

Diseño de una solución de sensorización para un banco de ensayos de motores eléctricos

Eloy Vázquez Fernández

Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM) -

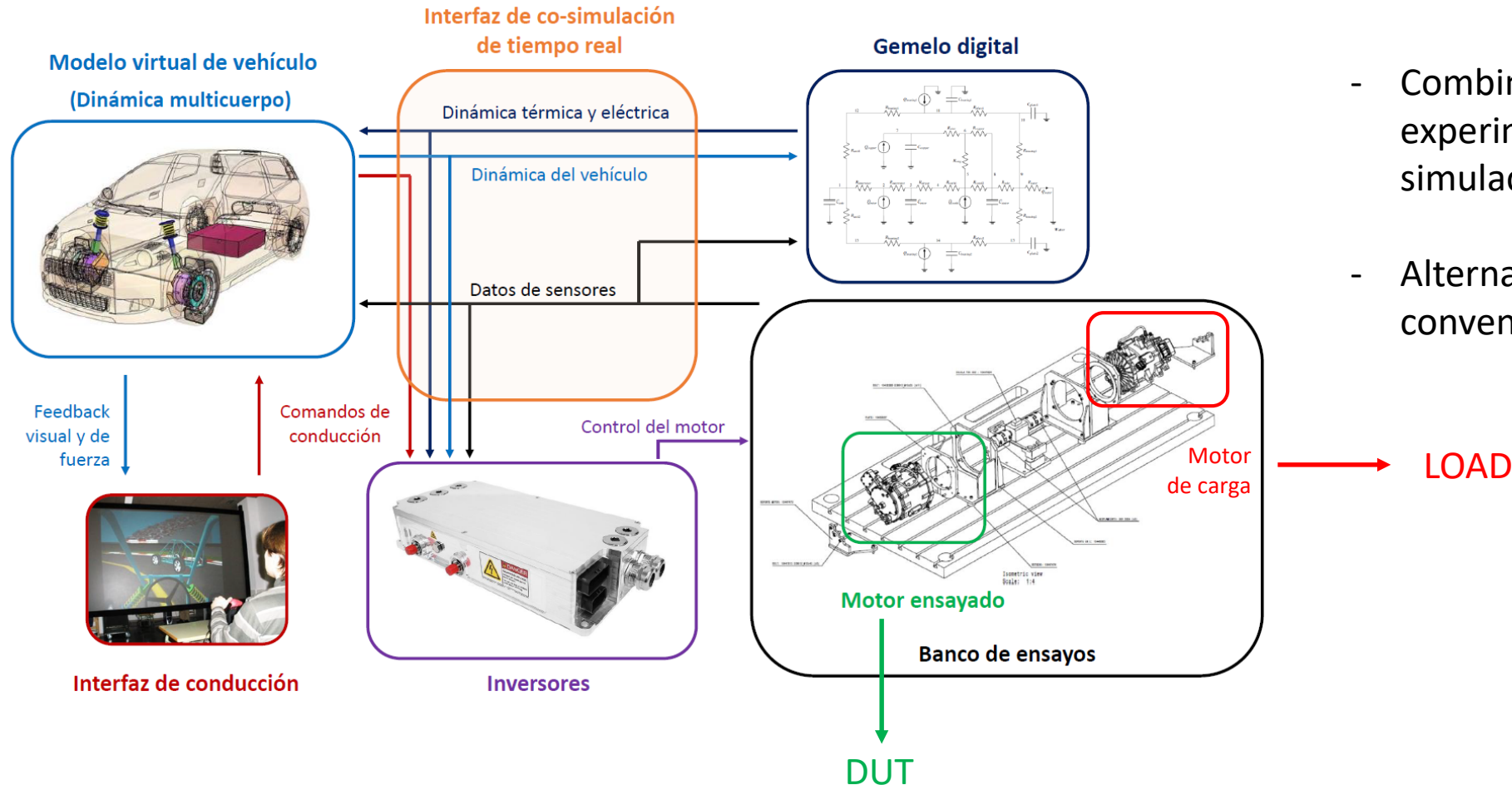
Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol (EPEF), Universidade da Coruña

Trabajo Fin de Grado – Ingeniería Mecánica

11 de julio de 2023

- **1. Motivación**
 - Banco de ensayos ciber-físico
 - Caso particular: banco para motores eléctricos de automoción
 - Necesidad de mejoras en la sensorización
- **2. Análisis de soluciones**
 - Medidas de temperatura
 - Medidas de par
- **3. Resultados**
 - Implementación de filtros
 - Validación experimental
- **4. Conclusiones y trabajo futuro**

¿Qué es un banco de ensayos ciber-físico?



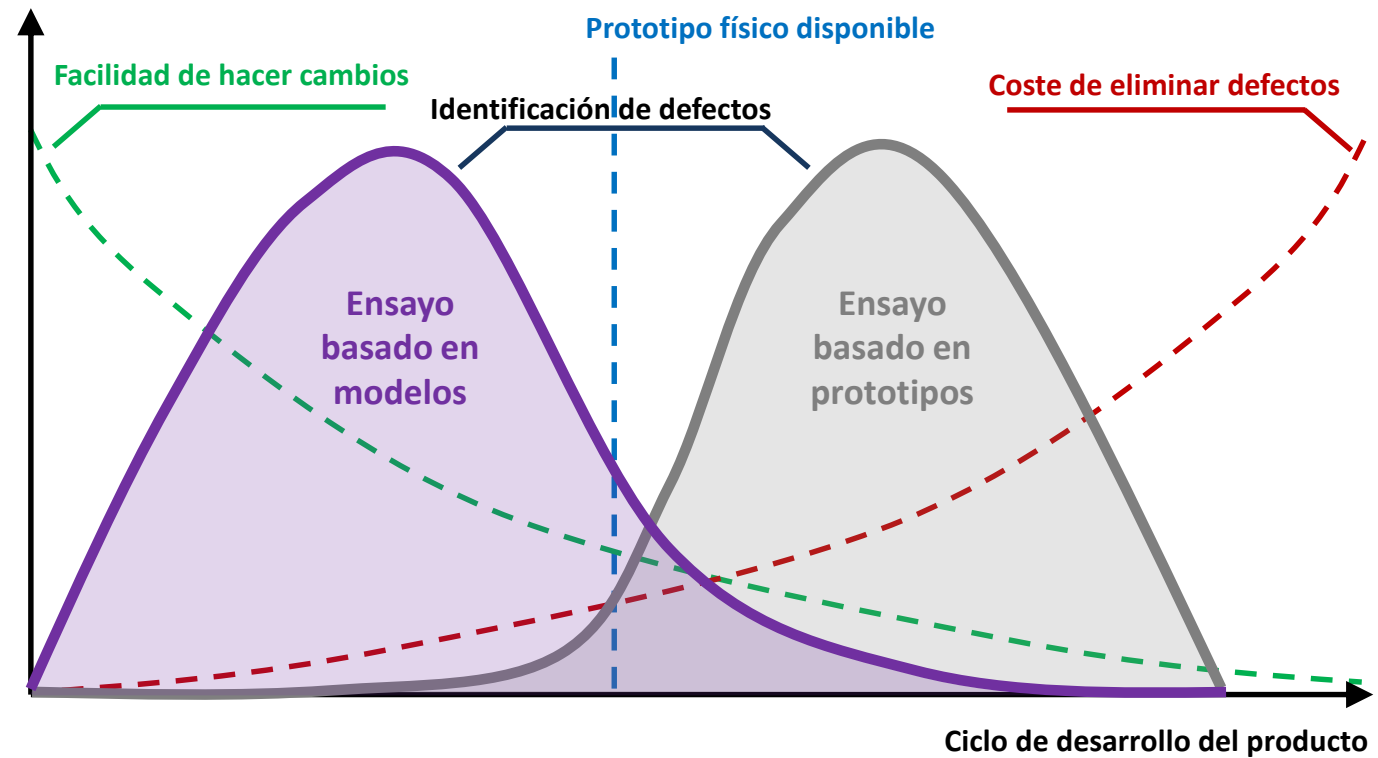
- Combinación de la experimentación física con la simulación por ordenador.
- Alternativa a bancos de ensayos convencionales.

