



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**“DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE SOBRE LA INCLUSIÓN  
DE MATERIALES MAGNETOREOLÓGICOS CON CARACTERÍSTICAS  
DOMINANTES EN EL CAMPO DE LA AMORTIGUACIÓN Y SU  
VIABILIDAD TÉCNICA EN UN PROTOTIPO MECATRÓNICO DE  
PRÓTESIS DE TOBILLO Y PIE CON CONTROL DE TORQUE”**

**JULIO DAVID ESCORZA PAREDES  
ISMAEL ALEJANDRO MEDINA NÚÑEZ**



# OBJETIVOS

- Investigar el mecanismo de movimiento del tobillo y del pie.
- Investigar el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos.
- Diseñar un amortiguador magnetoreológico.
- Diseñar el mecanismo de locomoción.
- Diseñar el control del prototipo híbrido.
- Desarrollar la interfaz HMI.
- Evaluar el torque para el funcionamiento del tobillo.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo protésico.



# Condiciones de Funcionamiento

1

- El prototipo tiene viabilidad para personas que presente una amputación de miembro inferior y que cumplen con un peso no mayor a 70 Kg.

2

- El sistema magnetoreológico entra en estado activo en función de las condiciones de impacto.



# INTRODUCCIÓN

# Prótesis de pie y tobillo presentes en el mercado



# Anatomía del tobillo y pie



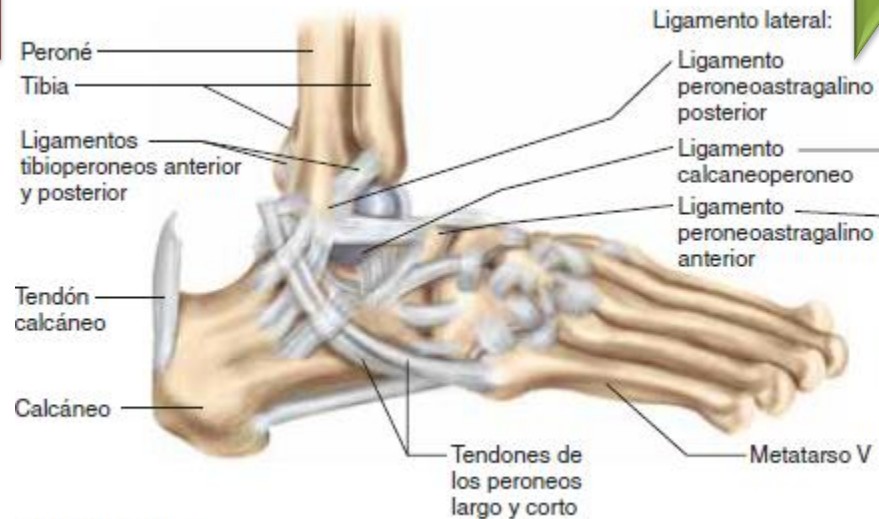
El tobillo y el pie constituyen una parte de vital importancia para la locomoción y el equilibrio del cuerpo

Estructura rígida o flexible según la función para la cual es requerida y las características del terreno en que se mueve

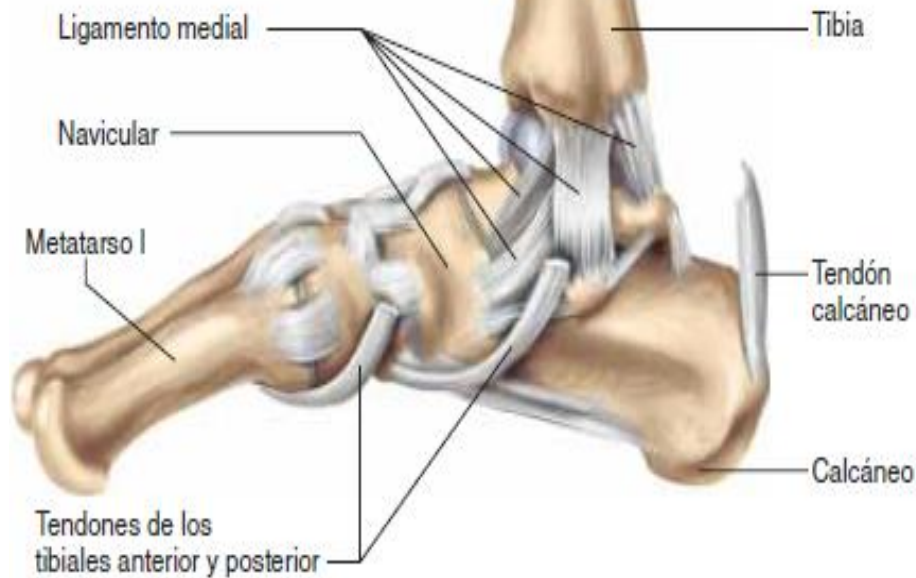
# Articulación del Tobillo

Es de tipo sinovial, debido a su configuración anatómica, es una de las más congruentes y, por lo tanto, de las más estables de la extremidad inferior

A través de ella se realizan los movimientos de flexión dorsal y planar de tipo bisagra del pie sobre la pierna.



a) Vista lateral



c) Vista medial



d) Vista posterior



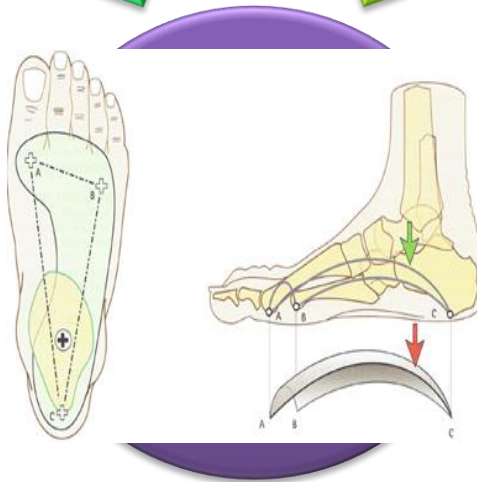
# Biomecánica del tobillo y pie

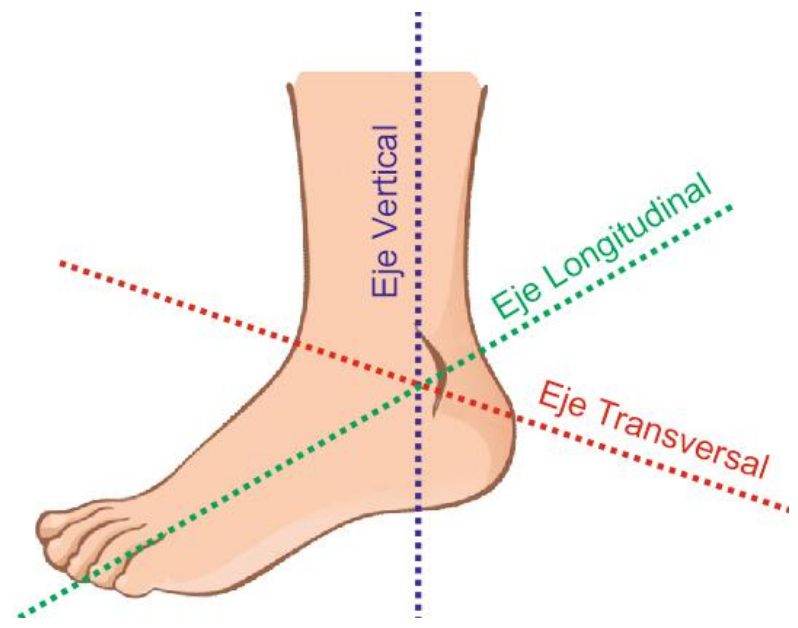
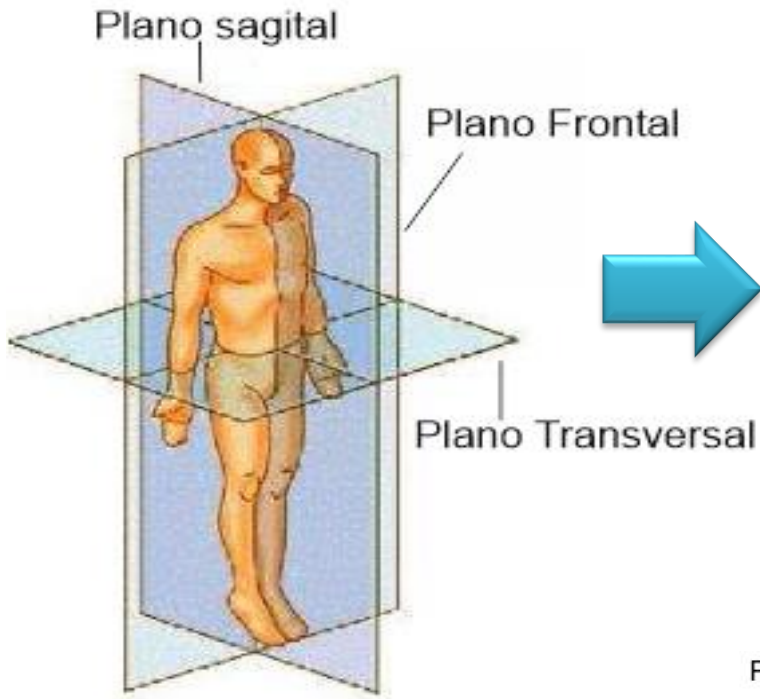
soportar el peso del cuerpo y permitir el desarrollo dinámico del paso cuando se camina

Pie es resistente y flexible a la vez

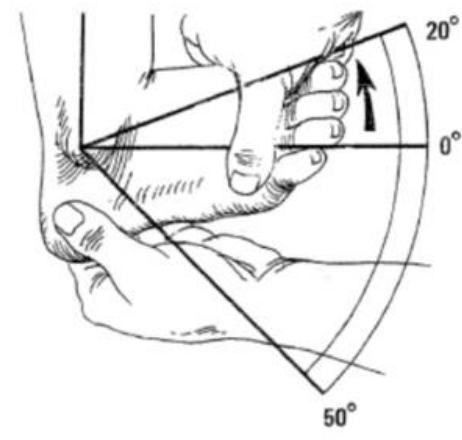
Adaptado a la bipedestación, el pie del hombre desempeña una doble función

Tobillo es el vértice donde se enlazan el plano vertical del cuerpo y el horizontal del pie.

