



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

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
PRÓTESIS DE RODILLA CON CONTROL DE TORQUE ACTIVO  
MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE MATERIALES MAGNETOREOLÓGICOS BAJO  
LA ACCIÓN DE DIFERENTES CAMPOS MAGNETICOS”**

**DIEGO OMAR CAMACHO FRANCO  
ALVARO PATRICIO VELASCO VASCO**

**TUTOR: ING. OSCAR ARTEAGA**



# INTRODUCCIÓN



Amputaciones  
externas



Naturales

Accidente



Fluidos  
Magnetoreológicos  
(FMR)



Propiedades



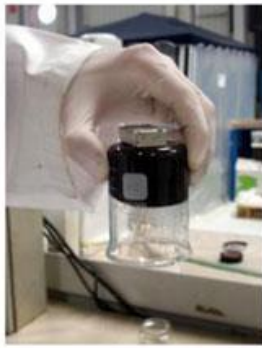
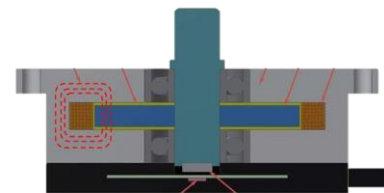
Implementación



Prótesis con  
Limitador de  
Torque



Estabilidad  
Regulador de torque  
Control mediante  
campo magnético  
Emulación de la  
marcha Humana





## ANTECEDENTES



Consejo Nacional  
de Igualdad  
de Discapacidades

(5,6%)

Discapacidad  
Física (23%)  
193520

Recuperación



Comodidad  
Prótesis  
(rígidas)

Fluidos  
Magnetoreológicos

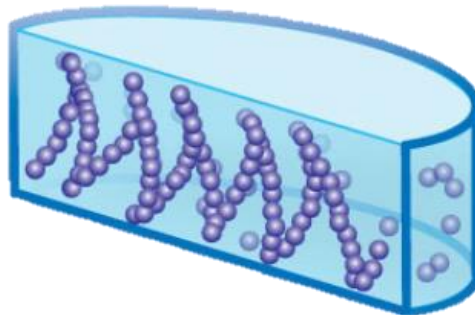
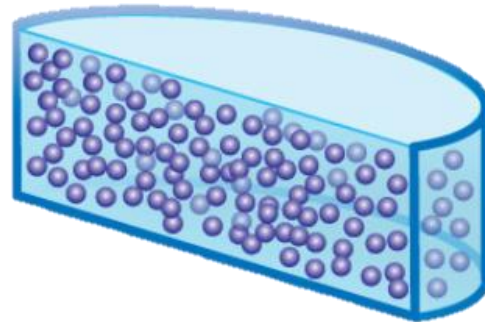
Jacob Rabinov 1940

Partículas  
micrométricas  
magnetizables

Fluido newtoniano

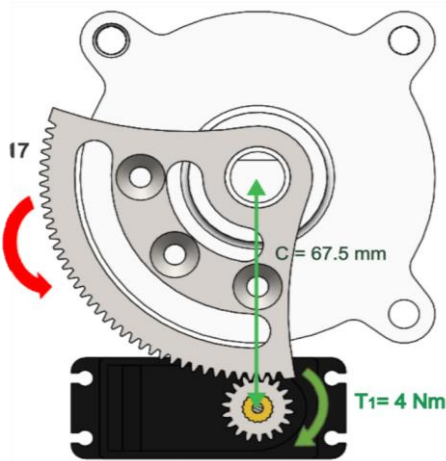
Viscosidad  
Resistencia al flujo

Campo Magnético





## JUSTIFICACIÓN



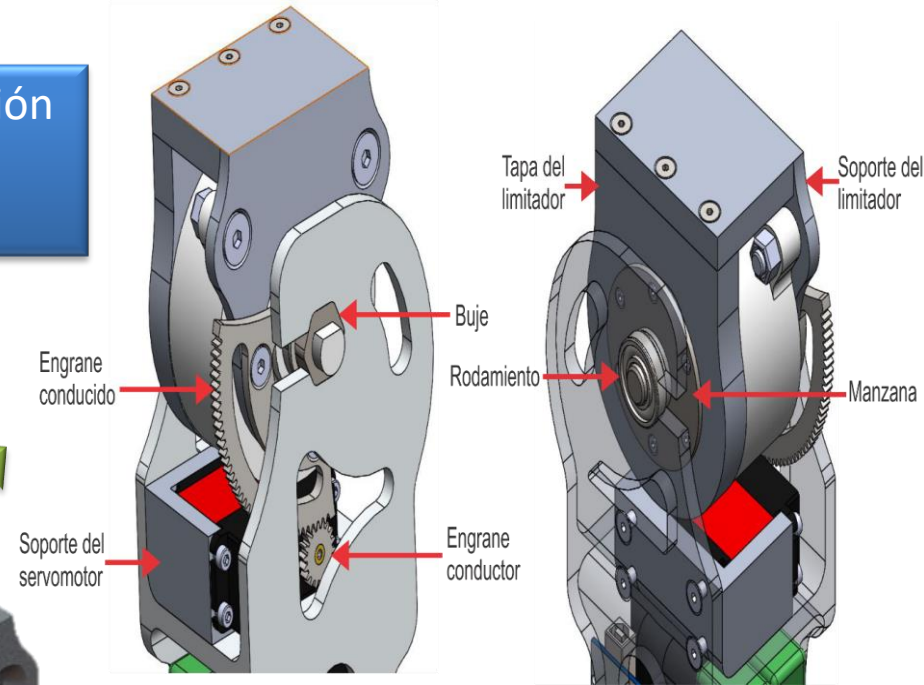
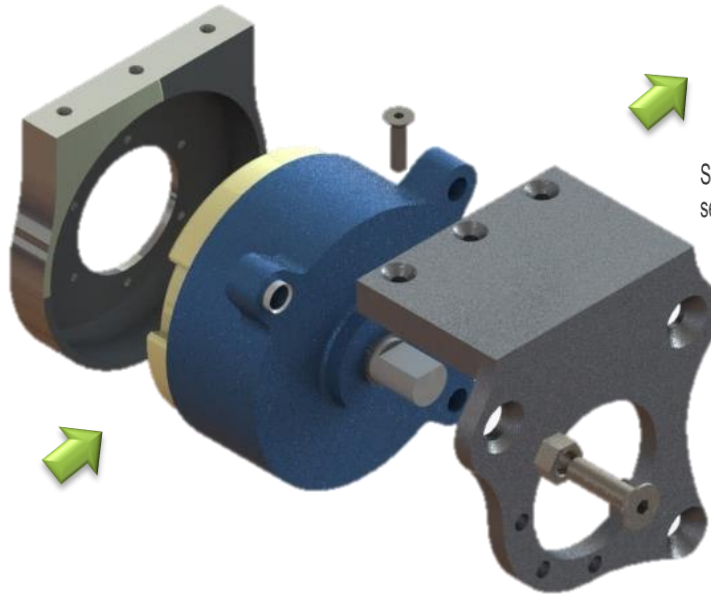


## PROPUESTA

Investigación  
Fluidos  
Magnetoreológicos



Implementación  
Prótesis de  
Rodilla



## OBJETIVO GENERAL

- Investigar las propiedades mecánicas de materiales Magnetoreológicos bajo la acción de diferentes campos magnéticos para el diseño e implementación de un prototipo de prótesis de rodilla con un control activo de torque activo.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un prototipo de prótesis de rodilla con control de torque para emular la oscilación de la articulación amputada.
- Implementar fluidos Magnetoreológicos en el prototipo construido, afín de generar un control de torque activo durante la caminata y reemplazar la función del músculo perdido.
- Proponer un esquema de control que permita maniobrar el actuador del prototipo de prótesis para replicar la marcha humana.
- Realizar evaluaciones experimentales del prototipo de prótesis desarrollada para comprobar la incidencia del esquema de control en el control activo del torque



# TRABAJOS PREVIOS



**Prótesis de rodilla con pistón  
magnetoreológico**  
**México**



**Prótesis de rodilla  
policéntrica  
Ossur**  
**Canadá**



**Prótesis de rodilla Rheo  
Knee 3**  
**Estados Unidos**



**Rodilla Adaptive Endolite**  
**Estados Unidos**

Materiales Protésicos



Biocompatibles  
Resistentes



Aluminio C330R



- Buena Resistencia
- Tratable Térmicamente
- Apto para el mecanizado
- Resistencia a la corrosión





# PARAMETROS DE DISEÑO



Medidas antropométricas

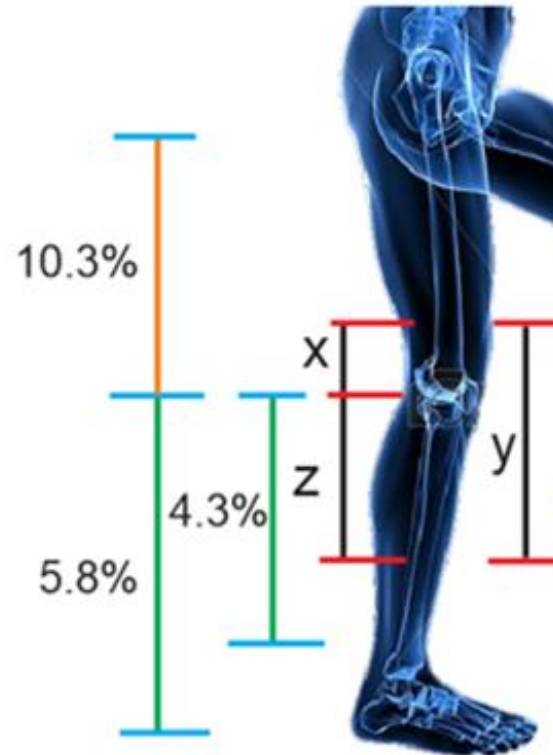


Altura = 165-170 cm.  
Masa = 65-70 Kg.



Peso: 686 [N]

Modelo Dempster  
y Clauser



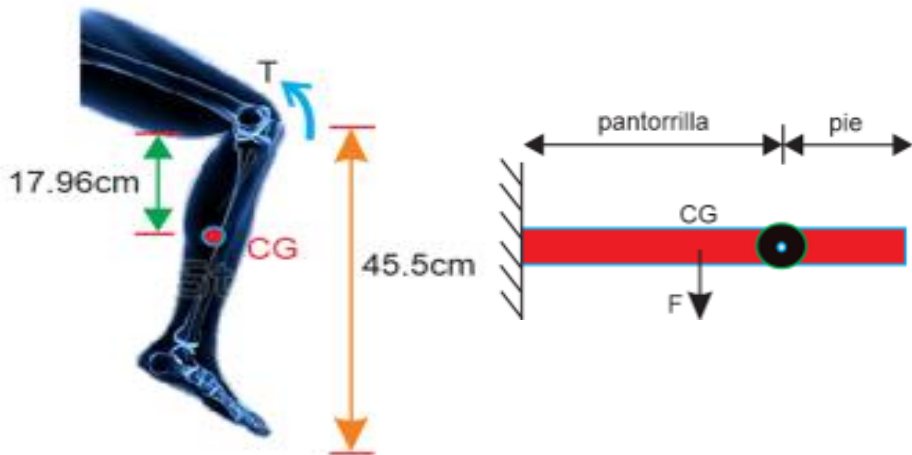
Peso de la prótesis



3,57 Kg.



