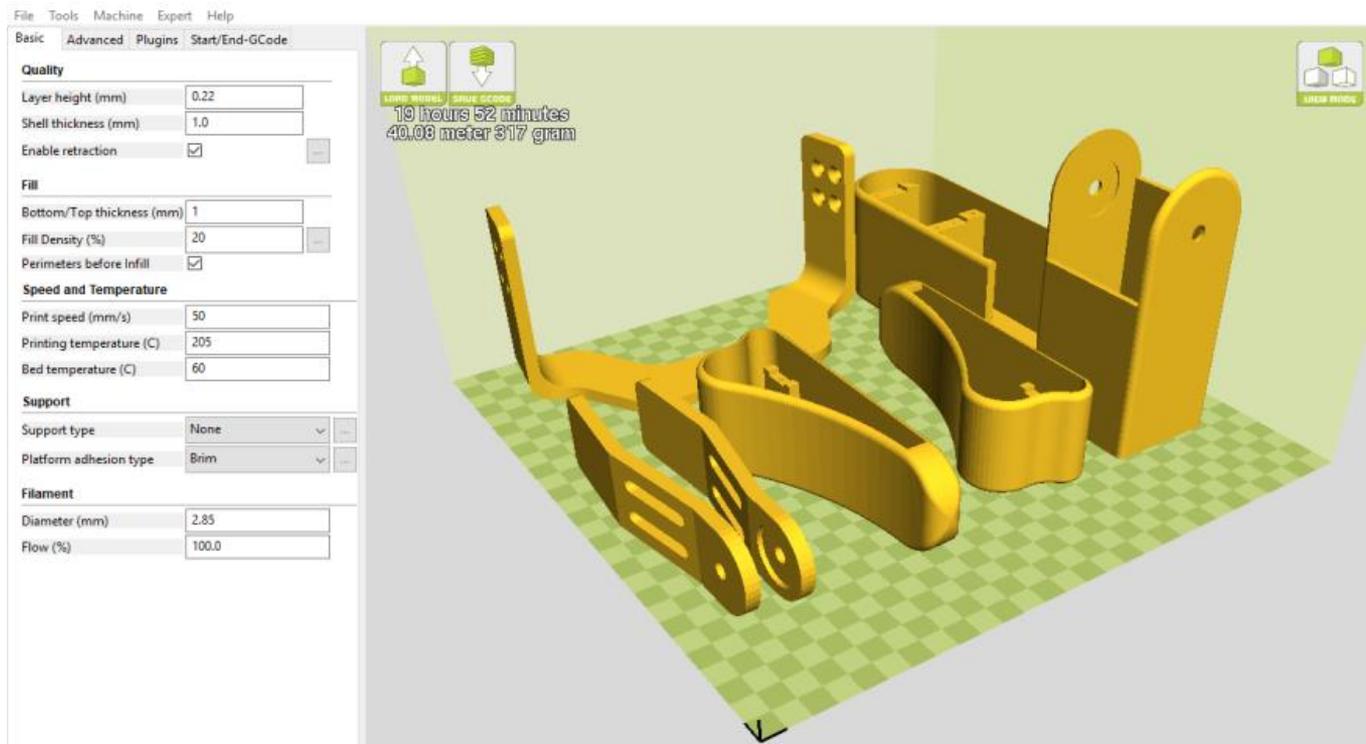


DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN

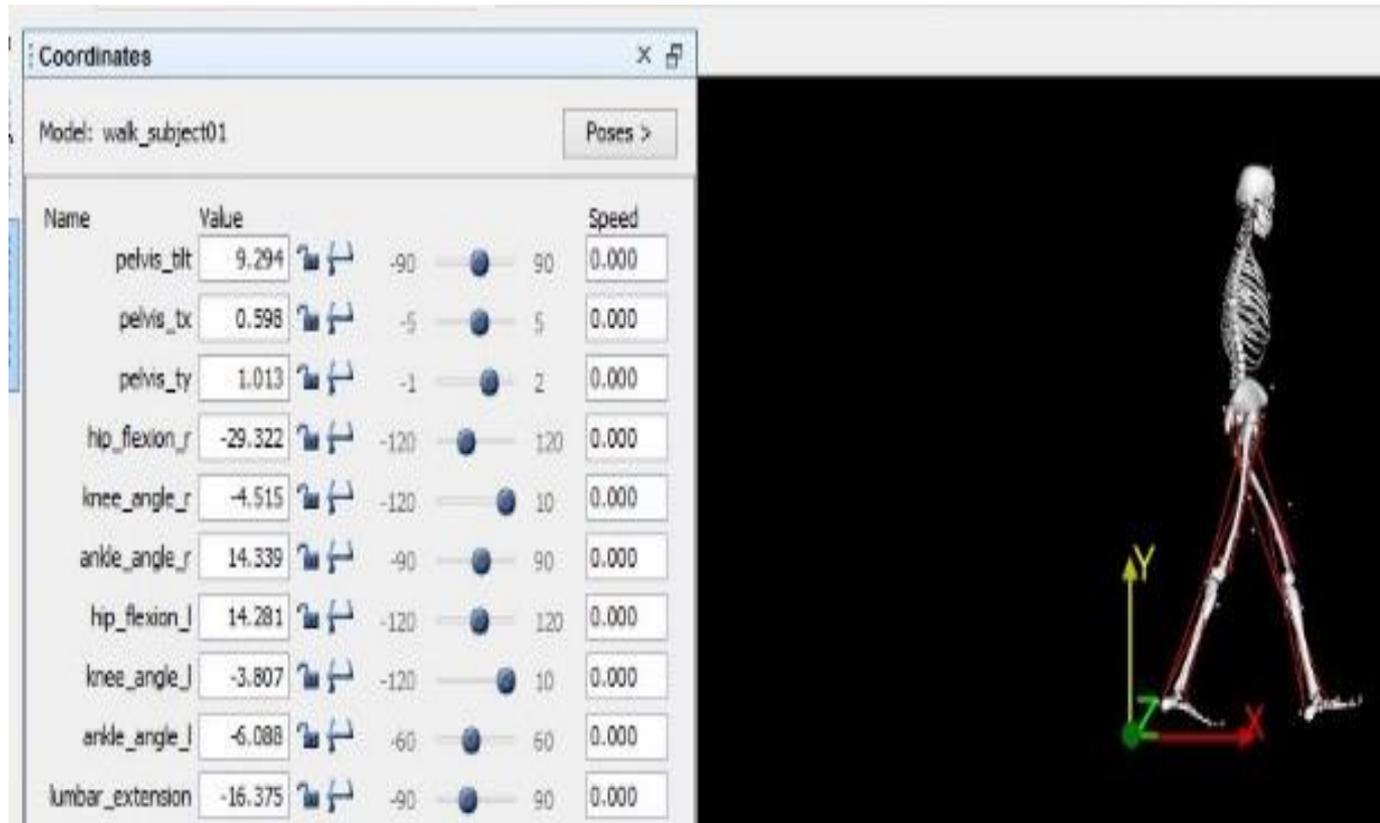


IMPLEMENTACIÓN

Para validar el prototipo se decide construir un modelo a escala 1:3 del mismo debido al alto costo de su implementación

