

Trabajo Fin de Máster CURSO 2022/2023

EVALUACION DE RESULTADOS EN BANCOS DE ENSAYOS CIBER-FISICOS PARA MOTORES ELECTRICOS

AUTOR: CARLOS LOURIDO FERNANDEZ

TUTORES: EMILIO SANJURJO MAROÑO
FRANCISCO JAVIER GONZALEZ VARELA

TFM Nº: 2122-TFM-3

M. U. en Ingeniería Industrial

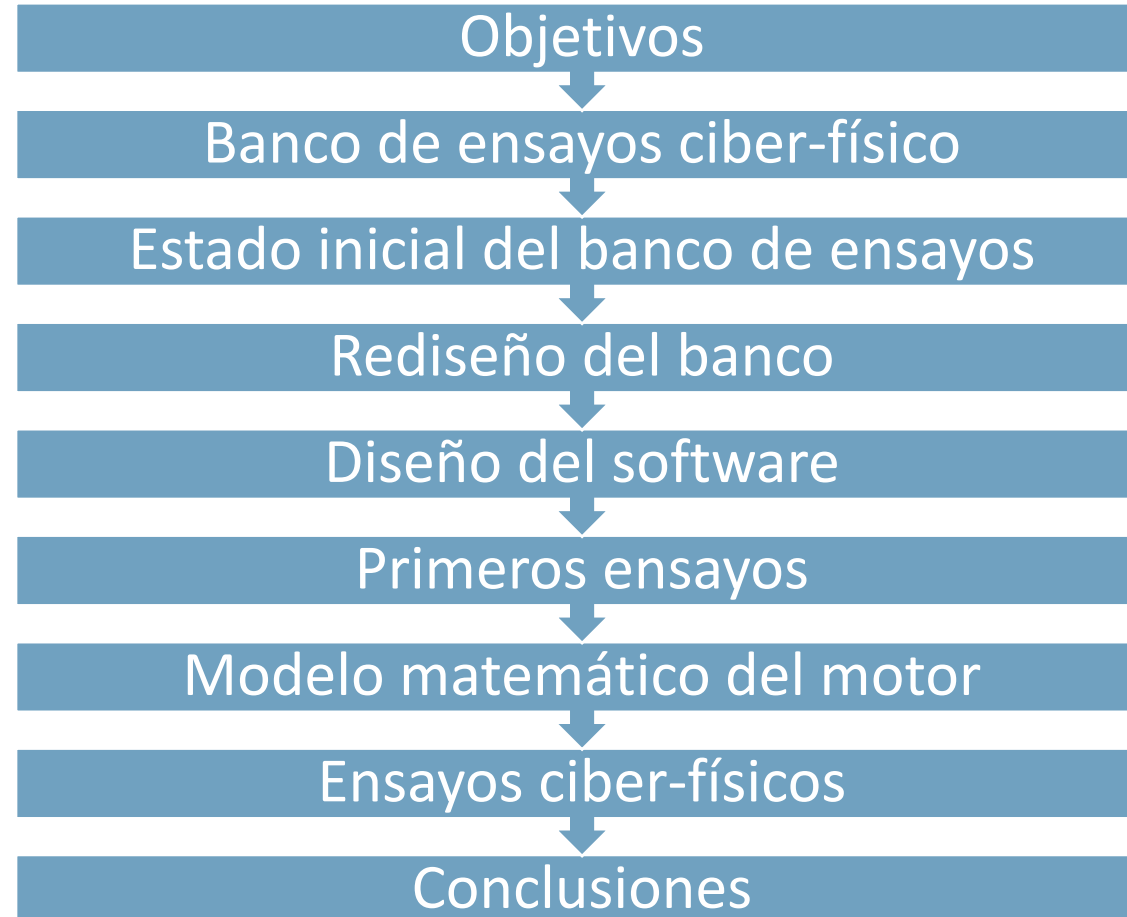
FECHA: SEPTIEMBRE 2023



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol



Objetivos

Contribuir a la cuantificación de los errores presentes en la experimentación ciber-física de un banco existente

Rediseño del banco para comparar ensayos físicos y ciber-físicos

Diseño del software

Creación un modelo matemático del motor

Realización ensayos ciber-físicos

Análisis de los Resultados



Ventajas:

Validación en etapas tempranas

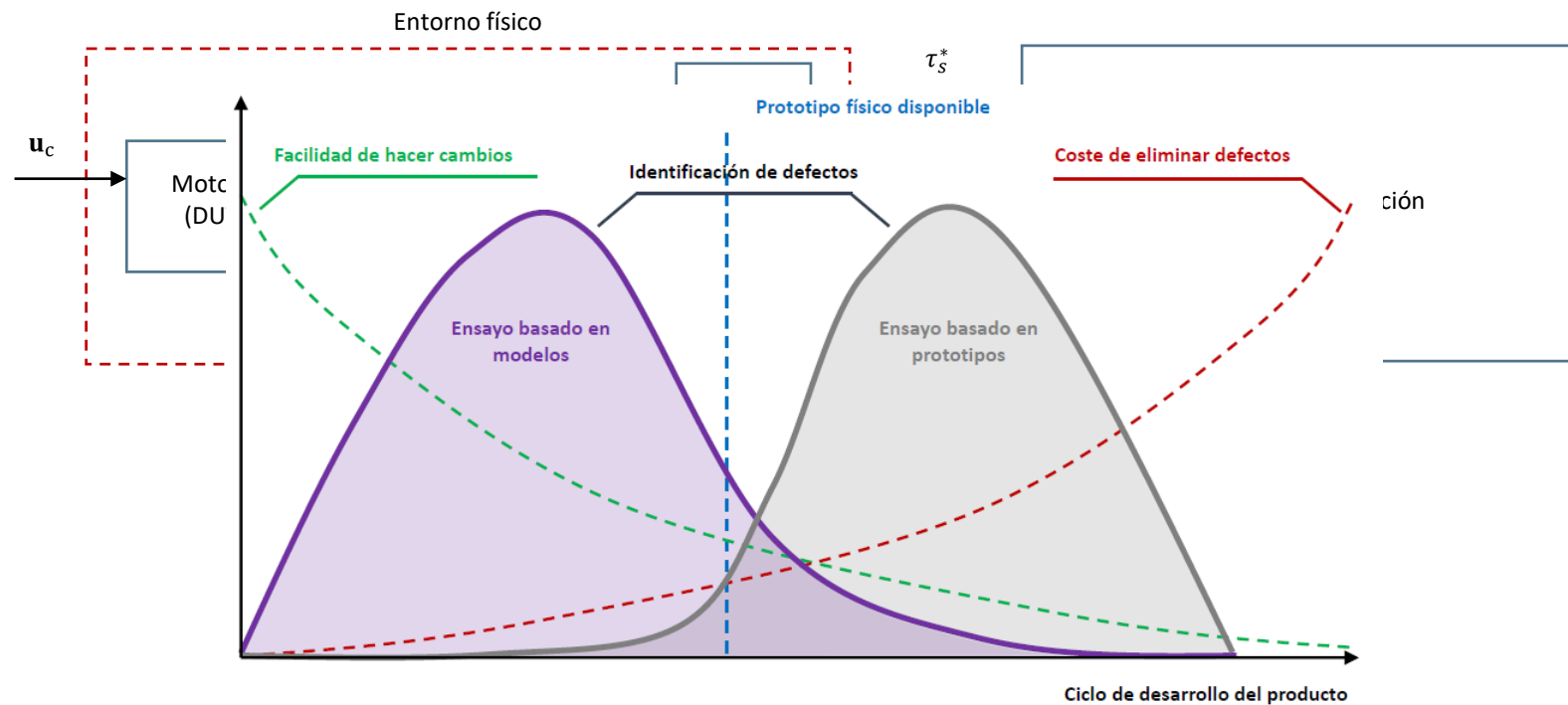
Descubrir defectos o fallos anticipadamente