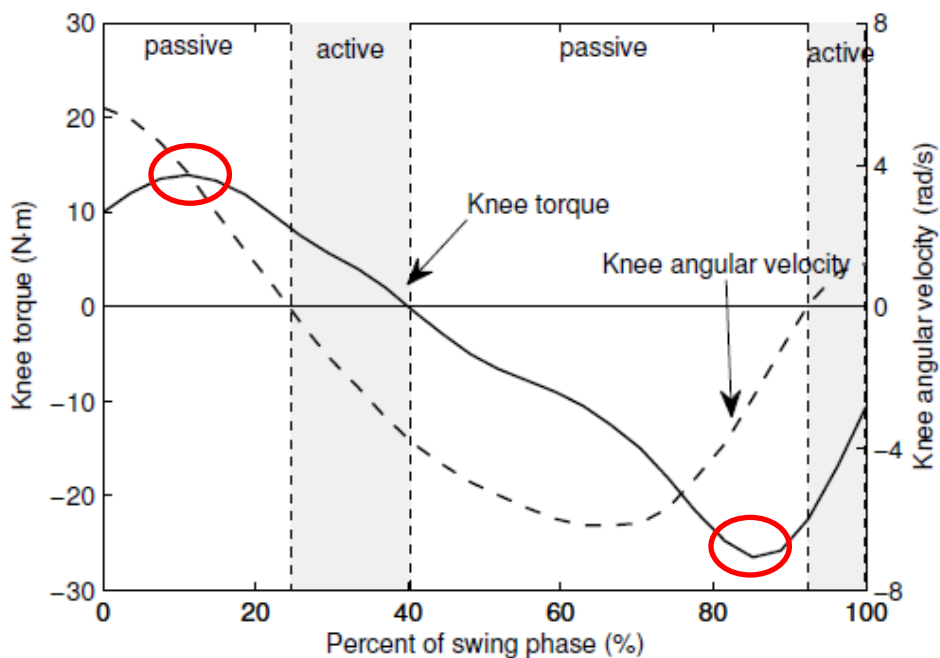
# TORQUE MÁXIMO



Torque flexión y extensión



7,1 [Nm]



Torque máximo caminata



# PROPIEDADES FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO



MRF 140 CG



**MID-ATLANTIC RUBBER CO.**  
Solutions that Seal and Protect

**LORD**

AskUsHow™

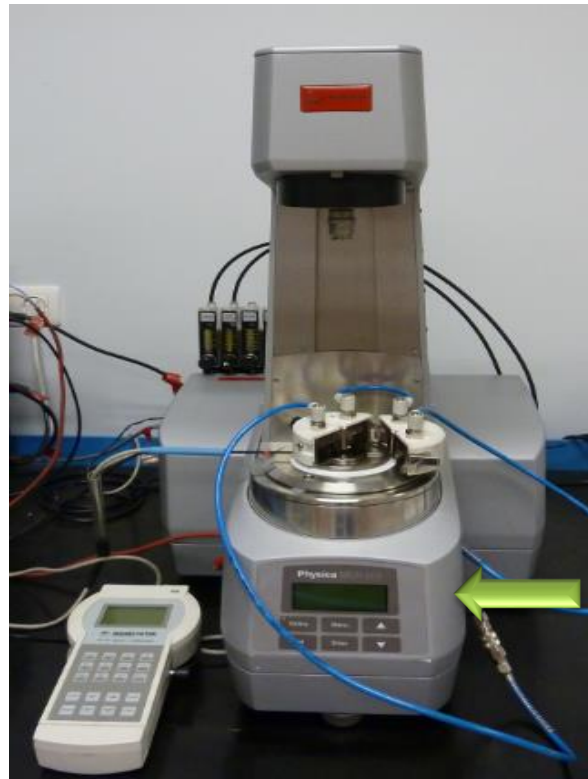


Ensayos Reológicos



Anton Para  
Physica MRC-50I

Density, g/cm <sup>3</sup> (lb/gal)	3.54-3.74 (29.5-31.2)
Solids Content by Weight, %	85.44
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)



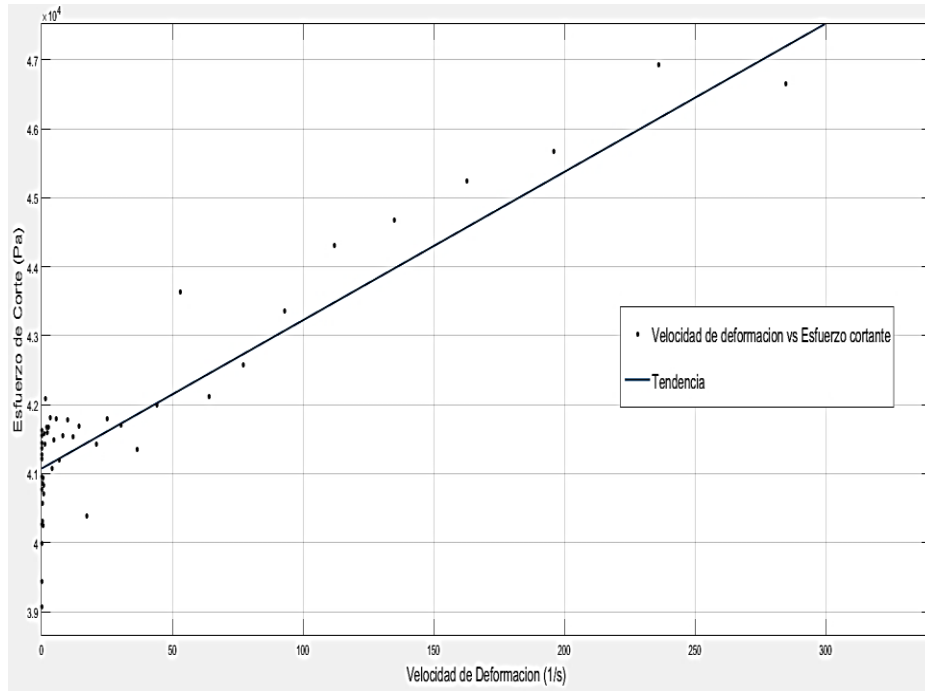
MRD  
70/IT



# RESULTADOS

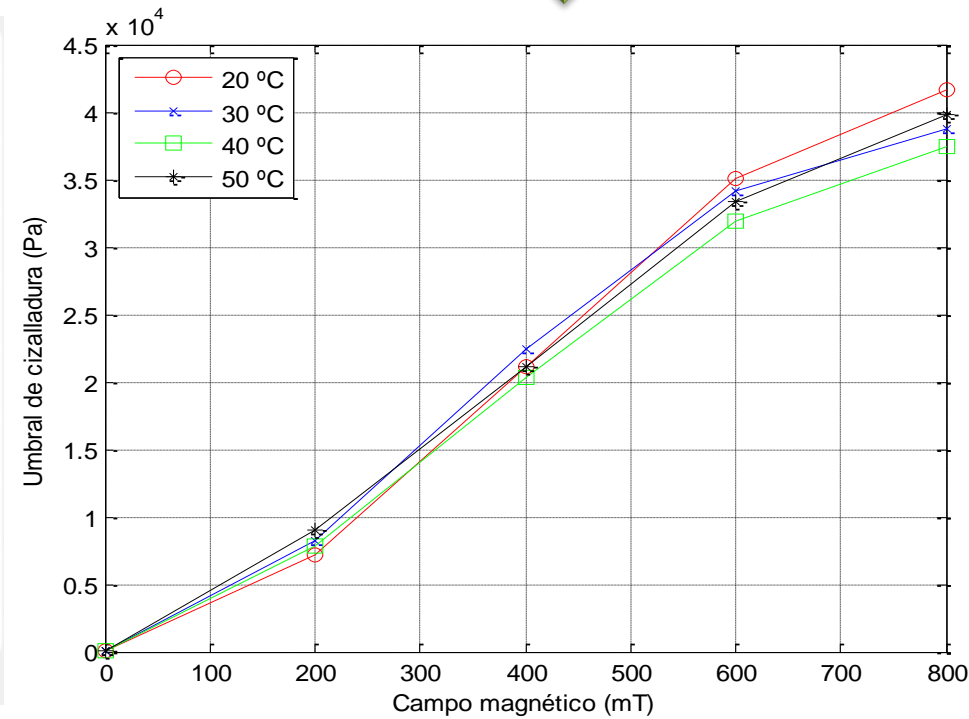


Viscosidad



Viscosidad= 21,51 [Pa.s]

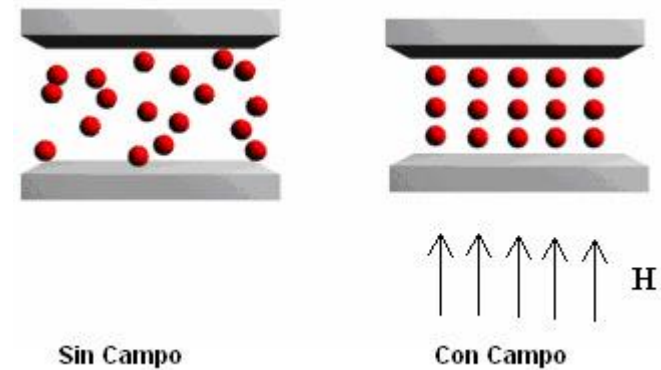
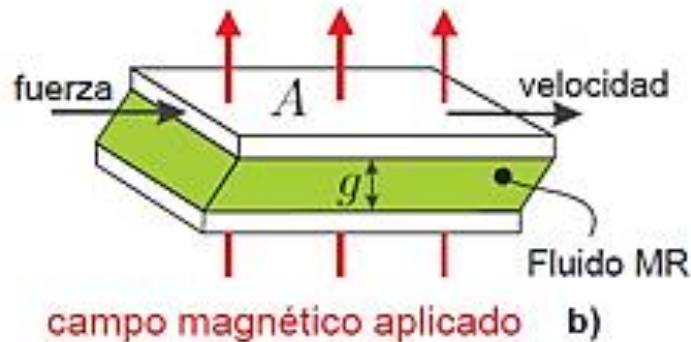
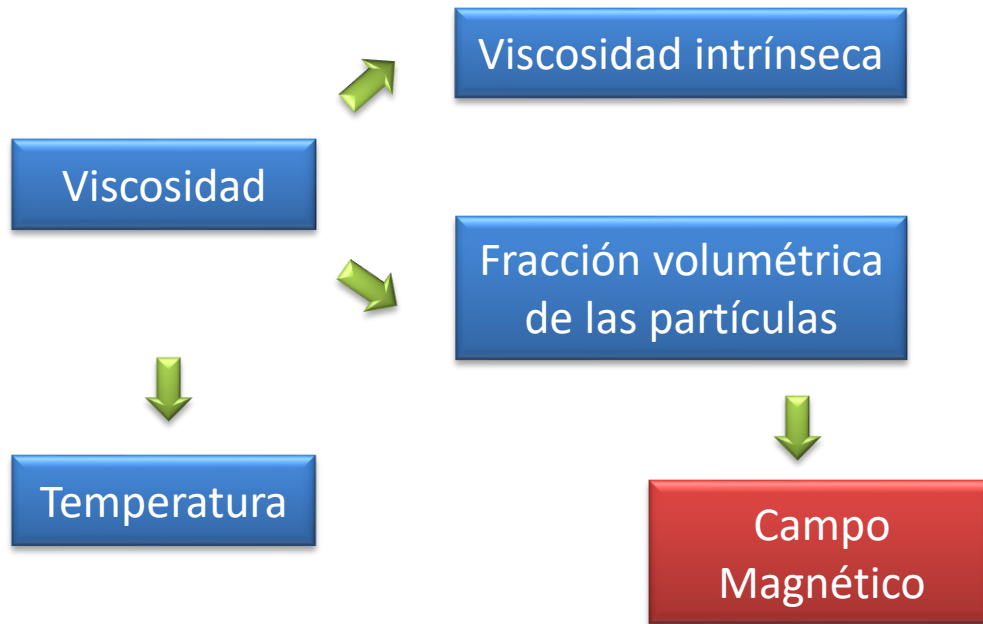
Umbral de Cizalladura