Ensayo de sistemas basado en modelos (MBST)

– Combinación de ensayos con componentes físicos y la simulación por ordenador

- Elevado control sobre el ensayo
- Reducción de costes
- Adelanto del ciclo de desarrollo

– Necesidad de fiabilidad en los resultados

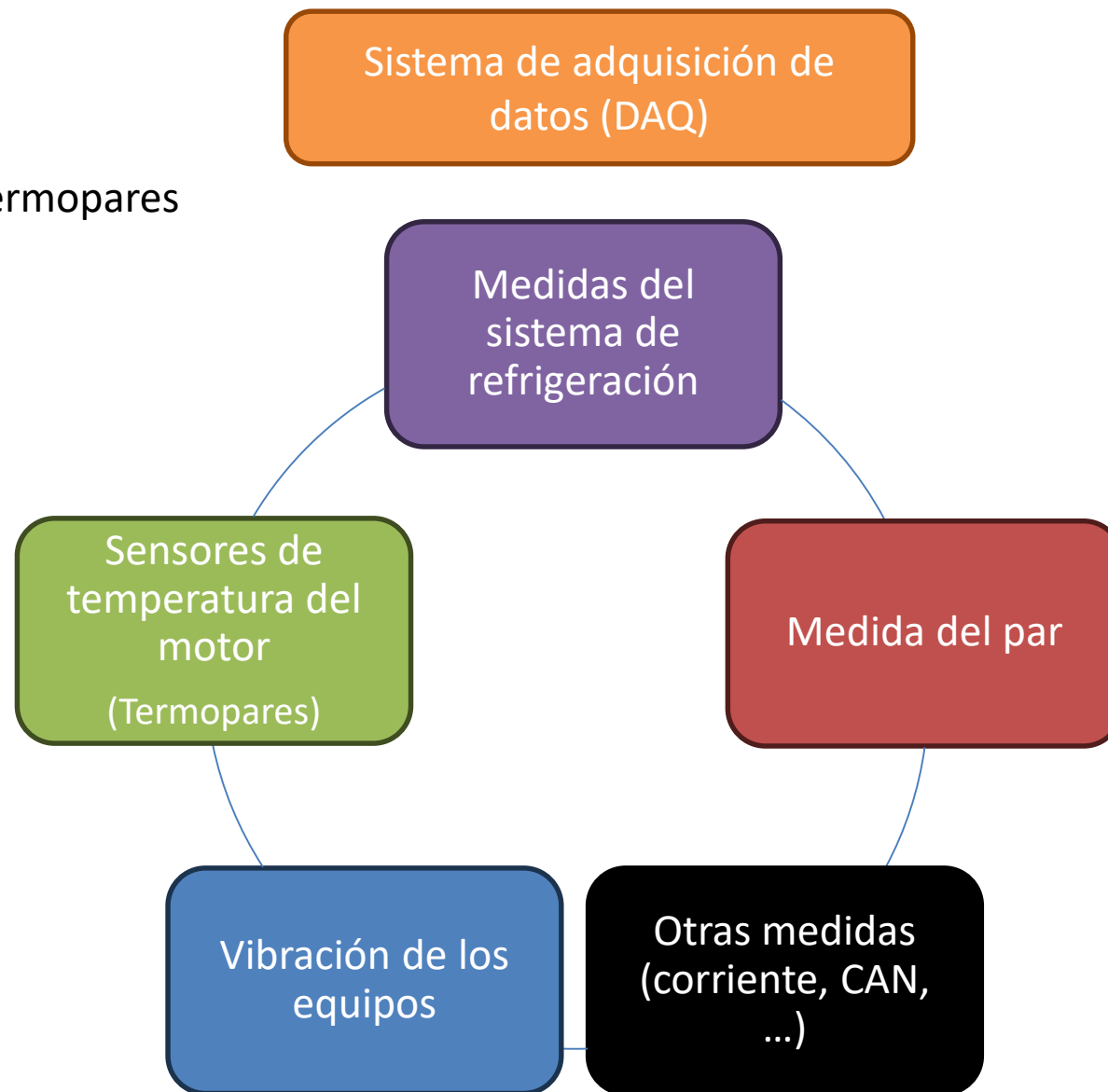


- **Estado inicial de la instalación**
 - Motores de uso en automóviles
 - Banco operativo
 - Sensorización existente:
 - Refrigeración (T, caudal)
 - Par (señal sin acondicionar)



- **Trabajo realizado**

- Recogida y acondicionamiento de la señal de los termopares
- Acondicionamiento de la señal del sensor de par
- Consideraciones acerca de los acelerómetros
 - Medir las vibraciones del banco