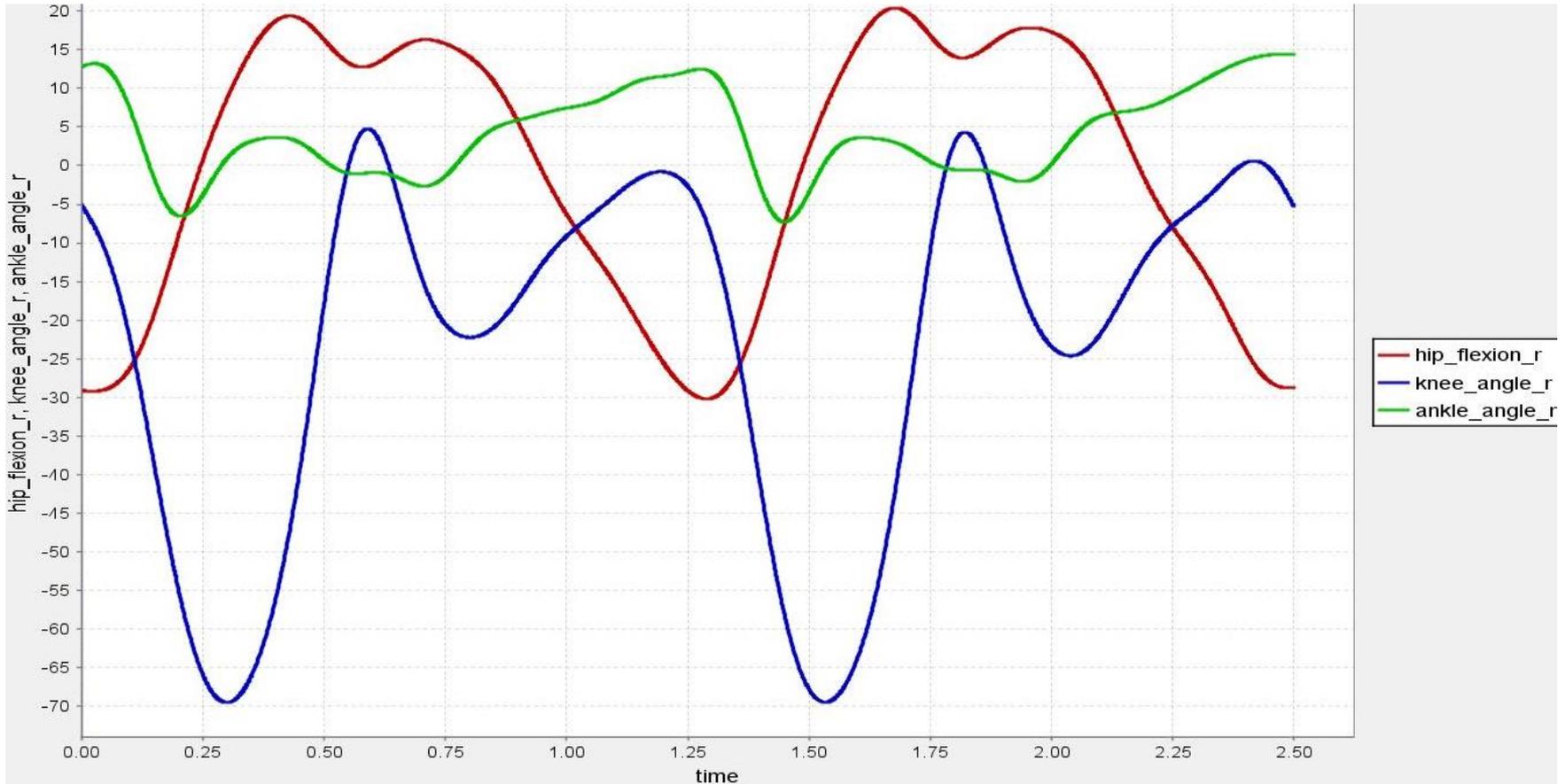


Simulación del ciclo de marcha en OpenSim