Mayor facilidad para hacer cambios

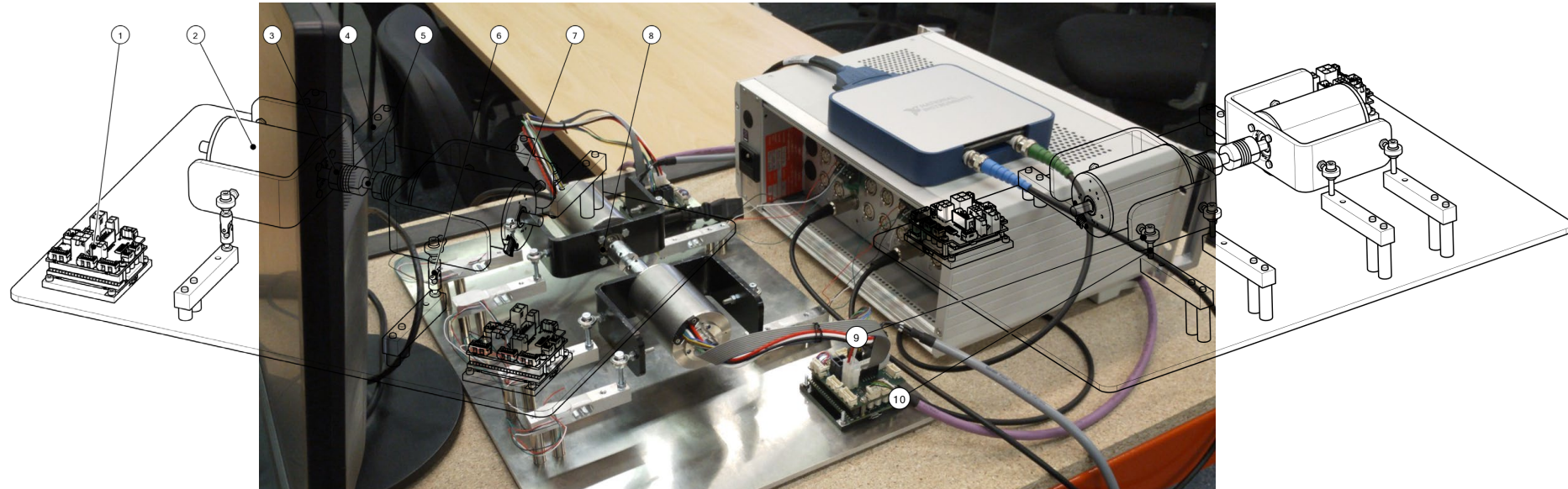
Ahorro en costes

Repetitividad de ensayos con las mismas condiciones

Posibilidad de simular maniobras peligrosas o difíciles



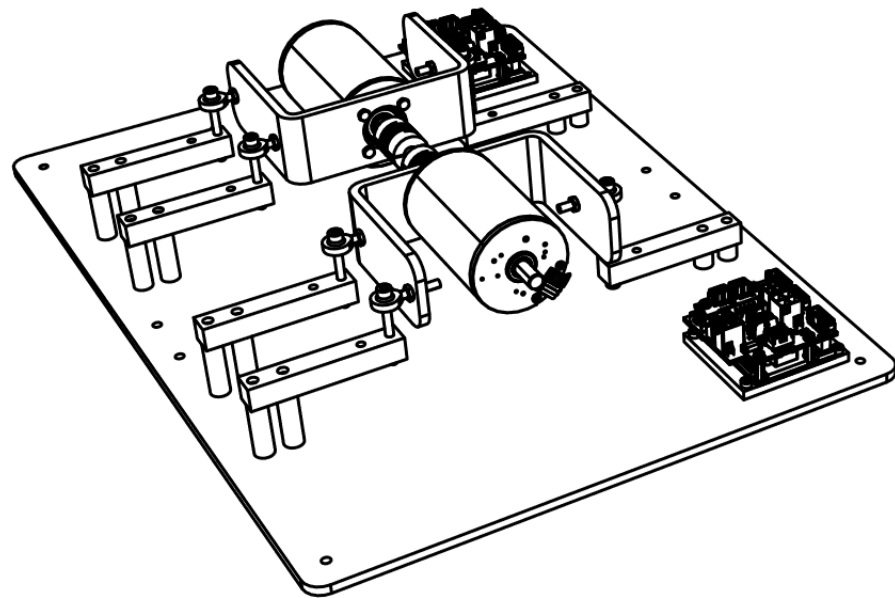
Estado inicial del banco de ensayos



| Nº | Descripción |
|----|-----------------------|
| 1 | Controladora EPOS4 |
| 2 | Motor EC-i52 |
| 3 | Acoplamiento flexible |
| 4 | Células de carga |
| 5 | Eje intermedio |

| Nº | Descripción |
|----|------------------------|
| 6 | Unión Cardán |
| 7 | Soporte en U del motor |
| 8 | Placa de montaje |
| 9 | Rótula |
| 10 | Tornillo rígido |





Requisitos:

Modificaciones mínimas

Mantener la funcionalidad

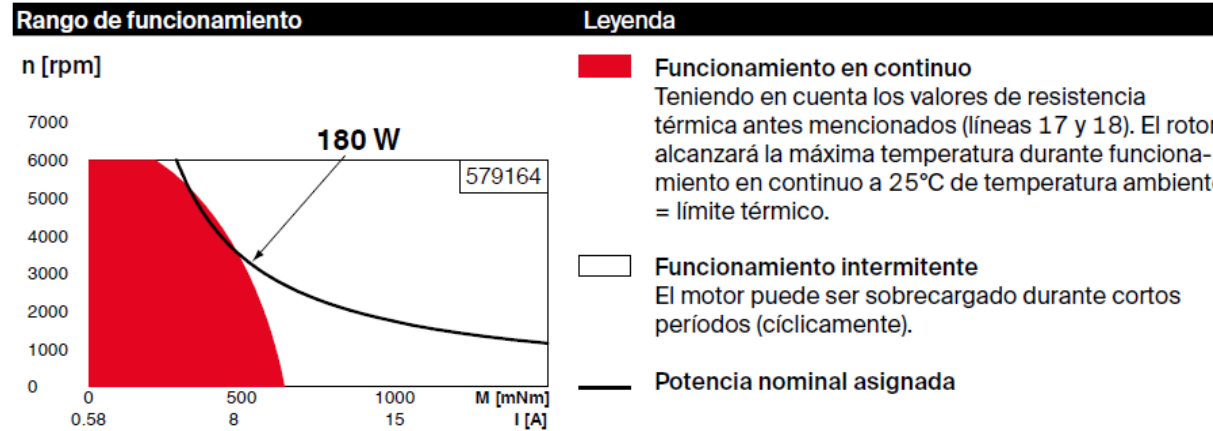
Incorporar ensayos con masas físicas

Cambio fácil de configuración



Rediseño del banco de ensayos - Cálculo de la masa física

Gráfica de rango de funcionamiento del motor EC-i52.