Termopares

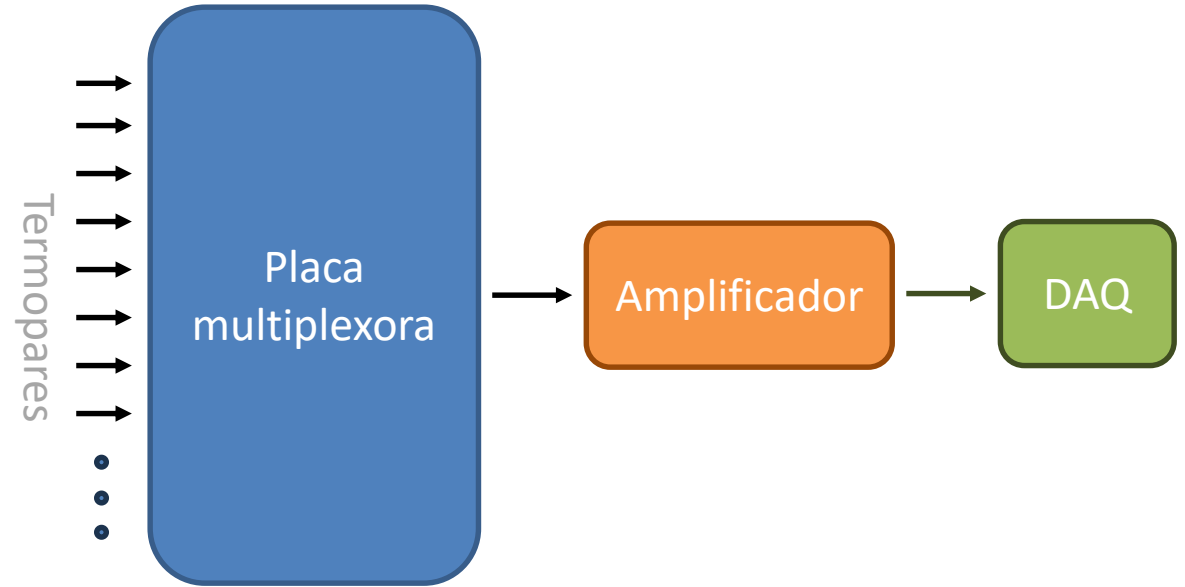
Recogida
de datos

Filtrado
de la señal

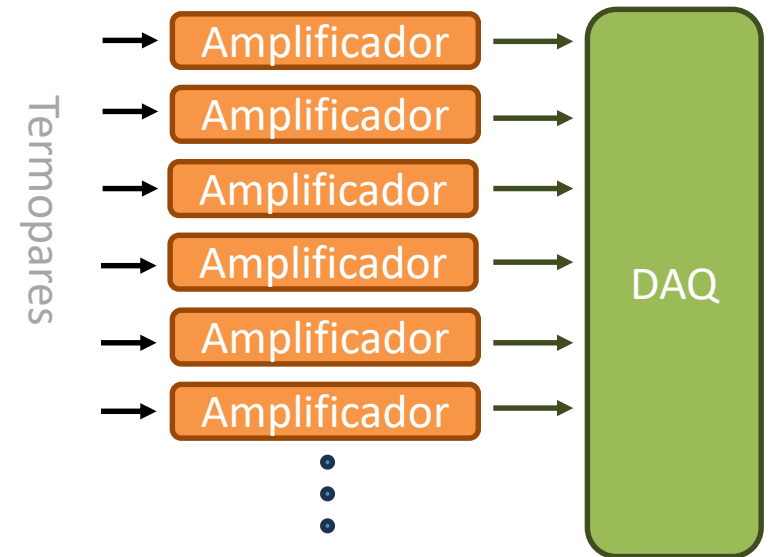


Termopares

- **Placa multiplexora de termopares**
 - Únicamente necesita un canal en la DAQ



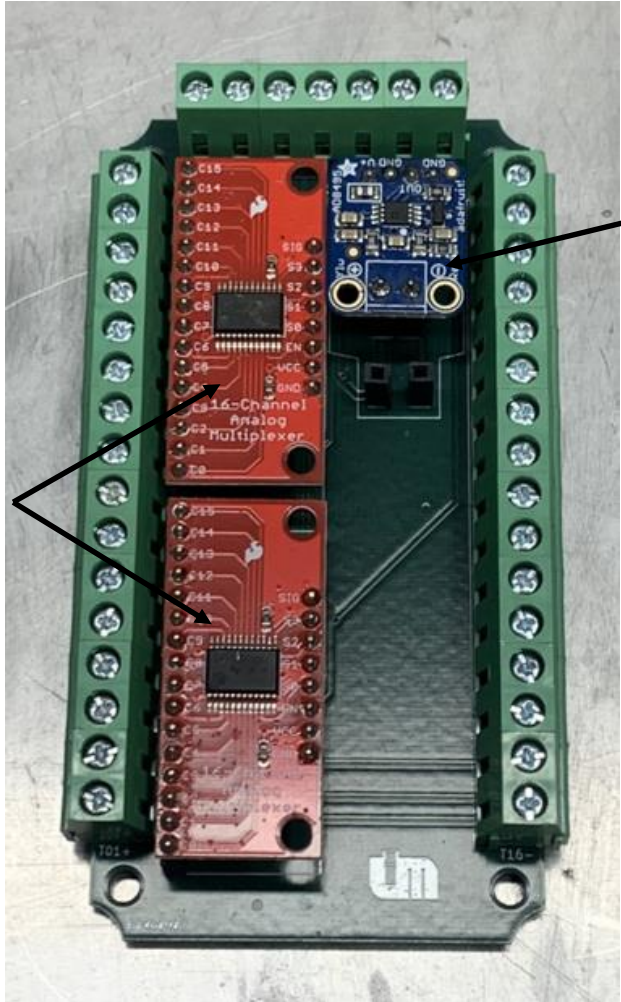
- **Placa multicanal con amplificadores independientes**
 - Se necesitarán tantos canales como termopares