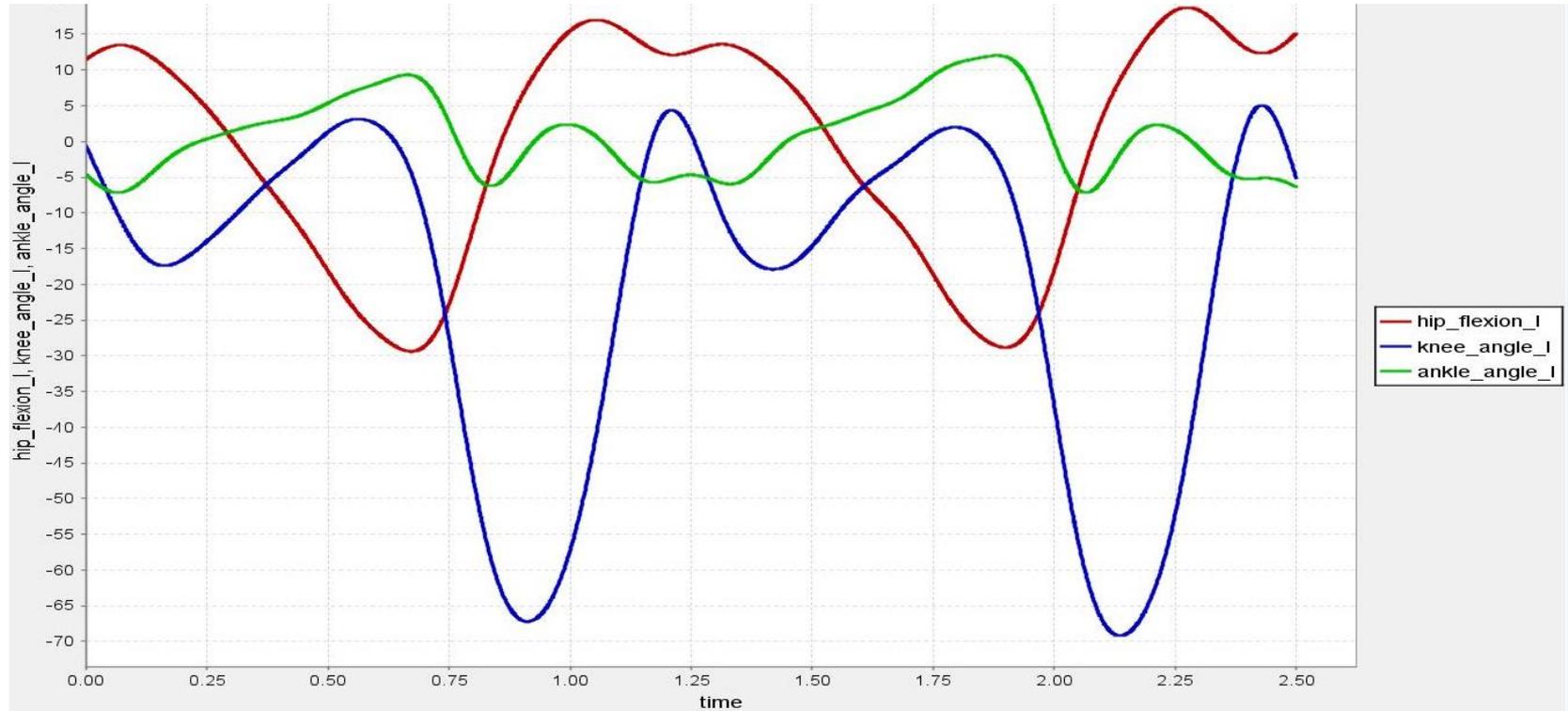
Simulación de las articulaciones del ciclo de la marcha en OpenSim

