



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Ingeniería Mecatrónica

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA
MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
PRÓTESIS TRANSTIBIAL CON AMORTIGUAMIENTO ACTIVO
MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE
MATERIALES MAGNETOREOLÓGICOS BAJO DIFERENTES
CAMPOS MAGNÉTICOS”**

**ERAZO BRAVO MARÍA INÉS
MERA OTOYA ERICK PAUL**

TUTOR: ING. OSCAR ARTEAGA





- Oscar Arteaga, Diego Camacho, Segundo M. Espín, **Maria I. Erazo**, Victor H. Andaluz, M. Mounir Bou-Ali, Joanes Berasategi, Alvaro Velasco, **Erick Mera**. “**Characteristics of Magnetorheological Fluids Applied to Prosthesis for Lower Limbs with Active Damping**”, 7th iCatse International Conference on IT Convergence and Security, 2017.



- Oscar Arteaga, **Maria I. Erazo**, Hector C. Terán, Diego Camacho, Alvaro Velasco, **Erick Mera**, M. Mounir Bou-Ali, Joanes Berasategi. **“Characteristics of Magnetorheological Fluids Applied to Prosthesis for Lower Limbs”**, 2017 3rd Advanced Research in Material Sciences, Manufacturing, Mechanical and Mechatronic Engineering Technology International Conference.



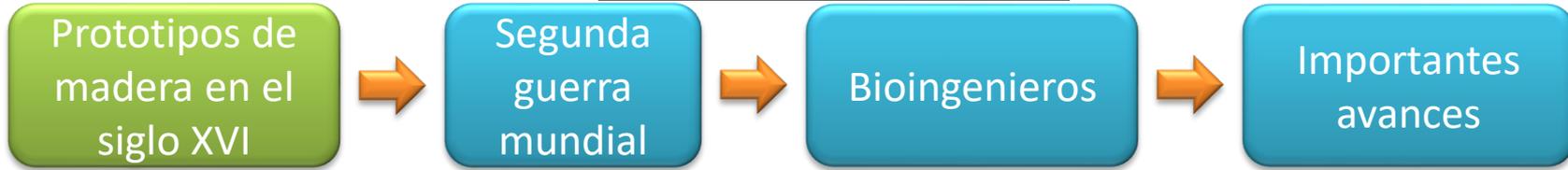
- **“PRÓTESIS TRANSFEMORAL CON FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS”**, 2017
I Encuentro Regional hacia la construcción de políticas públicas sobre Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) para personas con discapacidad, en el marco de Evento Global “Construyendo Igualdad”, organizado por la Oficina de la UNESCO en Quito y Representación para Bolivia, Colombia, Ecuador y Venezuela y el Consejo Nacional para la Igualdad de las Discapacidades (CONADIS).

INTRODUCCIÓN





ANTECEDENTES

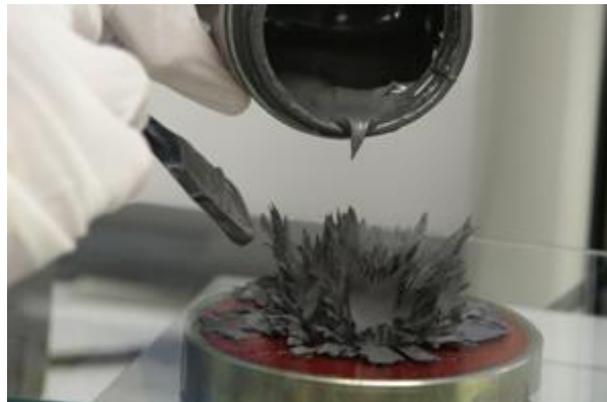
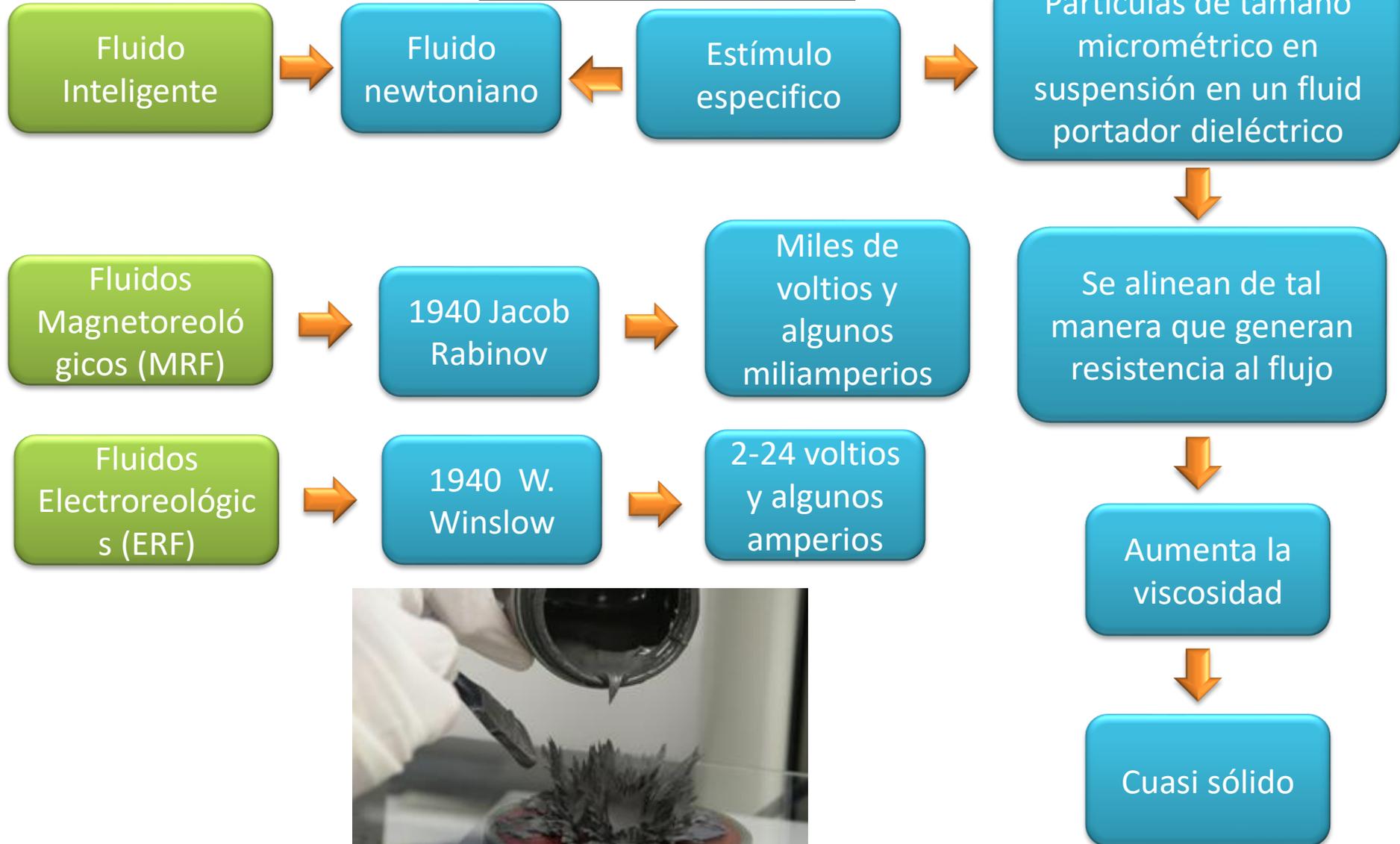


World Health Organization



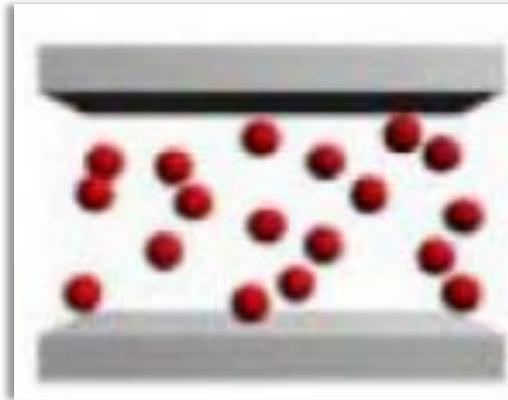


ANTECEDENTES

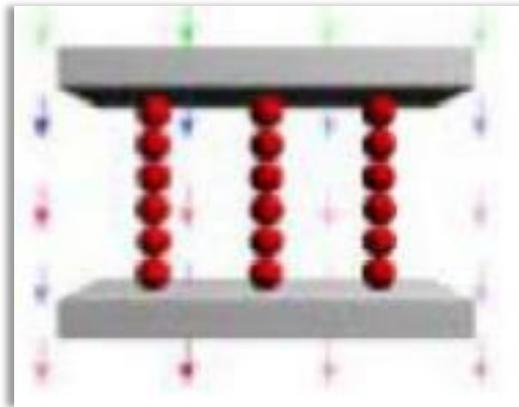




FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS (MRF)



MRF en estado desmagnetizado



MRF en estado magnetizado



PROPUESTA

Investigación del comportamiento de materiales magnetoreológicos



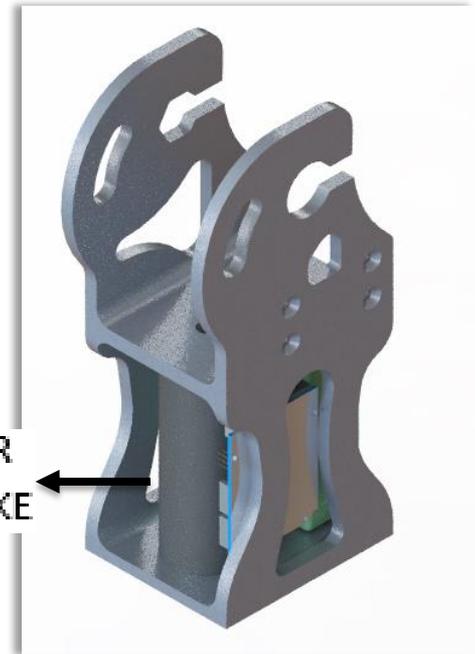
Implementación Prótesis transtibial con amortiguamiento activo



Bajo diferentes campos magnéticos



MR DAMPER
SHORT STROKE



Fluidos Magnéticos



Maestría en Educación Científica
QA Inés Germácho Argüero



OBJETIVO GENERAL

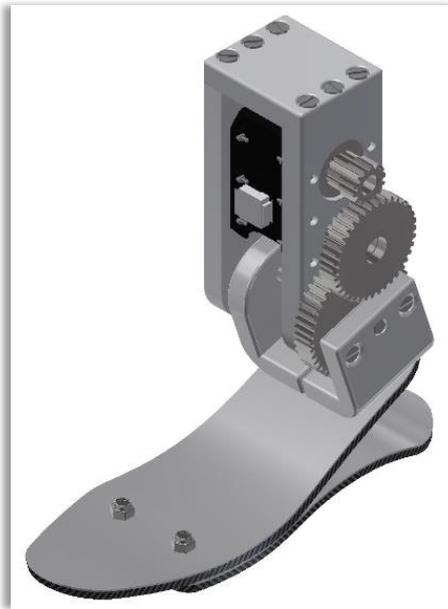
- Investigar el comportamiento de materiales magnetoreológicos bajo diferentes campos magnéticos para el diseño e implementación de un prototipo de prótesis transtibial con amortiguamiento activo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

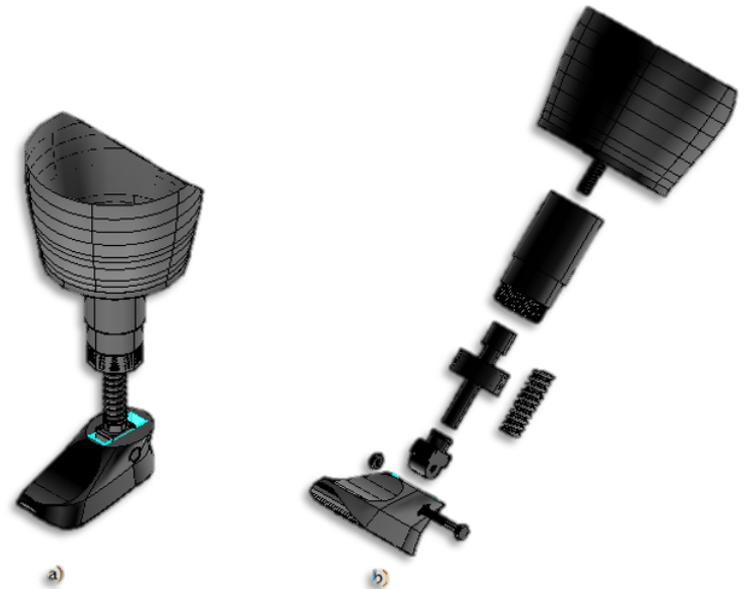
- Construir una prótesis mediante el uso de actuadores hidráulicos para extremidades inferiores con amortiguamiento.
- Implementar fluidos magnetoreológicos en la prótesis construida, a fin de generar amortiguamiento activo.
- Proponer un esquema de control que permita maniobrar los actuadores de la prótesis para replicar la marcha humana.
- Realizar evaluaciones experimentales de la prótesis desarrollada para comprobar la incidencia del esquema de control en el amortiguamiento activo.



TRABAJOS PREVIOS



**Diseño y Construcción de Prótesis de
Miembro Inferior Monitoreado desde un
Computador Personal**
Ecuador



**Diseño de una Prótesis Transtibial
Amortiguada**
México



DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES





A. COMPORTAMIENTO DE MATERIALES MAGNETOREOLÓGICOS BAJO DIFERENTES CAMPOS MAGNÉTICOS

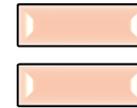
Reómetro
rotacional
de MRC-501
(Anton Paar
Physica)



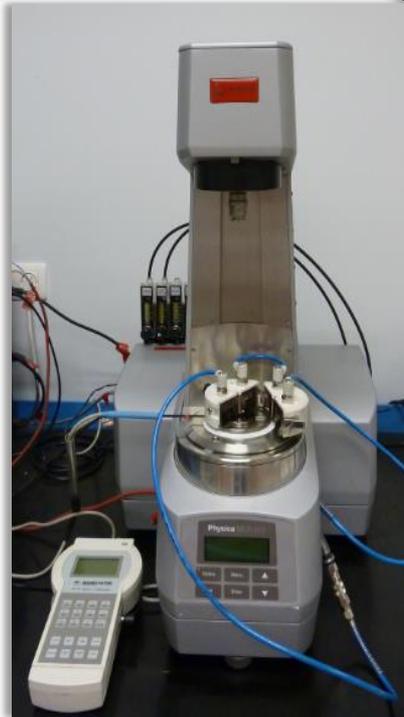
Célula
MRD-
70/1T



Baño
termo-
estático
Jubalo F-25



Caracterización
magnetoreológi-
ca del fluido
MRF-140CG





El comportamiento de los MRF se representa como un plástico de Bingham el cual tiene un límite elástico variable. En este modelo el flujo es gobernado por la ecuación:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}$$

Donde:

τ : Esfuerzo total.