2. Análisis de soluciones

- Placa multiplexora de termopares

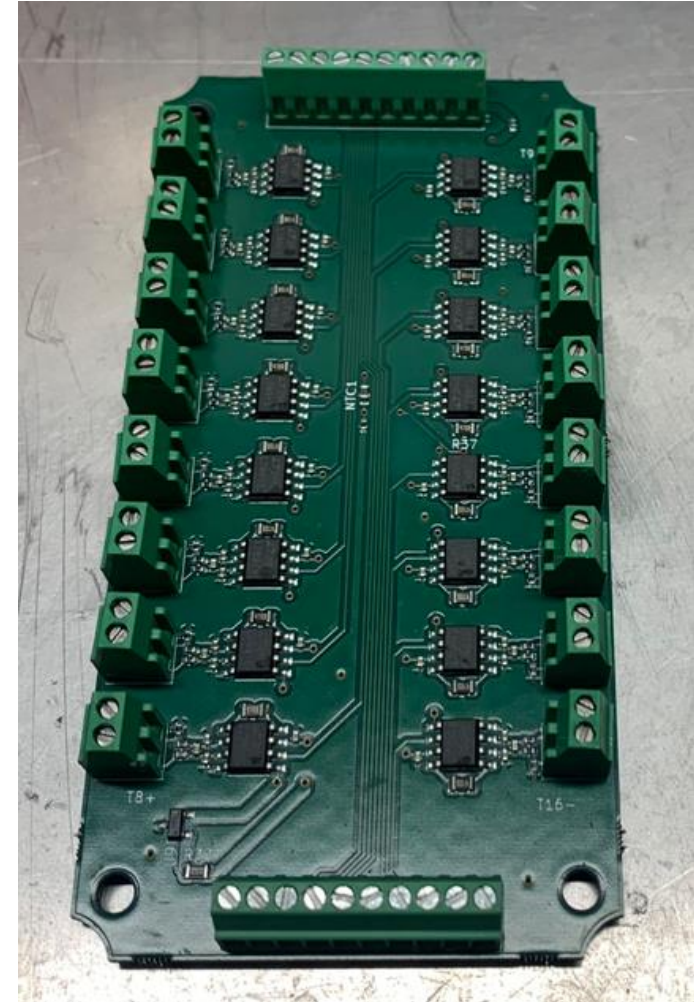
Termopares



Módulos de multiplexión

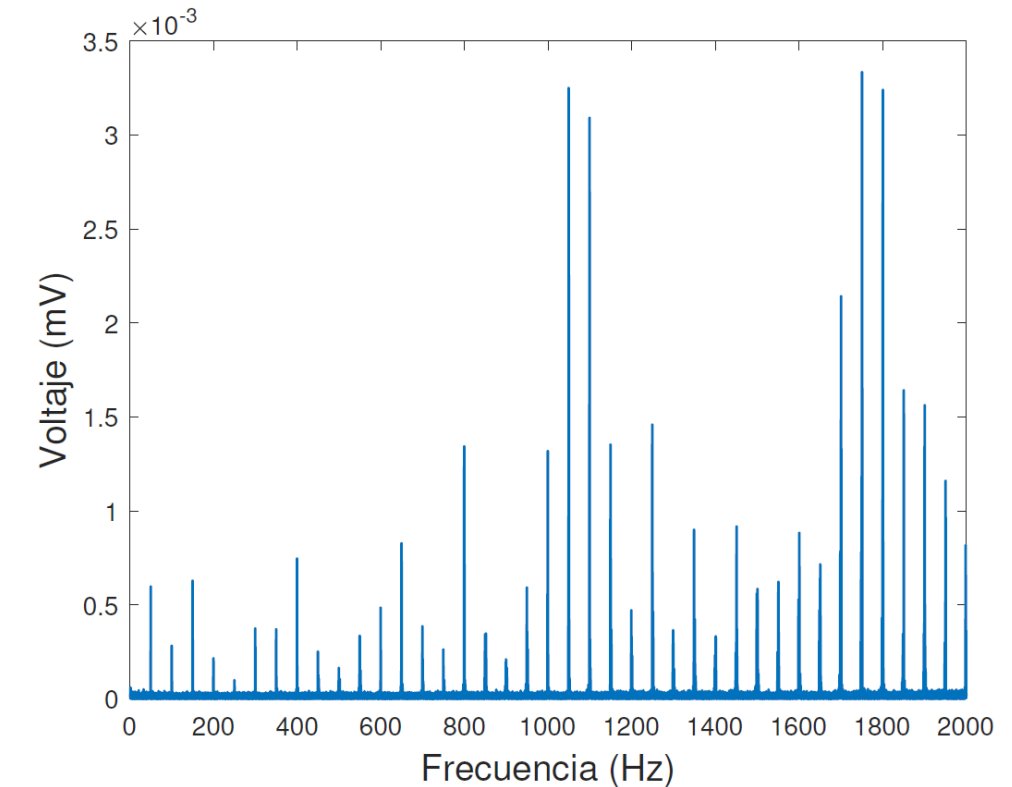
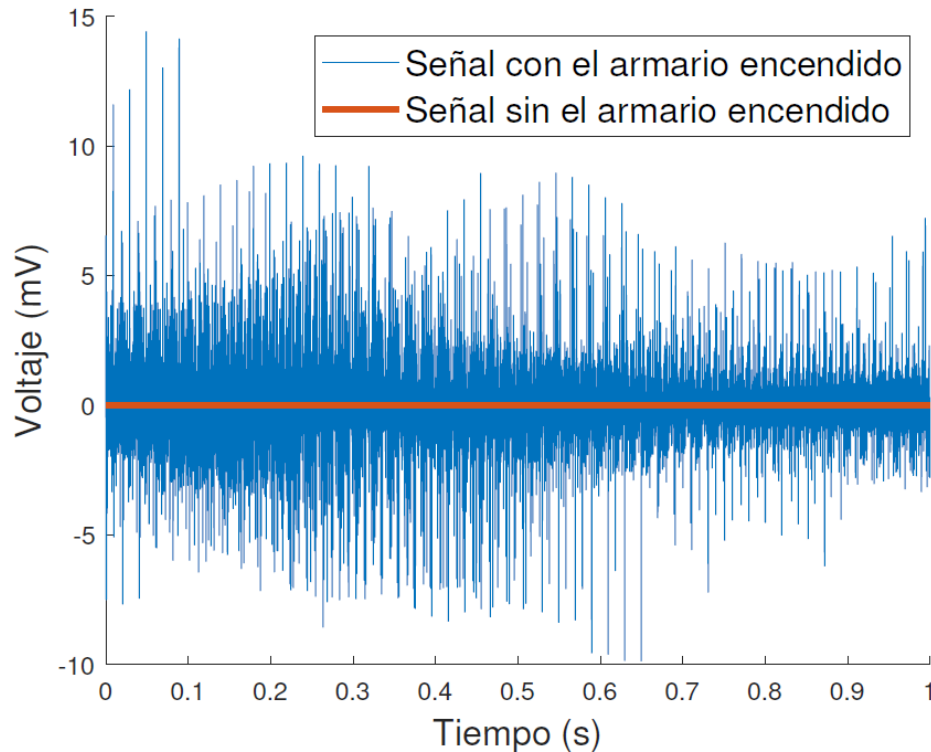
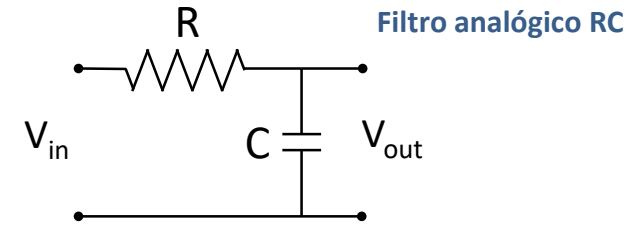
Amplificador
Adafruit 8495

- Placa multicanal con amplificadores independientes



Termopares Placa multicanal

- Necesidad de un filtro para eliminar el ruido
 - Analógico $\xleftrightarrow{\text{Filtro Online}}$ Anti-alias
 - Digital $\xleftrightarrow{\text{Filtro Offline}}$ Elimina el ruido



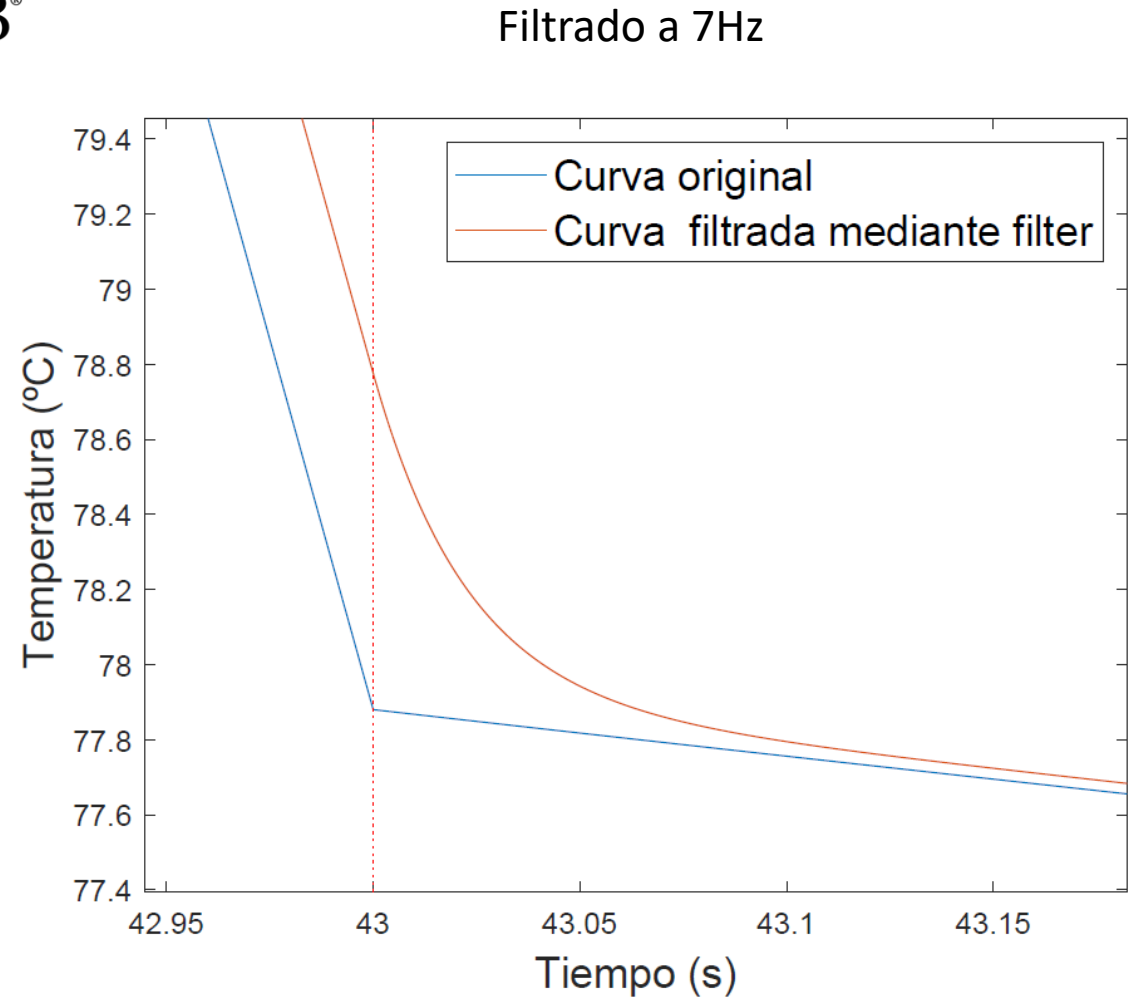
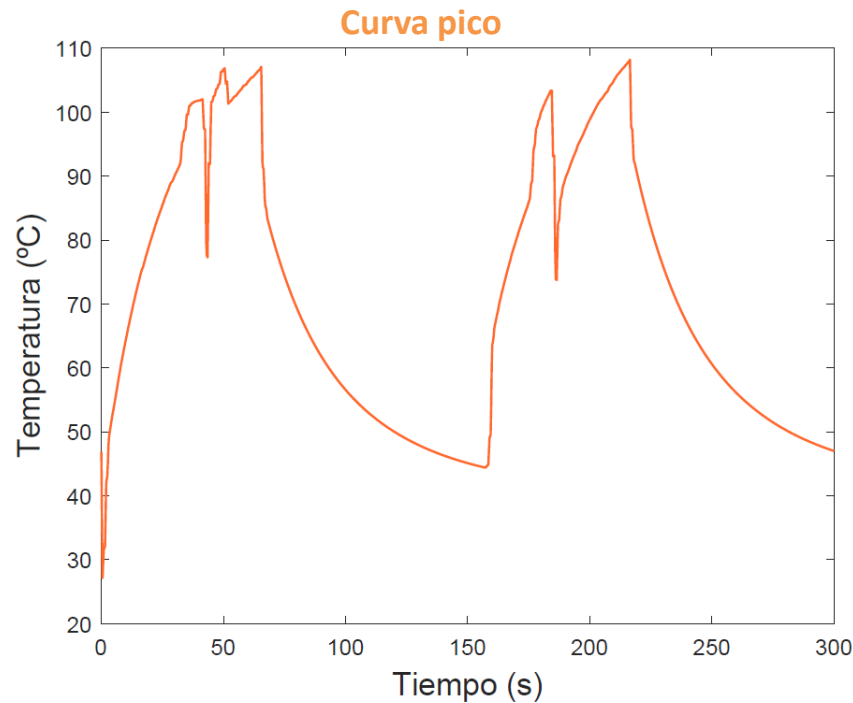
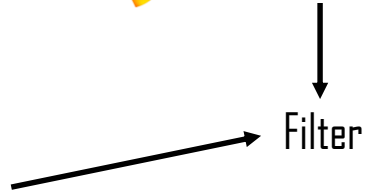
Termopares Placa multicanal