Simulación del ciclo de marcha en OpenSim



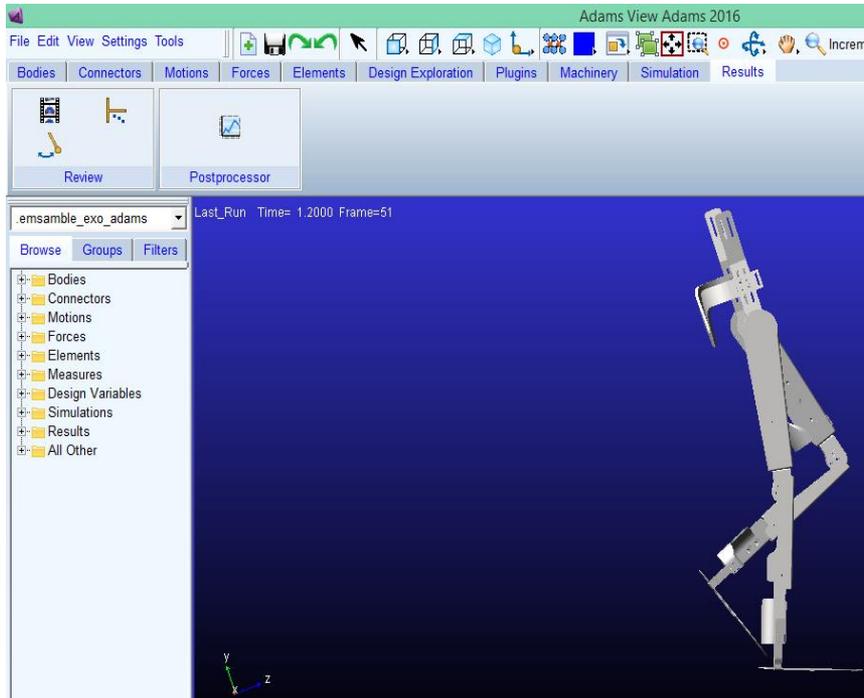
Ángulos de movimiento pierna derecha

Simulación del ciclo de marcha en OpenSim

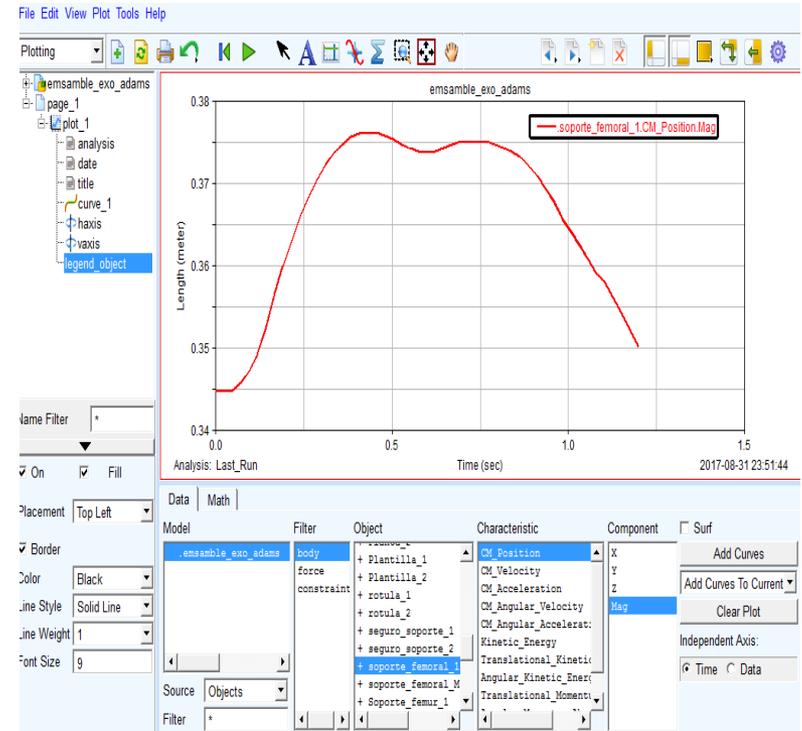


Ángulos de movimiento de la pierna izquierda

Simulación del ciclo de marcha del prototipo en Adams



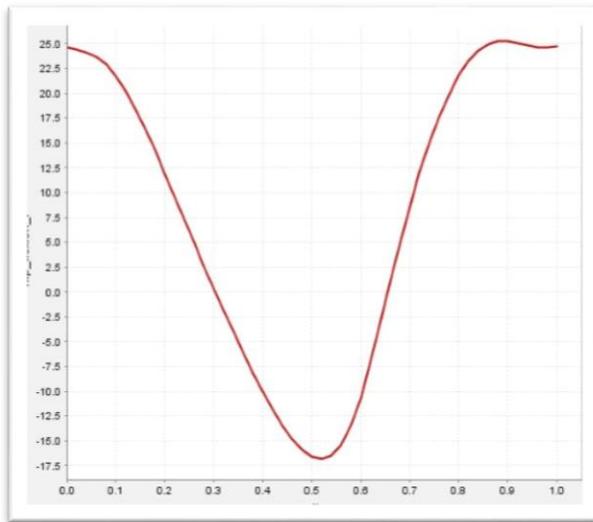
Simulación de las trayectorias de movimiento del prototipo



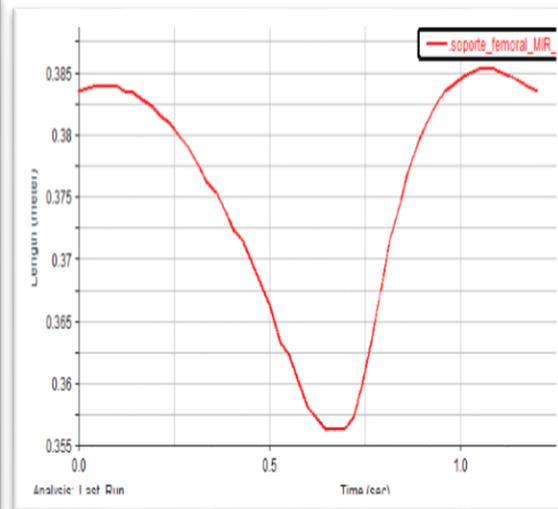
Curvas de movimiento de la cadera obtenidas

Análisis de resultados

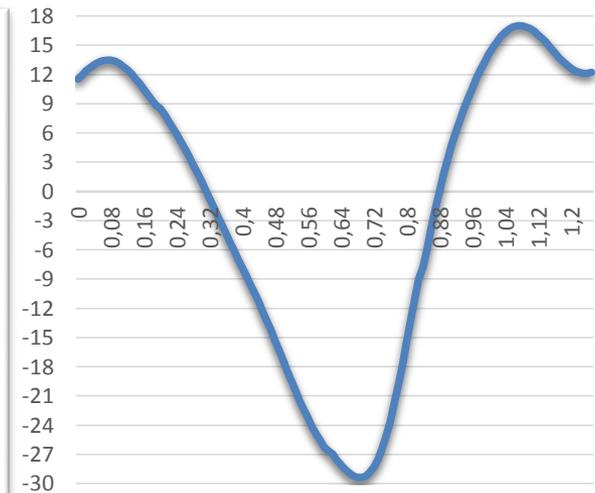
Graficas de la curva de trayectoria de la cadera lado izquierdo