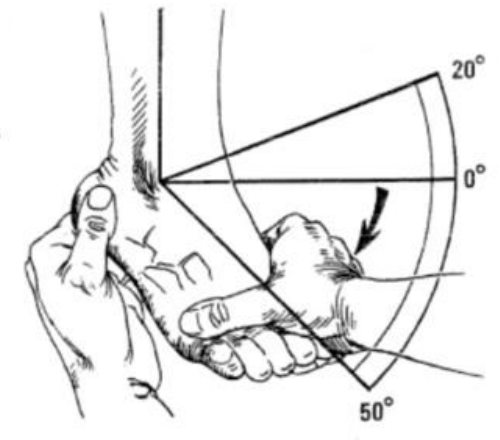




Flexión Dorsal



Flexión Planar

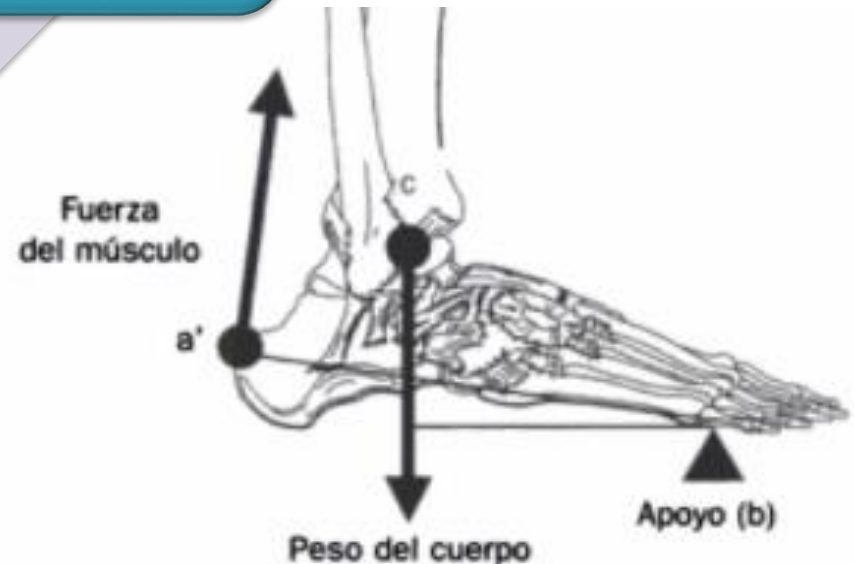


# Palancas de segundo orden

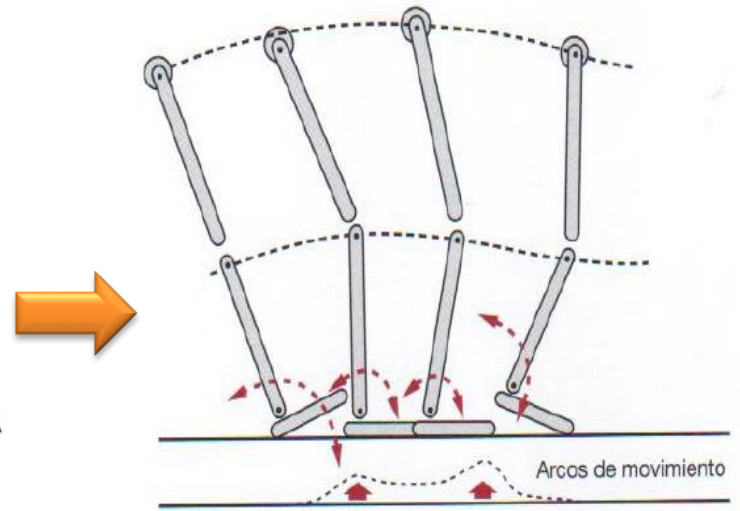
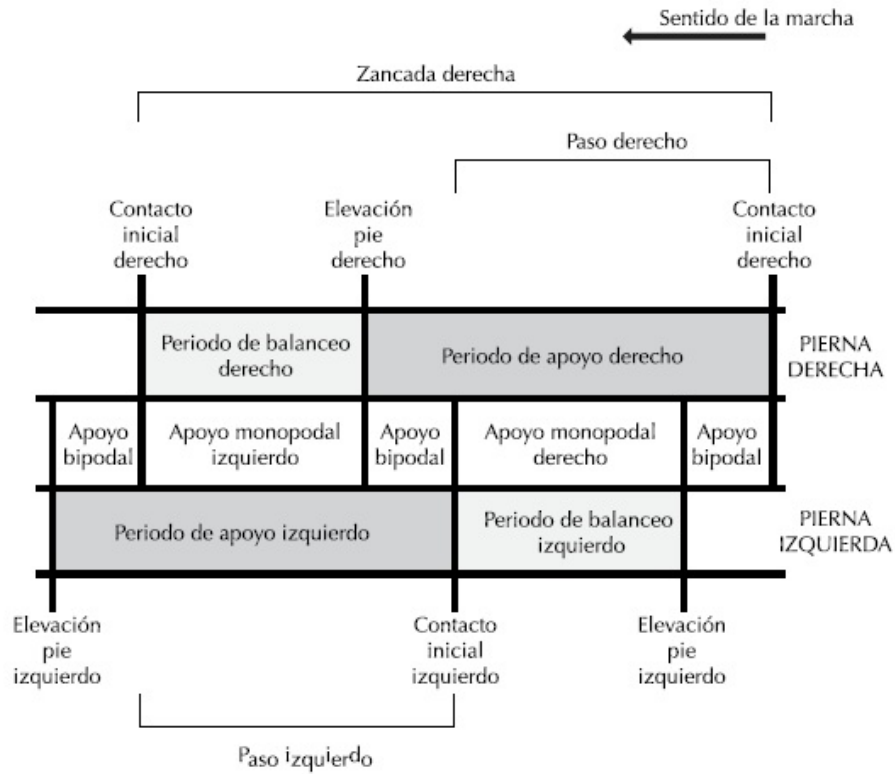
En este tipo de palanca la resistencia se encuentra situada entre el punto de apoyo y la potencia

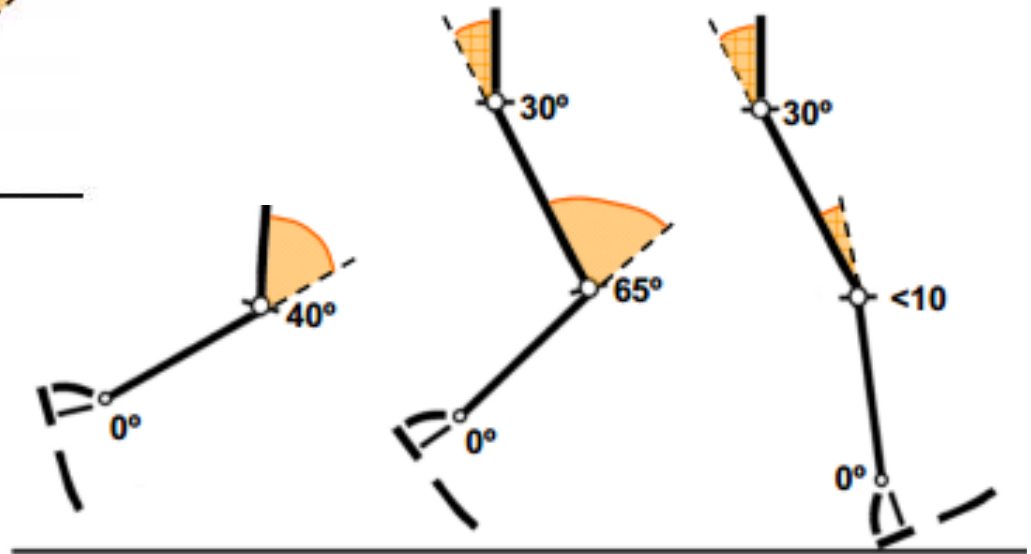
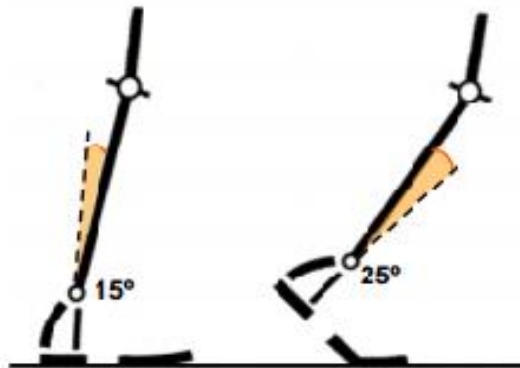
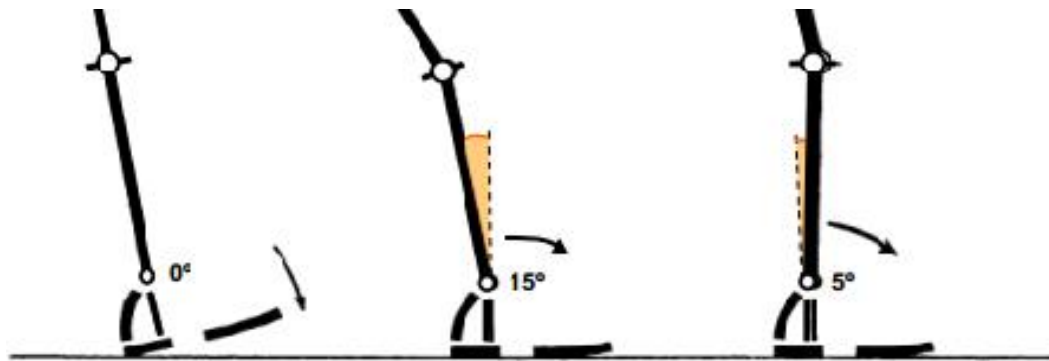
Esta palanca recibe la denominación de fuerza

se localiza en el movimiento realizado para levantar el peso del cuerpo

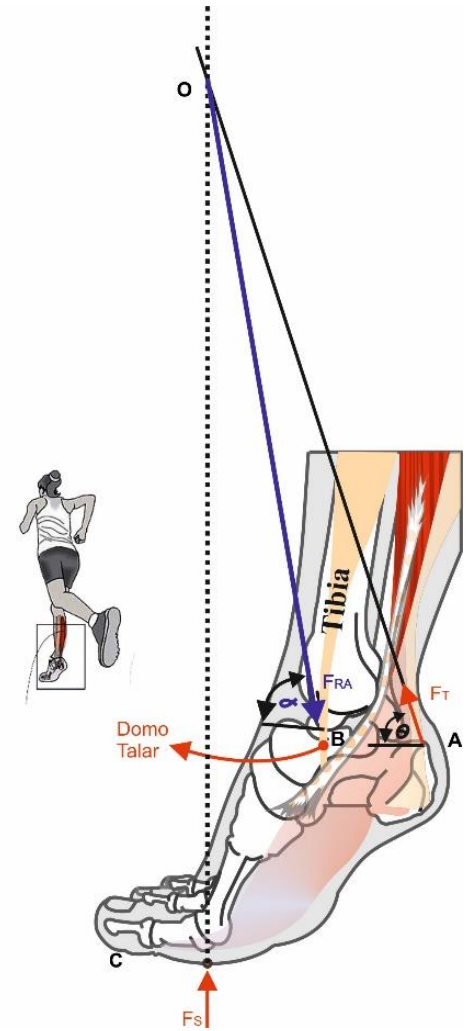
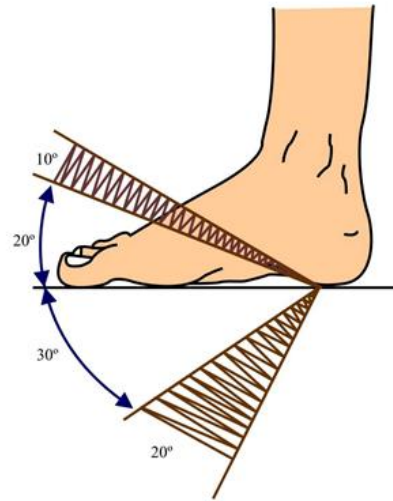
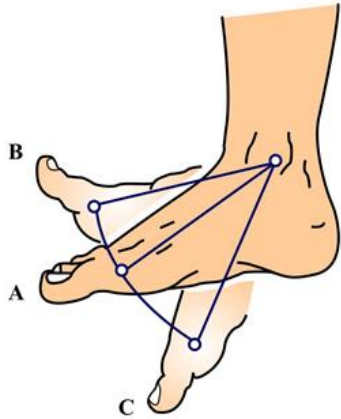


# Estudio de la Marcha





# Fuerzas y mecánica del pie

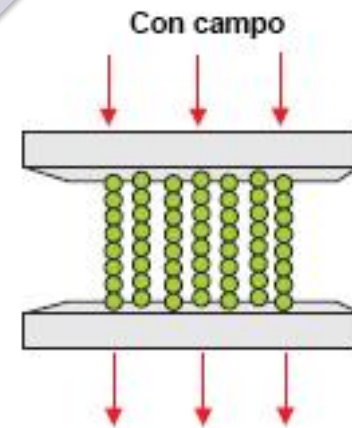
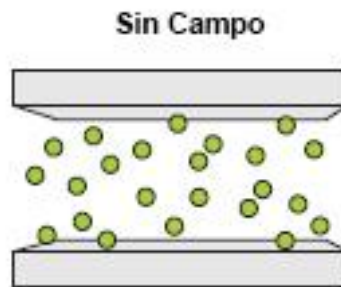


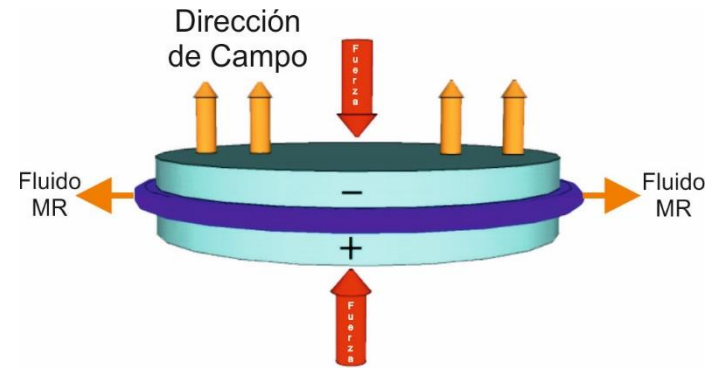
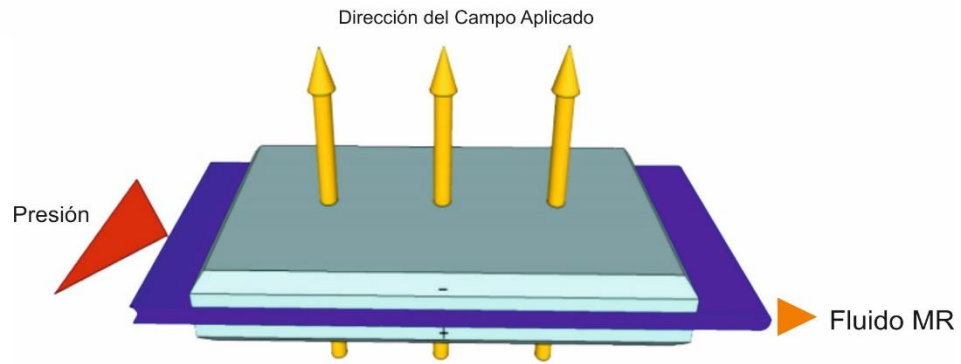
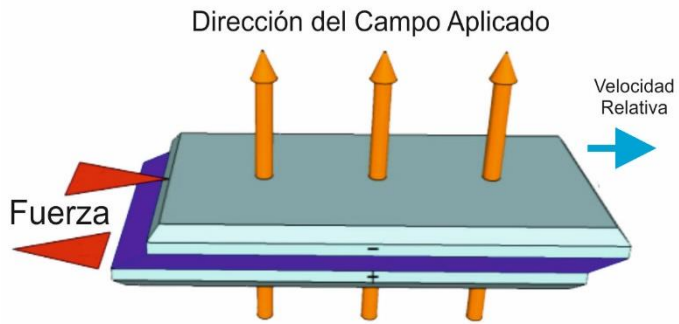
# Caracterización de fluidos magnetoreológicos

Los materiales magnetoreológicos son una clase de materiales inteligentes

bajo la influencia de campos magnéticos sus partículas magnéticas suspendidas interactúan para formar una estructura que resista la deformación o flujo

cambio en el material se muestra como un rápido aumento en la viscosidad o en el desarrollo de un estado semisólido.