Simulación de los filtros

- Filtro analógico (tipo RC)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$



Diferencia máxima entre curvas: 0.90 °C

Termopares

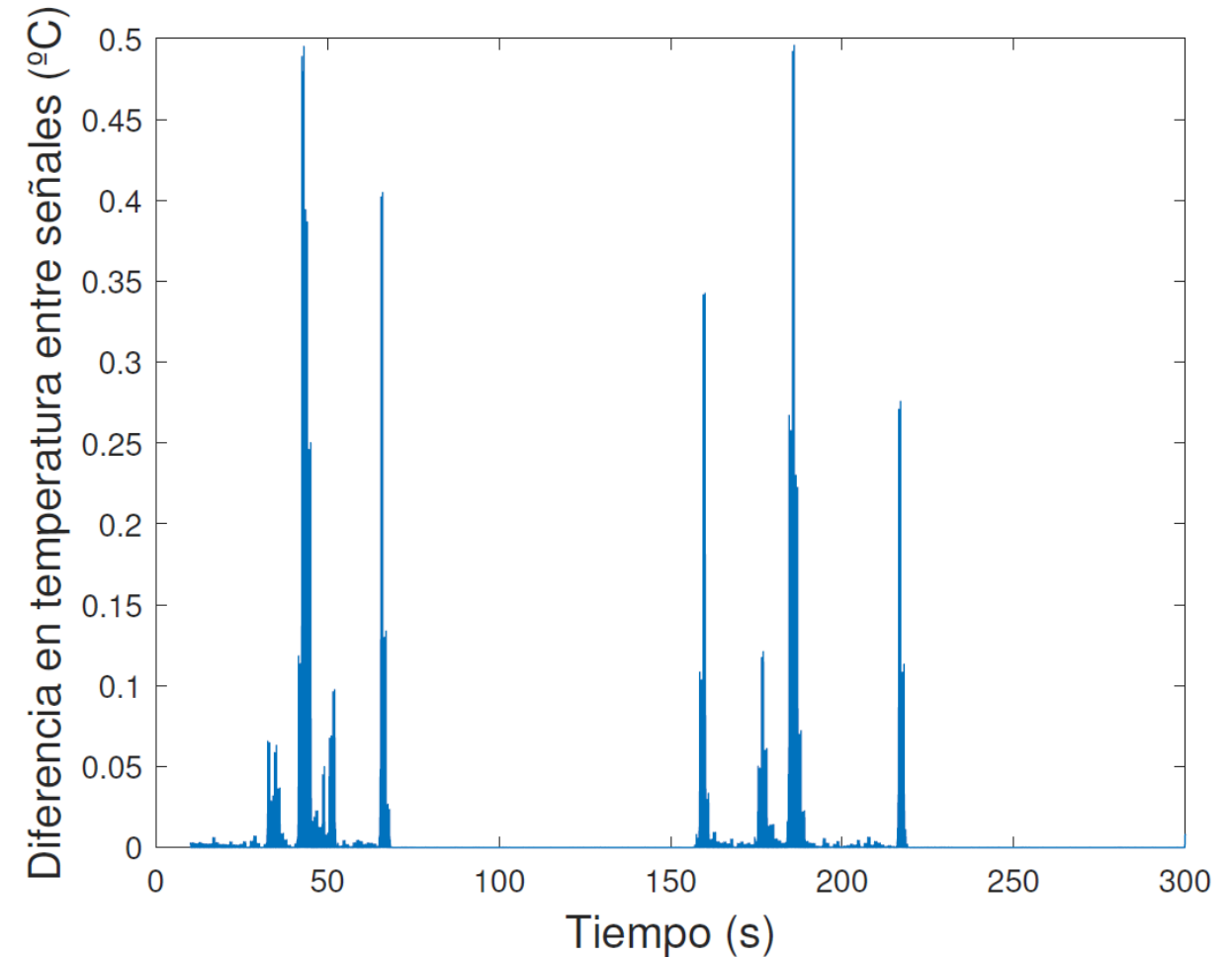
Placa multicanal

Simulación de los filtros

- Filtro digital
 - Filtro doble
 - Atenuación 8 veces más potente que el filtro RC