OpenSim



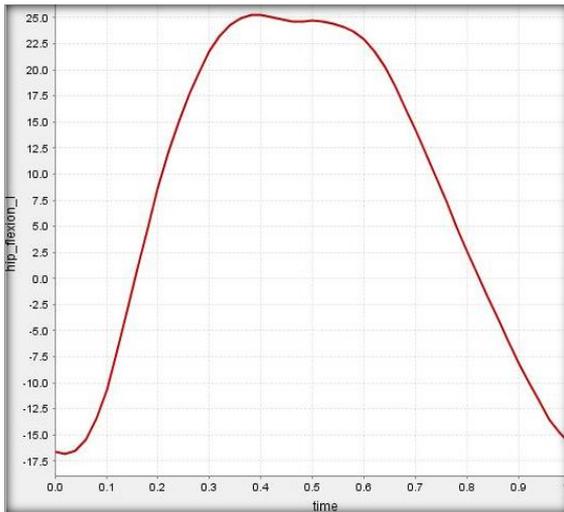
Adams



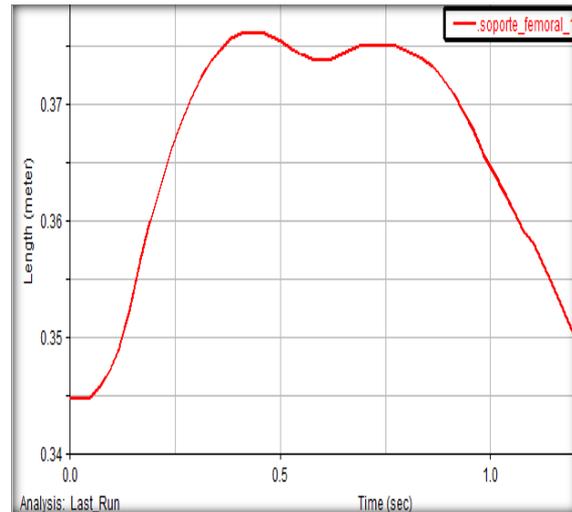
Experimental

Análisis de resultados

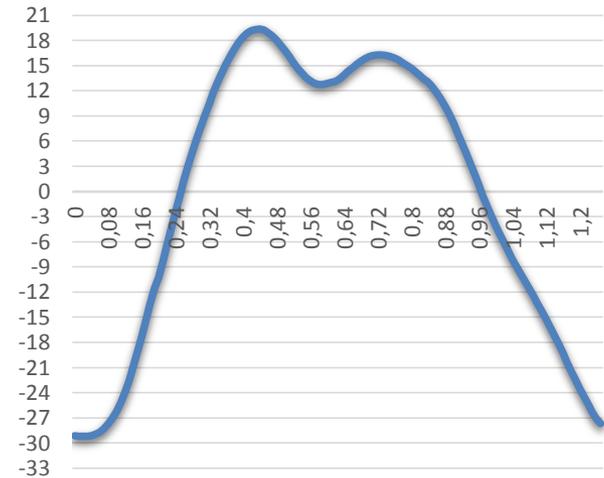
Graficas de la curva de trayectoria de la cadera lado izquierdo