$\tau_y(H)$: Esfuerzo ejercido sobre el eje, dependiente del campo magnético aplicado.

η : Viscosidad del fluido.

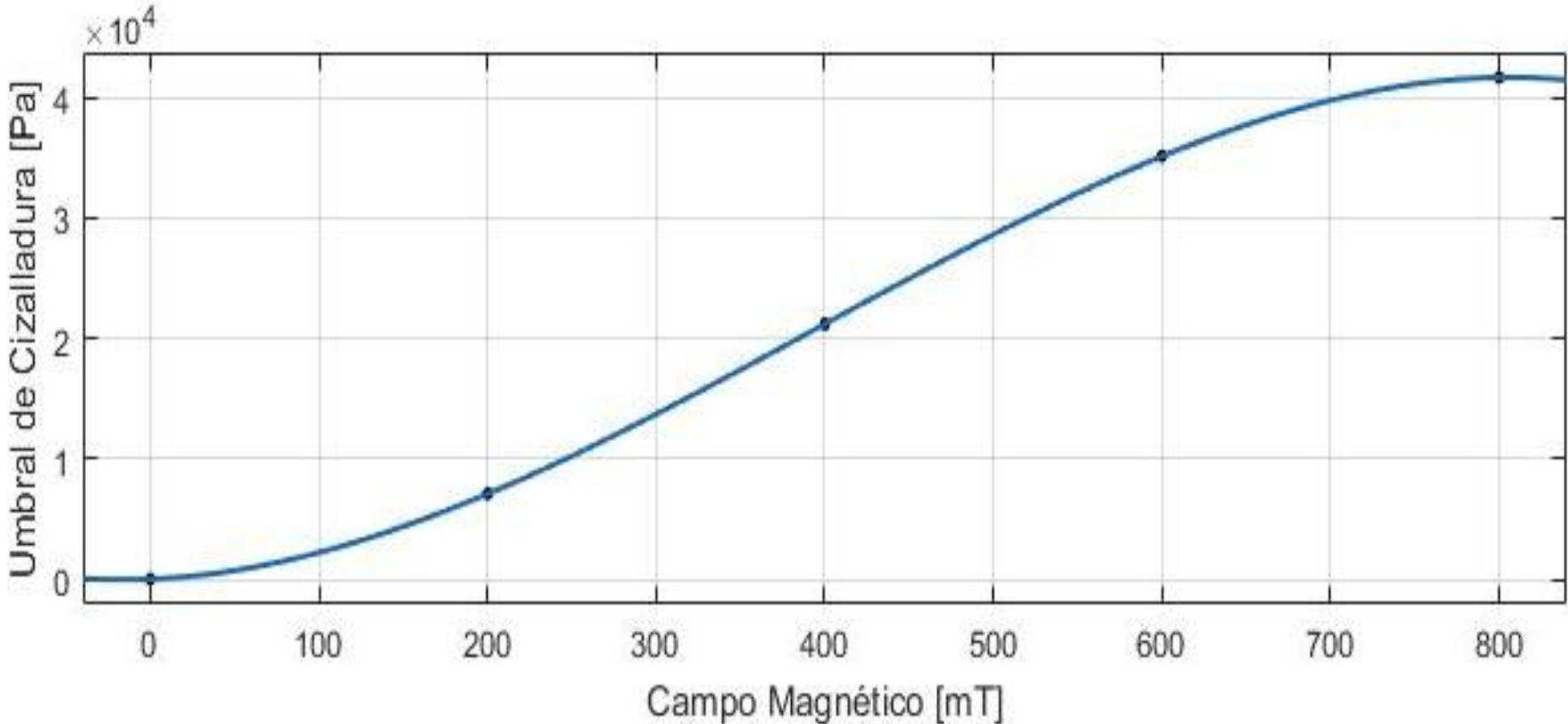
$\dot{\gamma}$: Tasa de corte que generan las microesferas en el proceso dado.

Datos
experimentales
a 0 [A] Y 20 [°C]



$$\tau = 29.8 + 1.338 \dot{\gamma}$$





Umbral de cizalladura Vs Campo Magnético a 20 [°C].

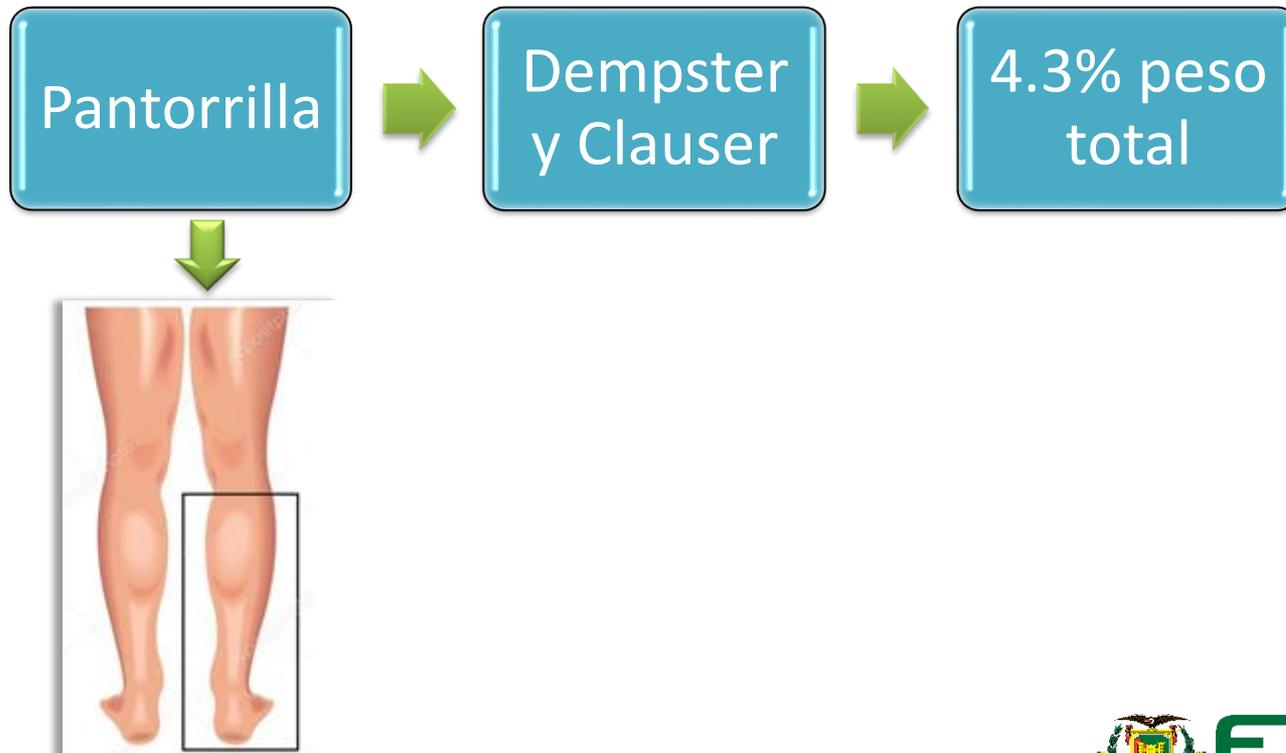


$$\tau_y(H) = 35117.639 [Pa]$$



B. PARÁMETROS DE DISEÑO

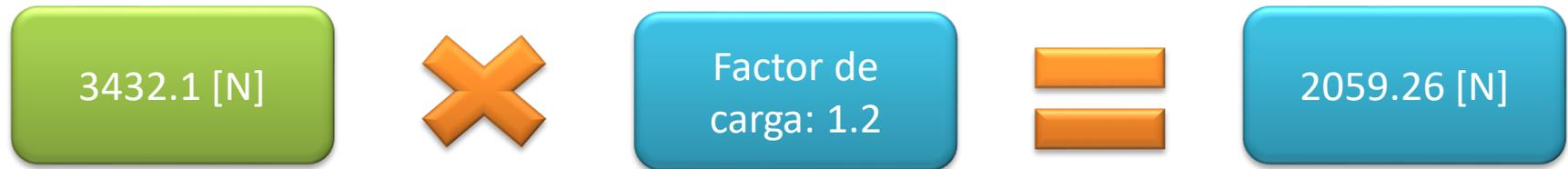
Altura[mm]	Peso [kg]
1.700	70





B. PARÁMETROS DE DISEÑO

Fuerza



La Longitud



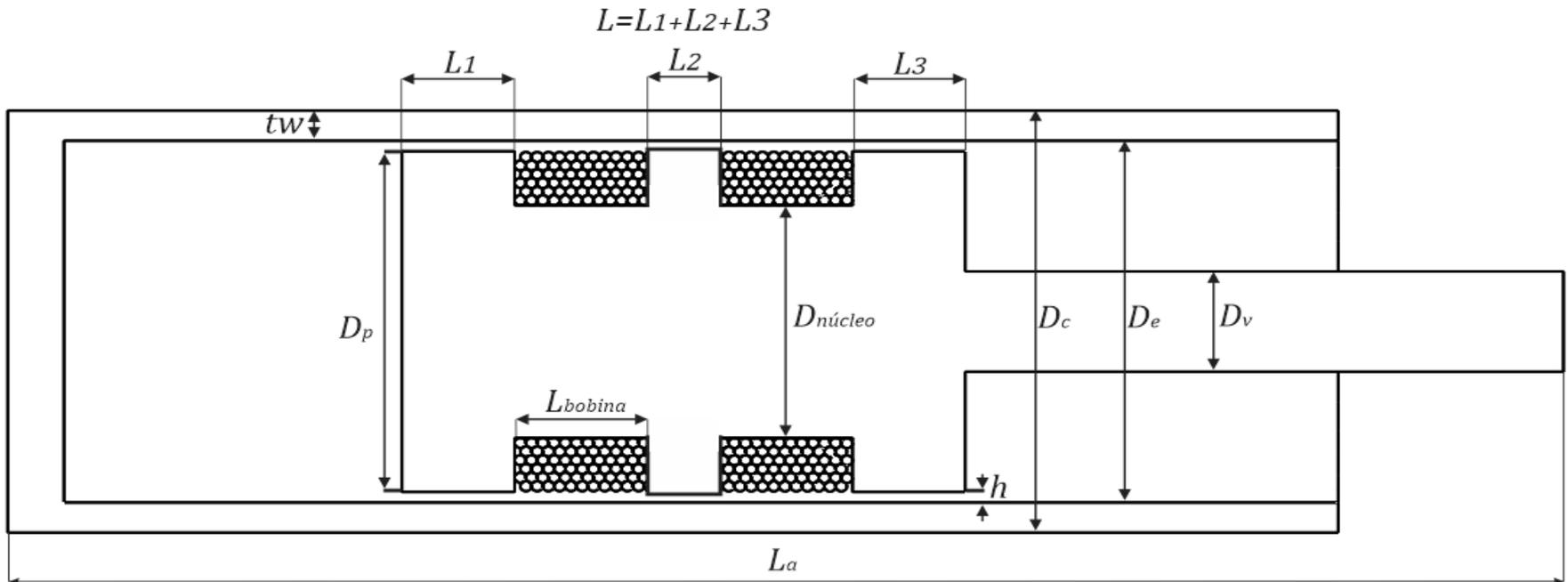


C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

Parámetro	Valor
Viscosidad Plástica η [$Pa \cdot s$]	1.338
Esfuerzo de cizallamiento $\tau_y(H)$ [Pa]	35117.639
Carrera c_t [m]	0.055
Carrera de Amortiguamiento c_a [m]	0.020
Diámetro Exterior del cuerpo D_c [m]	0.0421
Espesor del cuerpo t_w [m]	0.006
Longitud extendida L_a [m]	0.208
Diámetro del vástago D_v [m]	0.01
Diámetro externo D_e [m]	0.0301
Longitud del polo L [m]	0.01
Diámetro del núcleo $D_{núcleo}$ [m]	0.022
Longitud de la bobina L_{bobina} [m]	0.01



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

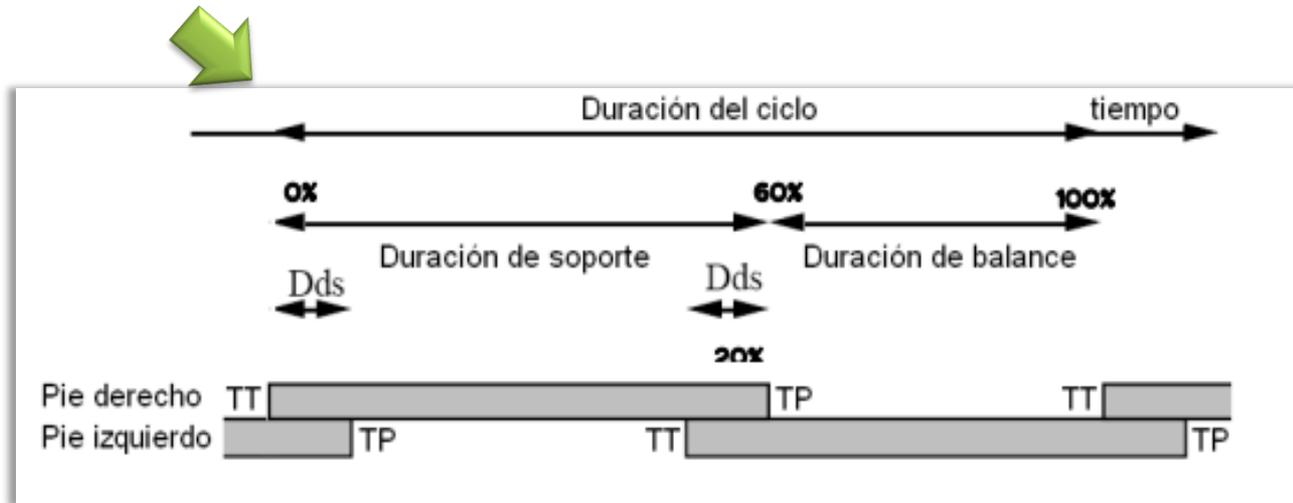


Esquema amortiguador MR



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

Ciclo de marcha :
1.14 [s]



40% apoyo
sencillo

0.456 [s]

$$V_a = 0.044 \left[\frac{m}{s} \right]$$



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

1. Determinación del Rango Dinámico

Fuerza total amortiguador

F_τ : Fuerza controlable, dependiente de un esfuerzo de cizallamiento controlado $\tau_y(H)$.