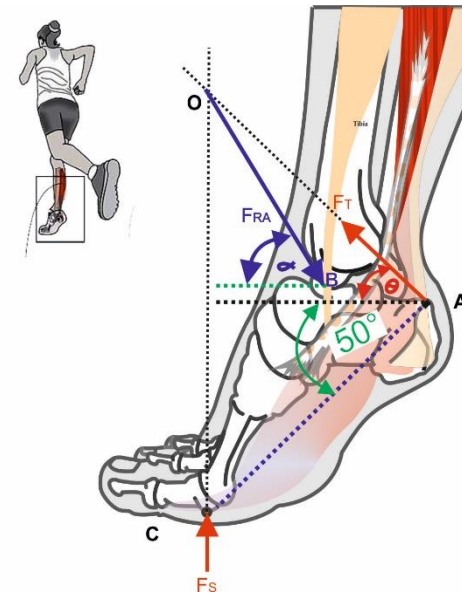
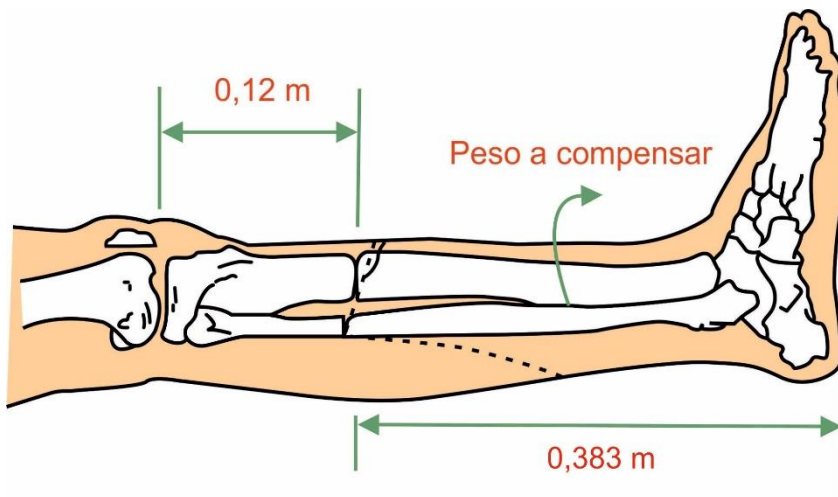
# INGENIERÍA DE DETALLE



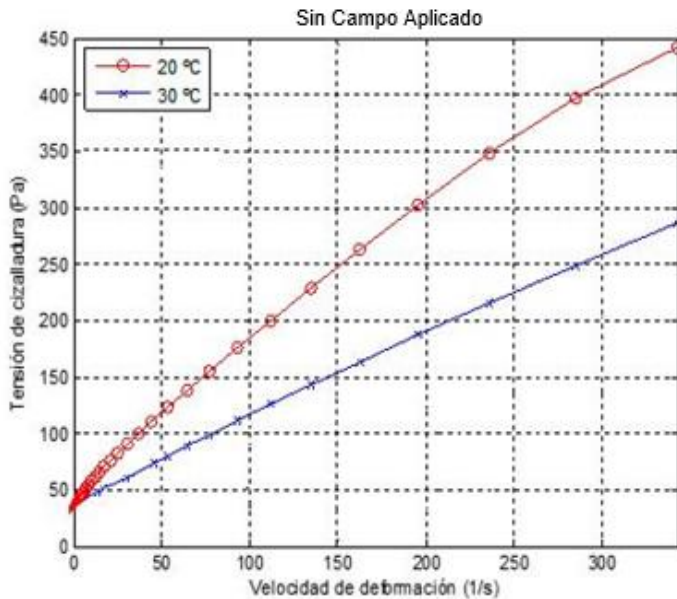
# Sistematización de Variables

Altura Persona	1,75 m
Peso Persona	70 Kg
Masa Amputación	3 Kg
Altura Prototipo	0,251 m

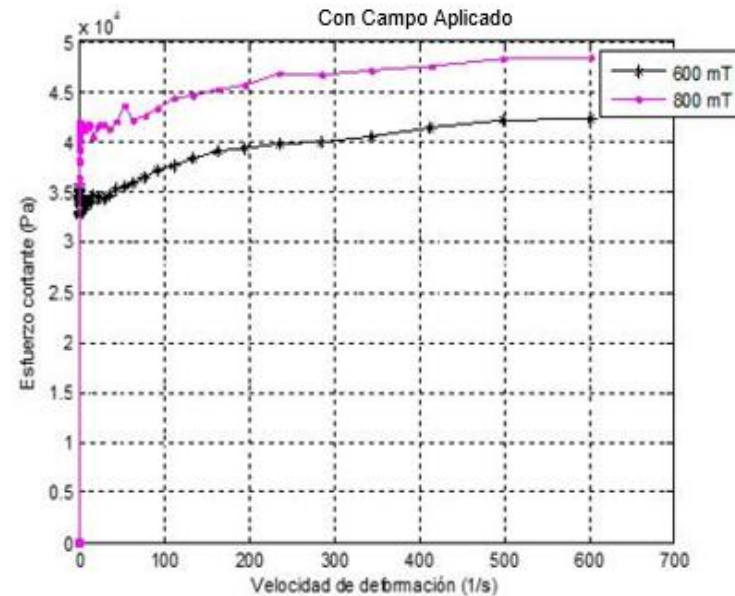
Fuerza Tibial	989 N
Fuerza Articulación	1515 N



# Diseño del sistema de amortiguamiento



(a)



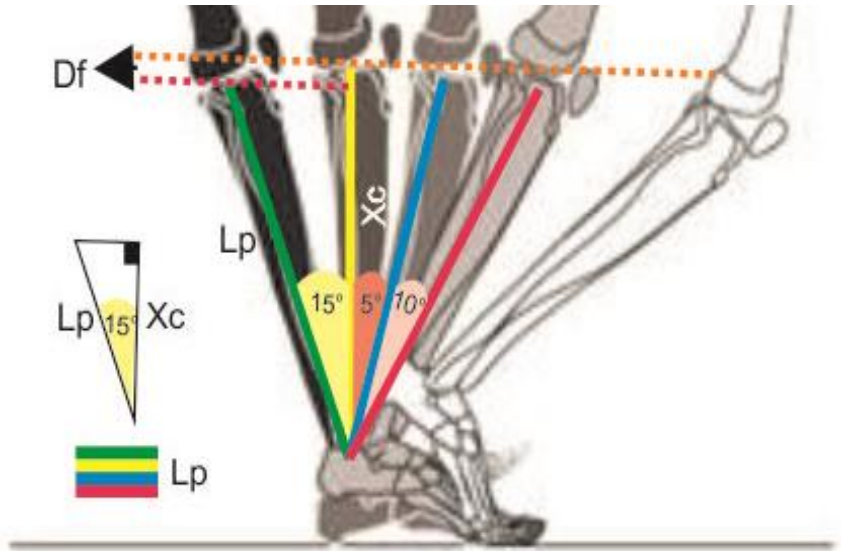
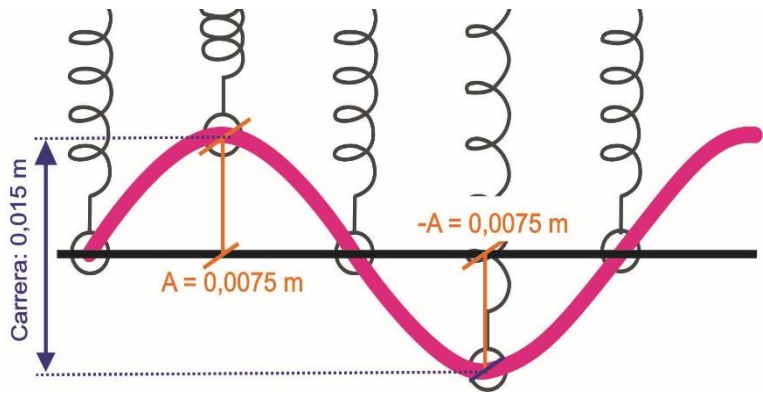
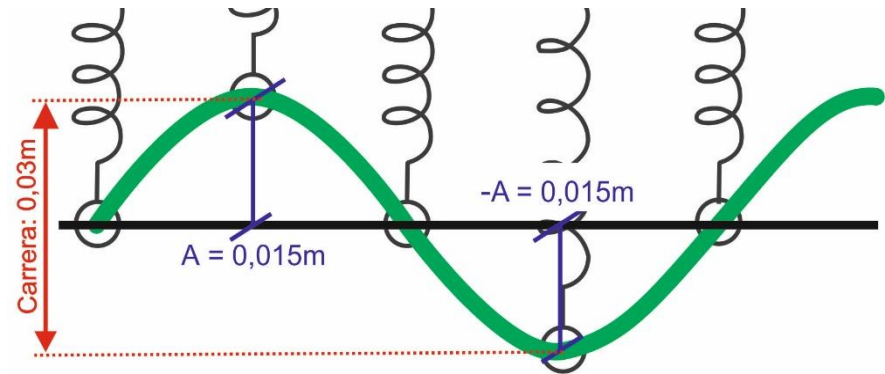
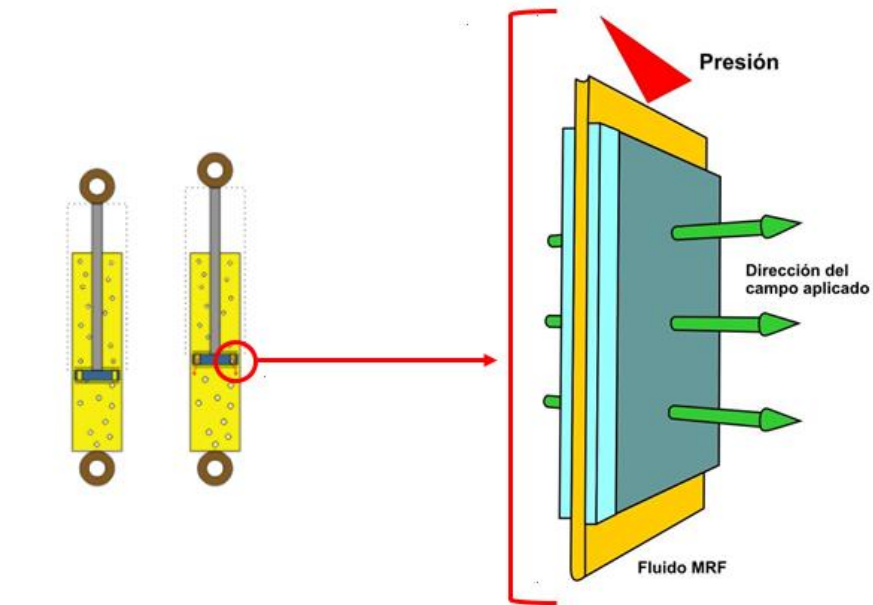
(b)