OpenSim



Adams



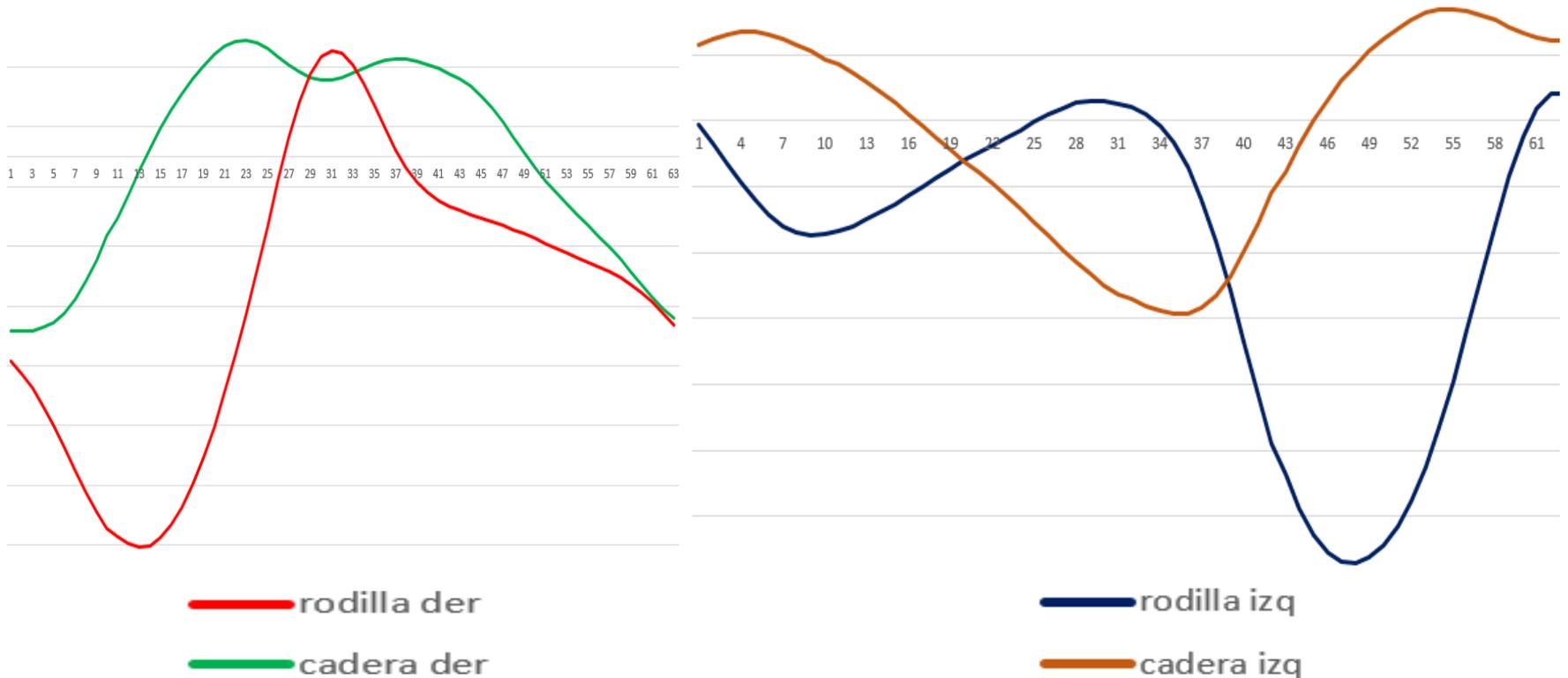
Experimental

PRUEBAS EXPERIMENTALES



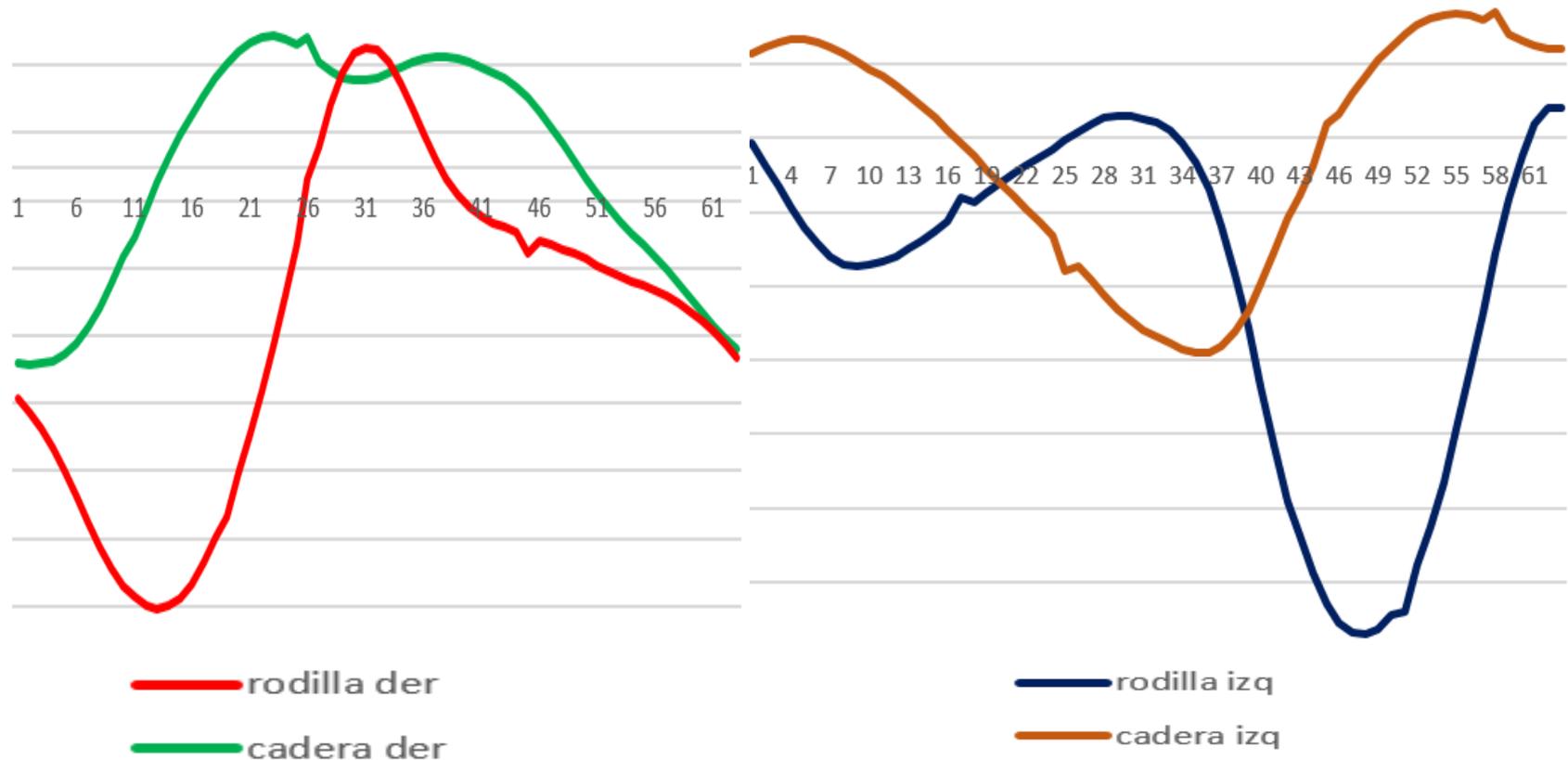
Análisis de resultados

Curvas de la pierna derecha e izquierda del exoesqueleto sin carga



Análisis de resultados

Curvas de la pierna derecha exoesqueleto con carga





VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Método Chi-cuadrado

Lo primero que se debe realizar es fijar la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis de alternativa (H_1).