$$v = 4680 \text{rpm} = 490 \text{ rad/s}$$

$$\tau = 0.5 \text{Nm}$$

$$t_f = 10 \text{s}$$

α = Aceleración angular

v_f = Velocidad final

v_i = Velocidad Inicial

t_f = Tiempo final

t_i = Tiempo inicial

τ = Par empleado

J_c = Momento de inercia

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(v_f - v_i)}{(t_f - t_i)} = \frac{(490 - 0)}{(10 - 0)} = 49 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha = 45 \text{ rad/s}^2$$

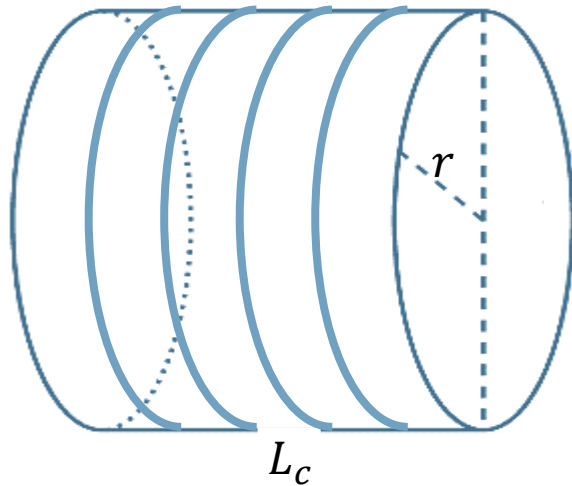
$$\tau = J_c \cdot \alpha$$

$$J_c = 11.11 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$



Rediseño del banco de ensayos - Cálculo de la masa física

$$J_c = 11.11 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$



m = Masa

r = Radio del cilindro

ρ = Densidad del material

V = Volumen del cilindro

L_c = Longitud del cilindro

Forma \rightarrow Cilíndrica

$$r = 67.5 \text{mm}$$

$$\rho = 7850 \text{kgm}^3$$

$$J_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$
$$m = \rho \cdot V$$
$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L_c$$

$$L_c = \frac{2 \cdot J_c}{\pi \cdot r^4 \cdot \rho}$$

$$L_c = 43.4 \text{mm}$$

$$r = 67,5 \text{mm}$$

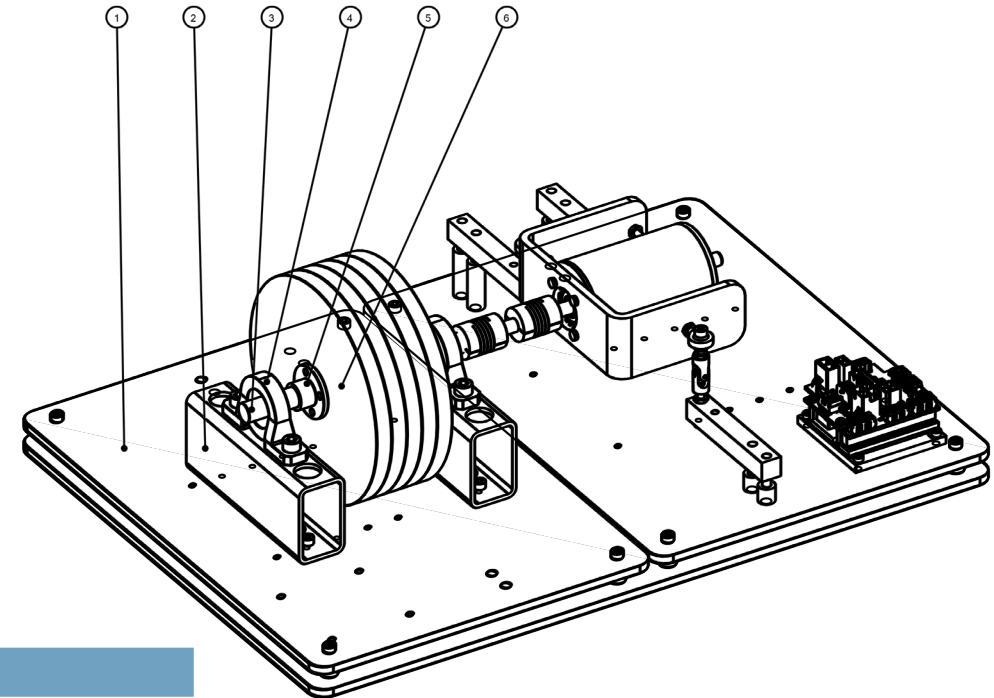
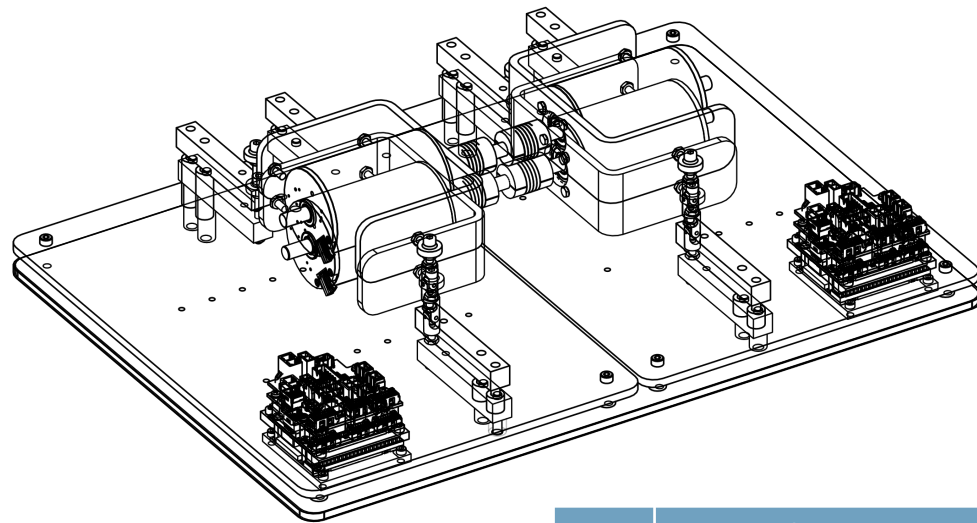
$$L_c = 50 \text{mm}$$

$$J_c = 12.87 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

$$m = 5.58 \text{kg}$$



Rediseño del banco de ensayos



| Nº | Descripción |
|----|-----------------------|
| 1 | Placa base modular |
| 2 | Soporte perfil 50x30 |
| 3 | Eje masa cilíndrica |
| 4 | Soporte UP001 |
| 5 | Brida rígida |
| 6 | Disco masa cilíndrica |



Banco de Ensayos

Inicio Fin

Banco

Simulación Pt Sim. : 0,040

Motor DUT Pt Com. : 0,040

Back to Back

Carga

Masa: 1,00 Radio: 0,01

Entrada

Control por Par desde Archivo

Control por Velocidad desde Archivo

C:/TFM/entradas/par_sin.bt Buscar

Pt Entrada 0,040 Bucle

Control por Par Manual

Par: 0 Set 0

Control por Velocidad Manual

Vel: 0 Set 0

Par Motor: []

Célula de carga Par Célula: []

Velocidad: []

Posición Posición: []

Salida: C:/TFM/resultados/

0%

Entrada

Salida

Par Motor: []

Célula de carga Par Célula: []

Velocidad: []