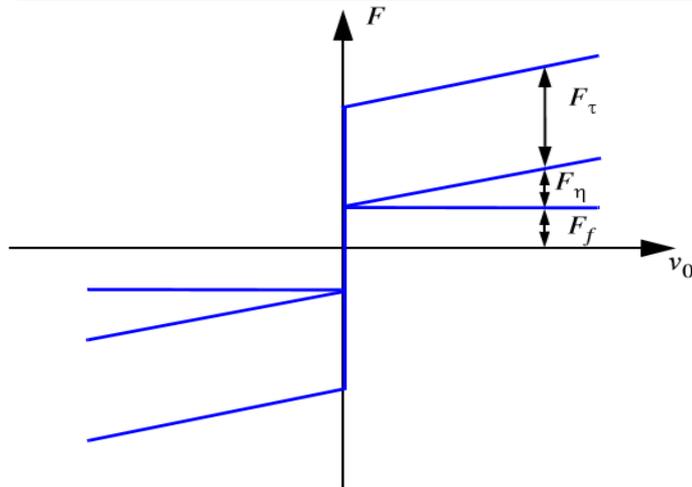
F_{uc} : Fuerza incontrolable

F_η : Fuerza de viscosidad plástica

F_f : Fuerza de fricción

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whV_a}{2Q}\right) \frac{12 \eta Q L A_P}{wh^3}$$

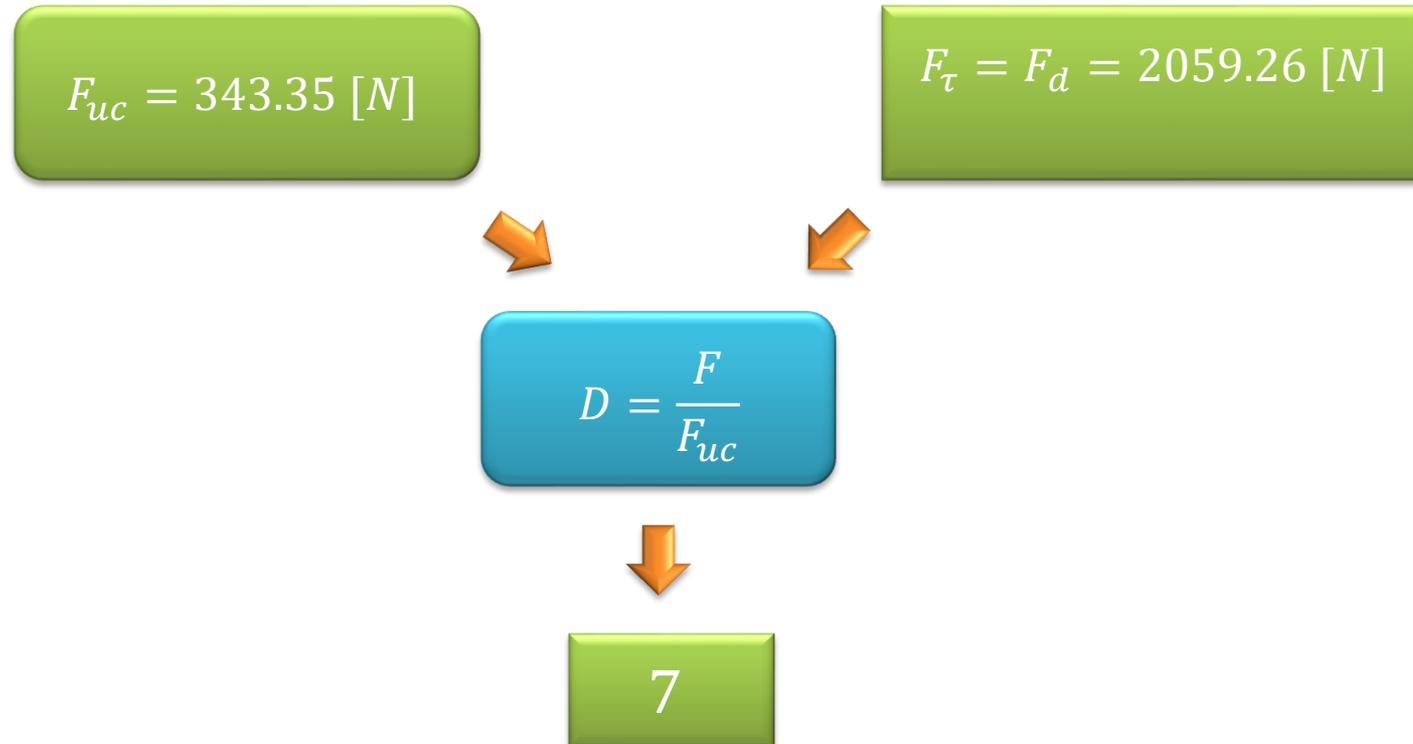
$$F_f = c \frac{\tau_y(H) L A_P}{h} \text{sgn}(V_a)$$





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

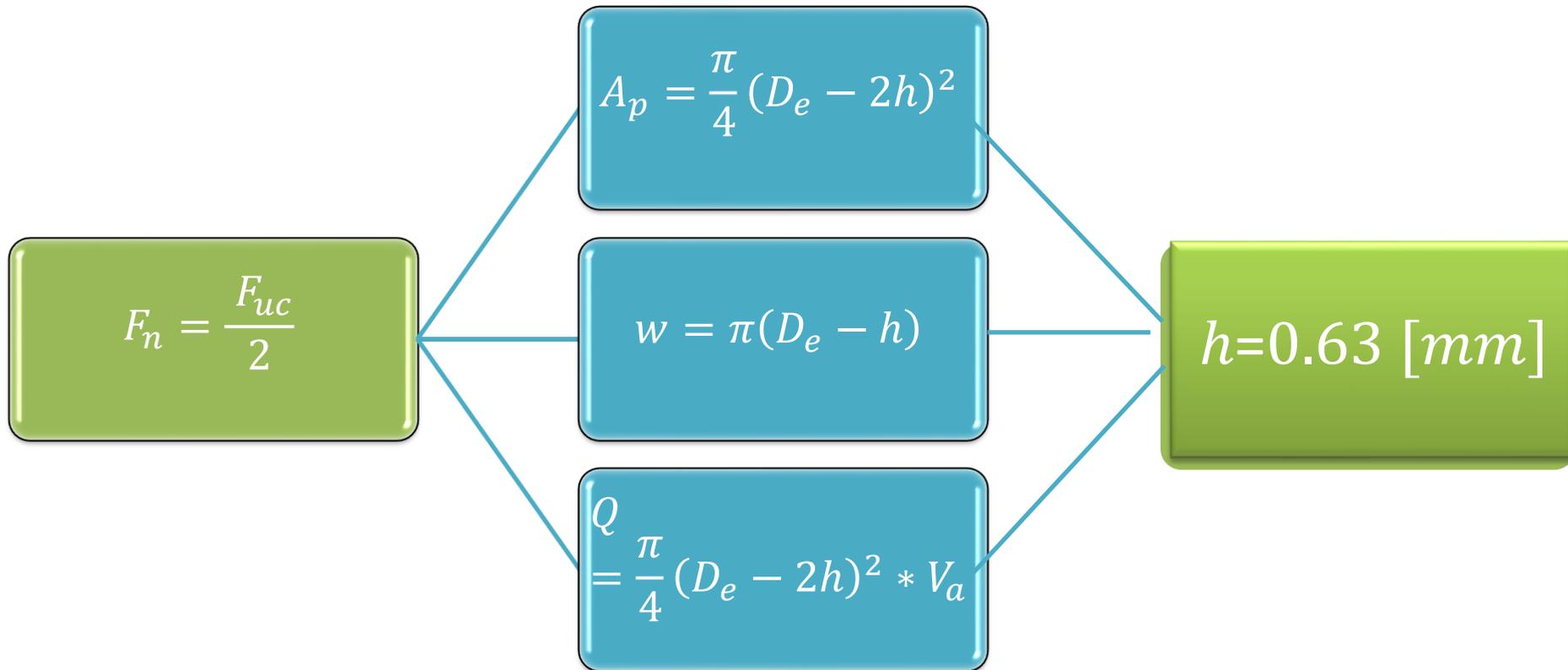
1. Determinación del Rango Dinámico





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

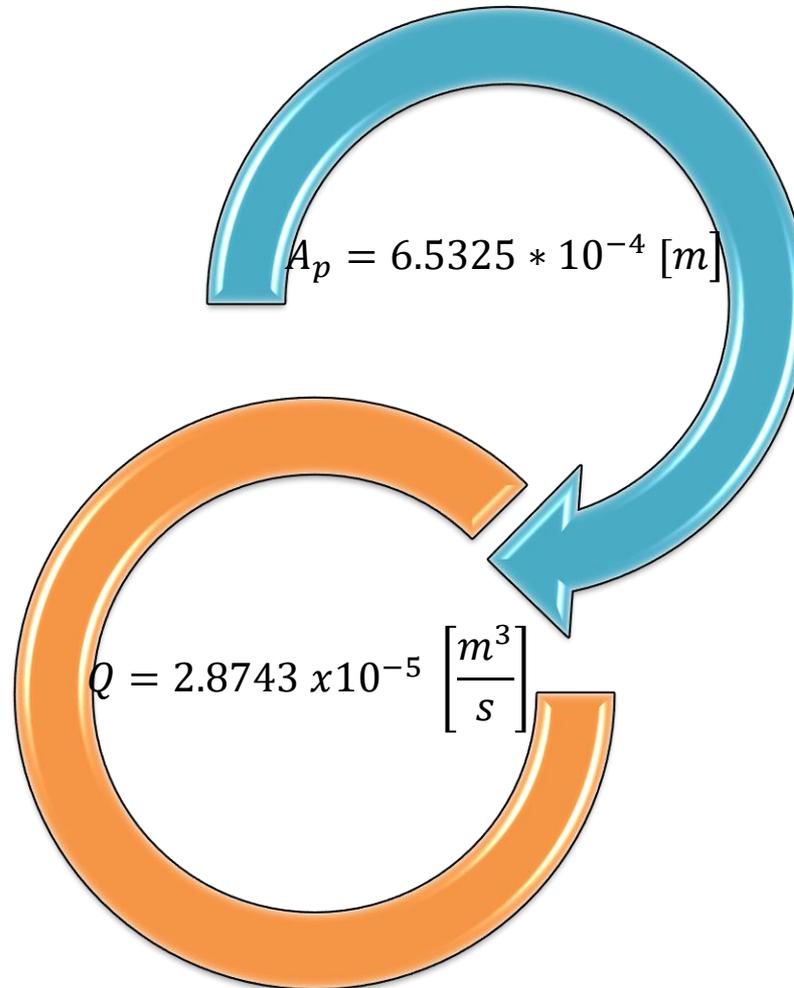
2. Determinación del Ducto Anular





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

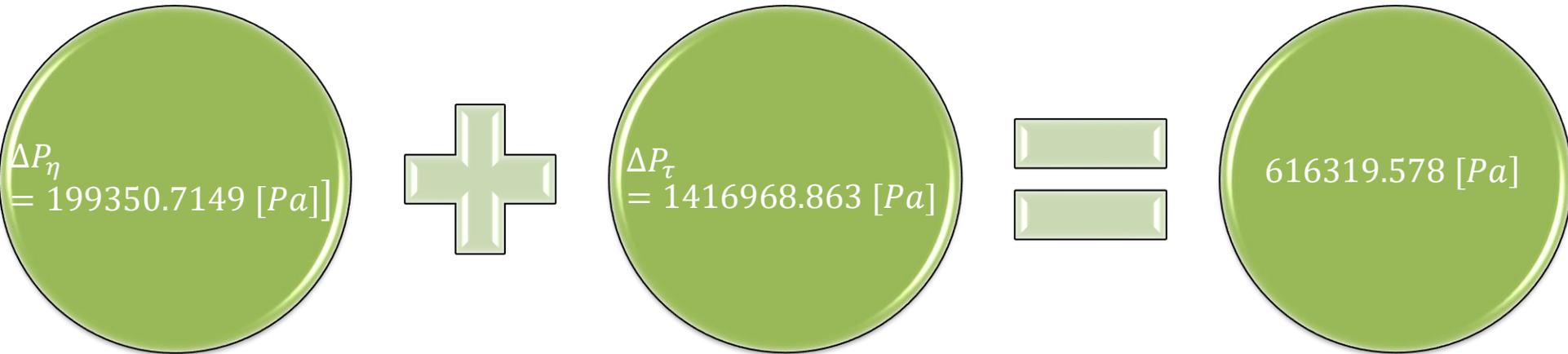
3. Determinación del Área y Caudal





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

4. Determinación de Presiones



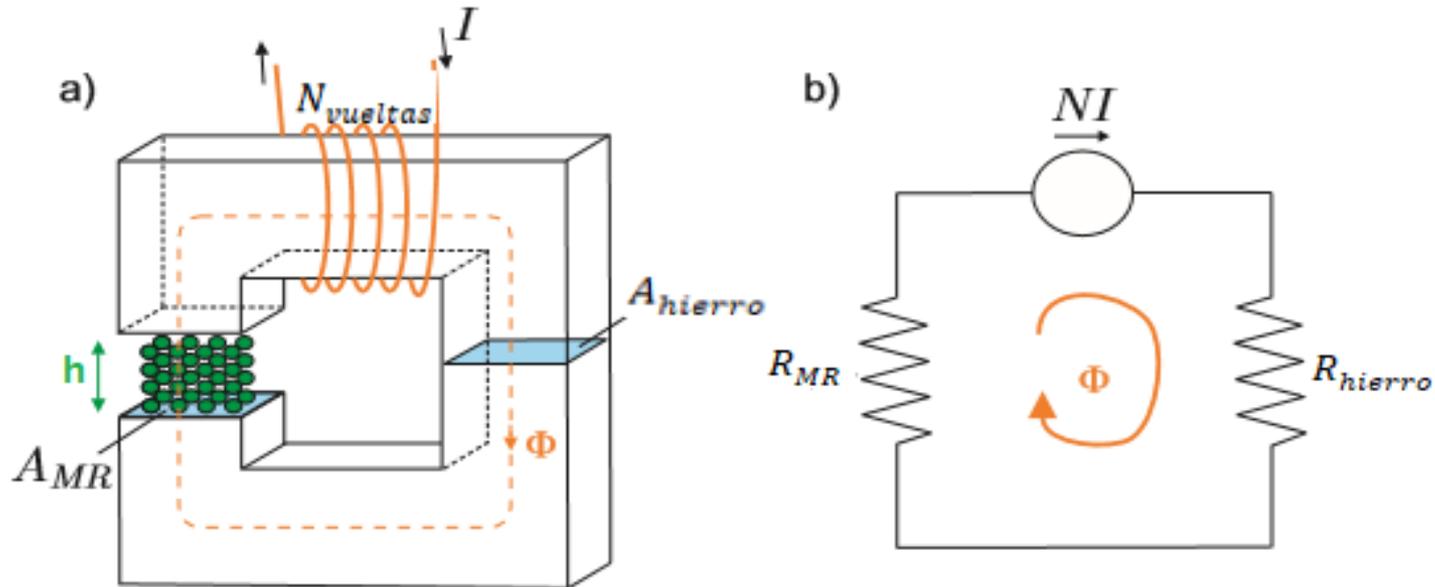
5. Determinación del Volumen



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

6. Diseño Magnético

Configuración del núcleo magnético con un gap lleno de fluido MR



a) Circuito Magnético b) Equivalente Eléctrico



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

6. Diseño Magnético

ley de voltaje de Kirchhoff's

$$H_{MR} = \frac{\Phi}{\mu_{MR} A_{MR}} = \frac{N_{vueltas} I}{h + l_{bobina} \left(\frac{\mu_{MR}}{\mu_{Acero}} \right) \left(\frac{A_{MR}}{A_{Acero}} \right)}$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \left[\frac{\text{Henry}}{\text{m}} \right]$$