800 [mT]  $\rightarrow$  41,7 [Kpa]



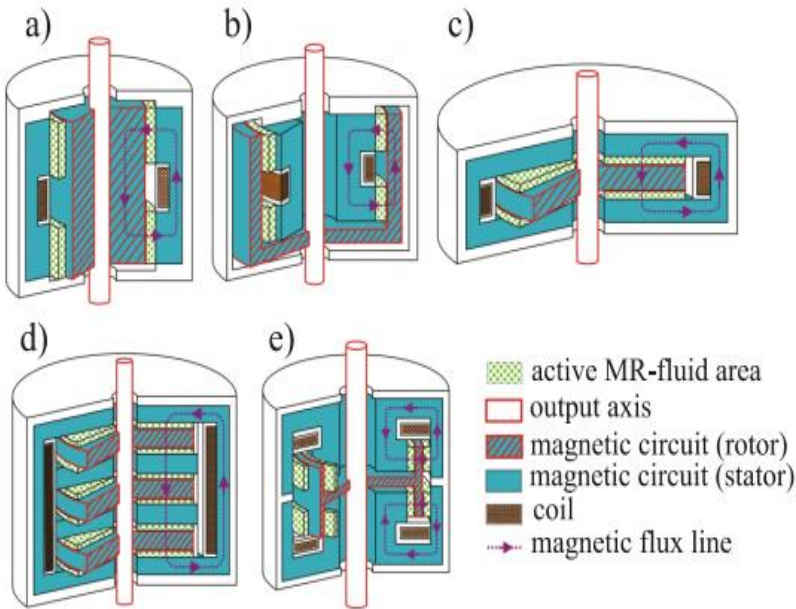
# PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS



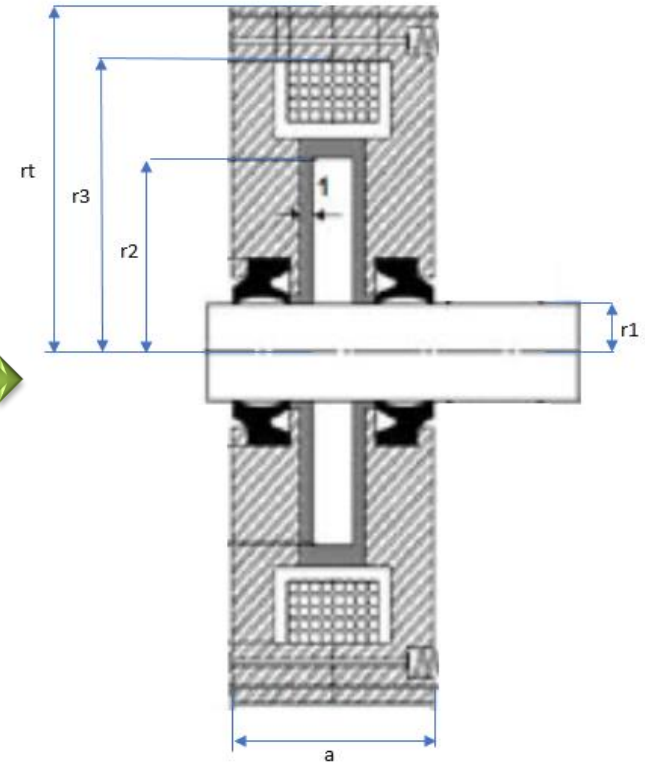
# DISEÑO MECÁNICO



### Tipos de Limitadores



Disco



r2= radio del disco  
r1= radio del eje del limitador  
rt= radio exterior de limitador  
a= ancho del limitador



# TENSIÓN DE CORTE DEL LIMITADOR



Fluidos  
Magnetoreológicos



Fluido de Bingham

$$\tau(r_2, \omega, H) = \tau_y(H) + \eta \frac{\omega r}{h}$$

$$T = T_{MR} + T_\eta$$

$$T = \frac{4\pi}{3} \tau_y(H) (r_2^3 - r_1^3) + \frac{\eta \omega \pi}{h} (r_2^4 - r_1^4)$$

Saturación



800 [mT] → 121 KA/m

$$T = 7,2 \text{ [Nm]}$$

Torque requerido 7,14 [Nm]

$\tau(r_2, \omega, H)$  es la fuerza de cizallamiento

$\tau_y(H)$  es el límite de cedencia dinámico

$\eta$  es la viscosidad del fluido

$\omega$  es la velocidad angular del disco rotatorio

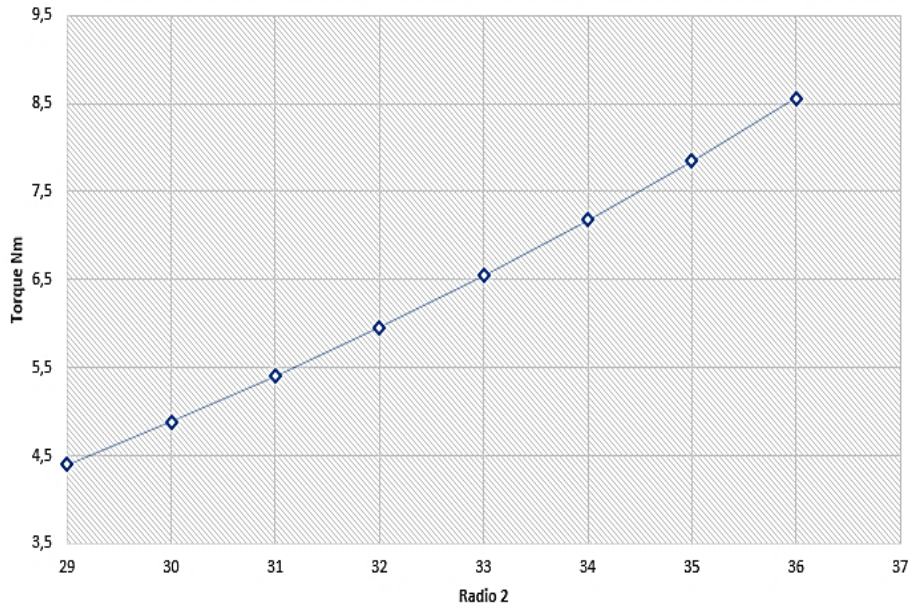
$h$  (**gap**) es el intervalo en donde se encuentra el fluido

$r_2$  es la posición en la superficie del disco.





### Torque vs radio 2

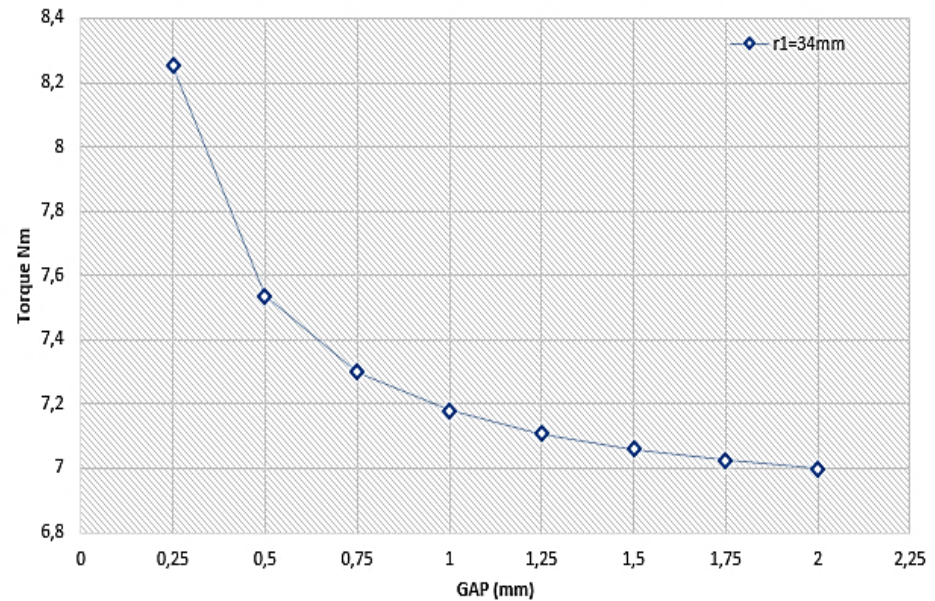


Efecto GAP

Efecto r2 sobre el torque

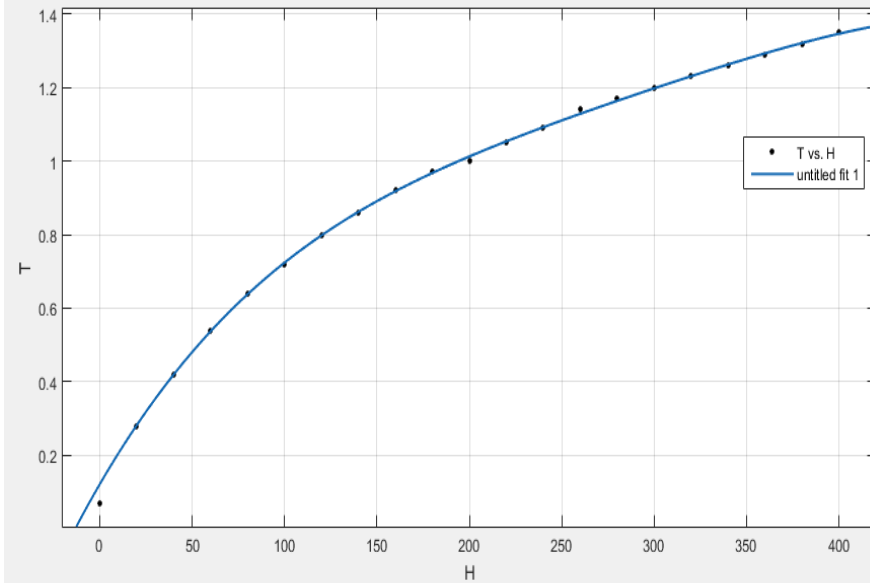


### GAP vs Torque





Según el fabricante

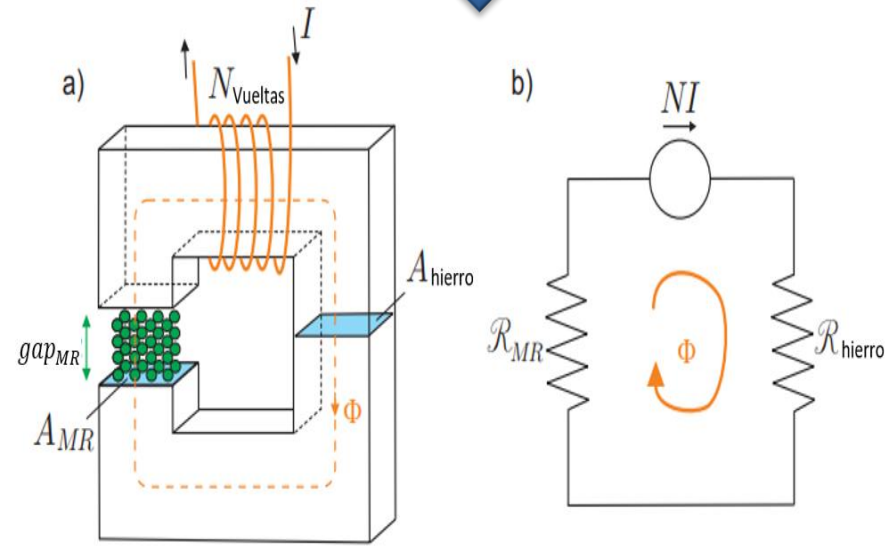


$$B = 2.645H^3 - 0.07035H^2 + 0.2654H + 1.013$$



800 [mT] → 121 KA/m

Circuito magnético → analogía eléctrica



$$NI = (\mathcal{R}_{MR} + \mathcal{R}_{acero})\Phi$$

# DISEÑO MAGNÉTICO



$$H_{MR} = \frac{\Phi}{\mu_{MR} A_{MR}} = \frac{NI}{g_{MR} + l_{acero} \left( \frac{\mu_{MR}}{\mu_{acero}} \right) \left( \frac{A_{MR}}{A_{acero}} \right)}$$