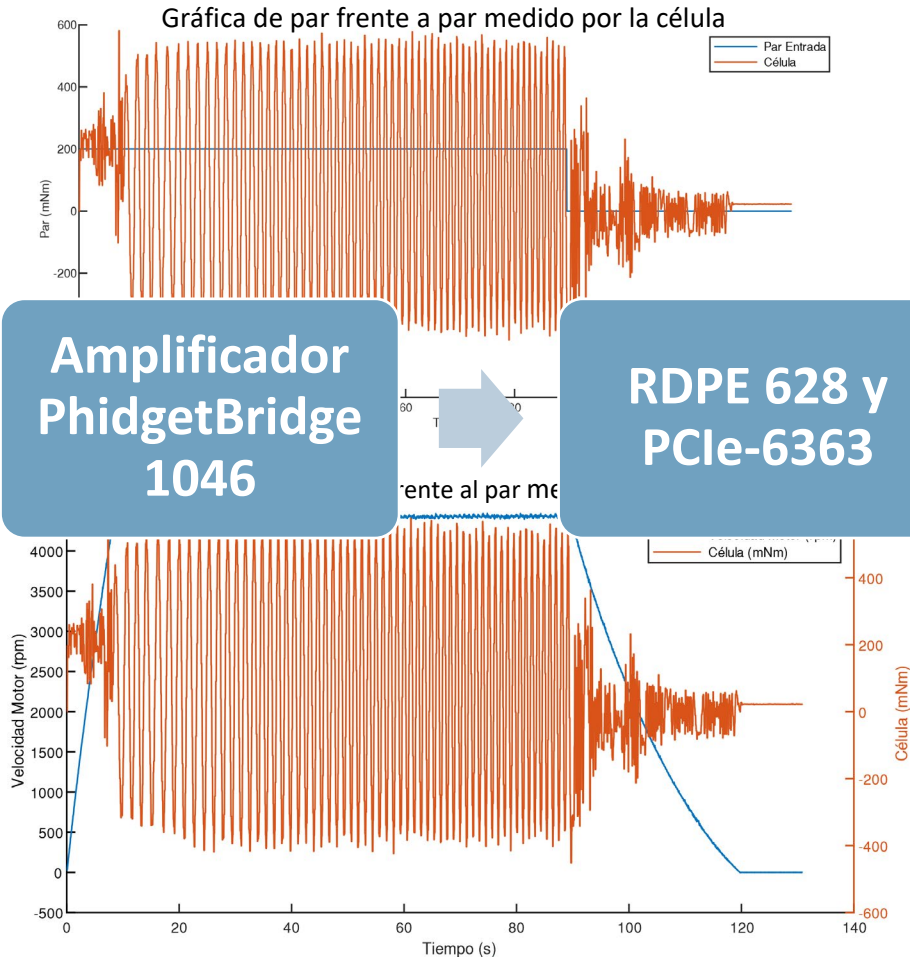
Posición Posición: []

Salida: C:/TFM/resultados/

0%



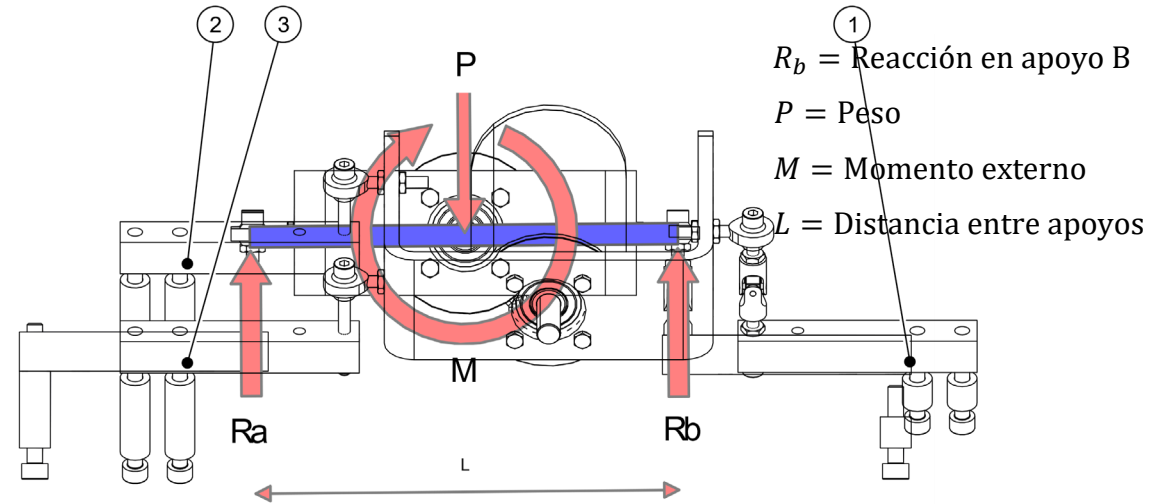
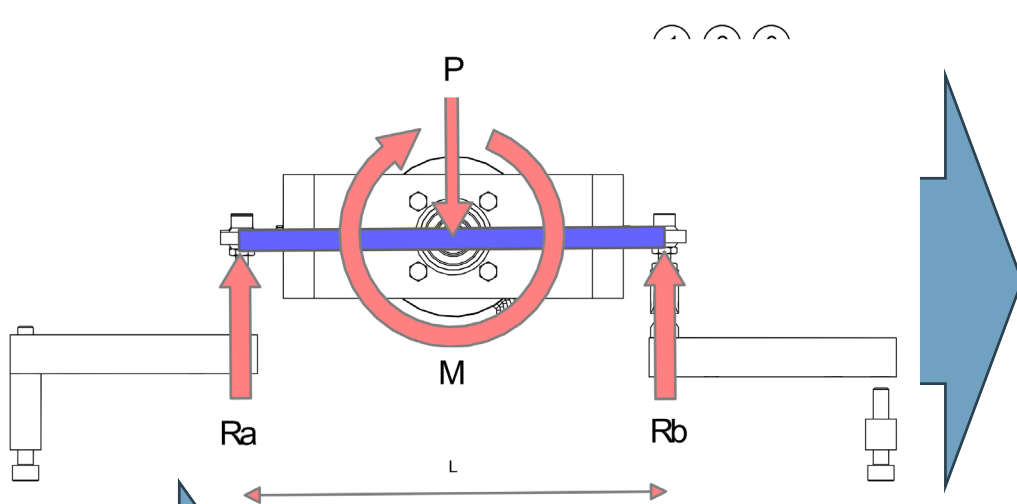
Primeros ensayos - Problemas observados



- Frecuencia máxima de comunicación con los motores 20Hz
- Aliasing en lecturas de las células
- Ampliación de células de carga



Primeros ensayos – Ampliación de células de carga



R_b = Reacción en apoyo B
 P = Peso
 M = Momento externo
 L = Distancia entre apoyos

$$R_a + R_b = P$$

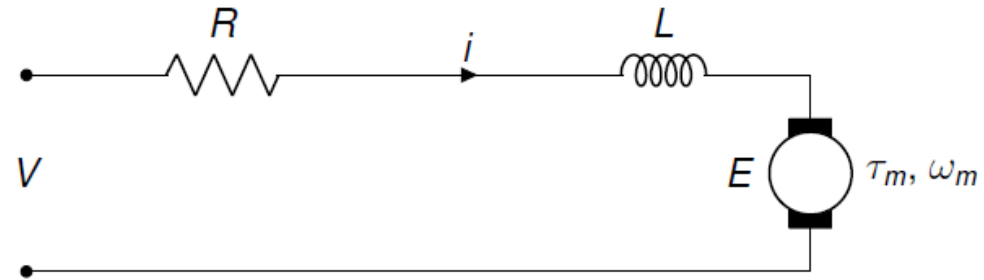
$$R_b = \frac{P}{2} + \frac{M}{L}$$

$$M = \left(R_b - \frac{R_a + R_b}{2} \right) \cdot L$$

| Nº | Descripción |
|----|--------------------------|
| 1 | Célula de carga original |
| 2 | Célula de carga nueva |
| 3 | Célula de carga nueva |