$$H_{MR} = 70000 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

$$\mu_{MR} = \frac{B}{\mu_0 H_{MR}}$$

$$\mu_{Acero} = 100$$

$$N_{vueltas} = 35$$

cable de cobre
AWG 20

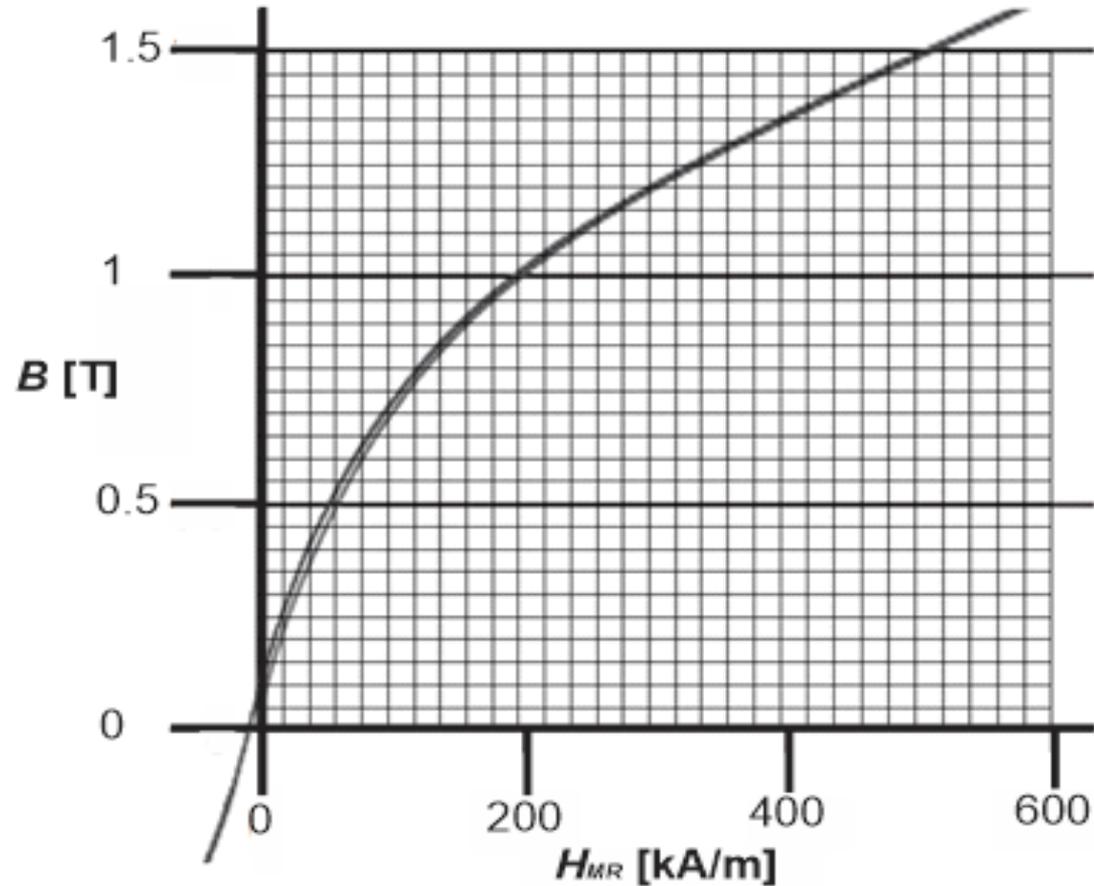
$$N_{capas} = 2.92 \approx 3$$





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

6. Diseño Magnético

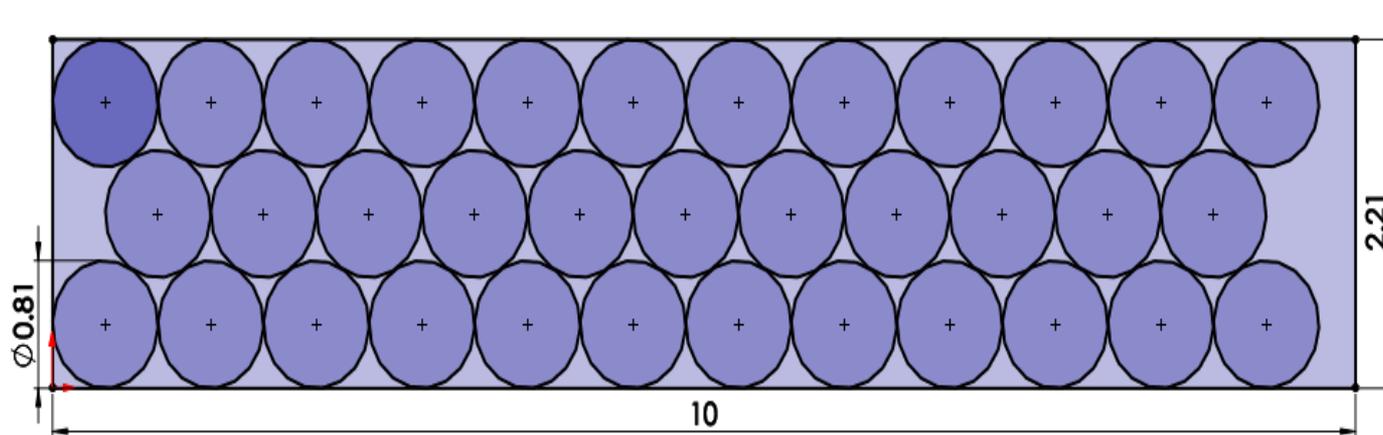


Propiedades Magnéticas Típicas

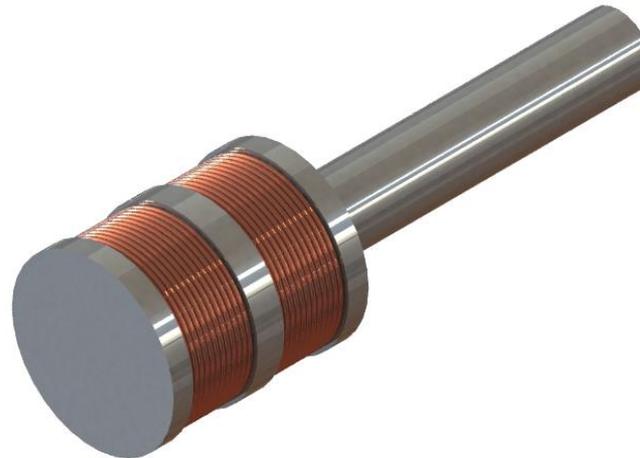


C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

6. Diseño Magnético



Área del bobinado alrededor del núcleo

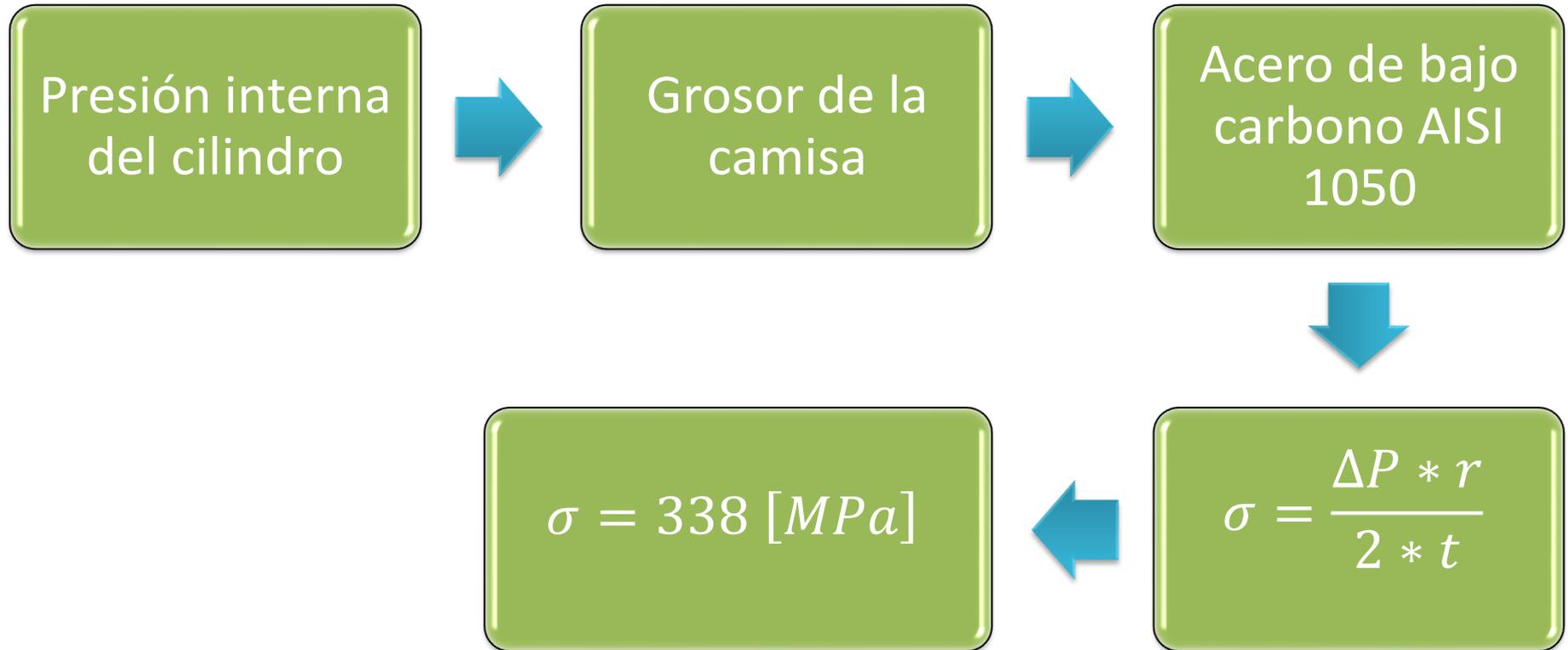


Distribución de Bobinas



C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

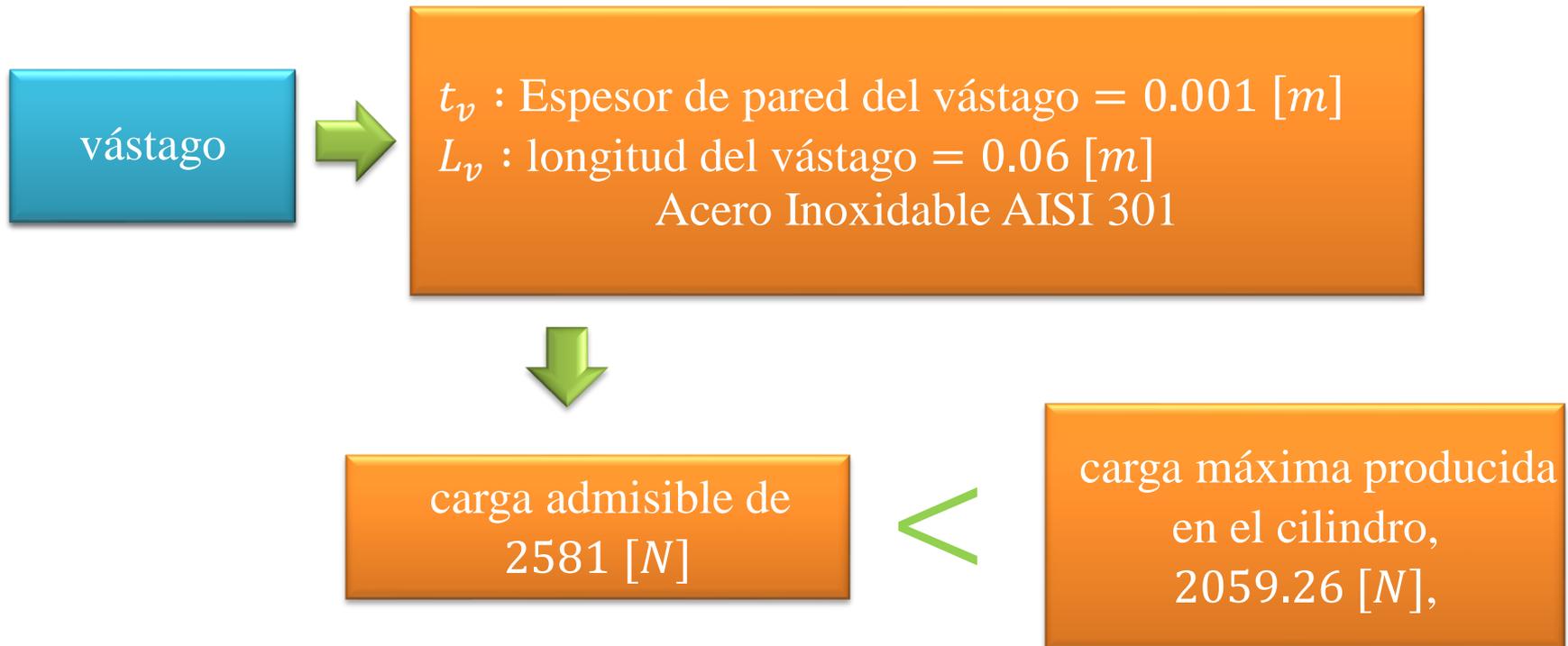
7. Diseño Mecánico del Amortiguador





C. DISEÑO DEL AMORTIGUADOR

7. Diseño Mecánico del Amortiguador





D. SELECCIÓN AMORTIGUADOR

Fuerza máxima=2059.26 [N]
Carrera máxima= 0.04 [m]
diámetro exterior= 0.0421 [m]



RD-8040-1 de LORD





E. DISEÑO RESORTE

L_f = Longitud libre = 35 [mm]

L_i = Longitud instalado = 30 [mm]

L_o = Longitud operación = 20 [mm]

ID = Diámetro interior = 18 [mm]