$N$  El número de vueltas del cable

$I$  Corriente = 0.8 [A]

$g_{MR}$  (gap) intervalo donde se encuentra el fluido = 1 [mm]

$l_{acero}$  longitud magnética del acero = 0.213 [m]

$\mu_{MR}$  coeficiente de permeabilidad magnética del fluido MR = 5.26

$\mu_{acero}$  coeficiente de permeabilidad magnética del acero = 100 (Olmo, 2012)

$A_{MR}$  Área del fluido = 0.131 [m]

$A_{acero}$  Área del acero = 0.444 [m]

$H_{MR}$  Intensidad de campo magnético del fluido = 121000 A/m

$N = 215.91 \approx 216$  vueltas



0,8 A → 24  
(AWG)



# SELECCIÓN DEL LIMITADOR



Dispositivos del Mercado



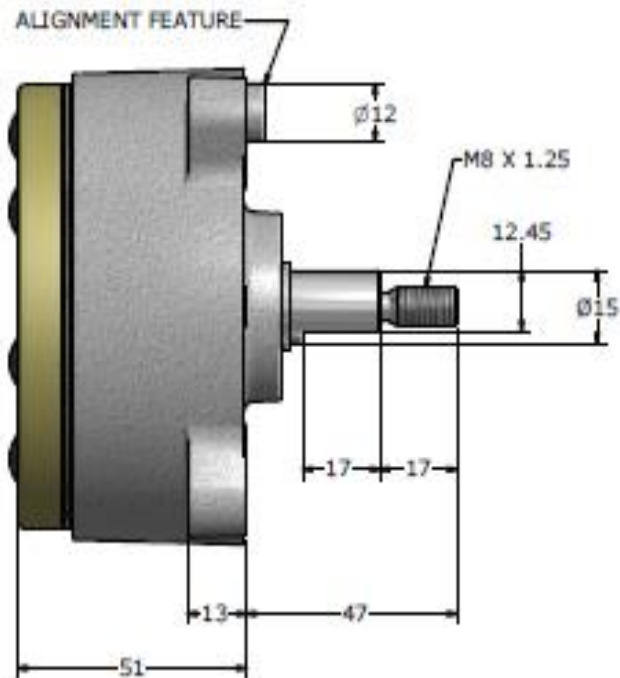
Condiciones geométricas y mecánicas



TDF Steering Unit LORD



5 Nm



7 Nm



Flexión y extensión



Sistema de transmisión



# DISEÑO DEL EJE



Masa 70 kg.  
Factor de seguridad= 1,2  
Masa 84 Kg.



Teoría de deformación



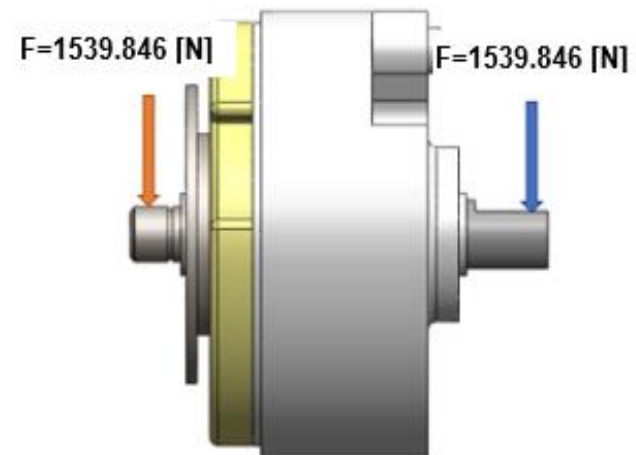
$\phi = 7,491 [mm] \rightarrow \phi = 12,7 [mm]$



Criterio de Goodman



Factor de Seguridad  $n = 1,13$



# SELECCIÓN SERVOMOTOR



Marcha Humana



Movimiento Continuo



Actuador Pasivo



Motor DC

Servomotor



Torque 3,9 [Nm]  
Precio 150

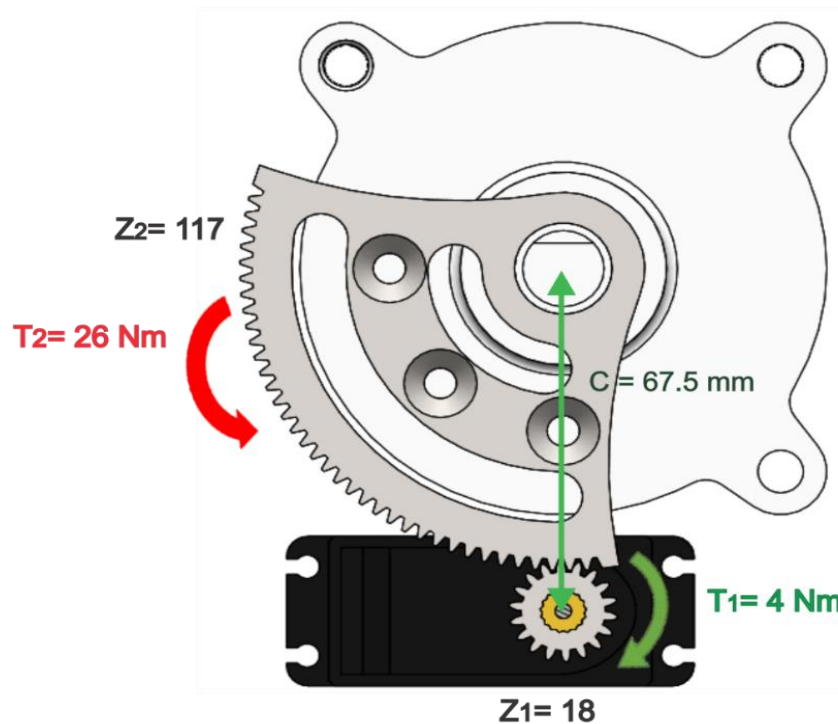


Torque 4 [Nm]  
Precio 60



Marcha → 10 a 25 [Nm]

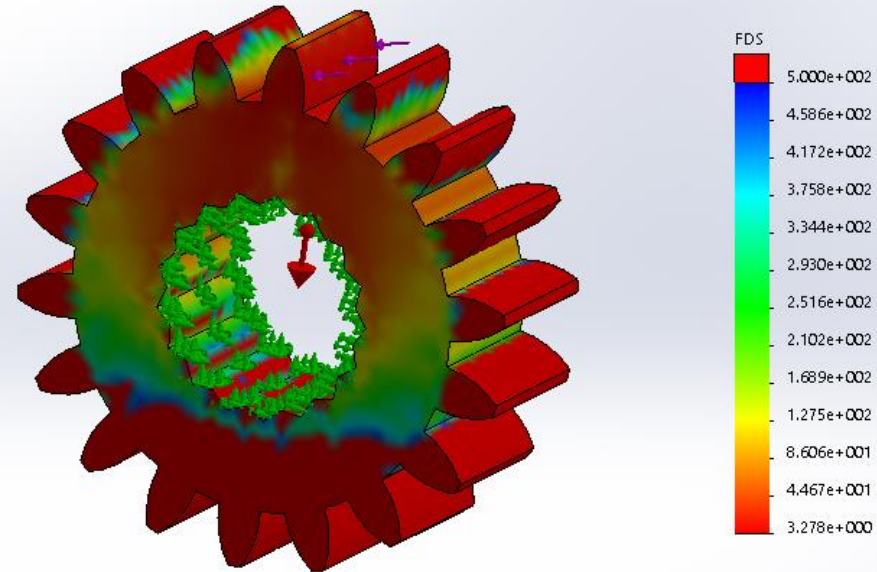
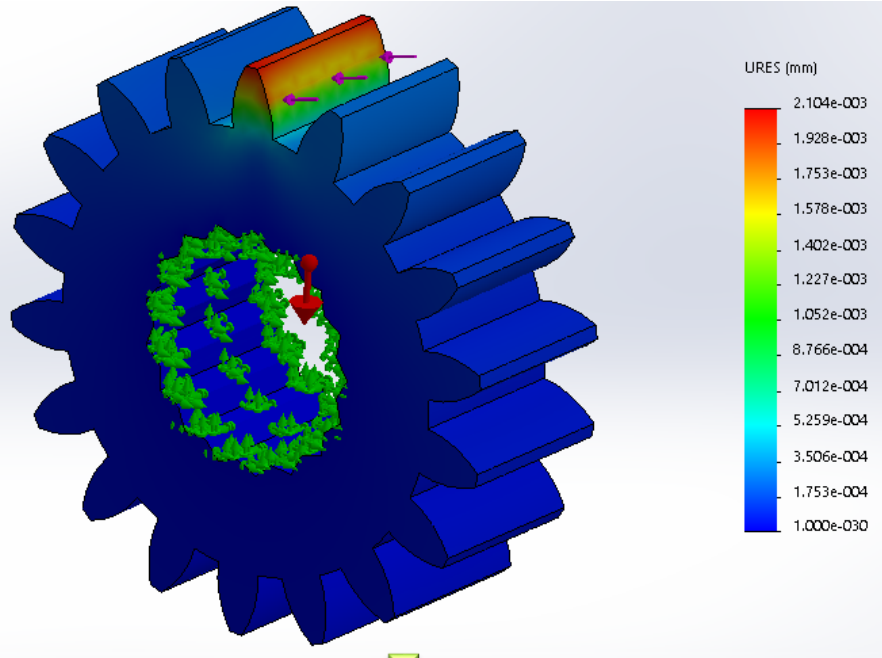
Relación de Transmisión → 6,25: 1



Torque máximo

26 [Nm] + 5 [Nm]

31 [Nm]



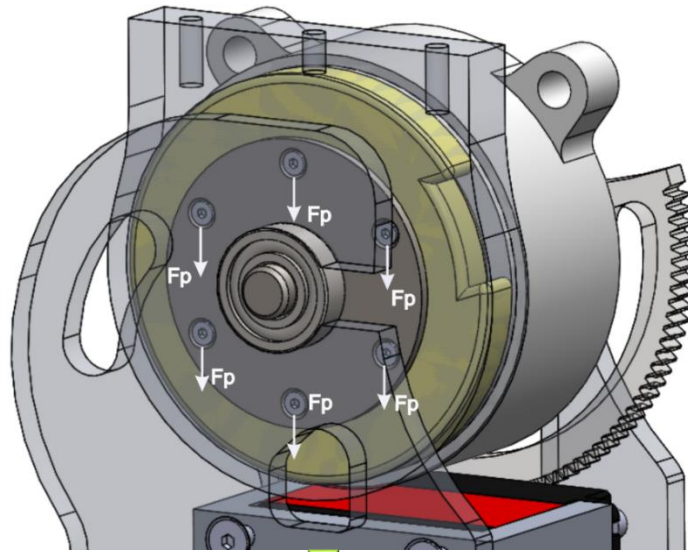
Deformación 0,00214 [mm]