Modelo matemático del motor



ω_m = Velocidad del motor

τ_m = Par aplicado al motor

V = Voltaje aplicado

i = Intensidad

R = Pérdidas eléctricas en los bobinados

L = Inductancia

E = Fuerza contraelectromotriz

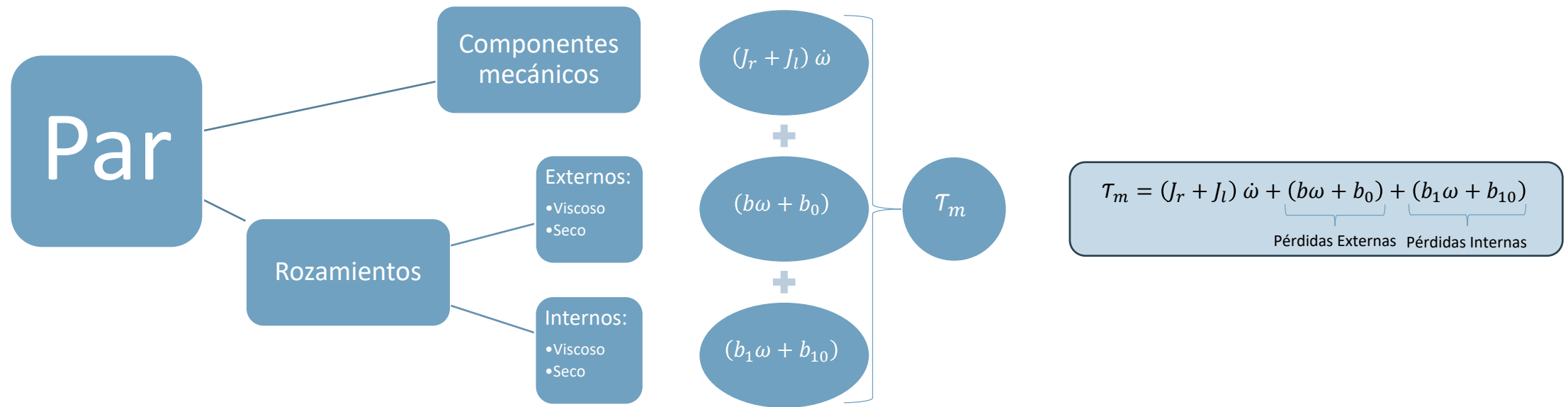
K_t = Constante de par

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + E$$

$$\tau_m = K_t \cdot i$$



Modelo matemático del motor - Caracterización



$$\tau_m = \cancel{(J_r + J_l)} \dot{\omega} + \underbrace{(b\omega + b_0)}_{\text{Pérdidas Externas}} + \underbrace{(b_1\omega + b_{10})}_{\text{Pérdidas Internas}}$$

Velocidad constante:

$$\tau_m = \cancel{(b\omega + b_0)} + (b_1\omega + b_{10})$$

Sin carga:

$$\tau_m = (b_1\omega + b_{10})$$

Con carga:

$$\tau_m = (b\omega + b_0) + (b_1\omega + b_{10})$$

τ_m = Par aplicado al motor

$\dot{\omega}$ = Aceleración angular

ω = Velocidad angular

J_r = Momento de inercia del rotor

J_l = Momento de inercia de la carga

b = Componente viscosa del rozamiento externo

b_0 = Componente seca del rozamiento externo

b_1 = Componente viscosa del rozamiento interno

b_{10} = Componente seca del rozamiento interno

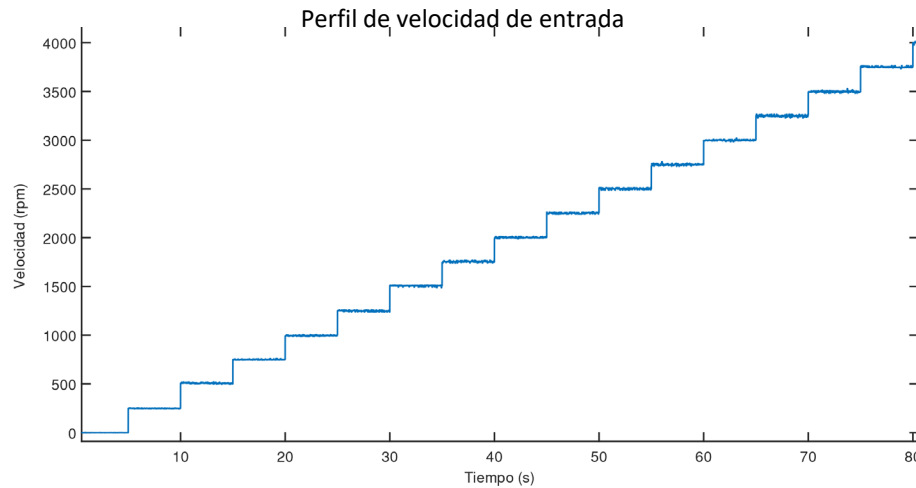


Modelo matemático del motor - Obtención de parámetros

$$b_1 = 4371.45 \cdot 10^{-6} \text{ mNm/rpm}$$

$$b_{10} = 11.55 \text{ mNm}$$

$$y = 4371.45 \cdot 10^{-6} \omega + 11.55$$

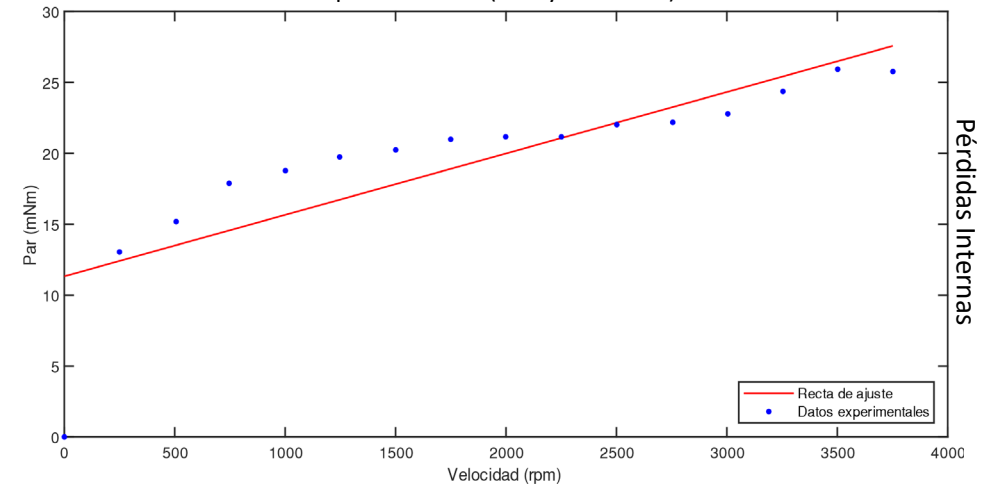


$$b = 8755.25 \cdot 10^{-6} \text{ mNm/rpm}$$

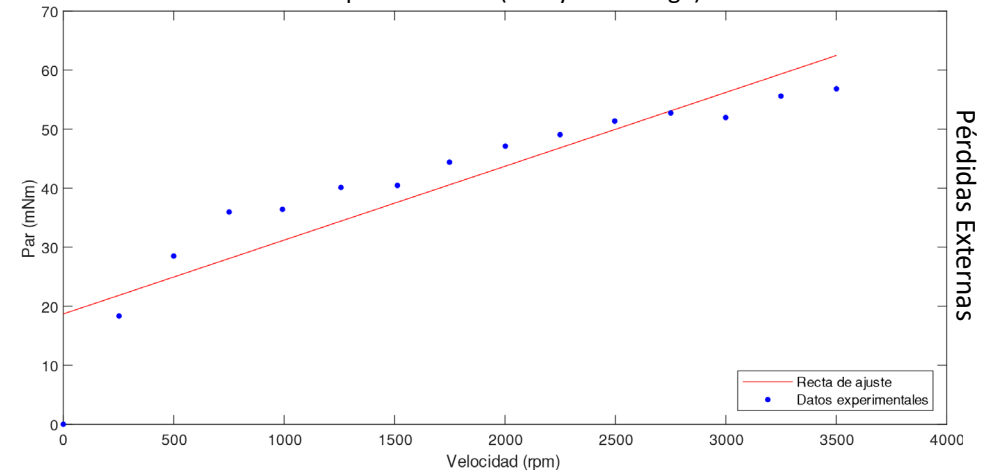
$$b_0 = 9.20 \text{ mNm}$$

$$y = 8755.25 \cdot 10^{-6} \omega + 9.20$$

Curva par-velocidad (ensayo en vacío)

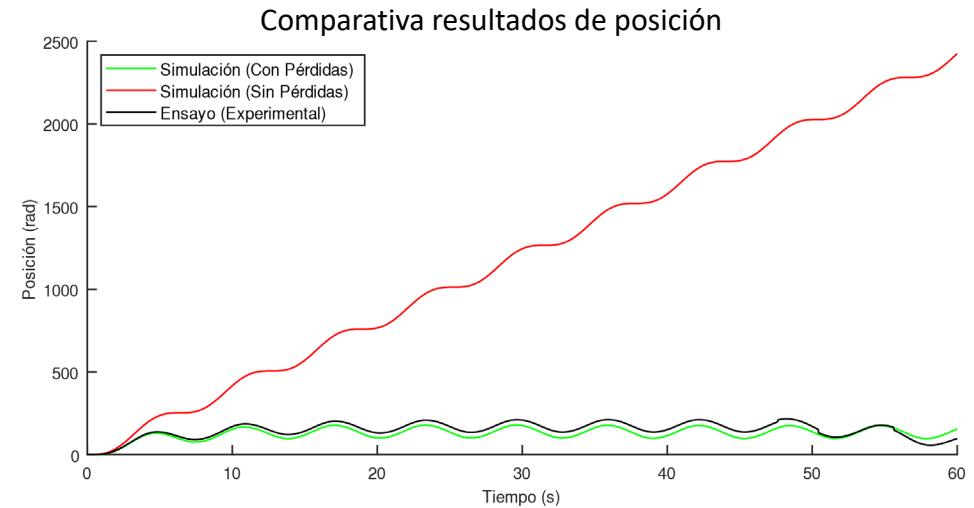
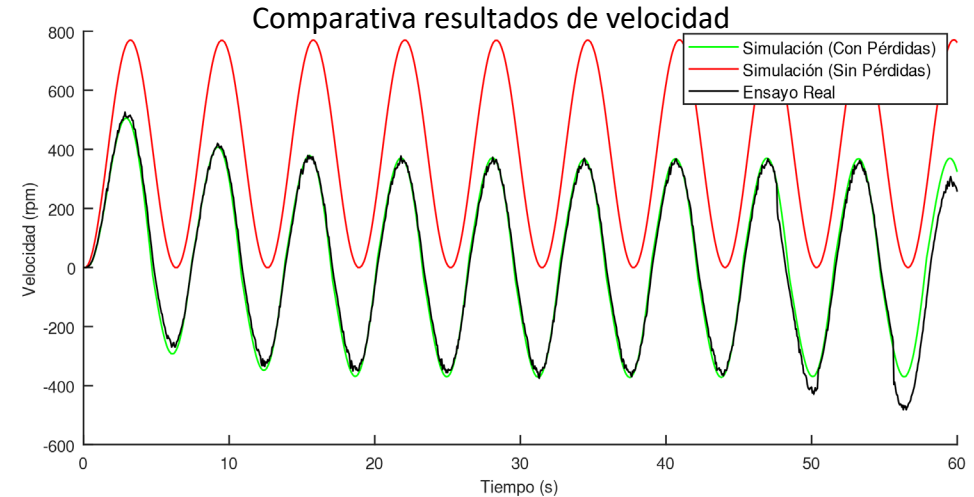
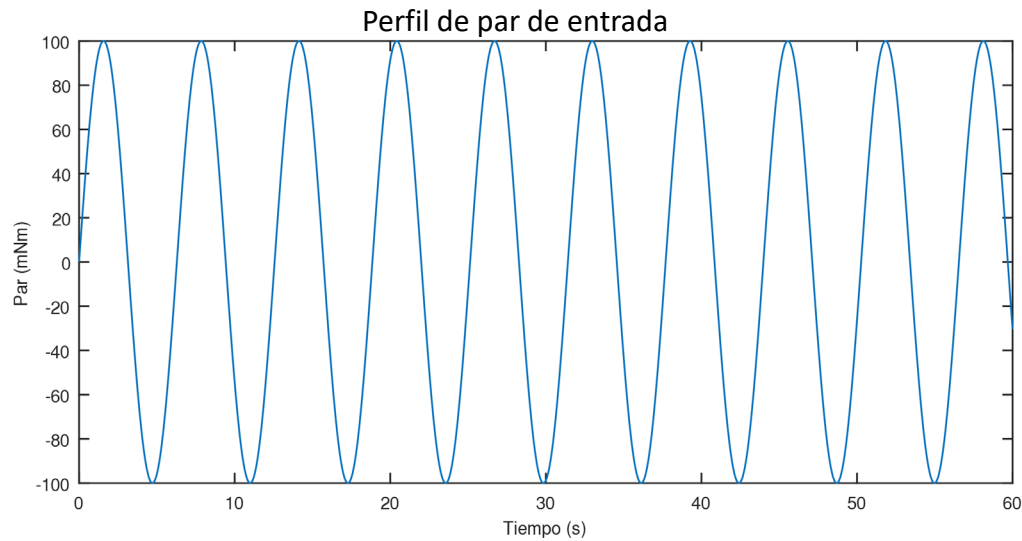


Curva par-velocidad (ensayo con carga)