D_m = Diámetro medio = 20 [mm]



alambre de acero
ASTM A231



$N_a = 2.5 \approx 4$

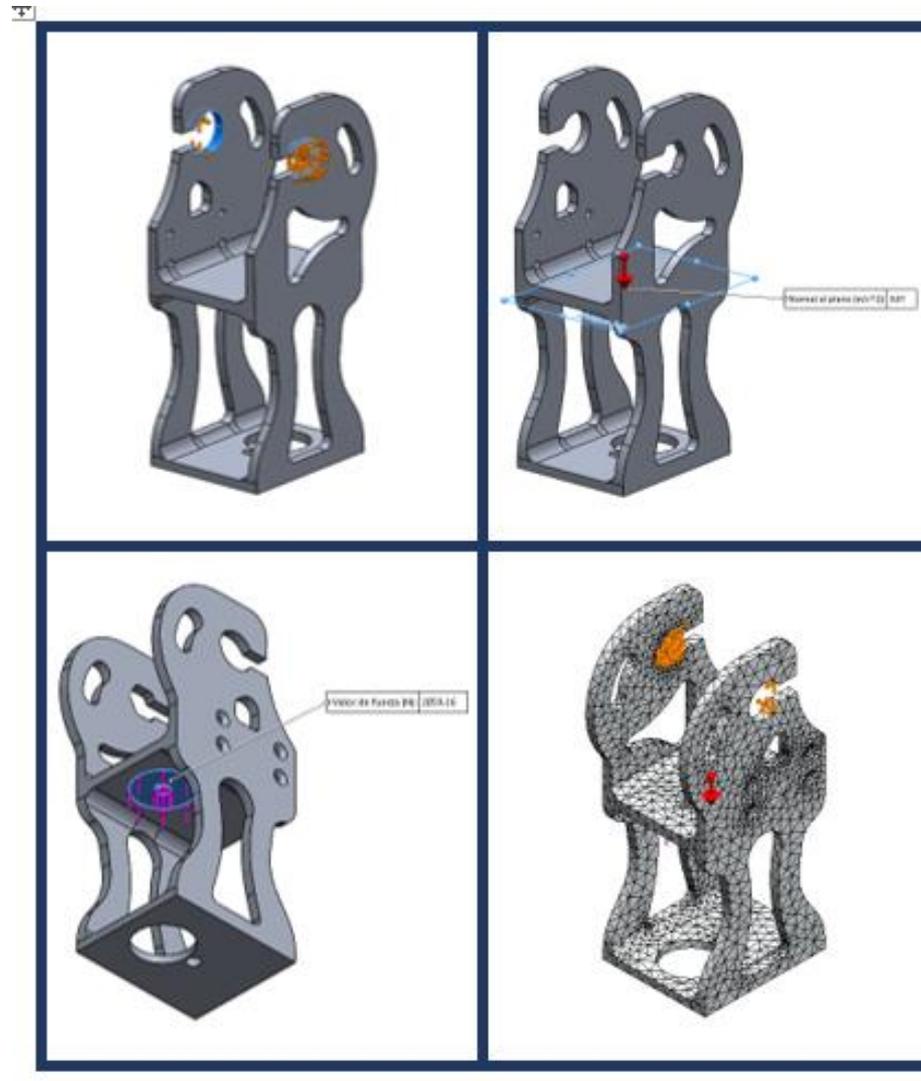


$L_s = 12$ [mm]



F. SIMULACIÓN DEL DISEÑO

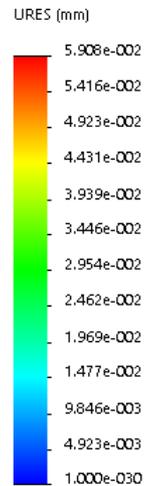
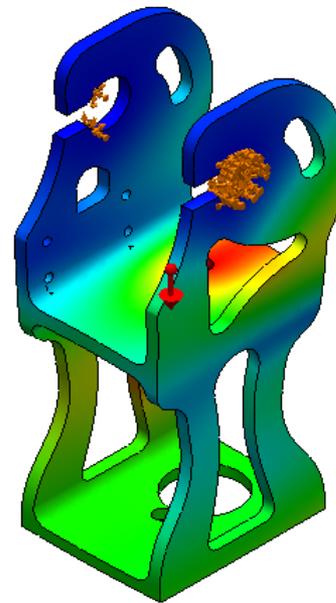
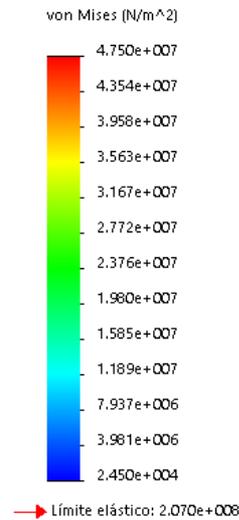
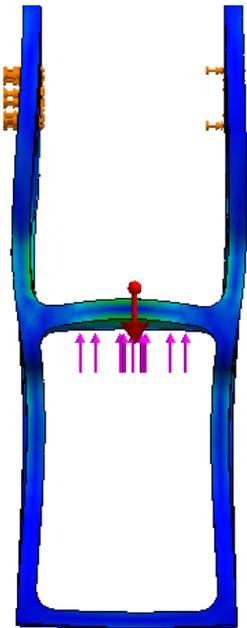
Parámetros iniciales de análisis estático



SIMULACIÓN DEL DISEÑO

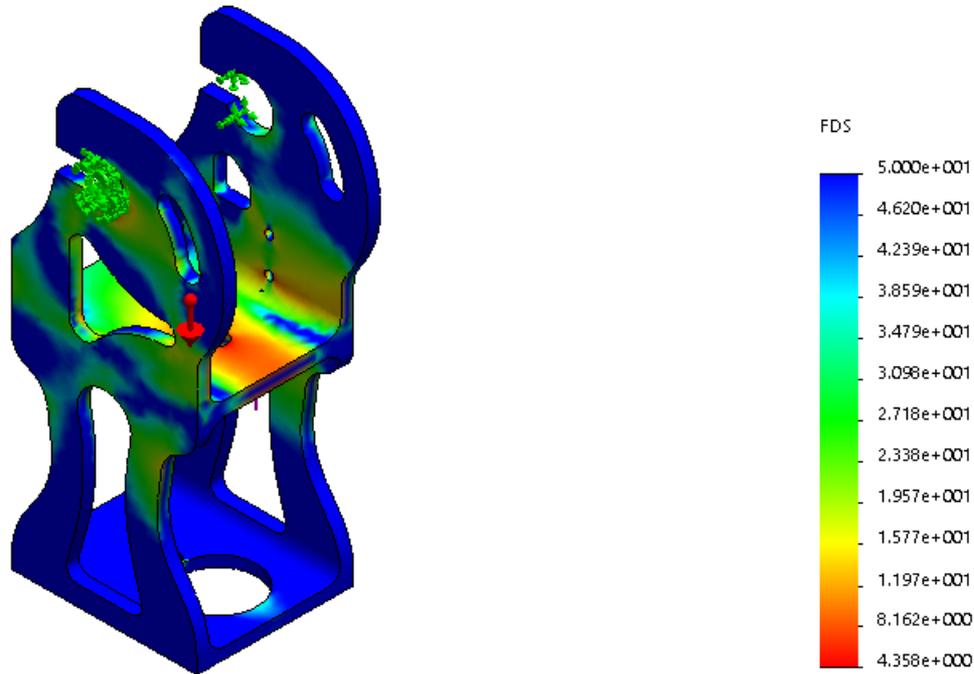
Esfuerzos de Von Mises provocados en toda la estructura

Deformación provocada por las cargas aplicadas



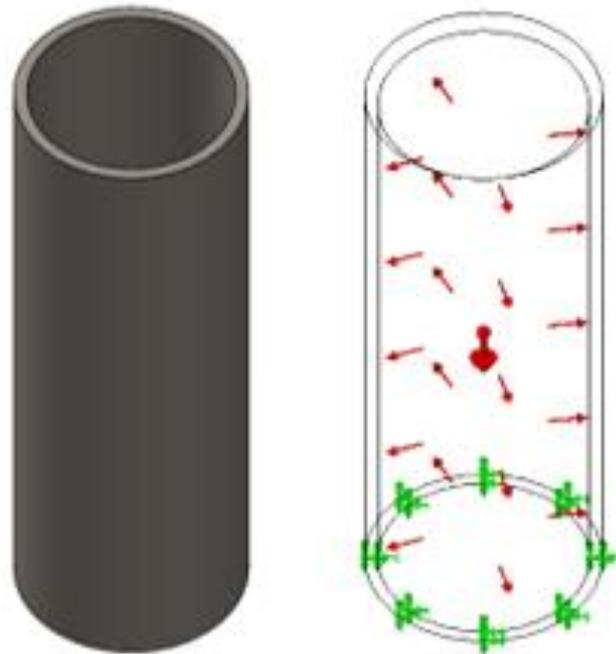
SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Factor de seguridad de diseño en cada punto de la estructura



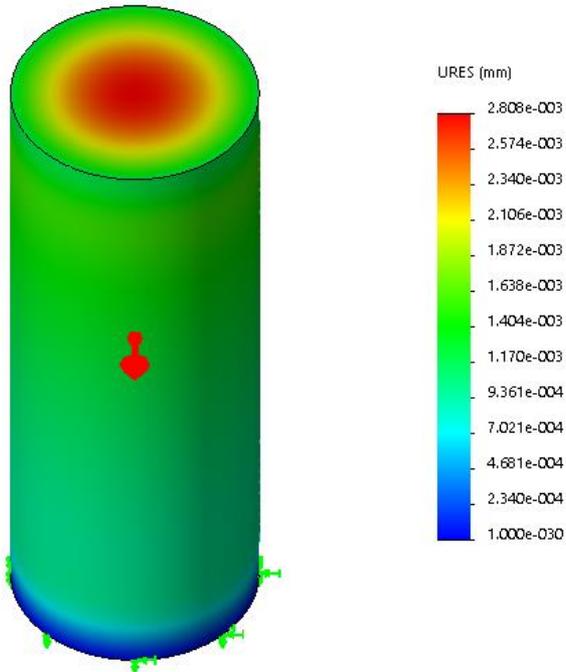
SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Diseño de la camisa del cilindro; Presión generada internamente en el cilindro

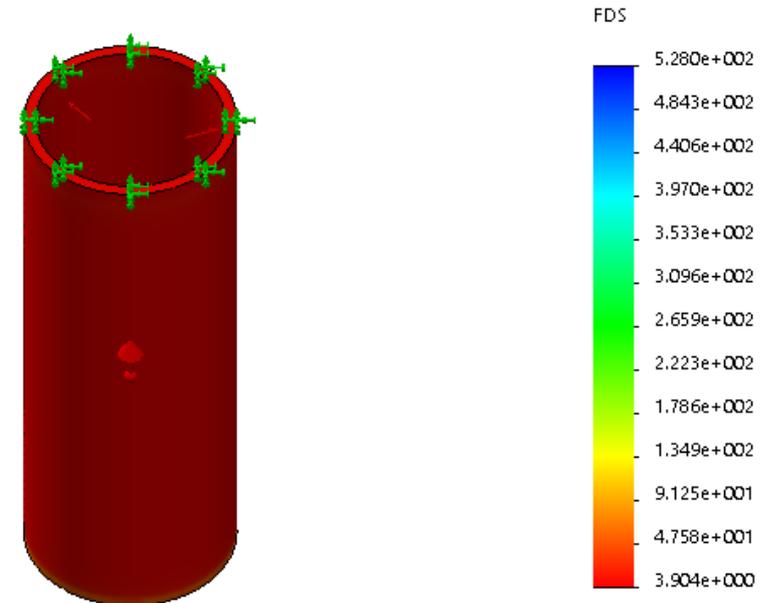


SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Deformación producida en el cilindro



Factor de Seguridad del diseño del cilindro





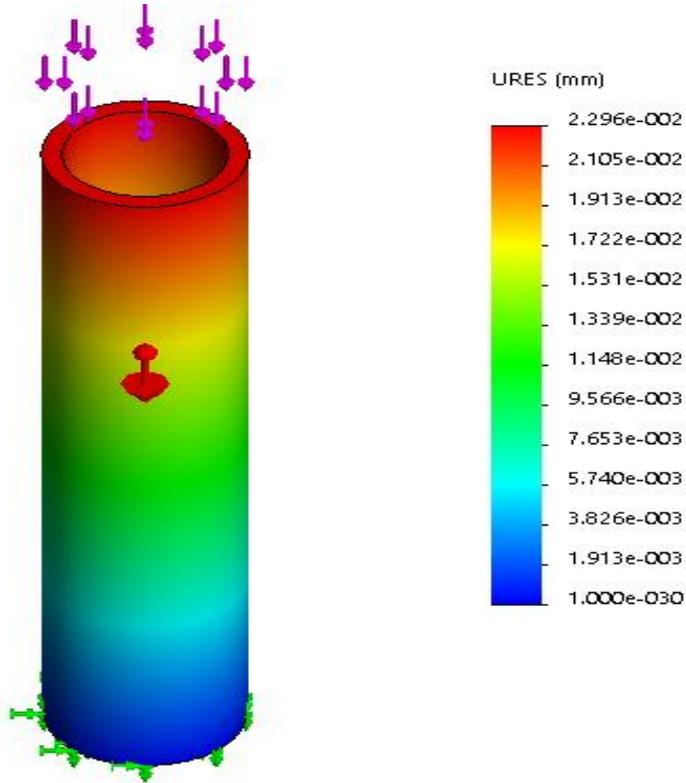
SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Diseño del vástago del amortiguador

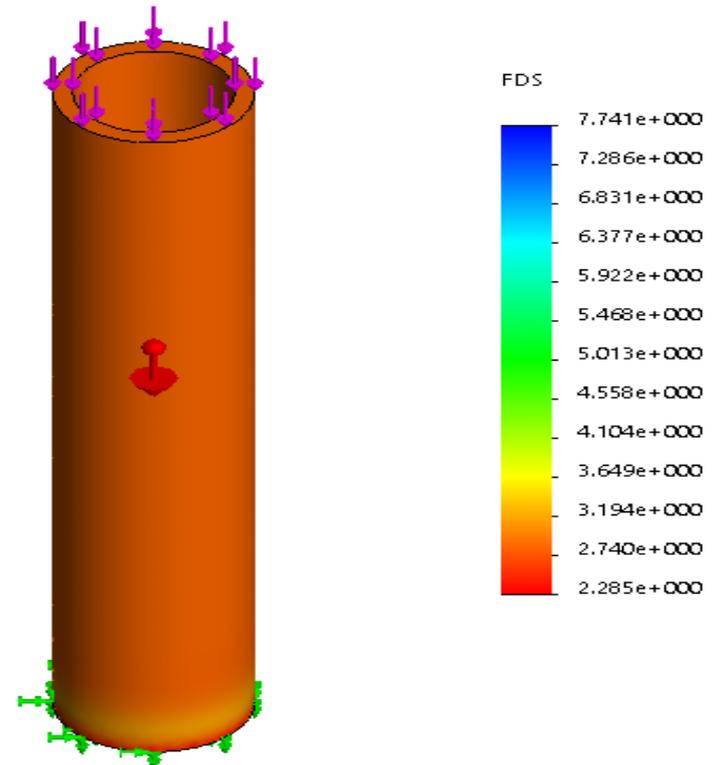


SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Deformación producida en el vástago por la fuerza axial