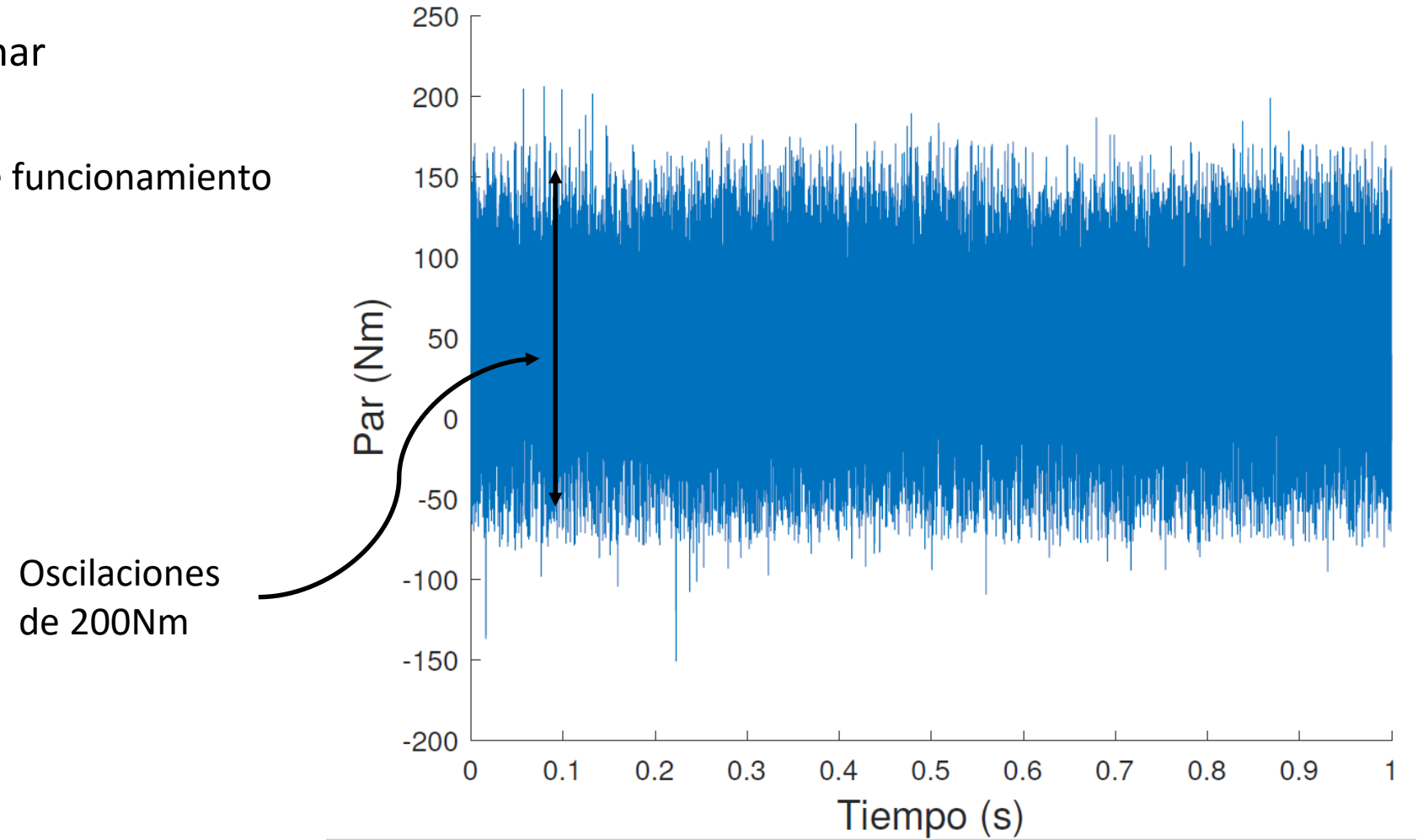
 MATLAB® → Filtfilt

Filtrado digital a 2.5Hz



Sensor de par

- Estado inicial sin acondicionar
 - Medida en condiciones de funcionamiento
 - 2000 rpm
 - 40 Nm



Sensor de par

Filtrado
analógico

Filtrado
digital

Medida
de par

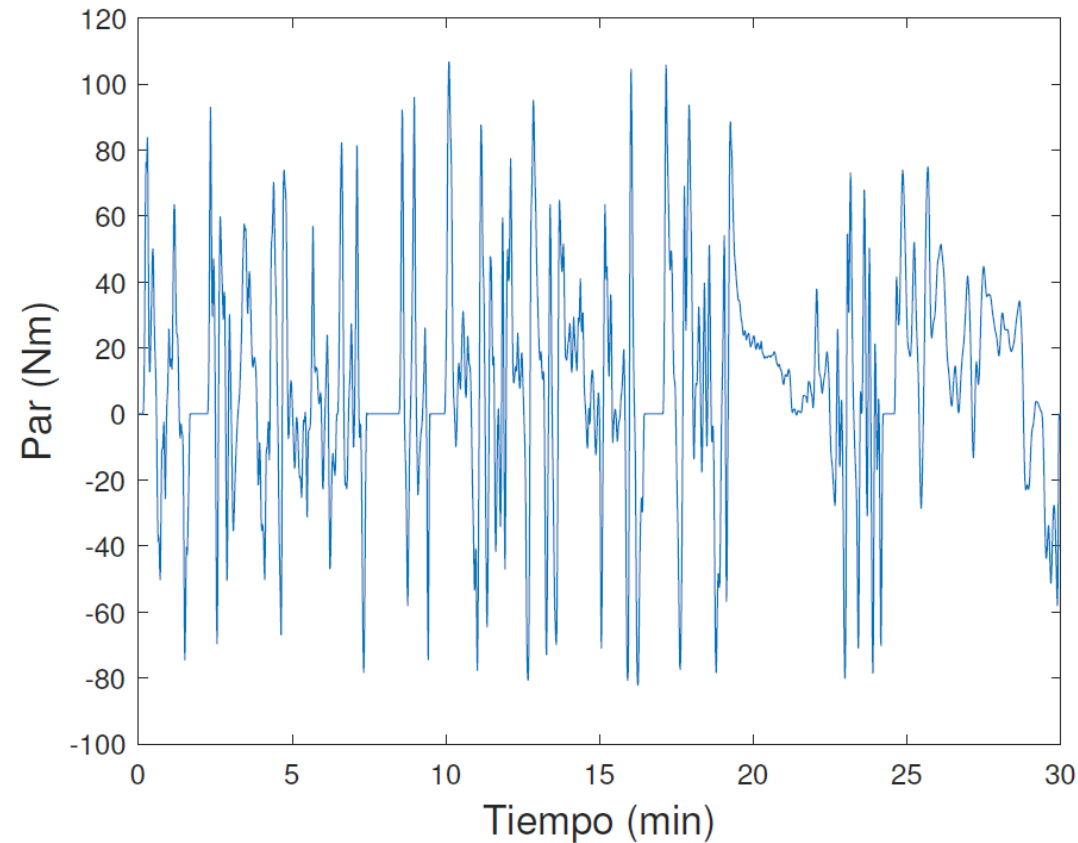
Filtrado
analógico

DAQ

Filtrado
digital

Sensor de par

- Diseño del filtro a partir de curva de par representativa  Ciclo WLTP (Worldwide harmonised Light vehicle Test Procedure)