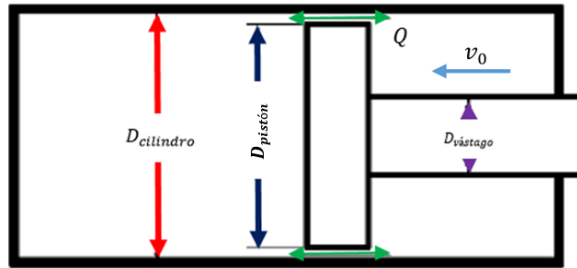
Considerando las características necesarias para complementar la funcionalidad del pie tobillo

Se postula el diseño de un cilindro de impacto magnetoreológico

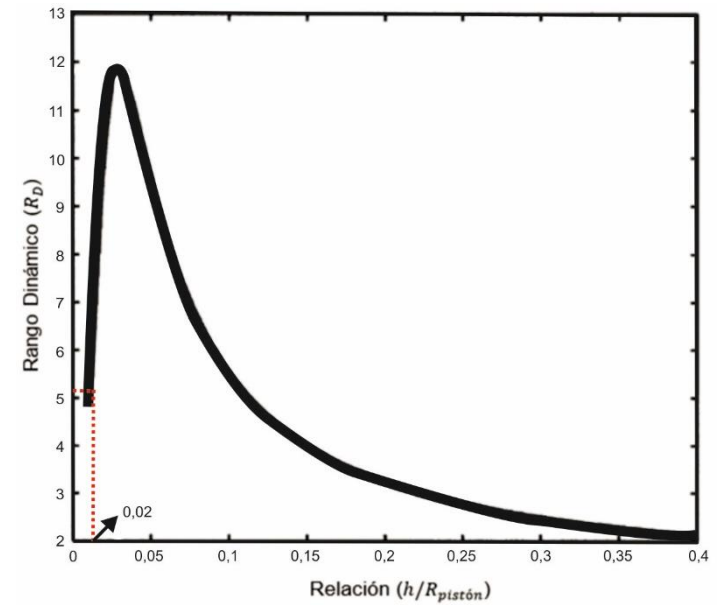
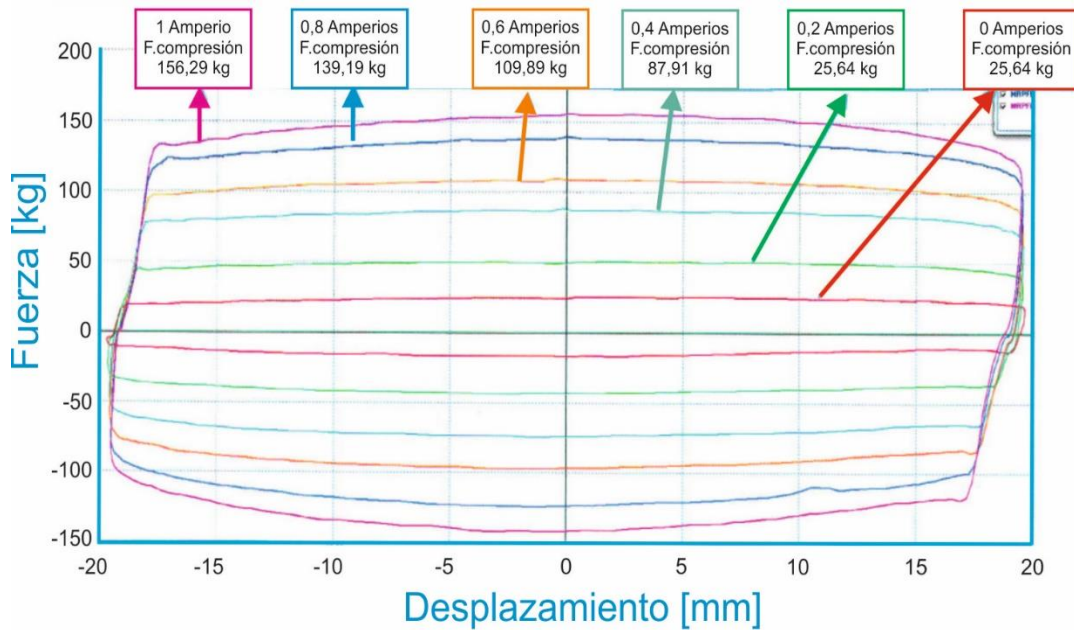
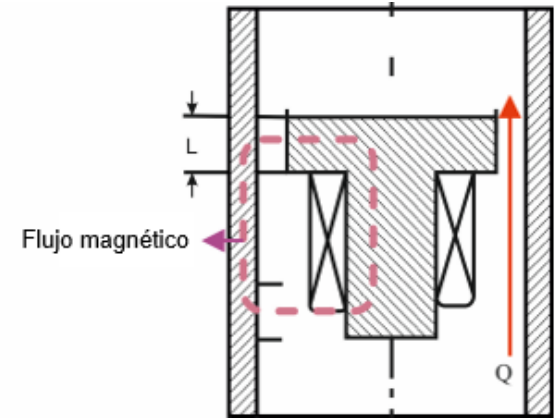
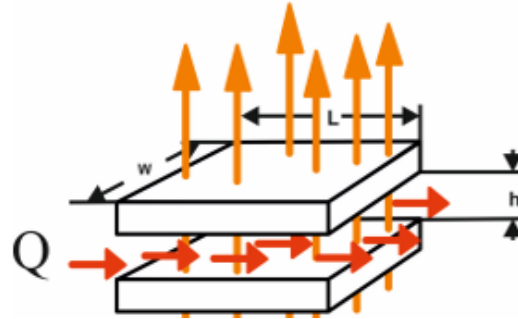
Fluido MRF 140-CG de Lord

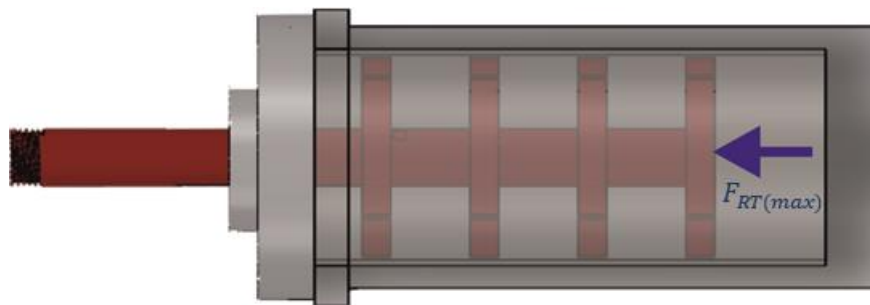
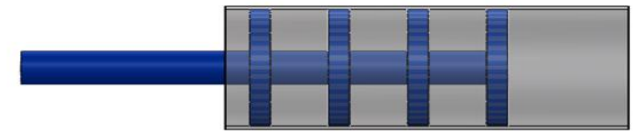
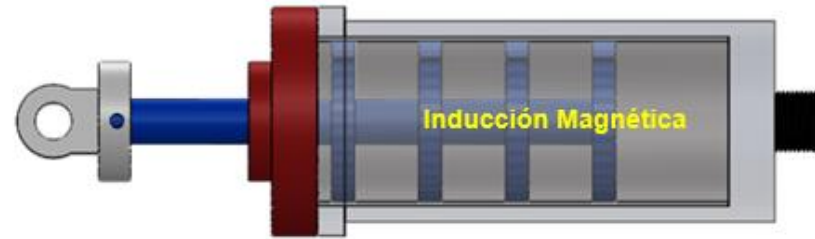
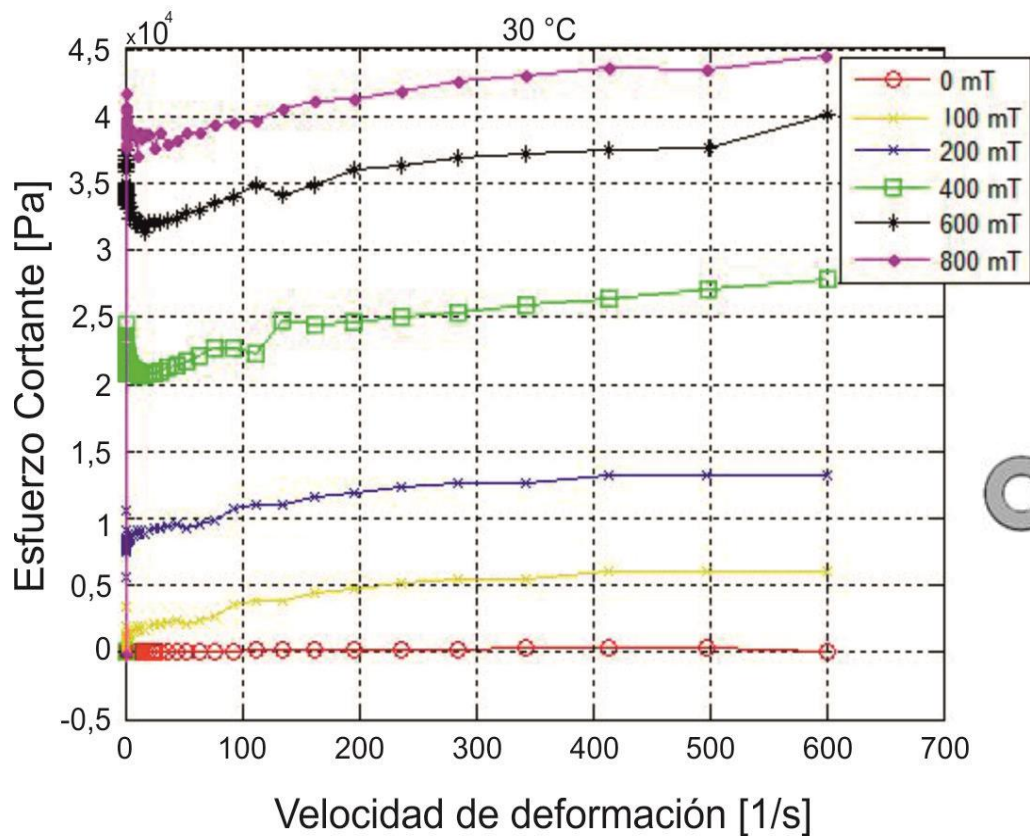


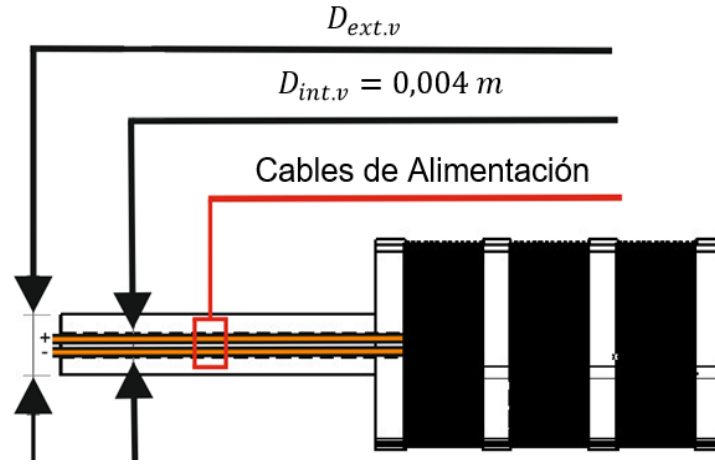
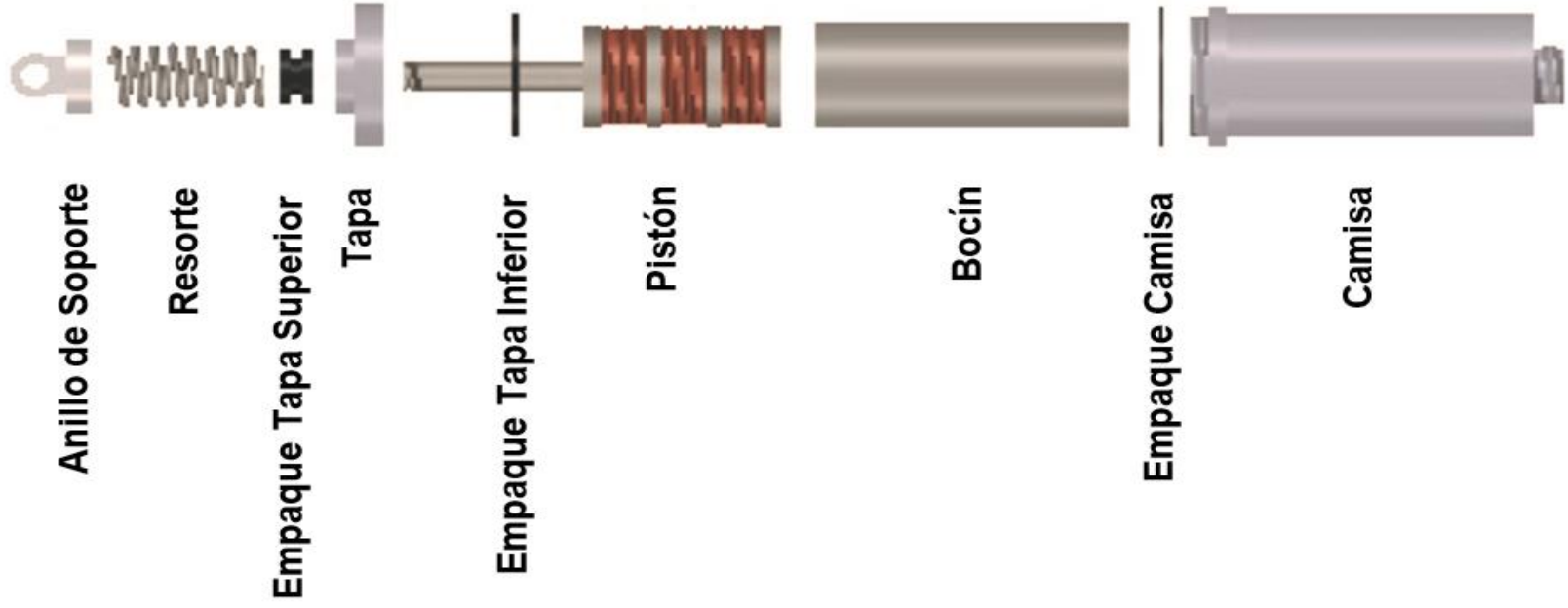