Factor de seguridad en el vástago del amortiguador



E. Diseño del Circuito de Control

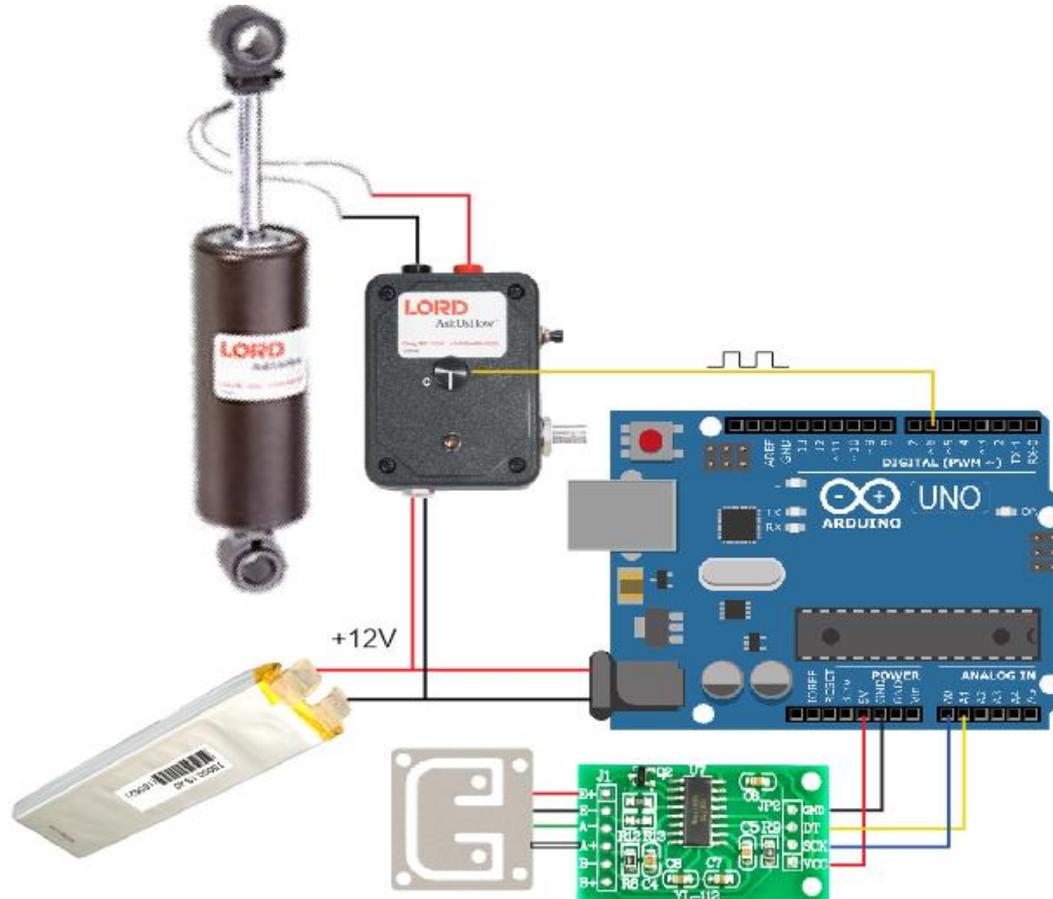


Diagrama de Conexión Eléctrica



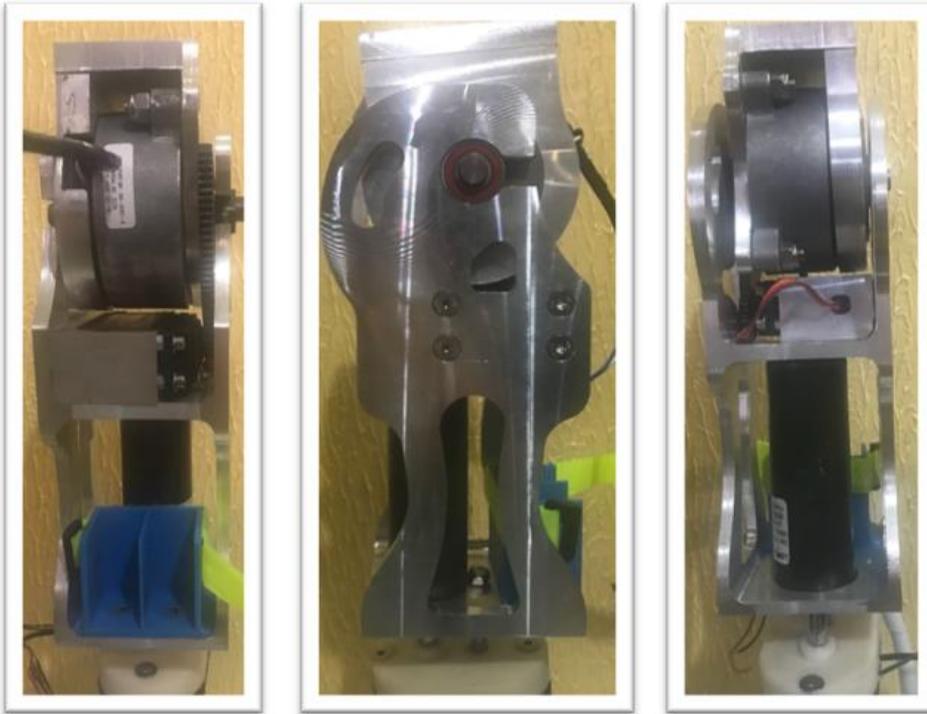
IMPLEMENTACIÓN





Mecanizado de la estructura





Implementación mecánica del prototipo



Celda de carga instalada



Circuito electrónico implementado

Carcasa





Programa para el control de amortiguación

```
#include "HX711.h"
#define DOUT 11
#define CLK 12
HX711 scale(DOUT, CLK);
float calibration_factor = 16800;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  scale.set_scale();
  scale.tare();
  long zero_factor = scale.read_average();}
void loop(){
  scale.set_scale(calibration_factor);
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 1);
  Serial.print(" Kg");
  Serial.println();
```





Programa para el control de amortiguación

```
if(scale.get_units()<0)
  analogWrite(pin, 0);

if(scale.get_units()<=70 && scale.get_units()>=0){
  valor=3.6429*scale.get_units();
  analogWrite(pin, valor);
  Serial.print(" Potenciometro: ");
  Serial.println(valor);}

if(scale.get_units()>70){
  analogWrite(pin, 255);
  Serial.print(" Potenciometro: ");
  Serial.println(255);}}
```

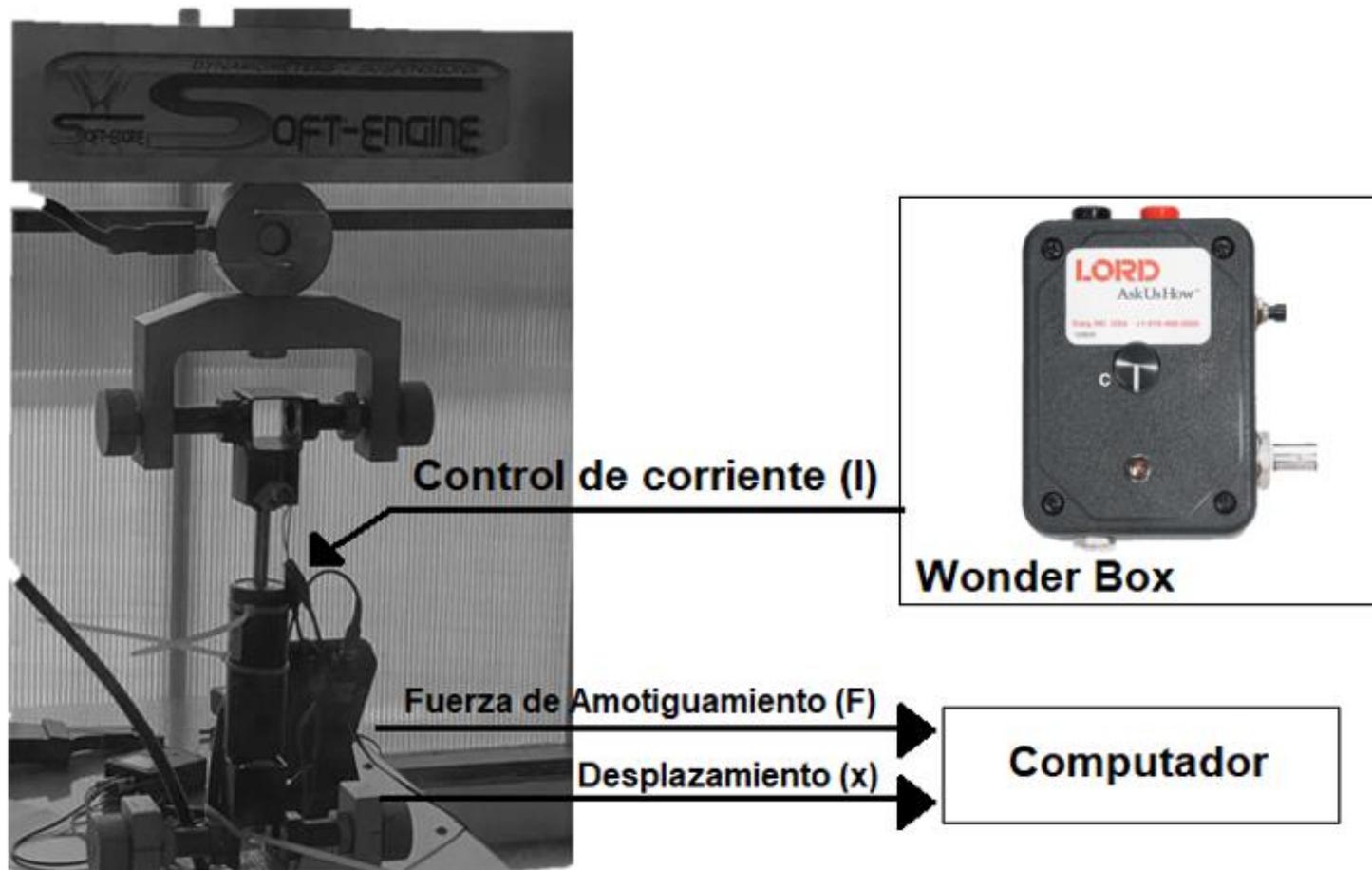




PRUEBAS Y RESULTADOS



A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1





A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR

LORD RD-8040-1

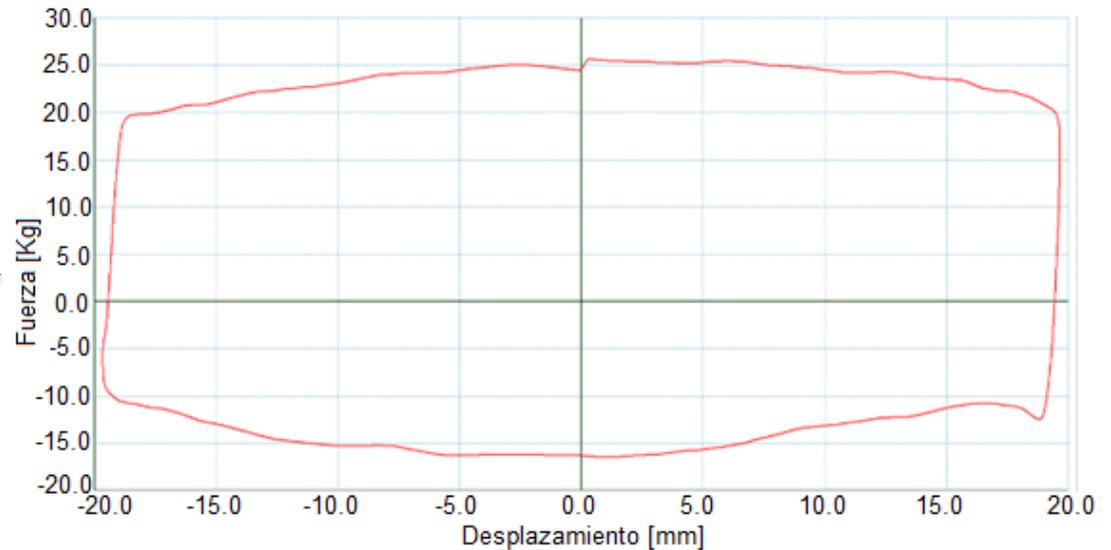
Parámetros para caracterización de pruebas fijas

Parámetro	Valores
Excursión [mm]	40
Frecuencia [Hz]	1
Velocidad [$\frac{mm}{s}$]	125.7
Temperatura de calentamiento [$^{\circ}C$]	25
Velocidad de calentamiento [$\frac{mm}{s}$]	200
Amperaje [A]	(0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1; 1.2; 1.4 y 1.6)



A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

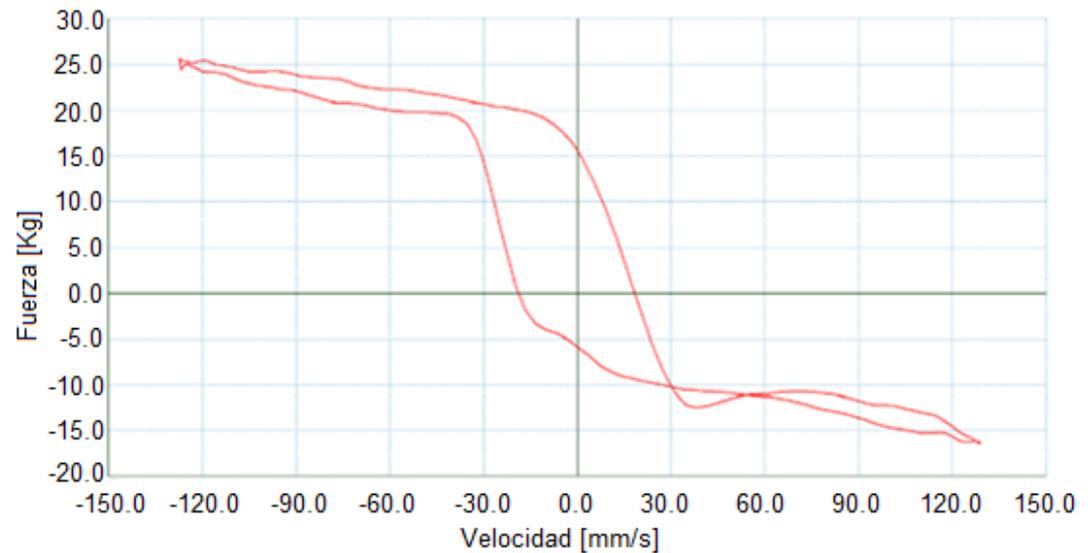
Fuerza Vs
Desplazamiento a
0 [A]



compresión → 25,64 [Kg]
rebote → 16,69 [Kg]
temperatura → 25,05 °C

A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

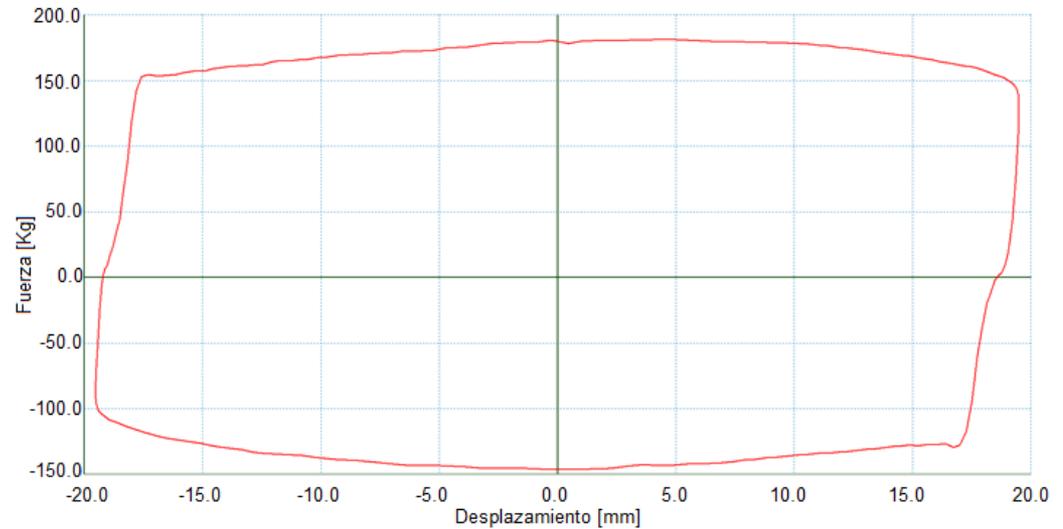
Fuerza Vs Velocidad a
0 [A]