Factor de seguridad 3,27



Giro 90 Bloqueo de movimiento

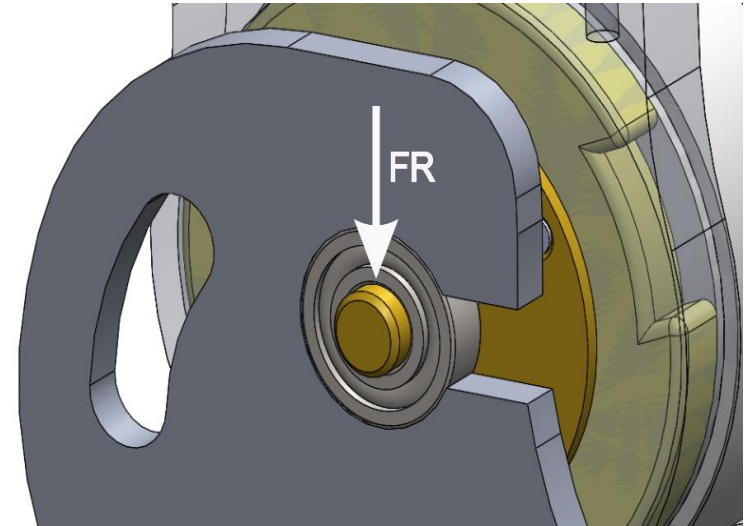
# DISEÑO CORTANTE PERNOS DE LA MANZANA



F perno → 266,64 N



F soporta → 1170 N



Rodamiento  
SKF 6001



C → 3,9 KN

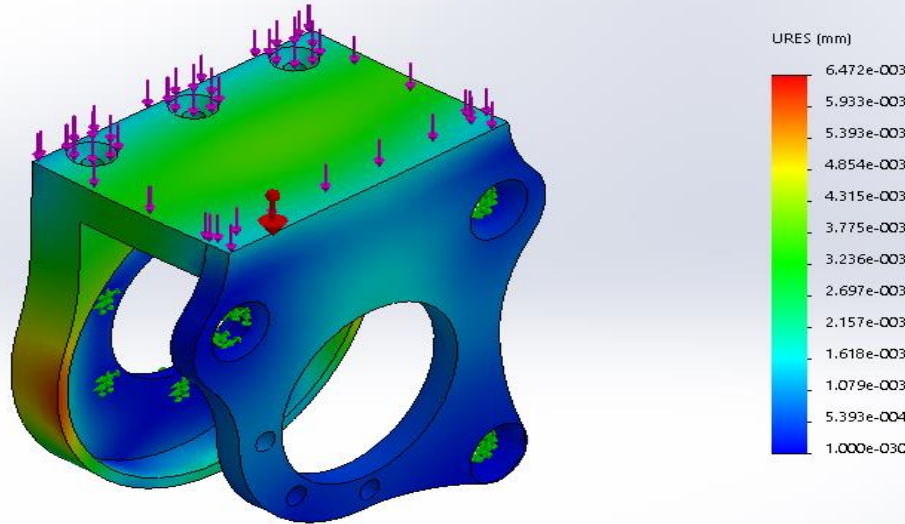
C soporta → 5,1 N



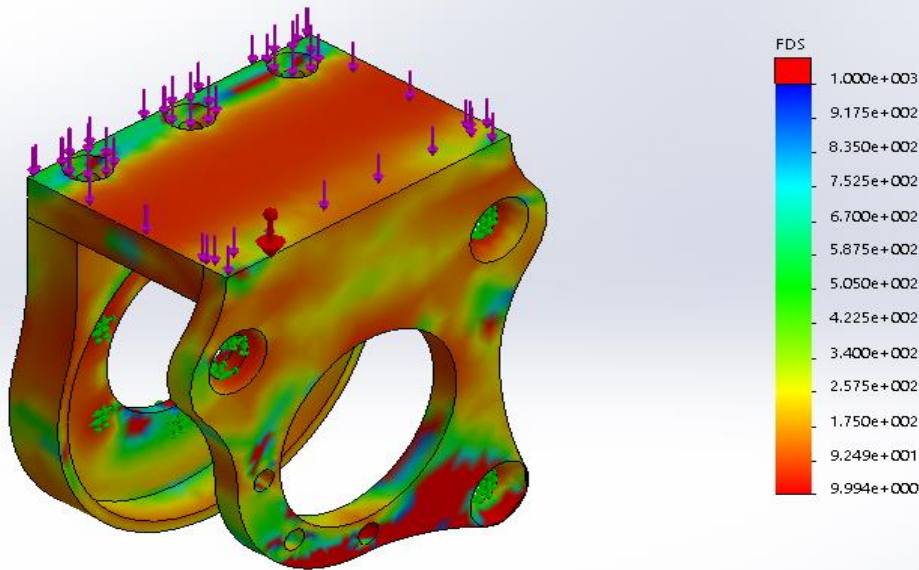
# DISEÑO SOPORTE DEL LIMITADOR



Aluminio C330



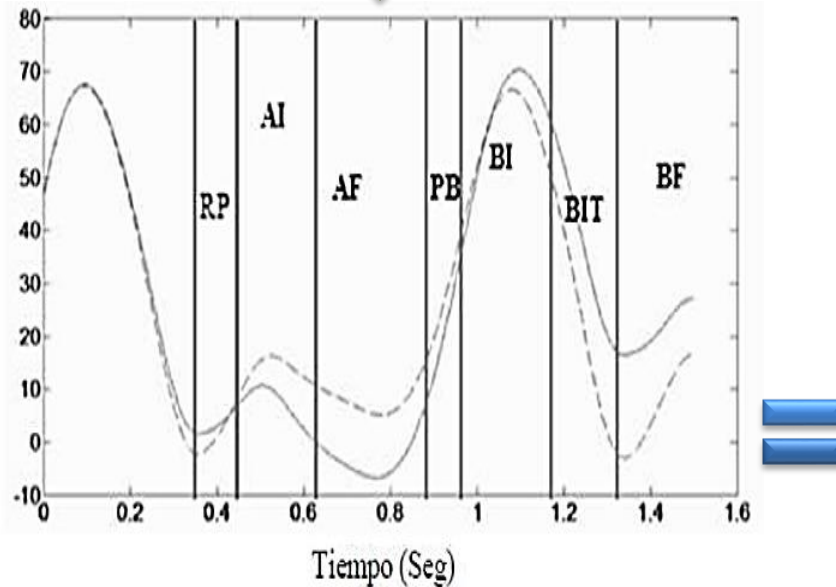
Deformación  
0,006472 [mm]



Factor de  
seguridad 9,9

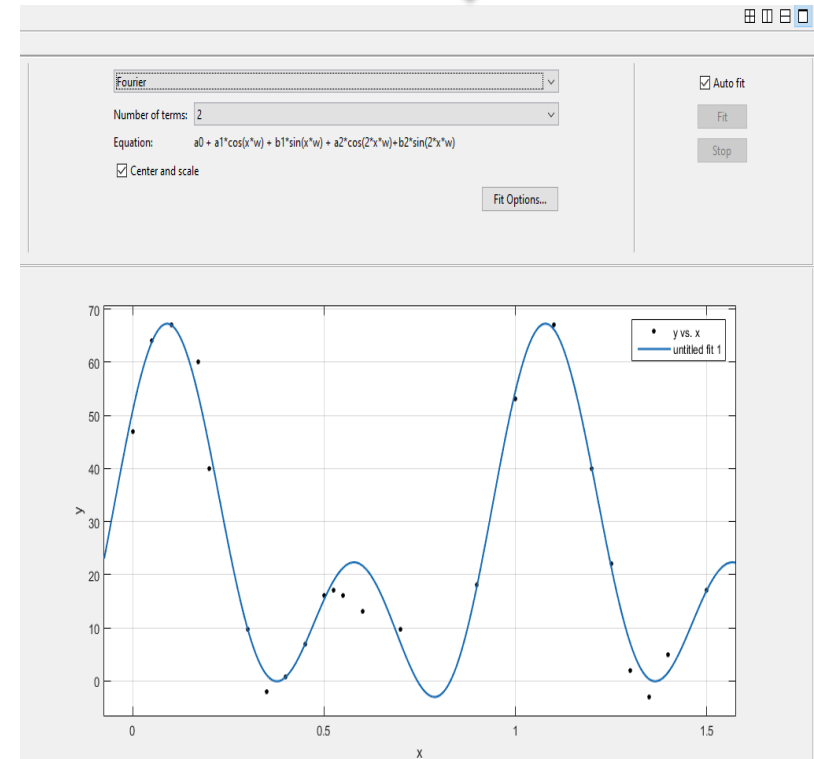


Marcha Humana

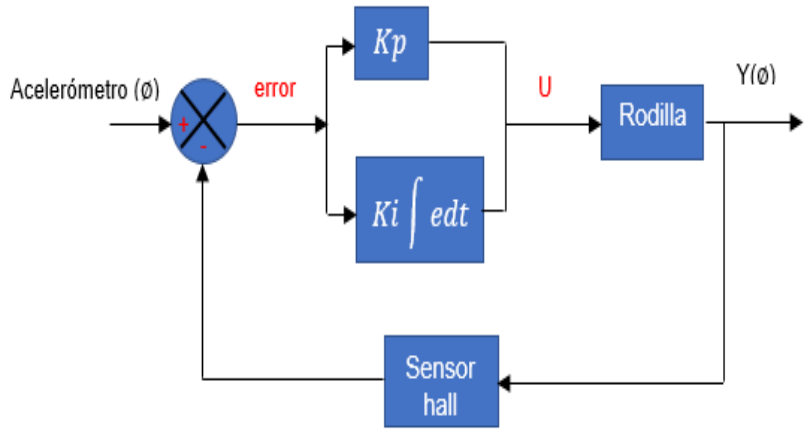


Variación angular en grados de la articulación de la prótesis de la rodilla.  
 RP-respuesta al peso,  
 AY-apoyo intermedio,  
 AF-apoyo final,  
 PB-pre balanceo,  
 BI-balanceo inicial,  
 BIT- balance intermedio,  
 BF-balanceo final

Matlab

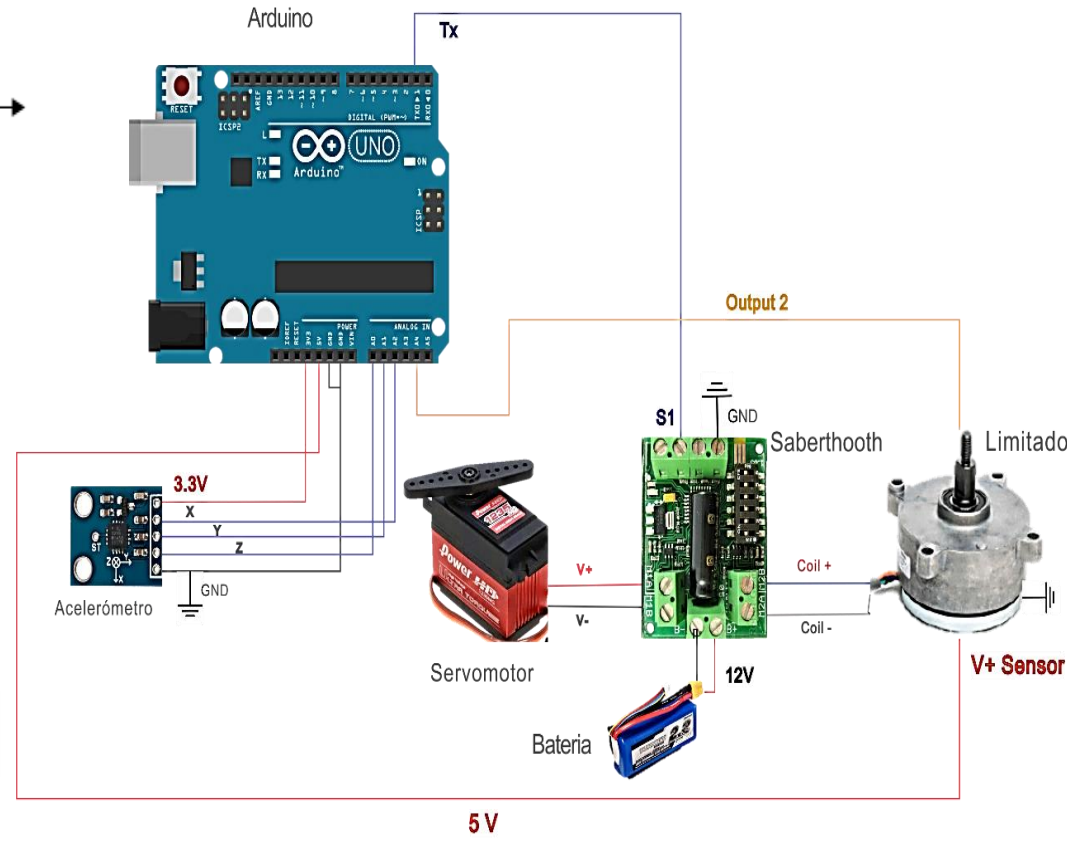


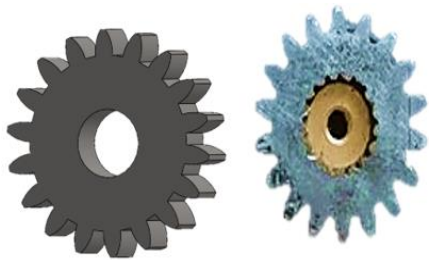
$$\theta(t) = 23.06 - 18.24\cos(3.057t) + 13.2\sin(3.057t) + 3.936\cos(6.114t) - 21.35\sin(6.114t)$$