Campo aplicado





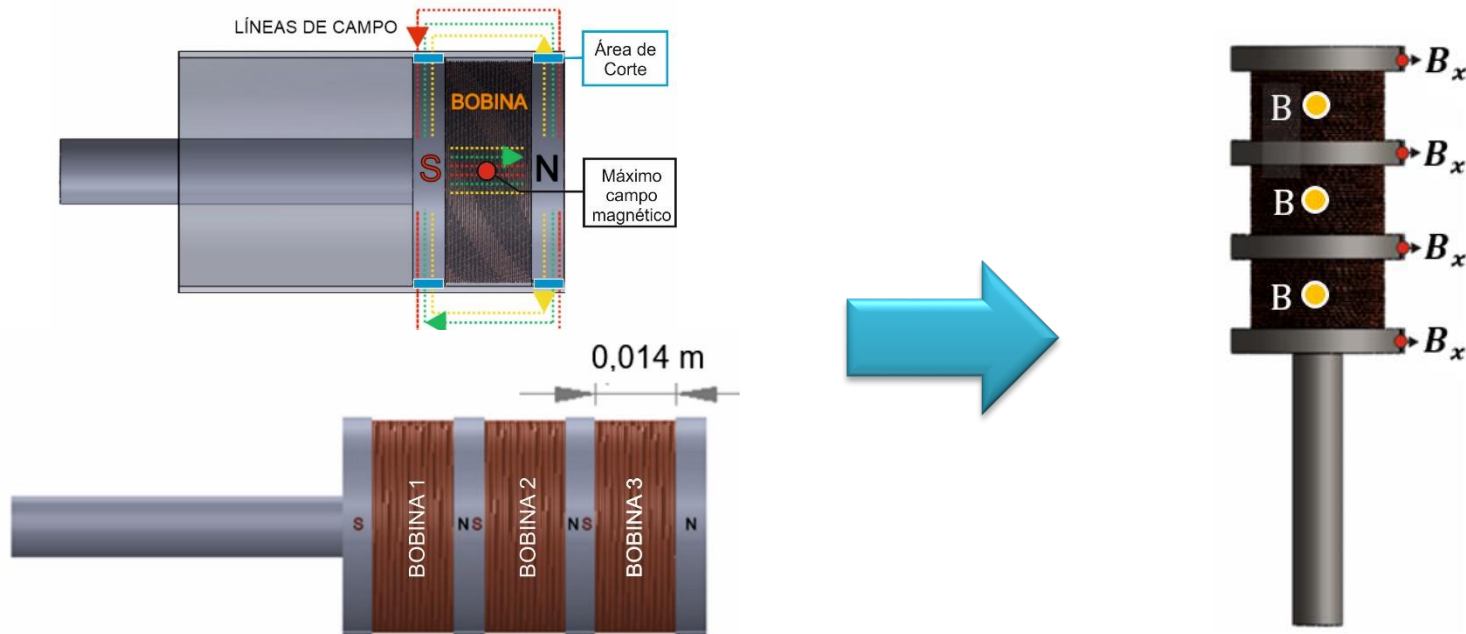


# Diseño del Electroimán

Para generar el campo magnético que permita la saturación del fluido MRF-140CG

Se propone el diseño de un electroimán basado en el principio de un solenoide

Las líneas de campo se dirigen entre los polos Norte y Sur





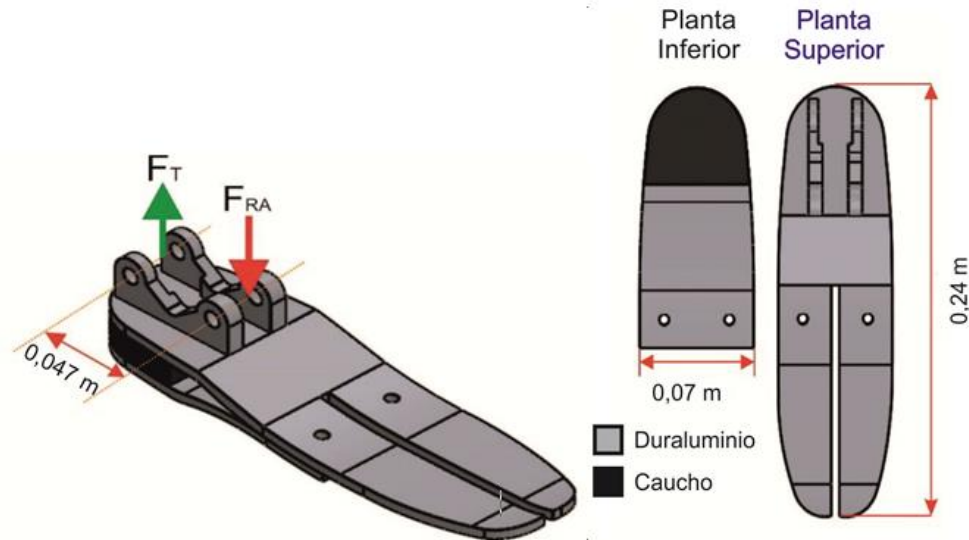
# Control de Torque

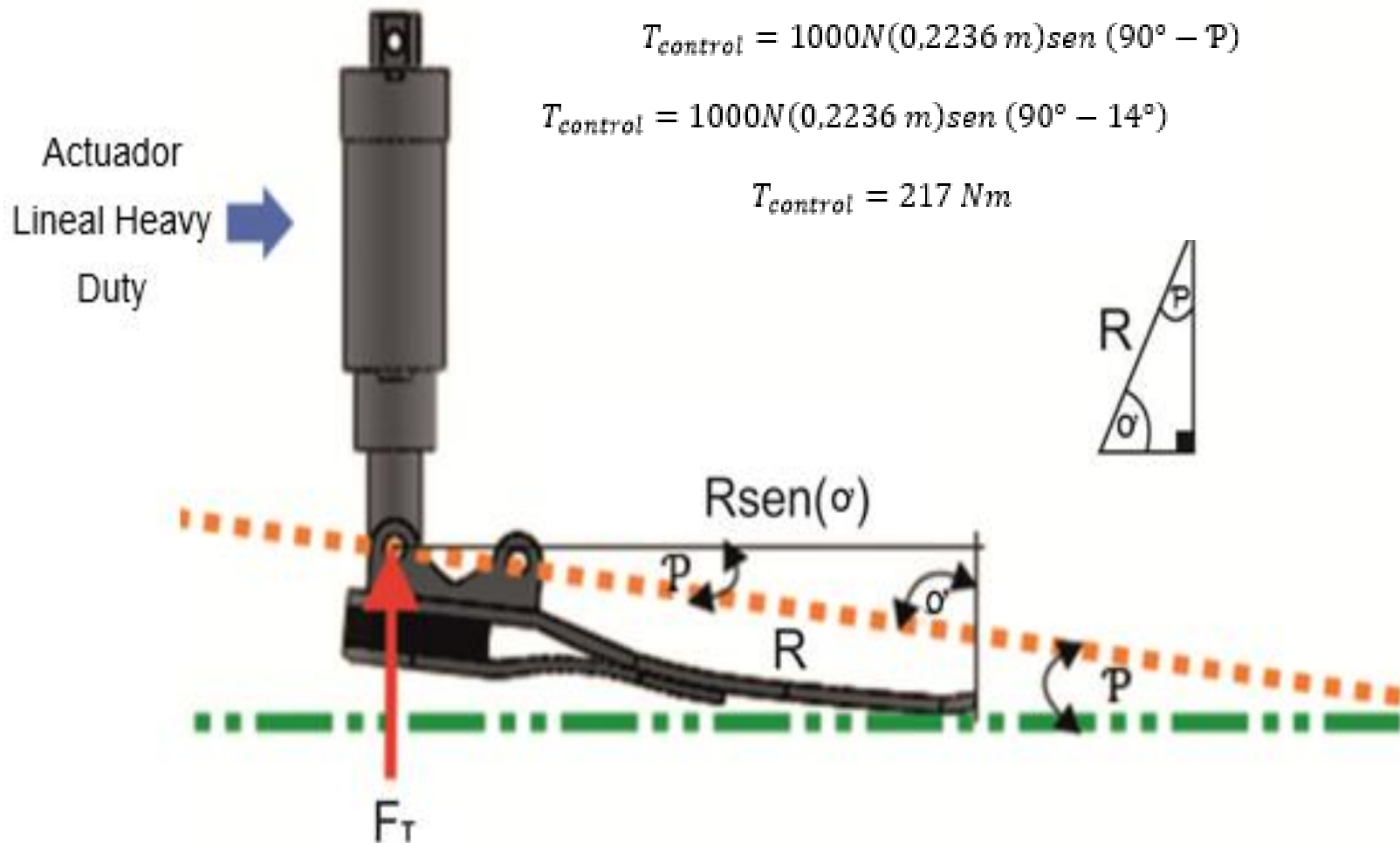
La fuerza de tensión ejercida por los músculos gastrocnemio y sóleo en el hueso calcáneo FT

Genera el impulso para cambiar el estado de rotación del pie alrededor del tendón de Aquiles

produciendo un torque que permite cumplir con el ciclo de marcha

el ángulo de giro debe ser controlado a partir de este torque.