Fuerza de amortiguamiento → 15 [Kg]

A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

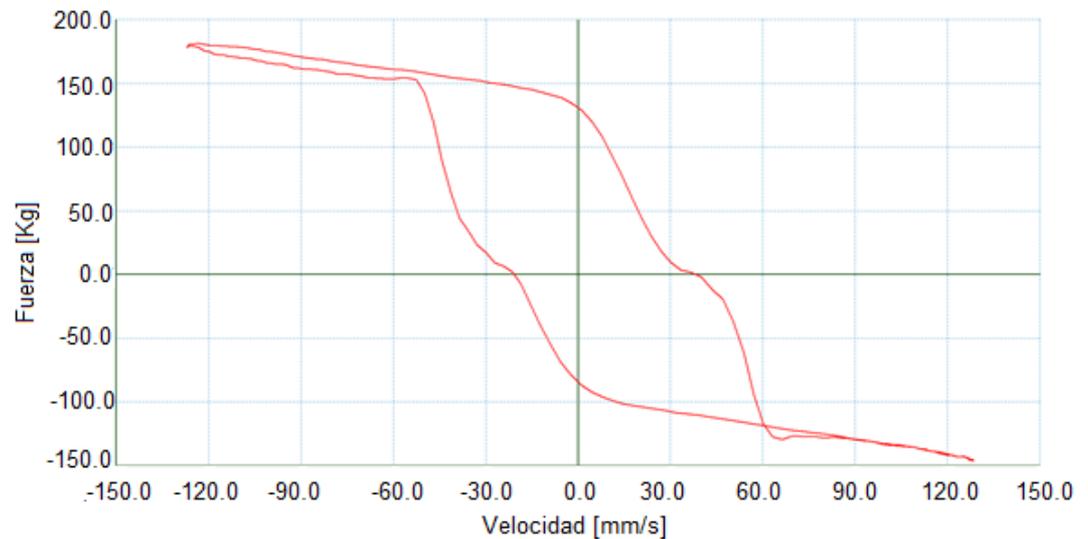
Fuerza Vs
Desplazamiento a
1.8 [A]



compresión $\rightarrow 126,83 \left[\frac{mm}{s} \right] \rightarrow 156,29 [Kg]$
rebote $\rightarrow 128,42 \left[\frac{mm}{s} \right] \rightarrow 141,23 [Kg]$
temperatura $\rightarrow 39,51^{\circ}C$.

A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

Fuerza Vs Velocidad a
1.8 [A]





A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR

LORD RD-8040-1

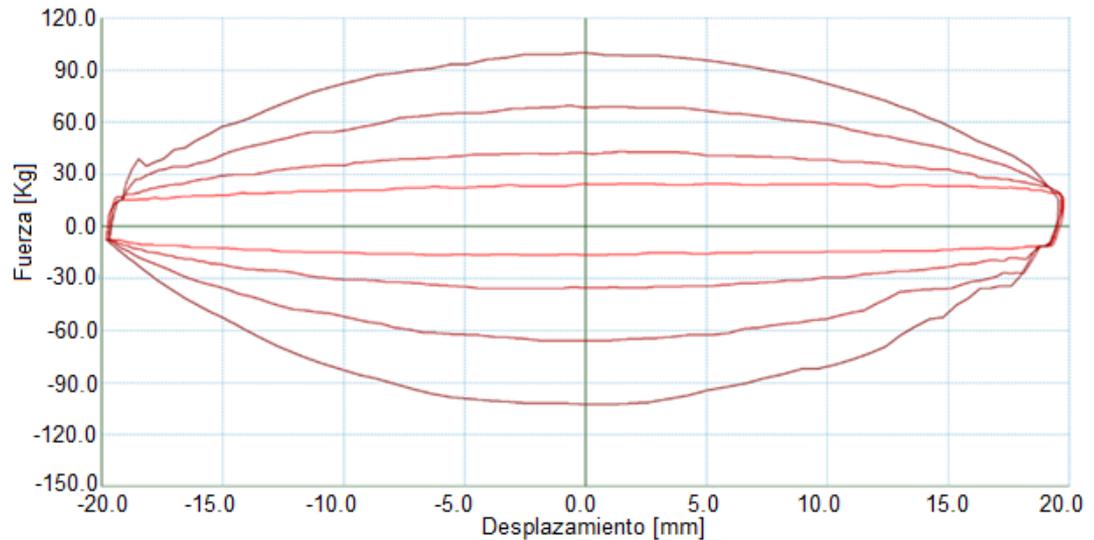
Parámetros para caracterización de pruebas variables

Parámetro	Valores
Excursión [mm]	40
Frecuencia [Hz]	(1.5; 3.18; 4.77 y 6.37)
Velocidad [$\frac{mm}{s}$]	(200; 400; 600 y 800)
Temperatura de calentamiento [$^{\circ}C$]	25
Velocidad de calentamiento [$\frac{mm}{s}$]	200
Amperaje [A]	(0; 1 y 1.8)



A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

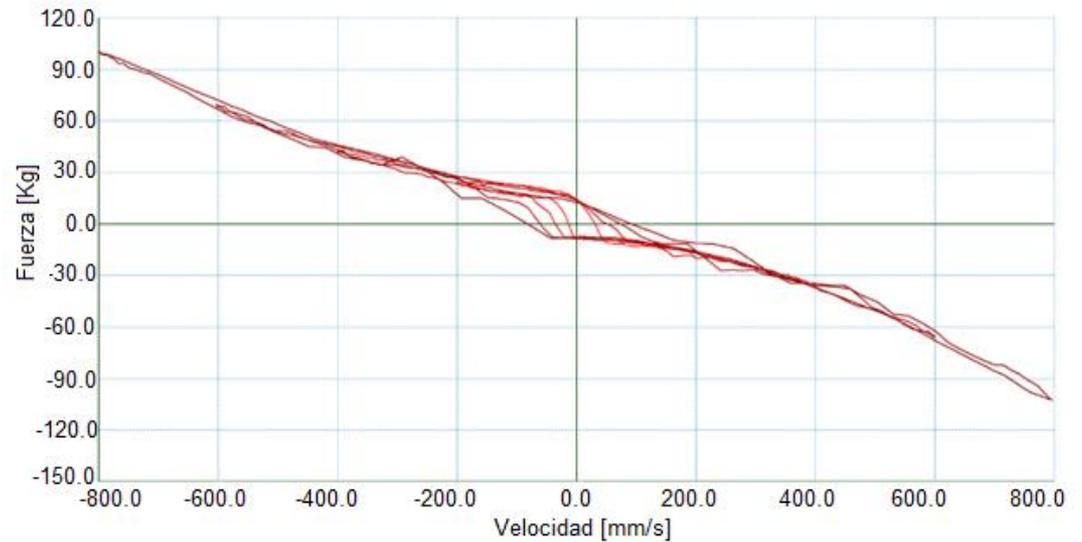
Fuerza Vs
Desplazamiento a
0 [A]



Desplazamiento de 20 [mm], las fuerzas necesarias para 200 $\left[\frac{mm}{s}\right]$ en expansión y compresión del amortiguador MR son 16.69 y 24.42 [kg] respectivamente, para 400 $\left[\frac{mm}{s}\right]$ son 35.82 y 43.14 [kg], para 600 $\left[\frac{mm}{s}\right]$ son 65.93 y 69.6 [kg] y para 800 $\left[\frac{mm}{s}\right]$ son 102.56 y 100.12 [kg], alcanzando una temperatura media de trabajo de 47.18°C.

A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

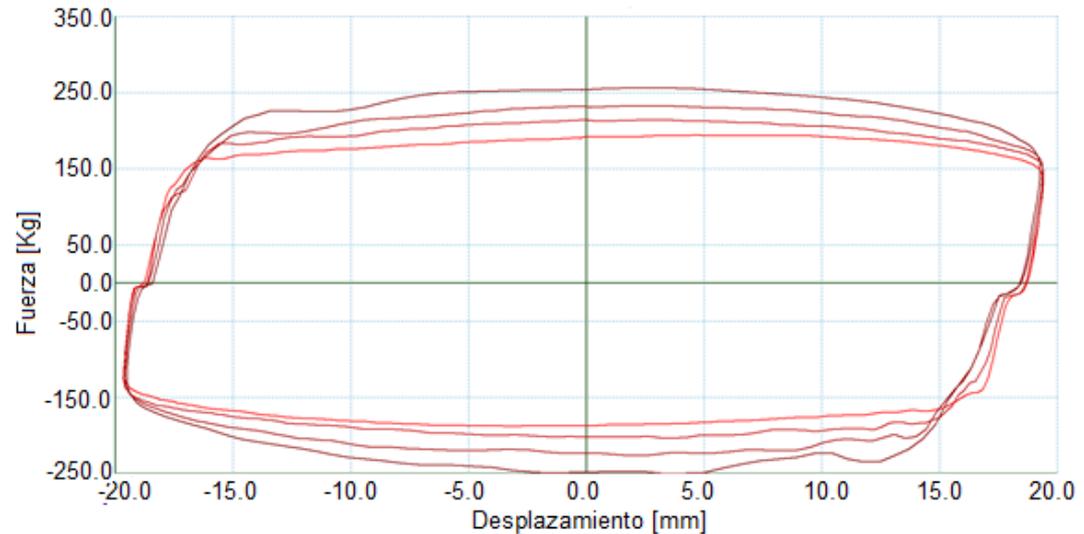
Fuerza Vs Velocidad a
0 [A]



A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR

LORD RD-8040-1

Fuerza Vs
Desplazamiento a
1.8 [A]



Las fuerzas necesarias para la expansión y compresión del amortiguador MR a una

velocidad de $200 \left[\frac{mm}{s} \right]$ son 154,25 y 175,01 [Kg] respectivamente, para $400 \left[\frac{mm}{s} \right]$

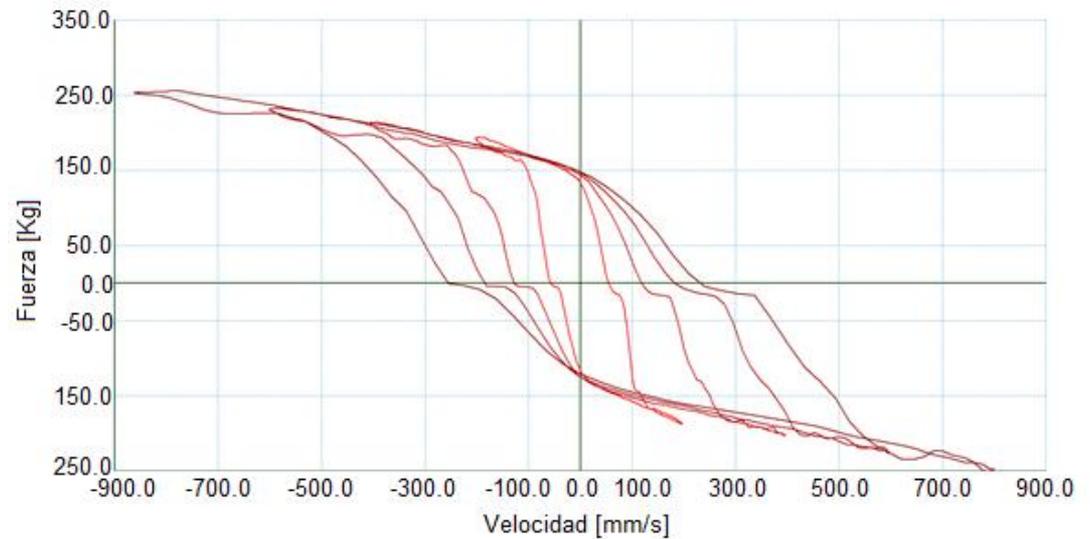
son 175.42 y 196.58 [kg], para $600 \left[\frac{mm}{s} \right]$ son 195.77 y 221.0 [Kg] y para

$800 \left[\frac{mm}{s} \right]$ son 212.05 y 233.21 [Kg], alcanzando una temperatura media de trabajo de

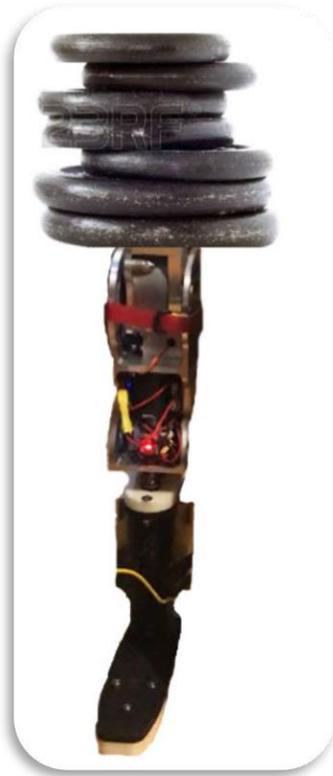
39.78°C.

A. ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AMORTIGUADOR LORD RD-8040-1

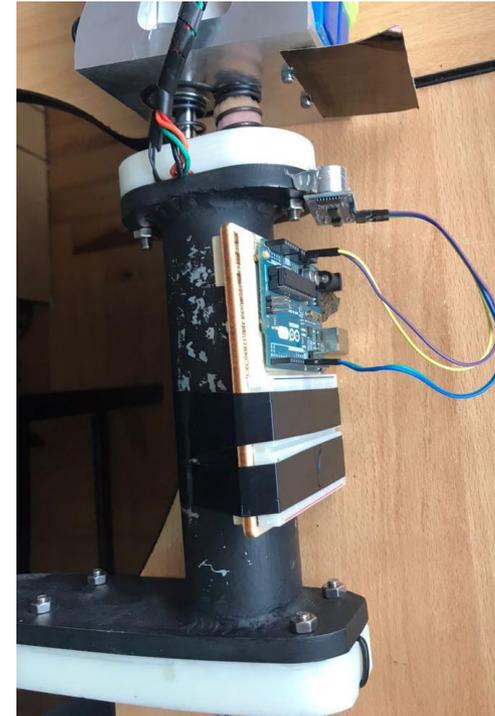
Fuerza Vs Velocidad a
1.8 [A]



A. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE PRÓTESIS

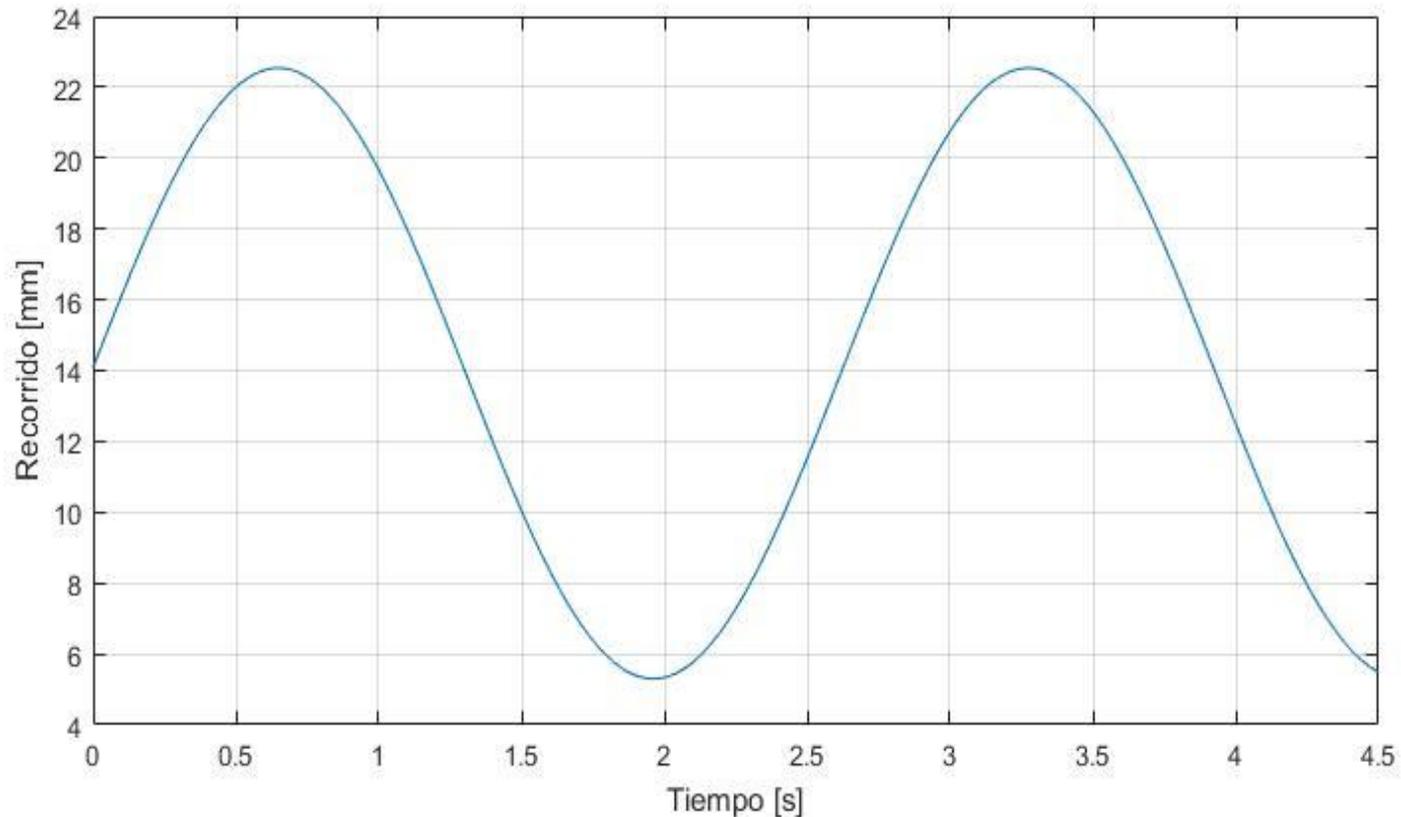


Pruebas del prototipo de prótesis a distintas cargas



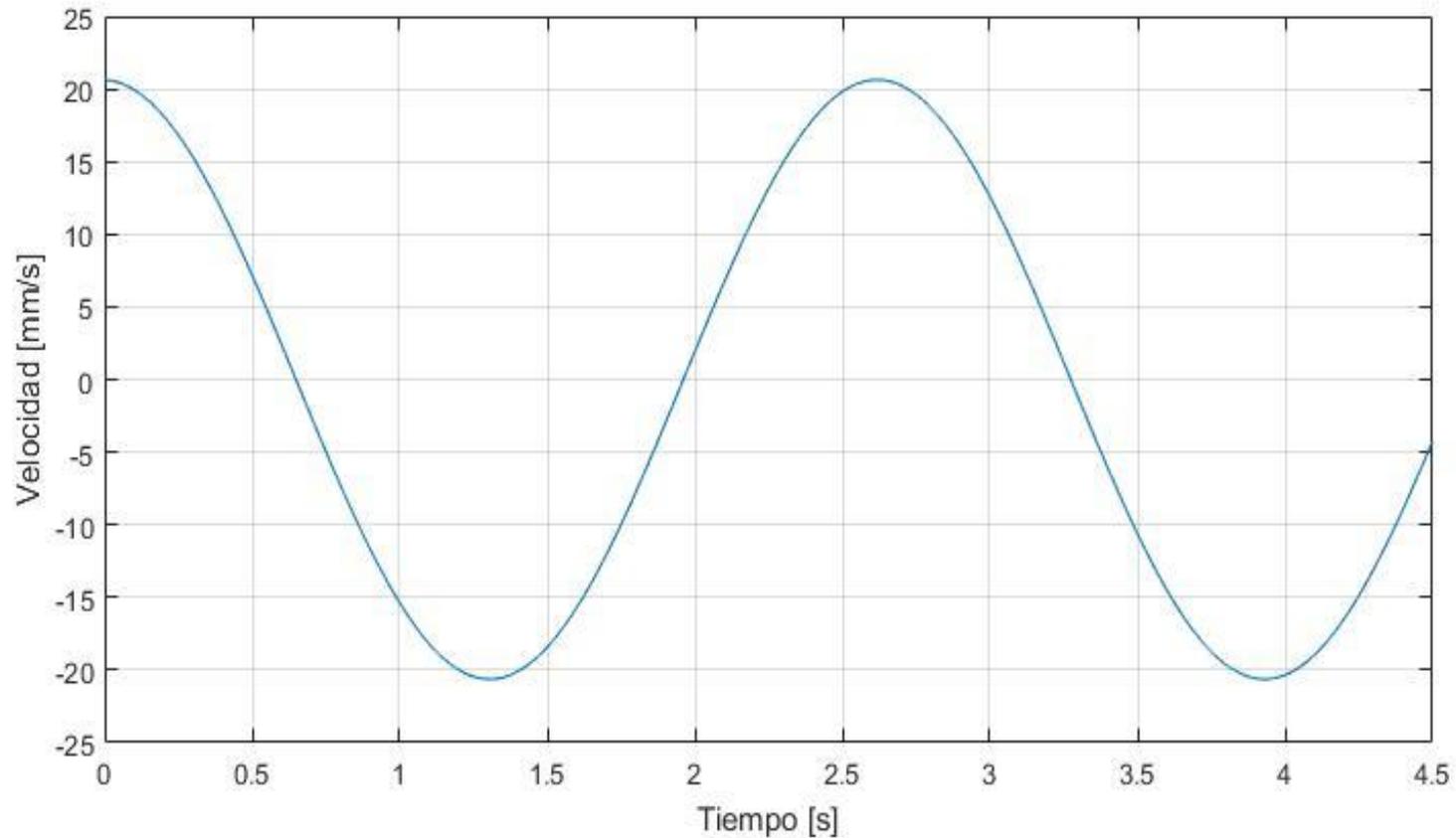
Circuito implementado para adquisición de datos del ciclo de marcha.

A. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE PRÓTESIS



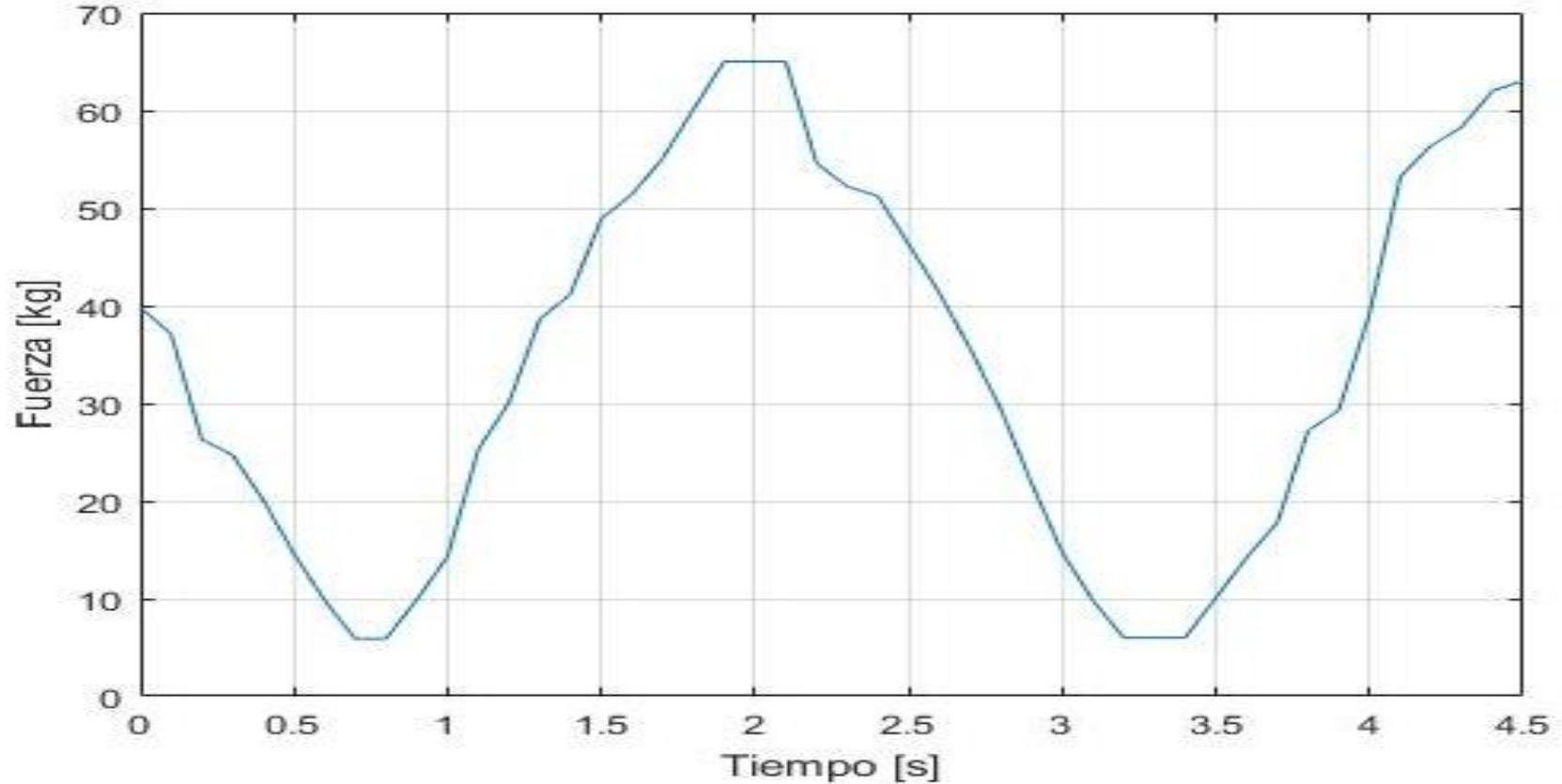
Recorrido Vs Tiempo de amortiguación durante el ciclo de marcha humana

A. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE PRÓTESIS



Velocidad Vs Tiempo de amortiguación durante el ciclo de marcha humana

A. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE PRÓTESIS



Fuerza Vs Tiempo de amortiguación durante el ciclo de marcha humana



CONCLUSIONES

- Se determinó de forma experimental las propiedades reológicas del fluido MRF-140CG mediante la aplicación de diferentes campos magnéticos, en donde el umbral de cizallamiento es de $35117.639 [Pa]$ a un campo magnético de $600 [mT]$.
- Se comprobó que el amortiguador soporta una carga de $2510 [N]$, es decir, mayor a la requerida, aunque la prótesis está diseñada para soportar fuerzas no mayores a $2059.26 [N]$, la cual se alcanza con una corriente de entrada a la bobina de $1.6 [A]$ creando un campo magnético de $600 [mT]$, el dispositivo MR es capaz de soportar estas cargas por efecto del fluido y la geometría que este posee.
- Se implementó fluidos MR al seleccionar el amortiguador RD-8040-1 de Lord, el cual los contiene y son indispensables para controlar el amortiguamiento a través de la variación de su viscosidad, en consecuencia, su resistividad fluídica es en más de un orden de magnitud bajo la influencia de un campo magnético inducido.





CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una prótesis transtibial con amortiguamiento activo cuya efectividad se demostró experimentalmente, la misma que para el efecto de amortiguación utiliza un actuador del tamaño y capacidad óptimo.
- Se desarrolló un algoritmo de control que cumpla con las condiciones establecidas para que se realice el ciclo de la marcha del prototipo, el cual permite el correcto funcionamiento de los elementos al ser accionados, a través de la vinculación óptima de los elementos con el microcontrolador.
- Se verificó la teoría básica de un amortiguador MR, mediante evaluación y ensayos realizados al amortiguador RD-8040-1 de Lord, los mismos que muestran que el usuario logre tener un control óptimo sobre la fuerza de amortiguamiento del dispositivo MR mediante la variación de la corriente de entrada suministrada al electroimán del amortiguador.





RECOMENDACIONES

- Para trabajos futuros se recomienda realizar la caracterización de otro fluido de tipo MR que brinde otras características al amortiguador, basándose principalmente en el grado de sedimentación y el porcentaje de partículas sólidas en el fluido.
- Un fluido de buenas características al momento de su caracterización cuando se le aplique campo magnético no manifestará muchas perturbaciones debido a los aditivos que contiene.
- Se aconseja mecanizar una estructura de prueba en un material más suave como nylon o duralón, esto nos servirá para realizar un ensamblaje previo y verificar que no sea necesario realizar modificaciones en el diseño y más importante aún definir los procesos de maquinado para llegar a obtener el producto final.
- Para el mecanizado de la estructura de la prótesis es necesario seleccionar la herramienta adecuada y calcular correctamente los parámetros de mecanizado y que sea del material óptimo para maquinar aluminio.