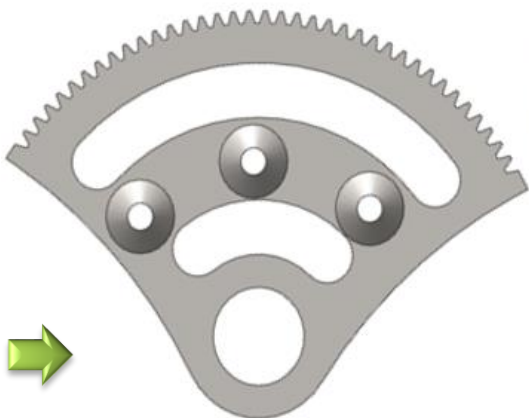
Proporcional → Rapidez

Integral → Estabilización

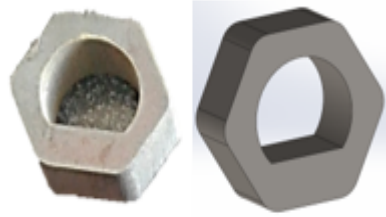




Sistema de transmisión



Buje



Tapa del Limitador



Soporte del servomotor



Manzana



# CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN



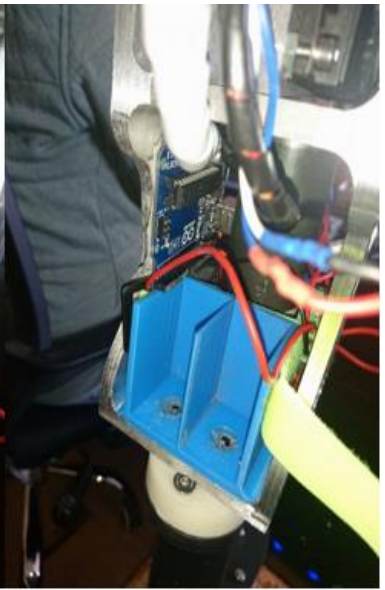
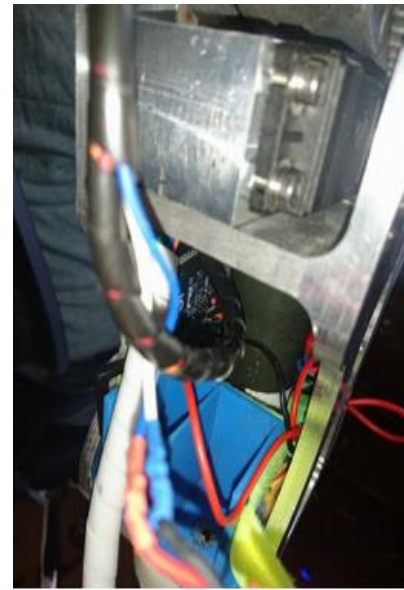
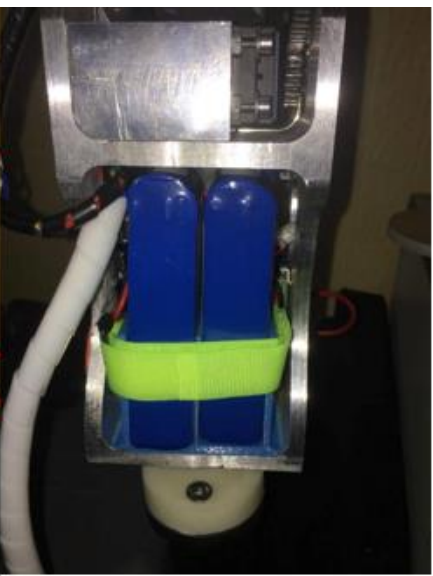
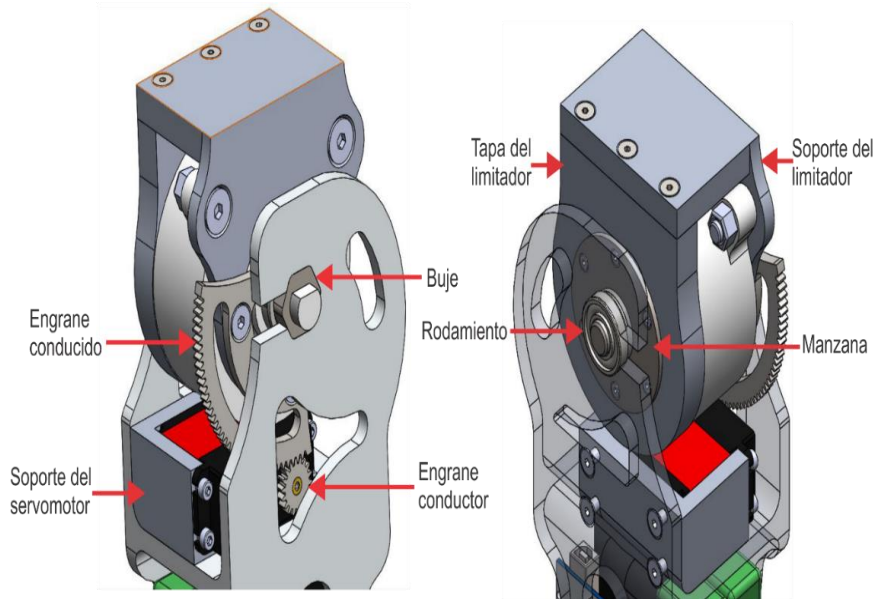
Soporte del Limitador



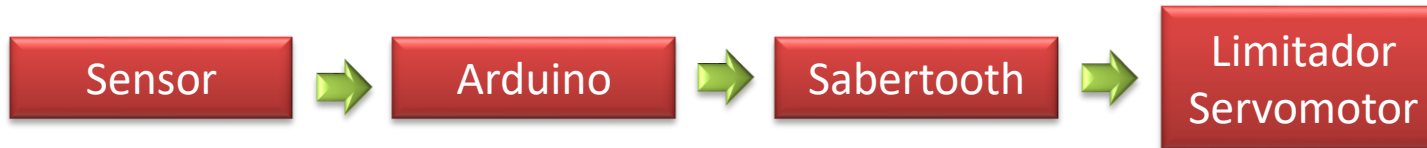
Estructura



# CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN



# SISTEMA DE CONTROL



```
proporcional Arduino 1.7.4
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
proporcional
//the accelerometer while standing still
//You very well may need to change these
int minVal = 265;
int maxVal = 380;

//to hold the caculated values
double x;
double y;
double z;
double y1;
int pos;
int kp=5.5;
int ki=0.05;

void setup()
{
  SabertoothTXPinSerial.begin(9600); // This is the baud rate you
}
```

```
{
  SabertoothTXPinSerial.begin(9600); // This is the baud rate you
}

void loop()
{
  int xRead = analogRead(xPin);
  int yRead = analogRead(yPin);
  int zRead = analogRead(zPin);
  int hallRead = analogRead(hallPin);

  //convert read values to degrees -90 to 90 - Needed for atan2
  int xAng = map(xRead, minVal, maxVal, -90, 90);
  int yAng = map(yRead, minVal, maxVal, -90, 90);
  int zAng = map(zRead, minVal, maxVal, -90, 90);
  pos=map(hallRead,420,800,175,90);
}
```

Mapeo y Acondicionamiento

420 a 800



175 a 90

Comunicación Serial



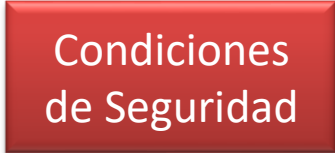
```
proportional2.0

//***** CONTROL PI *****/

ahora=millis(); // tiempo actual
int CambioTiempo= ahora-pasado; // diferencia de tiempo actu
if(CambioTiempo >= TiempoMuestreo) // si se supera el tiempo d
{
    error = pos-z; // error (Lazo cerr
    errorpast=error*TiempoMuestreo+errorpast; // cálculo de apr
    float P=kp*error; // control propor
    float I=ki*errorpast;

    servo=P+I; // Señal de control

    pasado=ahora; // actualizar tiempo
}
```



```
//Algoritmo de seguridad para evitar un excesivo PWM en el servomotor
if(servo>80)
{
    servo=80;
}

if(servo<-80)
{
    servo=-80;
}

//Evitar que los engranes salgan de su posición
if (pos>=175 && z>=175)
{
    servo=0;
    ST.motor(1,servo);
}
else
{
    if(pos<=90 && z<=90)
    {
        servo=0;
        ST.motor(1,servo);
    }
}

//Mover servo a la posición deseada
ST.motor(1, servo); // Go forward at full power.
}
```