$$T_{control} = F_T R \sin(\sigma)$$

$$T_{control} = 1000N(0,2236 m) \sin(90^\circ - P)$$

$$T_{control} = 1000N(0,2236 m) \sin(90^\circ - 14^\circ)$$

$$T_{control} = 217 Nm$$

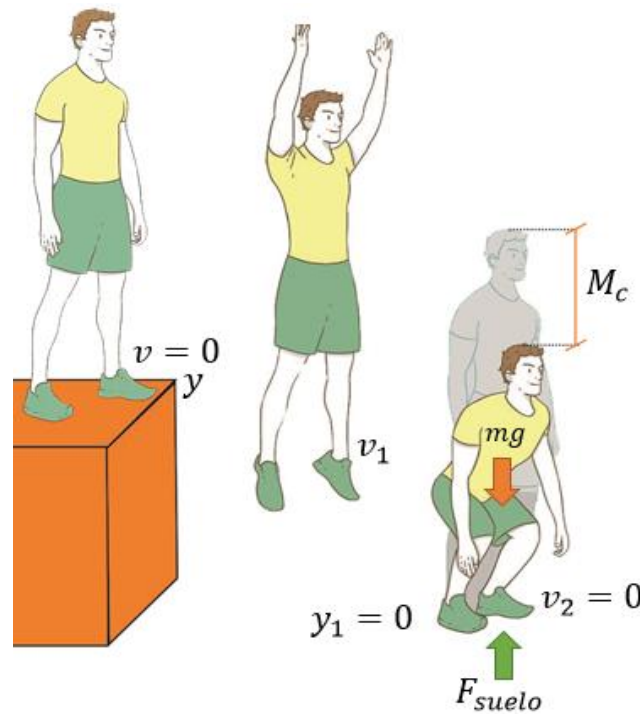


# Altura de Salto

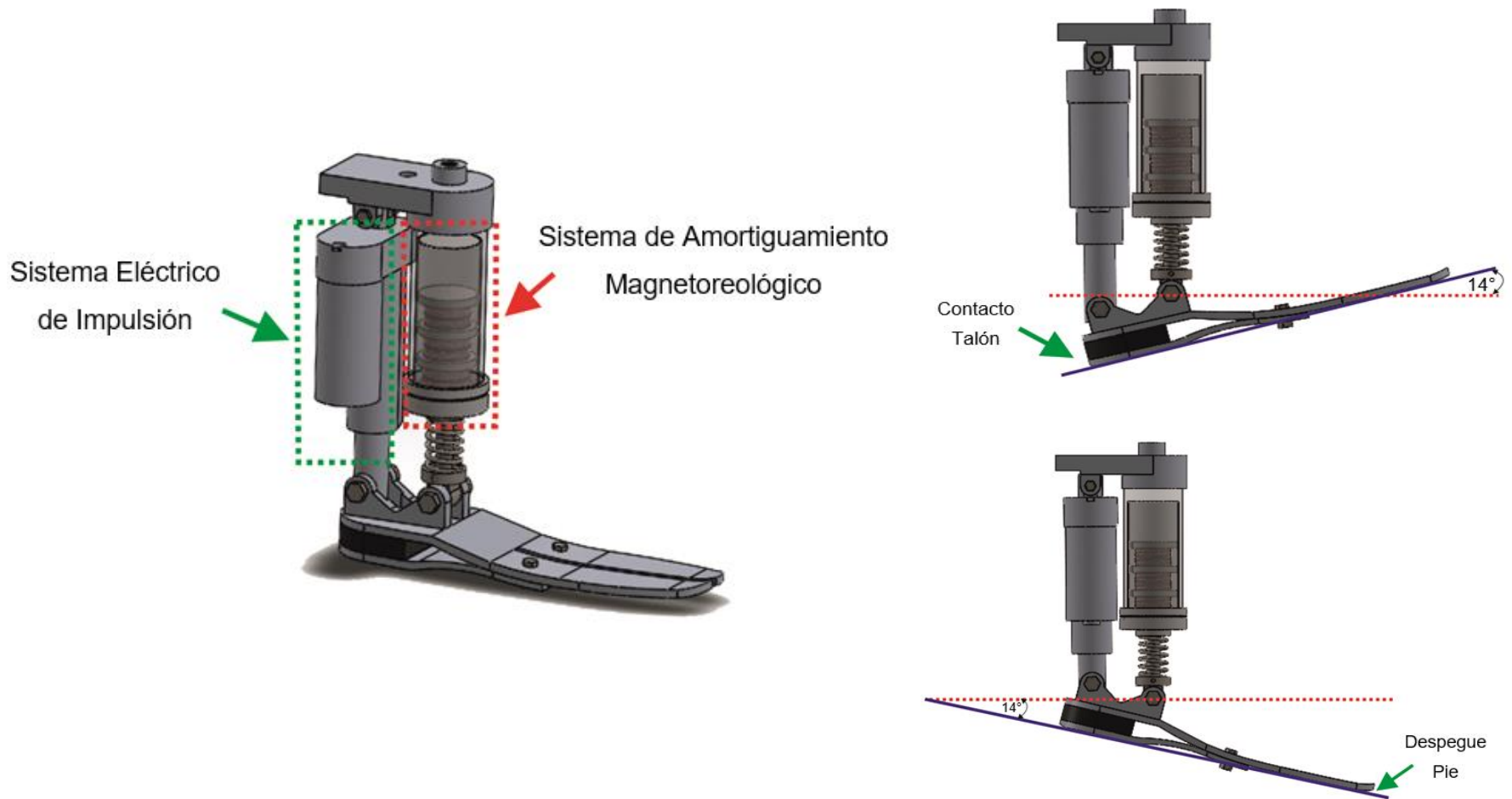
Altura de salto con relación al impulso experimental ejercido sobre el cuerpo

Fuerza máxima de impulso para un ser humano

Aproximadamente 2000N



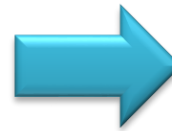
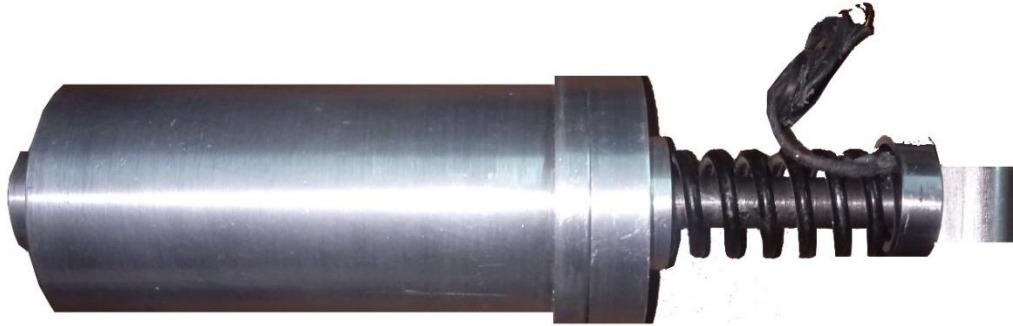
# Modelamiento Prototipo Protésico



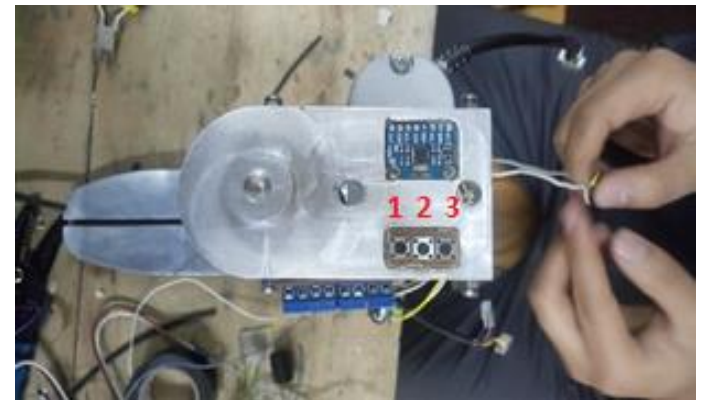
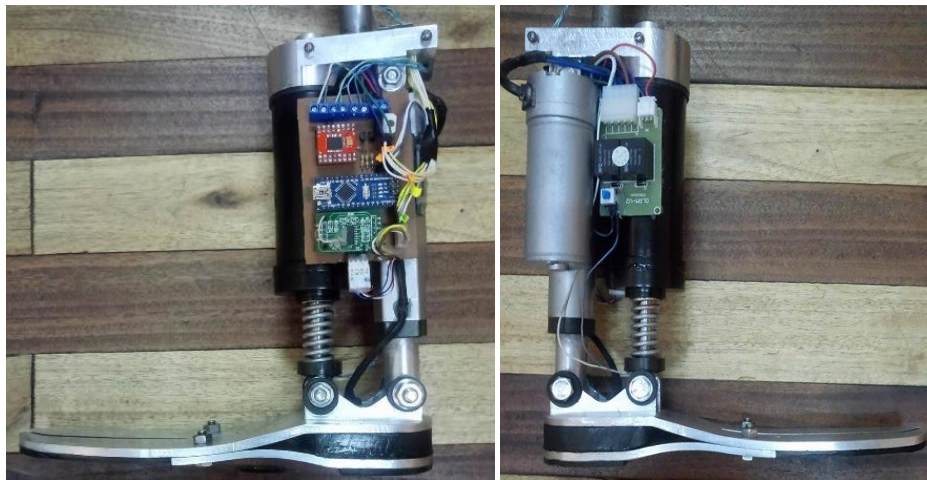
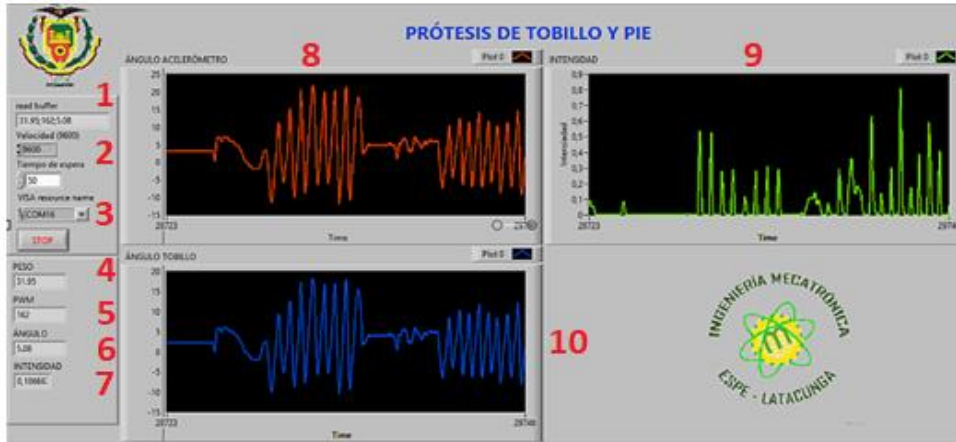
# IMPLEMENTACIÓN MECATRÓNICA



# Construcción Prototipo



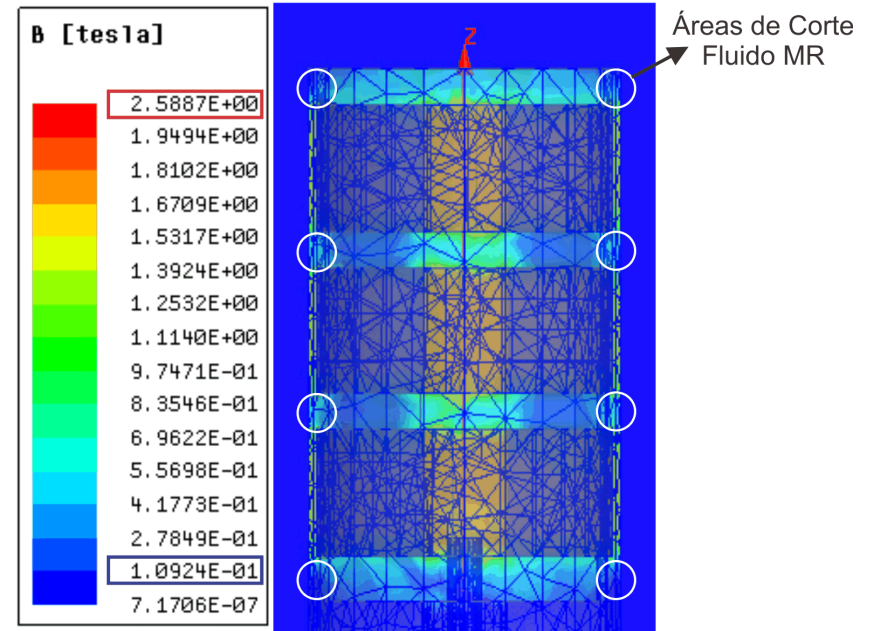
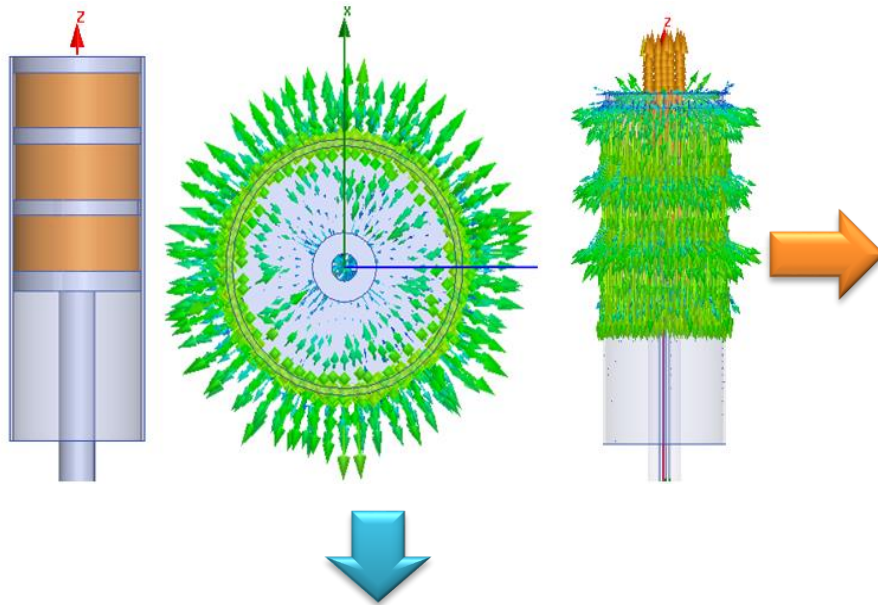
# IMPLEMENTACIÓN TOTAL