- H_0 : El diseño biomecánico e implementación de un prototipo de exoesqueleto de extremidades inferiores a escala no cumplirá con el ciclo de marcha humana.
- H_1 : El diseño biomecánico e implementación de un prototipo de exoesqueleto de extremidades inferiores a escala cumplirá con el ciclo de marcha humana.

$$\chi^2 = \frac{\sum(f_e - f_o)^2}{f_e}$$





Cálculo de frecuencia deseada del ciclo de marcha

CICLO DE MARCHA					
Movimiento	Aciertos	f_e	Desaciertos	f_e	Total
Flexión	75	79,02	45	40,97	120
Extensión	60	55,97	25	29,02	85
Total	135		70		205



Chi cuadrado: tabla de contingencia

Ciclo de marcha					
Combinaciones	Frecuencia observada	Frecuencia esperada	$(f_e - f_o)$	$(f_e - f_o)^2$	$\frac{(f_e - f_o)^2}{f_e}$
Acierto Flexión	75	79.02	-4.02	16.24	0.21
Desacuerdo Flexión	45	40.97	4.03	16.24	0.36
Acierto extensión	60	55.97	4.03	16.24	0.24
Desacuerdo Flexión	25	29.02	4.03	16.24	0.65
					1.46



$$(X^2c) = 1.46$$

$$G_1 = (f - 1)(c - 1)$$

$$G_1 = (2 - 1)(2 - 1)$$

$$G_1 = 1$$

Con los grados de libertad calculados y un nivel significativo de 0,05 se busca en la tabla de distribución de Chi-cuadrado, obteniendo un valor de 3,841 para (Xt).





TRABAJOS A FUTURO

- Utilizando los resultados obtenidos en este proyecto como punto de partida se puede implementar un prototipo de exoesqueleto de extremidades inferiores a escala real con la certeza de que realizará de forma correcta con el ciclo de marcha humana sin producirse interferencias mecánicas.
- Implementar un sistema de control para mantener en equilibrio giroscópico el exoesqueleto con el fin de que siempre permanezca erguido, evitando la utilización de muletas para que las extremidades superiores queden libres y el usuario las pueda utilizar para realizar otras tareas.
- Utilizar la tecnología disponible en el mercado para crear aplicaciones en dispositivos móviles como por ejemplo un Smartwatch que permitan controlar de forma remota las funciones del exoesqueleto y a la vez mantener un constante monitoreo del estado del mismo.





CONCLUSIONES

- El estudio antropomórfico de la biomecánica del cuerpo humano fue indispensable para la definición de variables tales como dimensiones morfológicas, masa de las extremidades inferiores del cuerpo humano, grados de libertad, rangos de movimiento de las articulaciones dándose como resultado ecuaciones antropomórficas en función de la estatura y peso de la persona.
- Se obtuvo un modelo matemático de las extremidades inferiores que satisface las condiciones de movimiento de la misma, al aplicar la ecuación obtenida en Matlab se obtiene como resultado el torque o par mínimo necesario para mover cada articulación de la pierna el cual sirve para seleccionar los actuadores más adecuados.





CONCLUSIONES

- Mediante el modelado y simulado en un software CAD se logró verificar y validar las trayectorias de movimiento en el plano sagital que es donde actúan la mayoría de movimientos y fuerzas del miembro inferior obteniéndose un prototipo funcional que cumple con el ciclo de marcha sin interferencias mecánicas en su estructura.
- Con la utilización de un software especializado se logró seleccionar el material más adecuado para la estructura del exoesqueleto y mediante su simulación en un software CAD, se verificó que el material seleccionado cumple con las especificaciones de diseño.





CONCLUSIONES

- En el método de control difuso o Fuzzy Logic implementado dentro sistema embebido (Arduino) y utilizando la librería eFFF (Embedded Fuzzy Logic Library) se determinó que si se introduce un número superior a 20 reglas difusas el controlador tiende ser inestable por pequeños intervalos de tiempo provocando que funciones ordenadas por el usuario no se ejecuten correctamente.
- Se validó el correcto funcionamiento del prototipo a escala real tanto por medio de simulación como por la implementación de un prototipo a escala 1:3 en cual se realizó pruebas de movimiento y otro a escala real en el que además se realizaron pruebas de movimiento en personas con paraplejia.





CONCLUSIONES

- El prototipo ha sido diseñado para soportar y funcionar correctamente en personas con paraplejia con un nivel de lesión T10 a T12 y L1 a L5 las cuales poseen fuerza abdominal y control en sus manos, dedos, hombros, cabeza y cuello y L1 a L5 que además tiene un leve movimiento en su cadera y rodillas y que cumplan con un peso máximo de 80Kg, una estatura mínima de 1.6m y una estatura máxima de 1.75m para otros valores de peso y estatura se debe rediseñar la estructura.





GRACIAS POR
SU ATENCIÓN