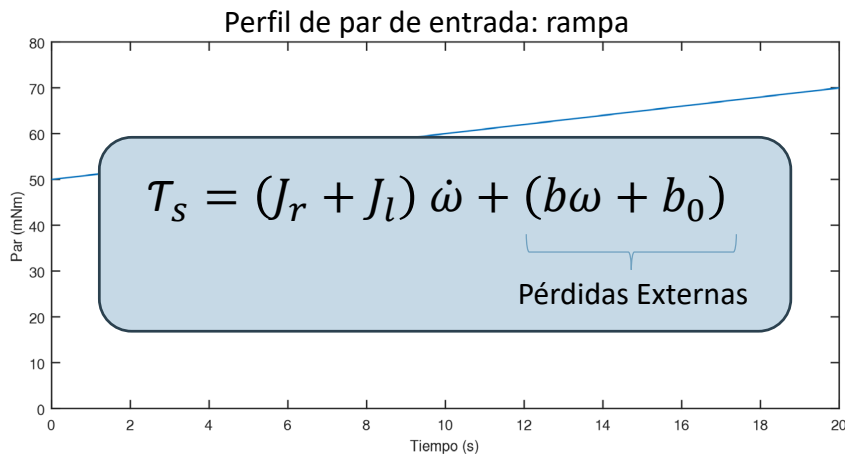
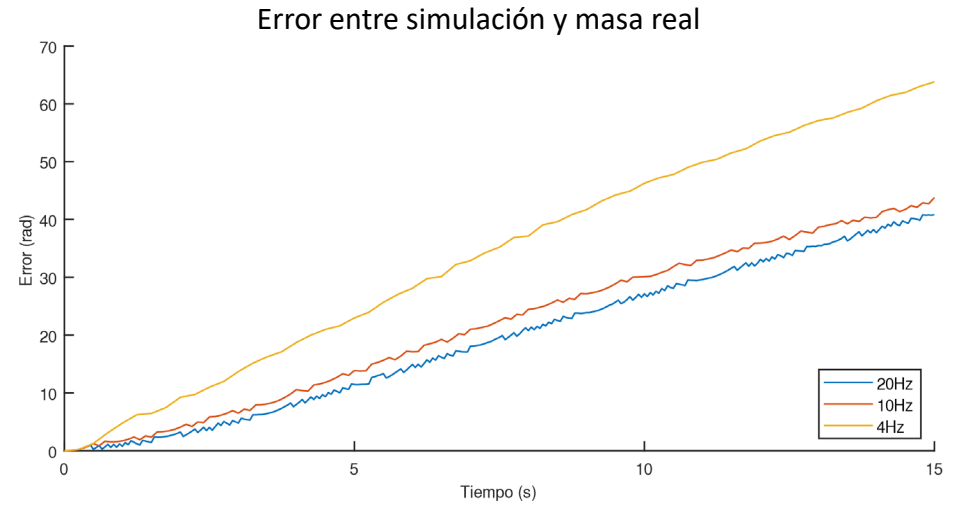
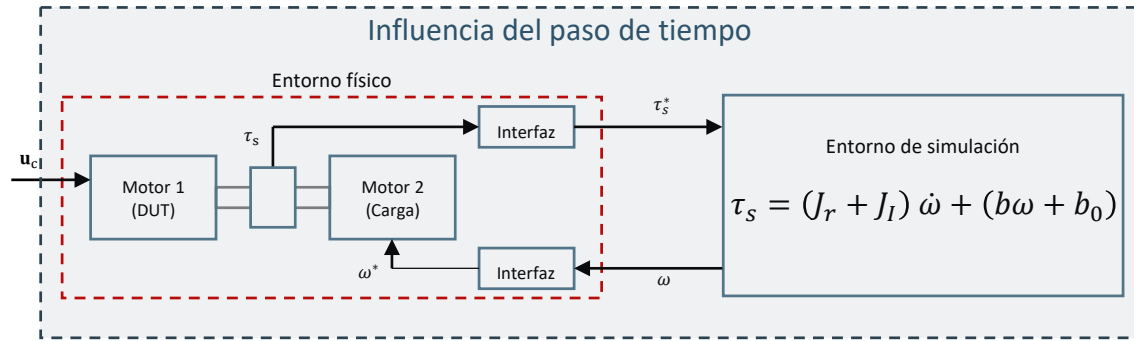


Modelo matemático del motor - Validación

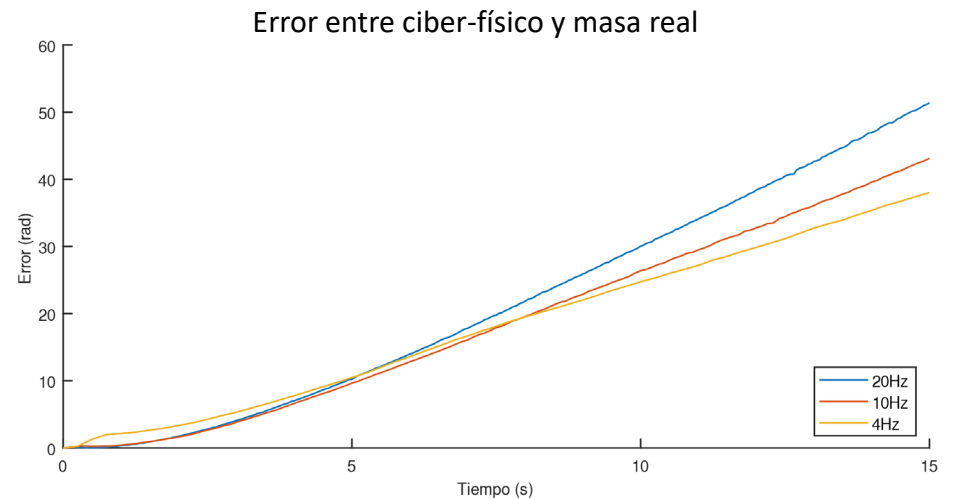
$$T_m = (J_r + J_l) \dot{\omega} + \underbrace{(b\omega + b_0)}_{\text{Pérdidas Externas}} + \underbrace{(b_1\omega + b_{10})}_{\text{Pérdidas Internas}}$$