# PRUEBAS Y RESULTADOS



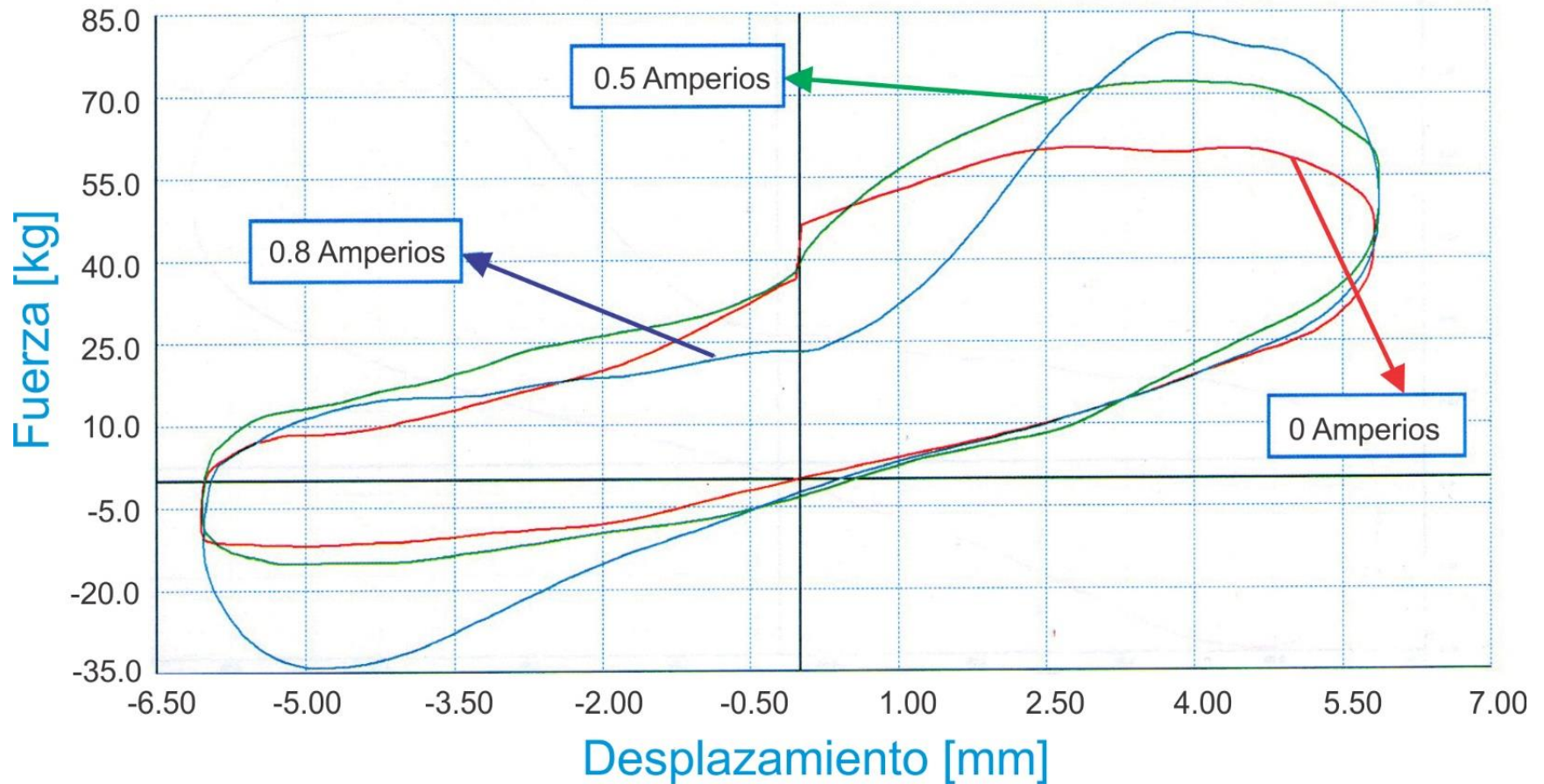
# Pruebas del sistema de inducción magnética



Componente	Campo Calculado	Campo Simulado	Campo Experimental
Embolo Superior	0,102 T	0,109 T	0,0924 T
Embolo Medio 1	0,102 T	0,109 T	0,0882 T
Embolo Medio 2	0,102 T	0,109 T	0,0879 T
Embolo Inferior	0,102 T	0,109 T	0,0878 T

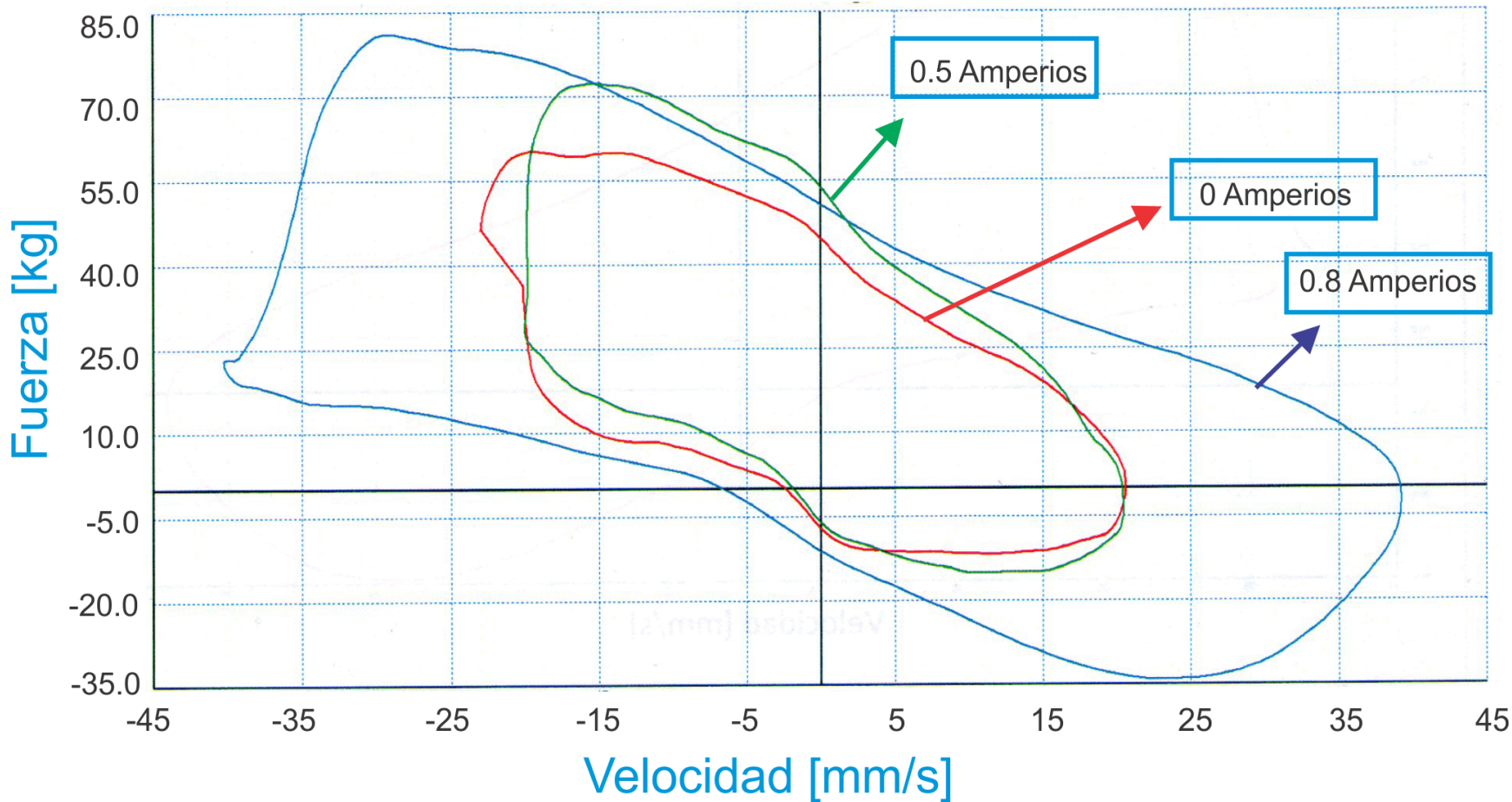
# Pruebas del actuador magnetoreológico





Corriente	Fuerza de Compresión	Fuerza de Extensión
0 Amperios	61,05 Kg	12,21 Kg
0,5 Amperios	72,45 Kg	15,87 Kg
0,8 Amperios	83,44 Kg	34,6 Kg





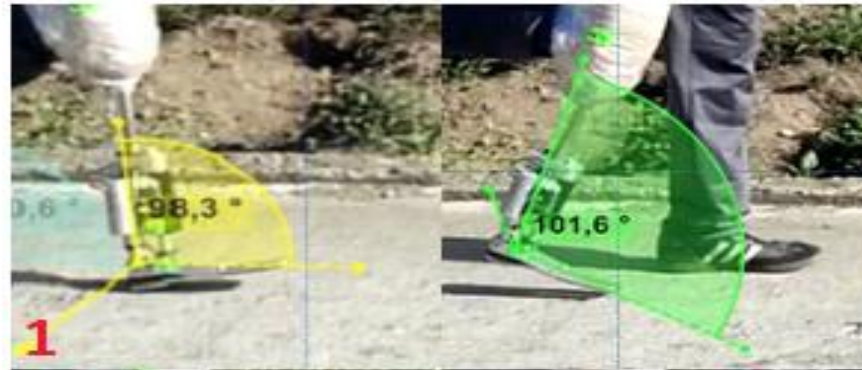
Corriente	Fuerza de Compresión	Velocidad
0 Amperios	61,05 Kg	20,14 mm/s
0,5 Amperios	72,45 Kg	19,77 mm/s
0,8 Amperios	83,44 Kg	39,56 mm/s
Corriente	Fuerza de Extensión	Velocidad
0 Amperios	12,21 Kg	20,63 mm/s
0,5 Amperios	15,87 Kg	20,51 mm/s
0,8 Amperios	34,6 Kg	39,28 mm/s



# Pruebas de funcionamiento del prototipo



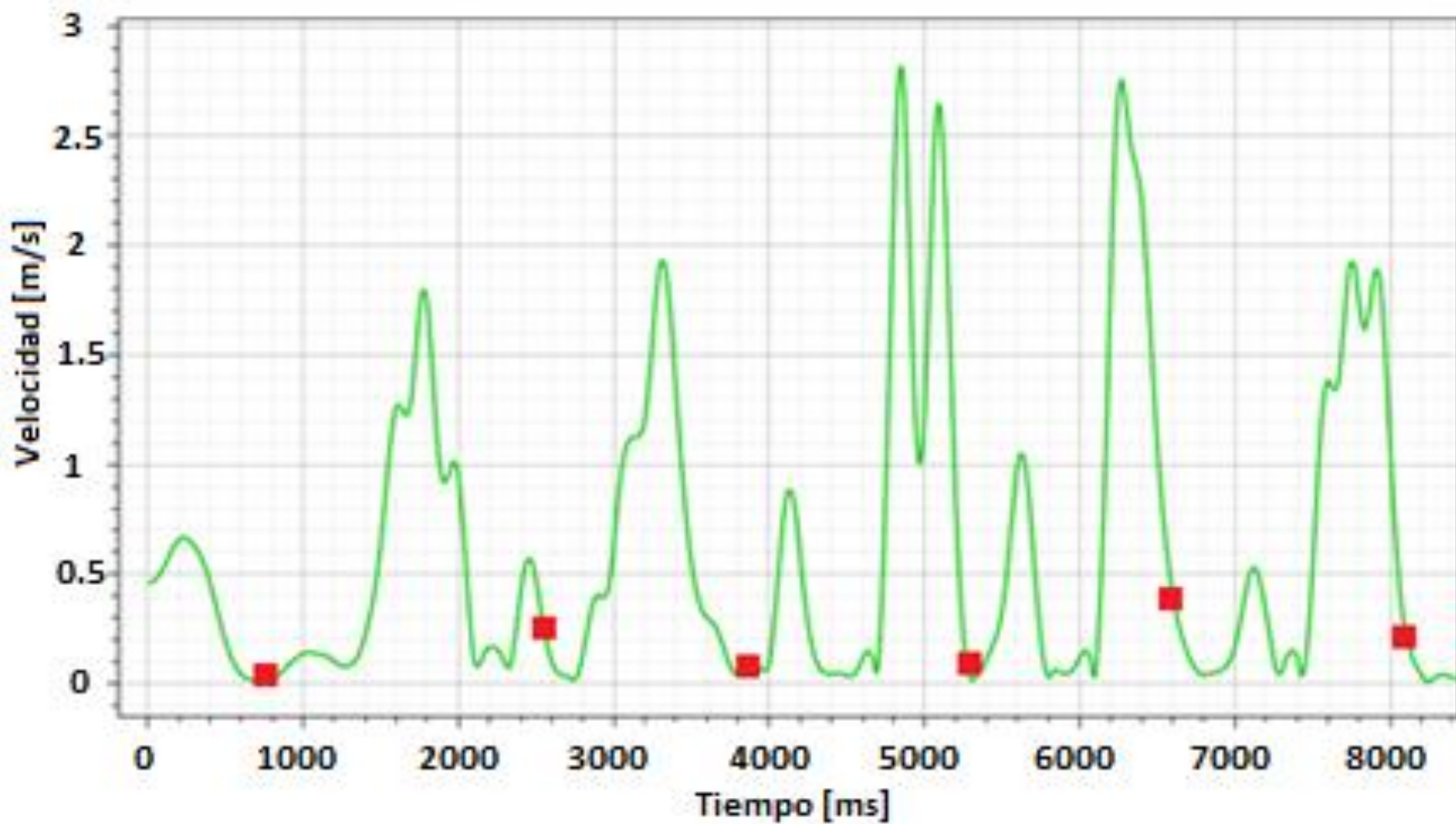
# Pruebas de sensores y ángulo del tobillo