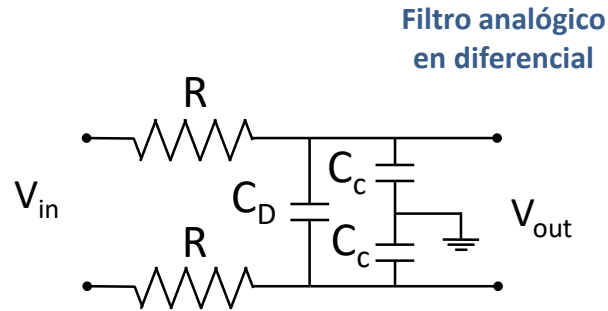


Sensor de par

Diseño de filtros

Simulación de los filtros

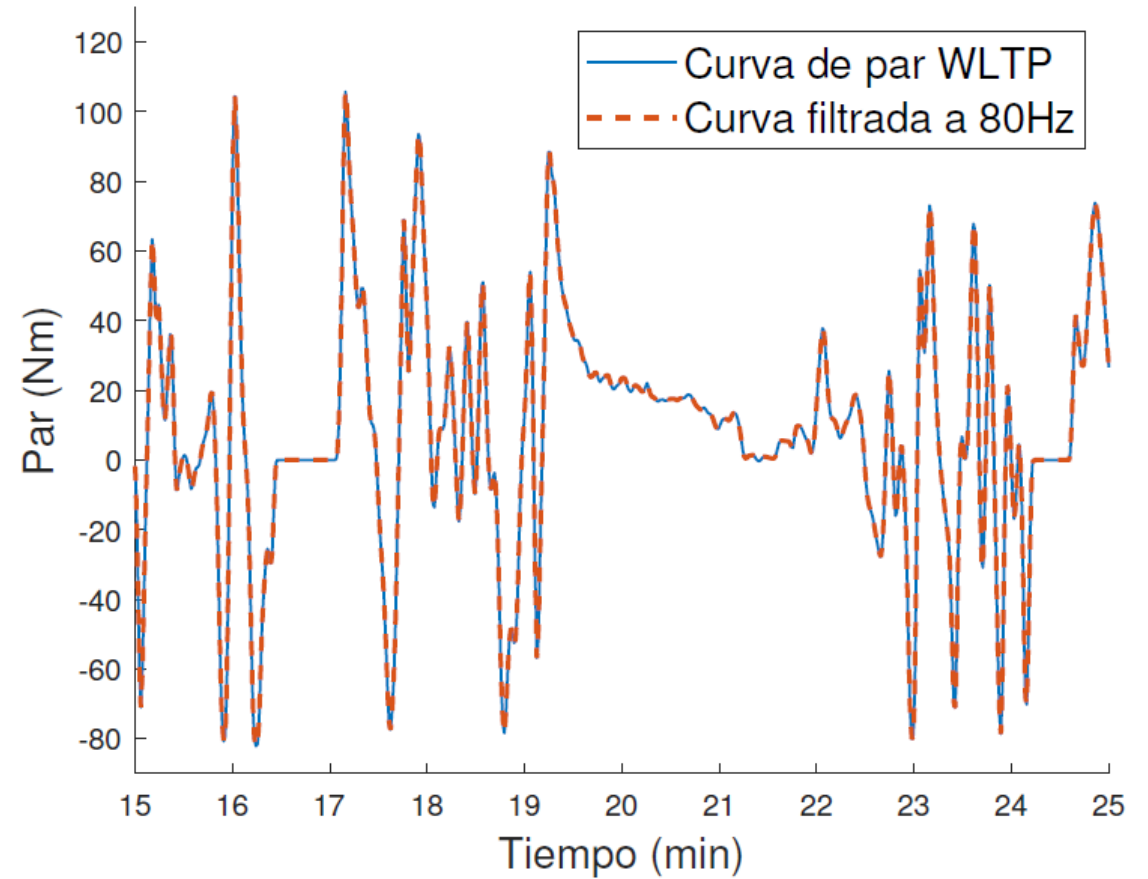
– Filtro analógico



Filtro analógico en diferencial

$$f_{c(Diff)} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)}$$

$$f_{c(Com)} = \frac{1}{2\pi RC_C}$$



Diferencia máxima entre curvas: 0.11Nm

Sensor de par

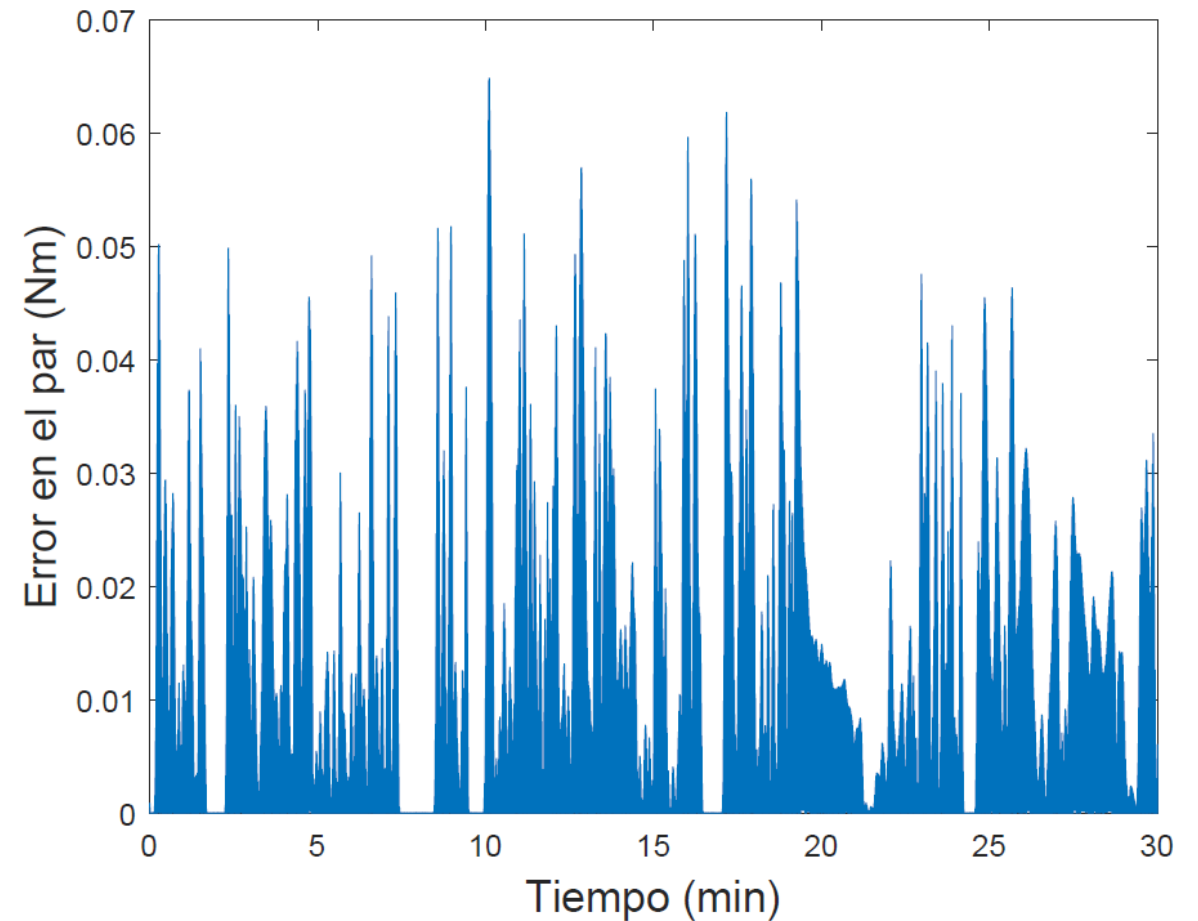
Diseño de filtros

Simulación de los filtros

- Filtro digital

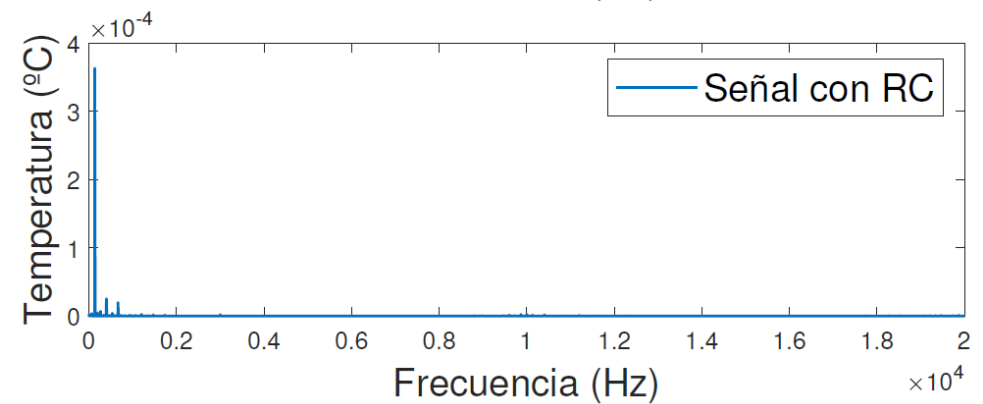
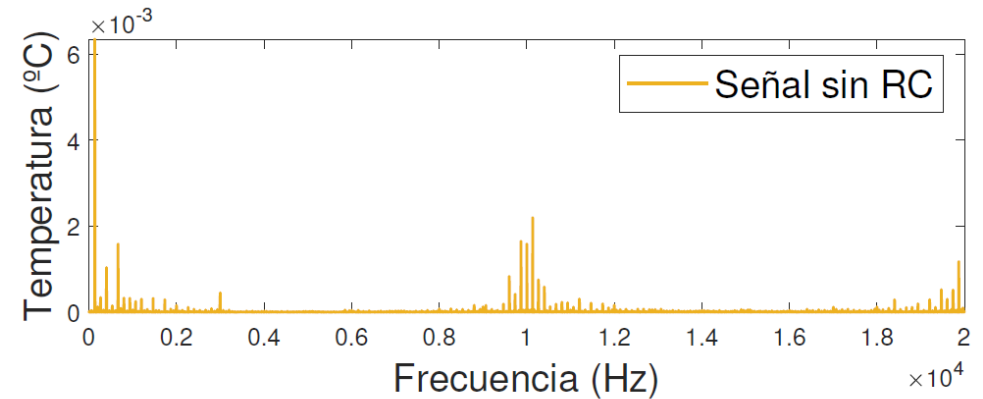