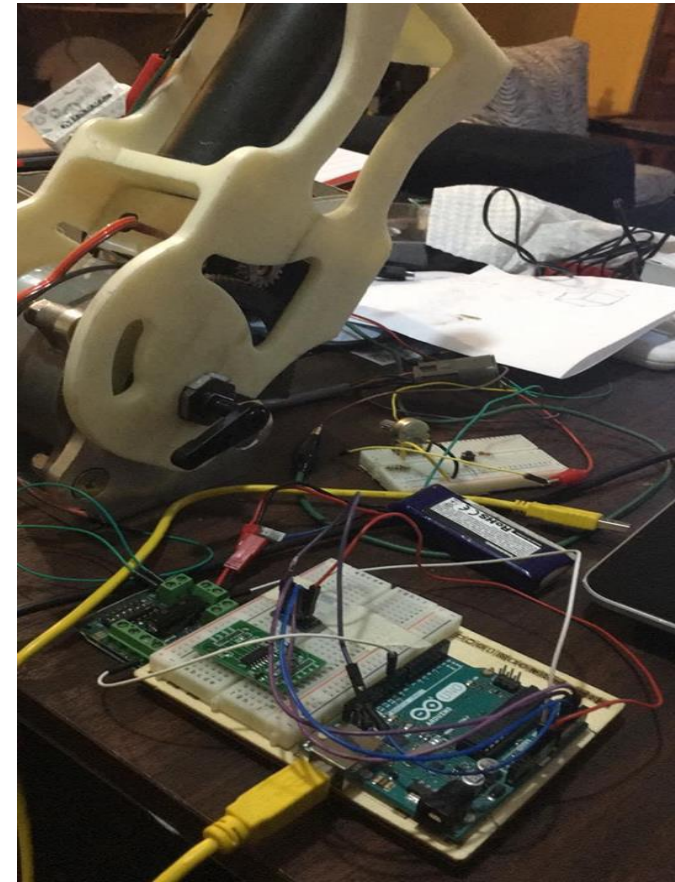
### Activación del Limitador



```
//Activar Limitador

if(error<2)
{
  limitador=127;
  ST.motor(2,limitador);
}

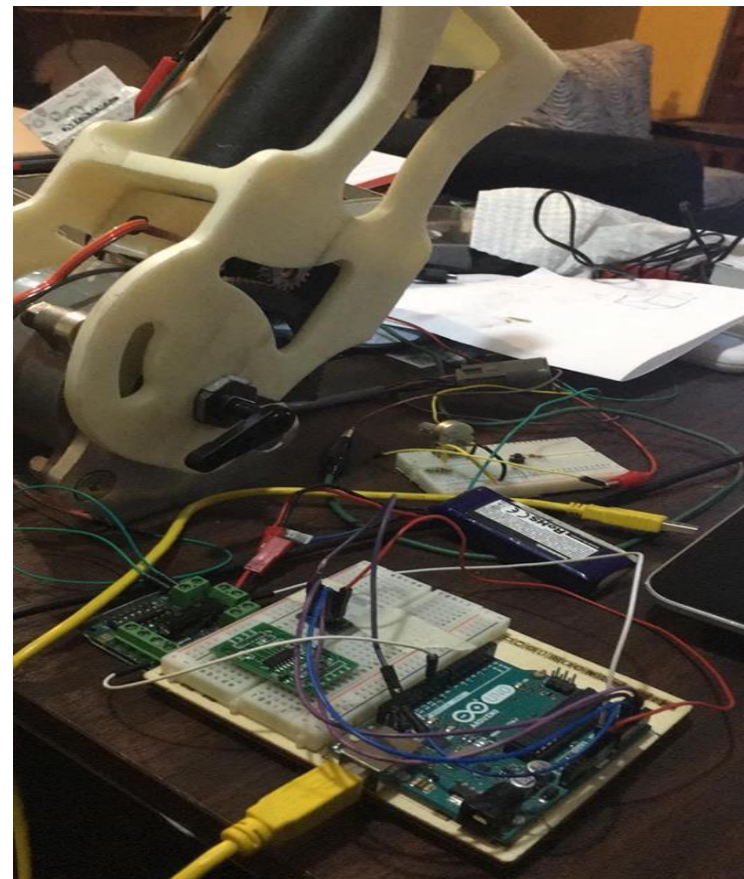
else
{
  limitador=0;
  ST.motor(2,limitador);
}
```



## Activación del Limitador



```
//Activar Limitador  
  
if(error<2)  
{  
  limitador=127;  
  ST.motor(2,limitador);  
}  
  
else  
{  
  limitador=0;  
  ST.motor(2,limitador);  
}
```



Implementación circuito eléctrico

# ENSAMBLAJE FINAL



# ANÁLISIS DE RESULTADOS



Limitador de Torque

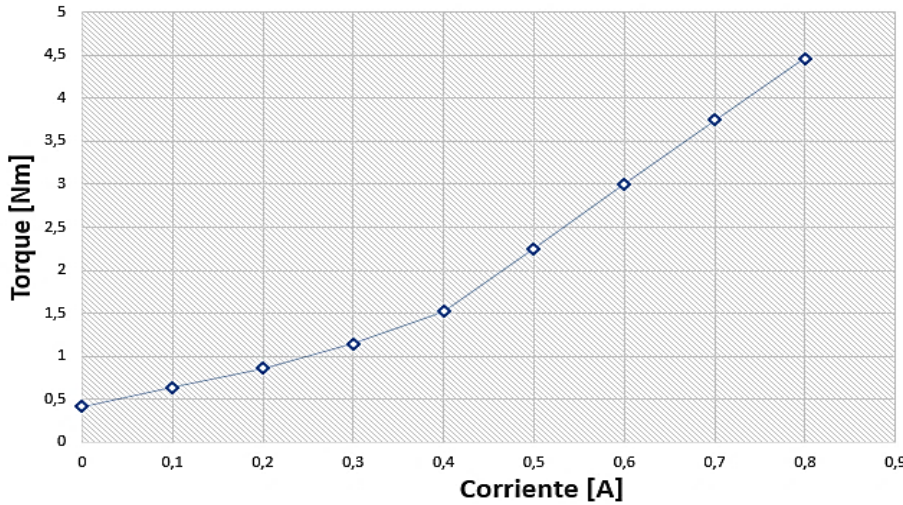


Datos Obtenidos

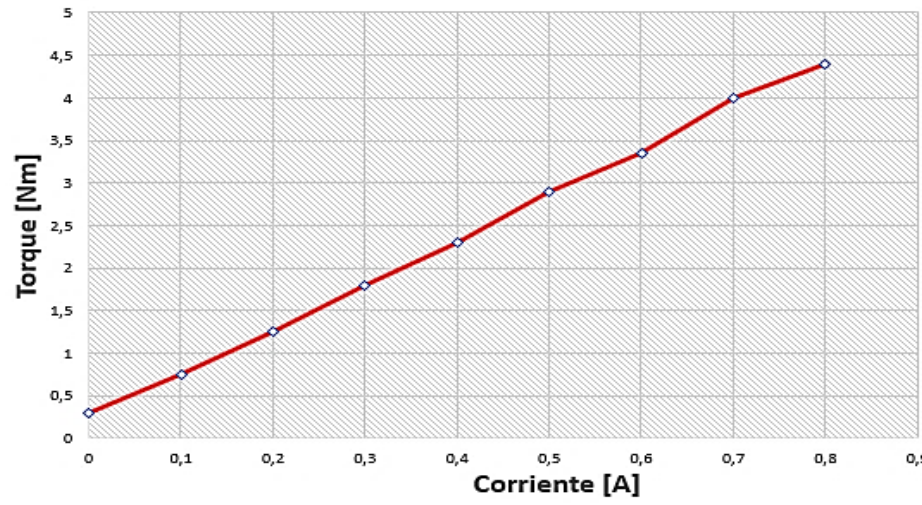


Datos Fabricante

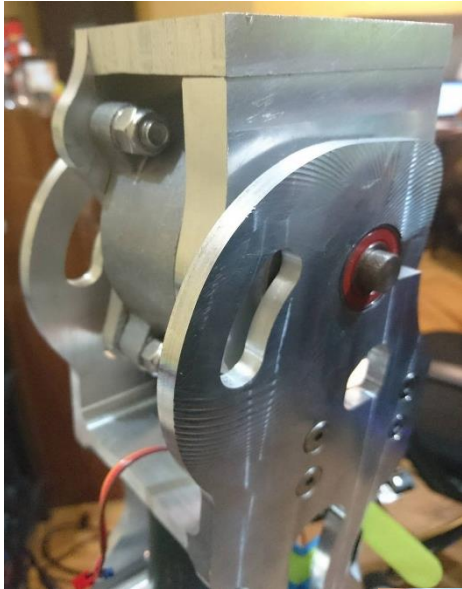
Corriente Vs Torque



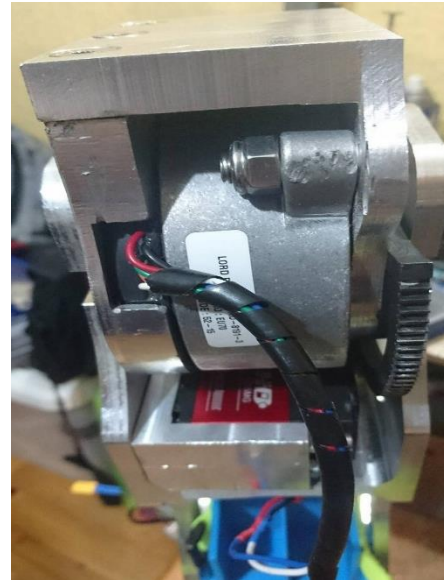
Corriente Vs Torque



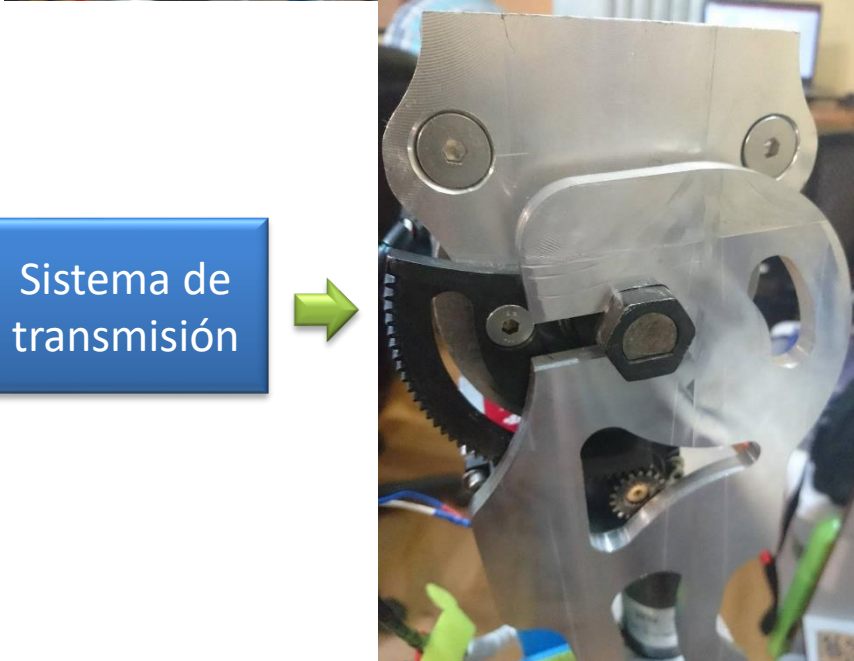
# IMPLEMENTACIÓN



Estructura de la prótesis



Limitador de torque y servomotor



Sistema de transmisión

Prótesis completa (pruebas)





## RESPUESTA PROTESIS A LA MARCHA

### Interfaz

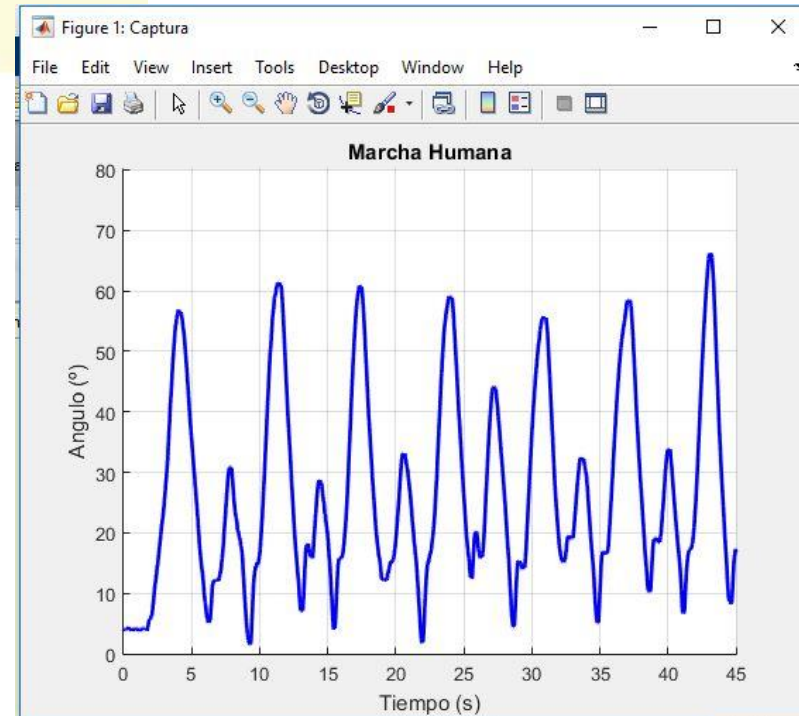
```
ard$  
  
int out1 = 0;  
void setup() {  
  // inicializar puerto serie  
  Serial.begin(9600);  
}  
void loop() {  
  out1 = analogRead(A0);  
  Serial.println(out1);  
  delay(20);  
}
```

```
delete(instrfind({'Port'}, {'COM3'}));  
%crear objeto serie  
s = serial('COM3', 'BaudRate', 9600, 'Terminator', 'CR/LF');  
warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');  
%abrir puerto  
fopen(s);  
% parámetros de medidas  
tmax = 45 % tiempo de captura en s  
rate = 33; % resultado experimental (comprobar)  
% preparar la figura  
f = figure('Name', 'Captura');  
a = axes('XLim', [0 tmax], 'YLim', [0 80.1]);  
ll = line(nan, nan, 'Color', 'b', 'LineWidth', 2);
```