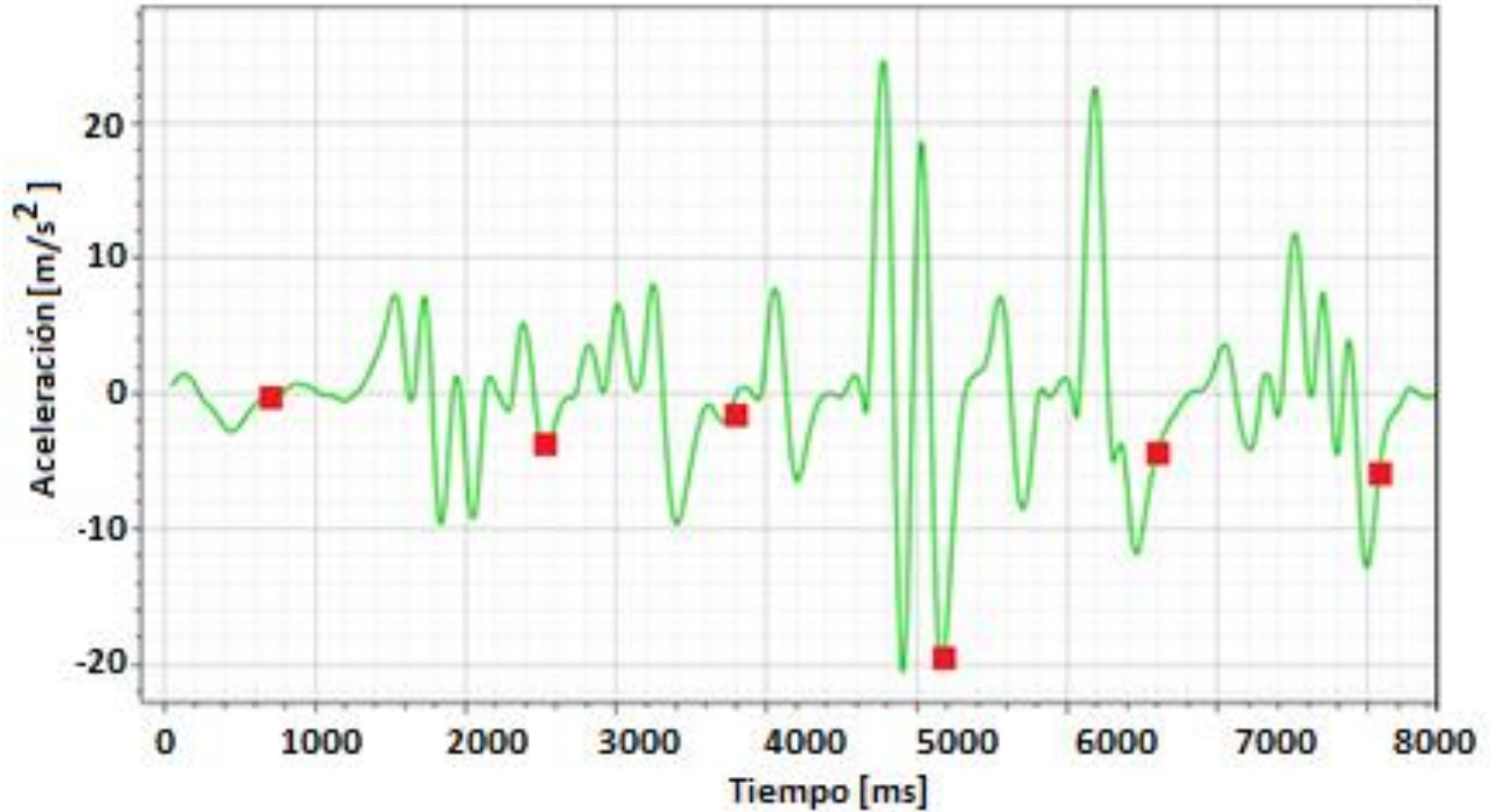
Ciclo	Contacto de talón		Despegue del pie	
	Sensor	Kinovea	Sensor	Kinovea
1	-7.5°	-8.3	12	11.6
2	-7.5°	-6.4	13.5	12.1
3	-7°	-6	12.5	11.8
4	-9	-8.3	13	12.5
5	-5°	-4.3	13.5	11.9
6	-6.5°	-5.1	13	12.5



# Pruebas de velocidad y aceleración

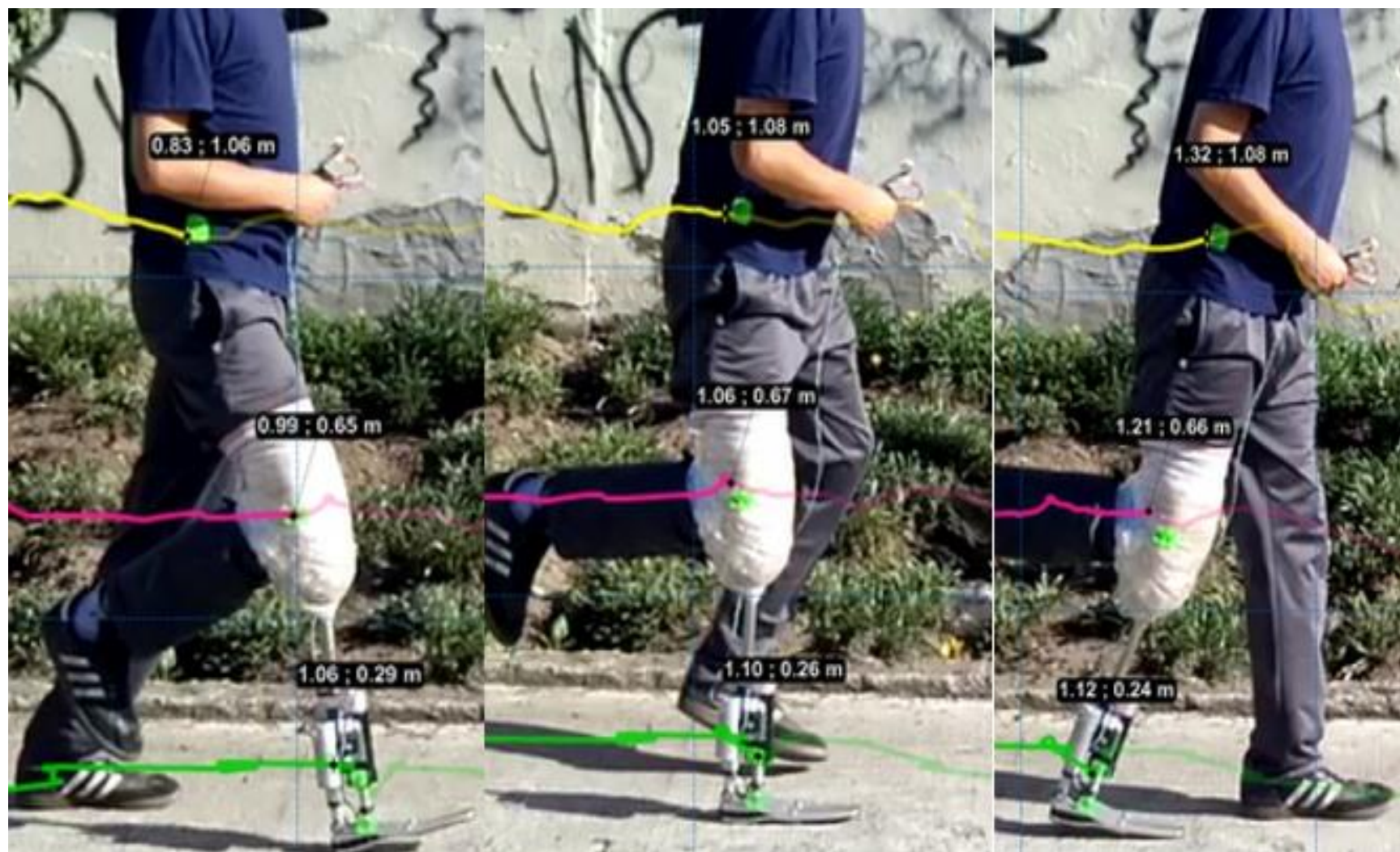


# Pruebas de velocidad y aceleración





# Pruebas del mecanismo protésico



# CONCLUSIONES

- La incorporación de fluidos magnetoreológicos en el prototipo permitió obtener una mejora en la funcionalidad del pie y una reducción de costos significativa en relación con las prótesis existentes en el mercado, tomándose como características más notables su respuesta rápida, su interfaz simple entre la entrada de energía eléctrica y su potencia mecánica de salida, así como también su controlabilidad e integración en el sistema protésico.
- El mecanismo imita satisfactoriamente la acción de locomoción durante un ciclo de marcha, dado que al hacer contacto el talón con el suelo, el centro de masa del cuerpo desciende y el tobillo tiende a desacelerarlo, acción que está representada por el sistema magnetoreológico.



# CONCLUSIONES

- Durante las pruebas de marcha incorporado el uso del muñón, el sistema fue capaz de imitar el ángulo y los patrones de torque del tobillo humano, para una velocidad de zancada de hasta 2,8 m/s, en donde la potencia necesaria para el empuje del tobillo fue lograda gracias al uso del actuador lineal Heavy Duty.
- El empleo del amortiguador magnetoreológico en la prótesis de tobillo pie resulta ser adecuado, puesto que el mismo tiende a frenar la inercia corporal producida durante el contacto inicial del talón con el suelo, es decir el prototipo cumple eficazmente con la acción de amortiguación y absorción del impacto.



# CONCLUSIONES

- El incremento paulatino de carga útil en correlación con la frecuencia de movimiento durante el ciclo de marcha tiende a intensificar la temperatura del sistema magnetoreológico, sin embargo, esta no llega a superar los 27,1°C.
- Las dimensiones y la permeabilidad del material resultaron ser vitales al momento de construir el sistema de inducción magnética, a razón de que, la bobina en forma de solenoide es la que mayor densidad de flujo magnético presentó en su extremo, permitiendo restringir el paso del fluido de una manera eficaz y acorde a lo requerido.



# RECOMENDACIONES

- Se debe analizar y evaluar detenidamente los resultados simulados y las características globales del sistema de inducción magnética, a fin de poder generar cambios si es necesario antes de proceder a su respectiva construcción.
- Para el desarrollo de futuros proyectos se puede maximizar el índice de amortiguación en función del campo magnético aumentando la resistividad de las bobinas, ya sea cambiando el grosor del alambre de cobre o mediante la implementación de elementos pasivos.

# RECOMENDACIONES

- Debido a la gran cantidad de corriente que requiere el cilindro eléctrico para soportar la carga de 1000N se debe tener precauciones al momento de diseñar el control mediante la tarjeta Arduino por lo cual se aconseja utilizar conmutadores de alta capacidad para evitar daños en la placa de control.
- Se debe generar e impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías en nuestro país, tomando como punto de referencia los estudios y avances ya existentes como es el caso de prototipos protésico que implementan sistemas de suspensión semiactivo, específicamente amortiguadores magnetoreológicos.