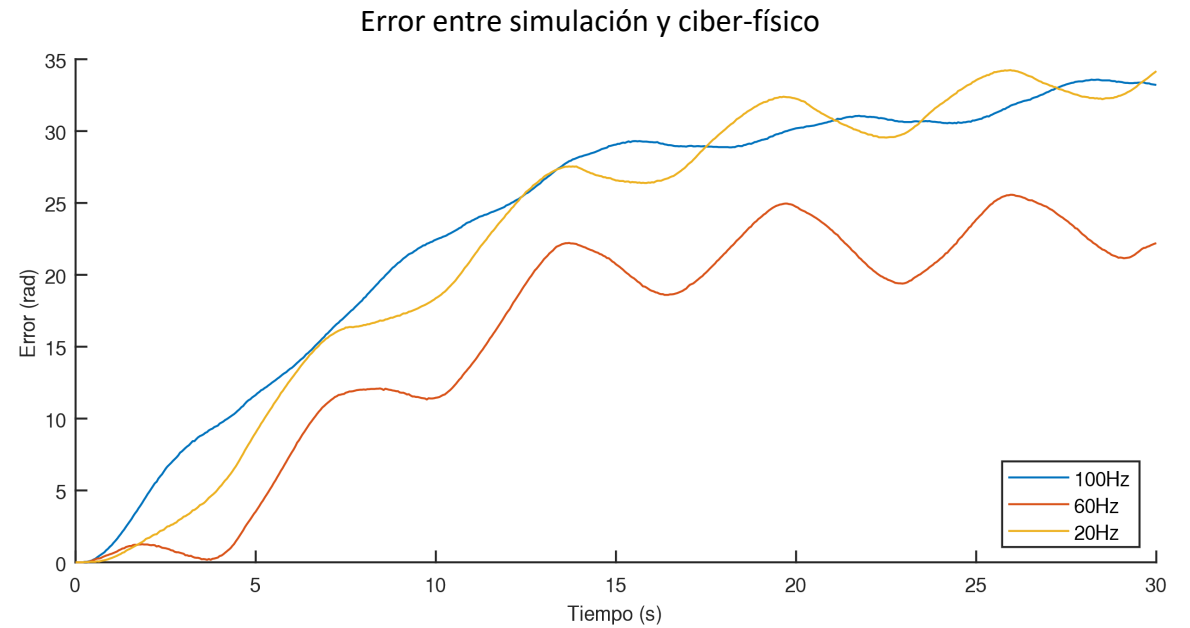
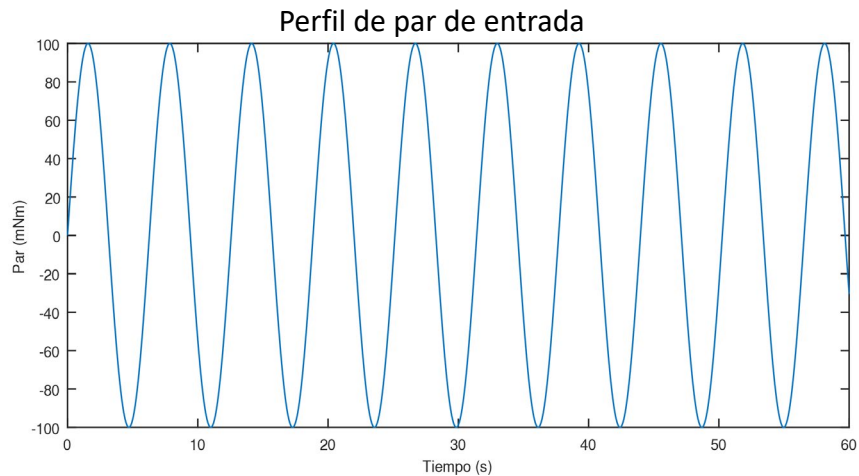
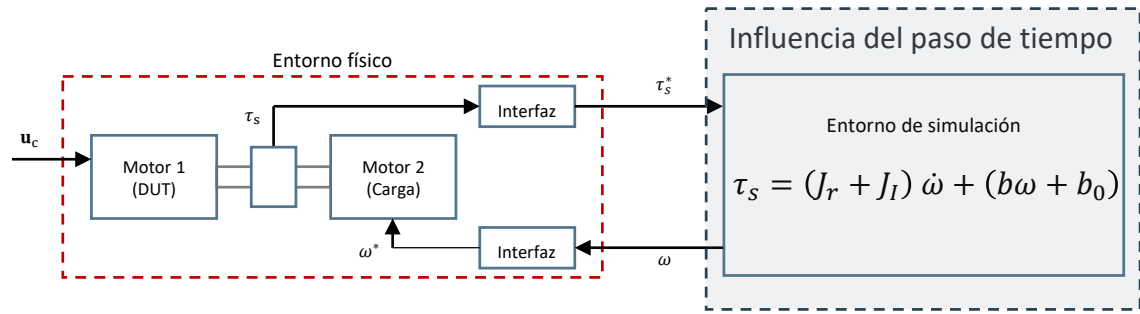
Ensayos ciber-físicos - Influencia del paso de tiempo en la co-simulación



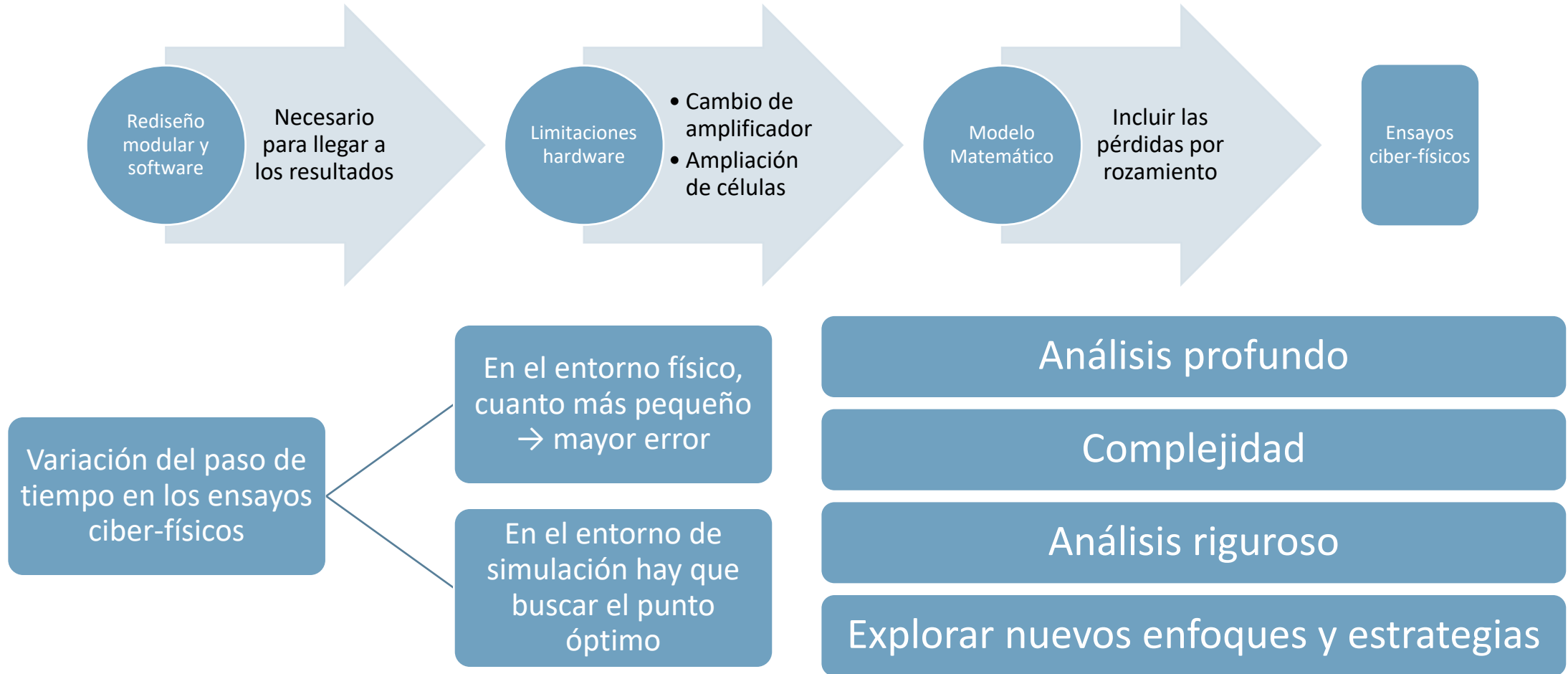
- 20Hz
- 10Hz
- 4Hz



Ensayos ciber-físicos - Influencia del paso del tiempo en el entorno de simulación



Conclusiones



Gracias

Trabajo Fin de Máster CURSO 2022/2023

AUTOR: CARLOS LOURIDO FERNANDEZ

TUTORES: EMILIO SANJURJO MAROÑO
FRANCISCO JAVIER GONZALEZ VARELA

M. U. en Ingeniería Industrial

FECHA: SEPTIEMBRE 2023