Arduino

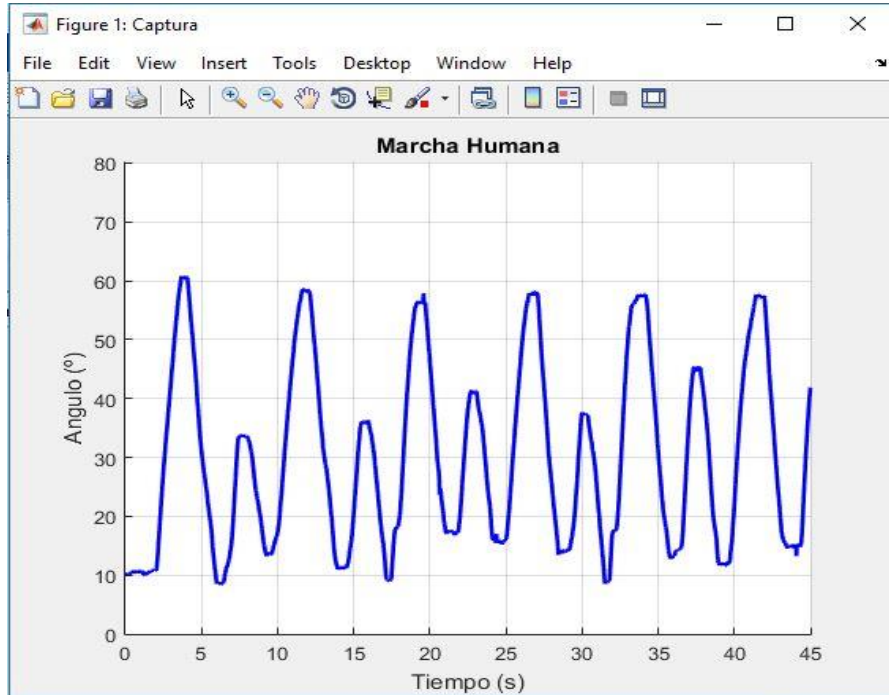


Matlab

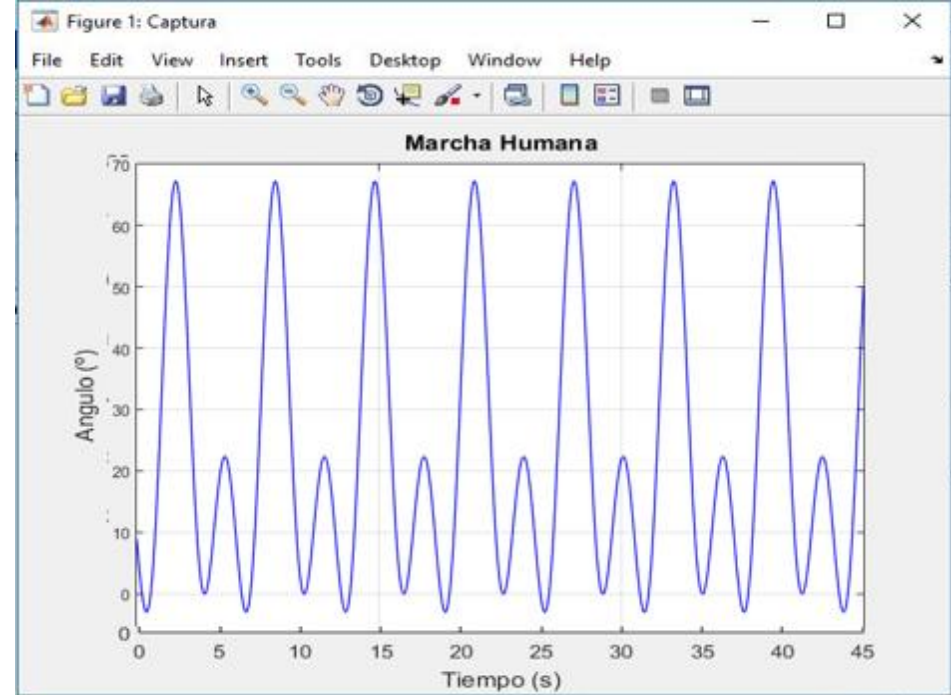




# RESPUESTA PROTESIS A LA MARCHA



Marcha Humana  
Prótesis



Marcha Humana  
Normal



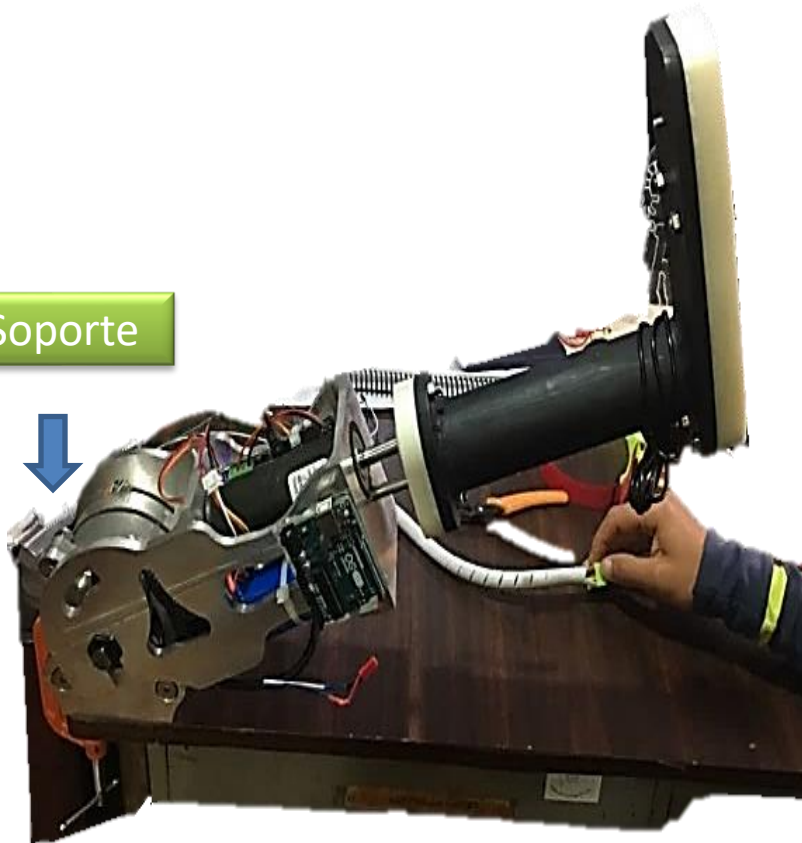


# PRUEBAS CON CARGA



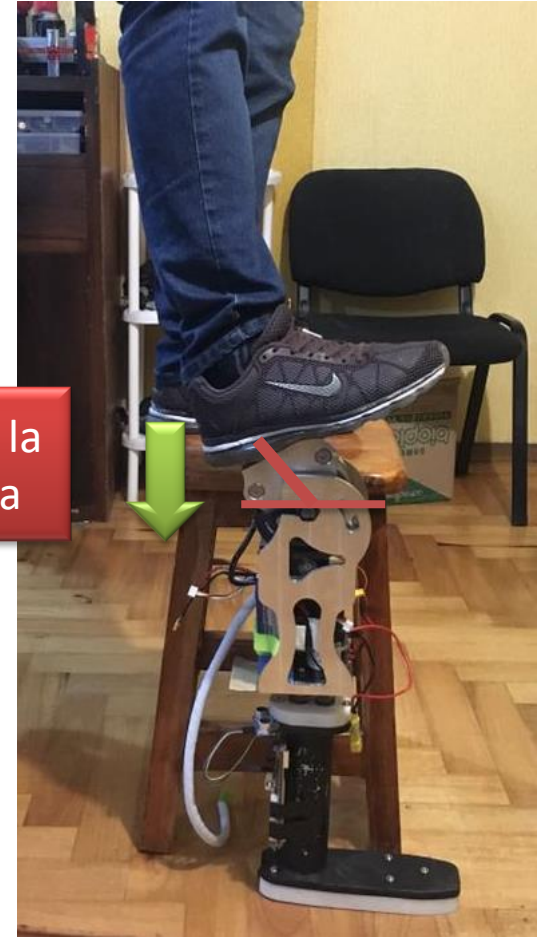
Flexión

Soporte



Carga Aplicada

Peso de la persona





## CONCLUSIONES

Mediante la investigación de las propiedades mecánicas de materiales Magnetoreológicos bajo la acción de diferentes campos magnéticos se lleva a cabo el diseño e implementación de un prototipo de prótesis de rodilla con un control activo de torque activo.

Con la implementación de los fluidos Magnetoreológicos en el prototipo construido, se logra generar un control de torque activo durante la caminata y reemplazar la función del músculo perdido.

El esquema de control se permite controlar el actuador del prototipo de prótesis para replicar la marcha humana y mediante evaluaciones experimentales del prototipo de prótesis desarrollada se verifica la incidencia del esquema de control en el control activo del torque





## CONCLUSIONES

Para el correcto diseño del limitador de torque se consideran tres parámetros importantes: el número de vueltas, el límite de saturación magnética y el gap o cavidad en donde se encuentra el fluido MR, deben considerarse simultáneamente para el diseño del limitador.

Los dispositivos de fluido MR, gracias a sus numerosas ventajas (compacidad, altas fuerzas o pares, bajo consumo de energía, suavidad y seguridad de funcionamiento), pueden utilizarse en una amplia variedad de campos que van desde automoción a la rehabilitación. El reciente interés creciente del mercado por los fluidos magnetoreológicos deriva principalmente de la capacidad de emplear interfaces rápidas y sencillas entre una señal de control eléctrico y una respuesta mecánica.





## CONCLUSIONES

Estos materiales tienen el potencial de cambiar radicalmente el diseño de las máquinas en las que su implementación es posible. Sin embargo, este escenario sólo es posible si los dispositivos que explotan estas características son capaces de garantizar el accionamiento mediante un movimiento preciso y rápido. Esta consideración es aún más relevante cuando se tiene en cuenta su costo. Como los dispositivos magneto-reológicos son controlables electrónicamente, es posible usar algoritmos de control de realimentación para mejorar su funcionalidad; sin embargo, este tipo de control requiere conocimiento de la respuesta del dispositivo mucho más allá de la disponible en la hoja de datos proporcionada por el fabricante.

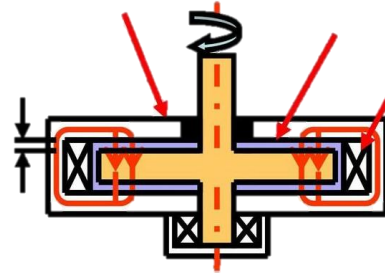




# RECOMENDACIONES



Comunicación Inalámbrica



Limitador de toque mas compacto



Medidas ajustables