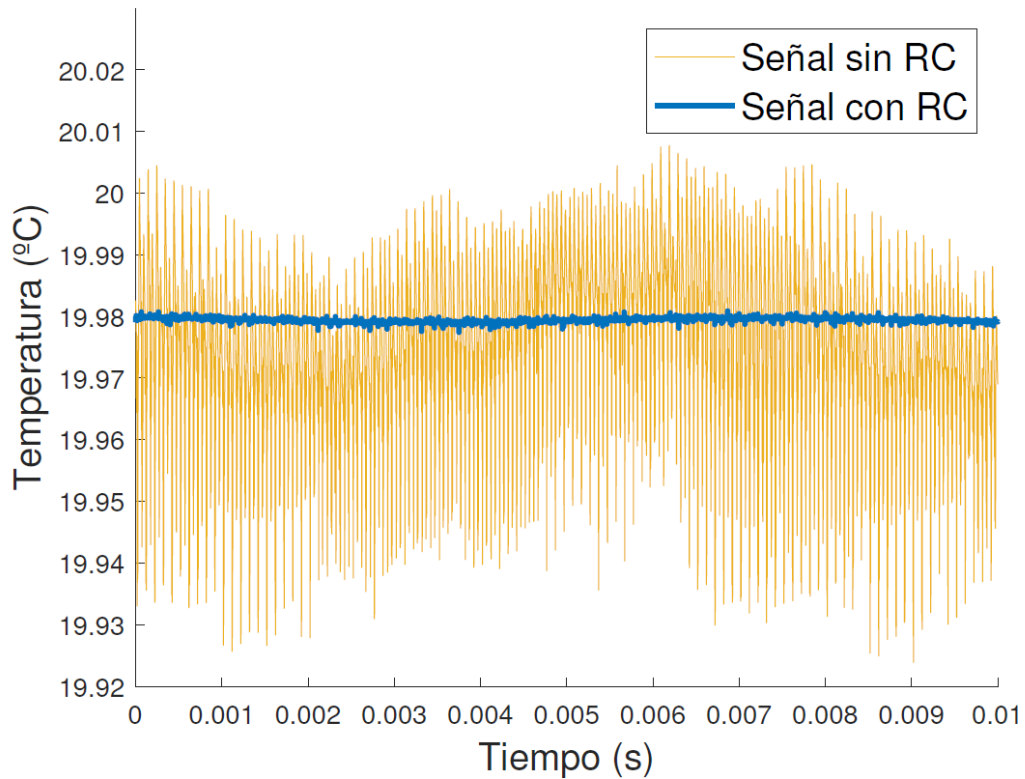


Filtrado digital a 5Hz



Termopares Implementación de filtros

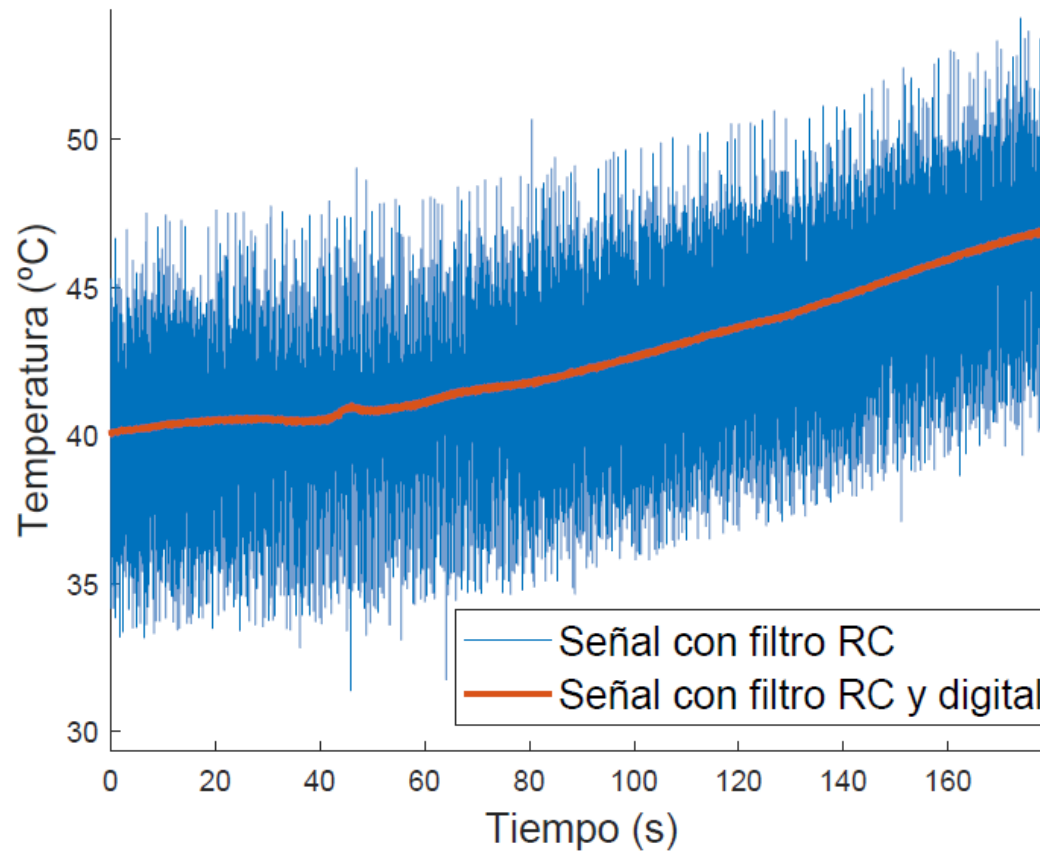
- Resultado de filtro analógico RC $\xrightarrow{f_c \cong 7 \text{ Hz}}$ $C = 22 \mu\text{F}$
 $R = 1000 \Omega$ $\xleftarrow{f_c = \frac{1}{2\pi RC}}$ $f_c = 7,23 \text{ Hz}$



Termopares

Implementación de filtros

- Resultado de filtro digital \longrightarrow $f_c = 2,5 \text{ Hz}$



Sensor de par

Implementación de filtros

• Resultado de filtro analógico RC

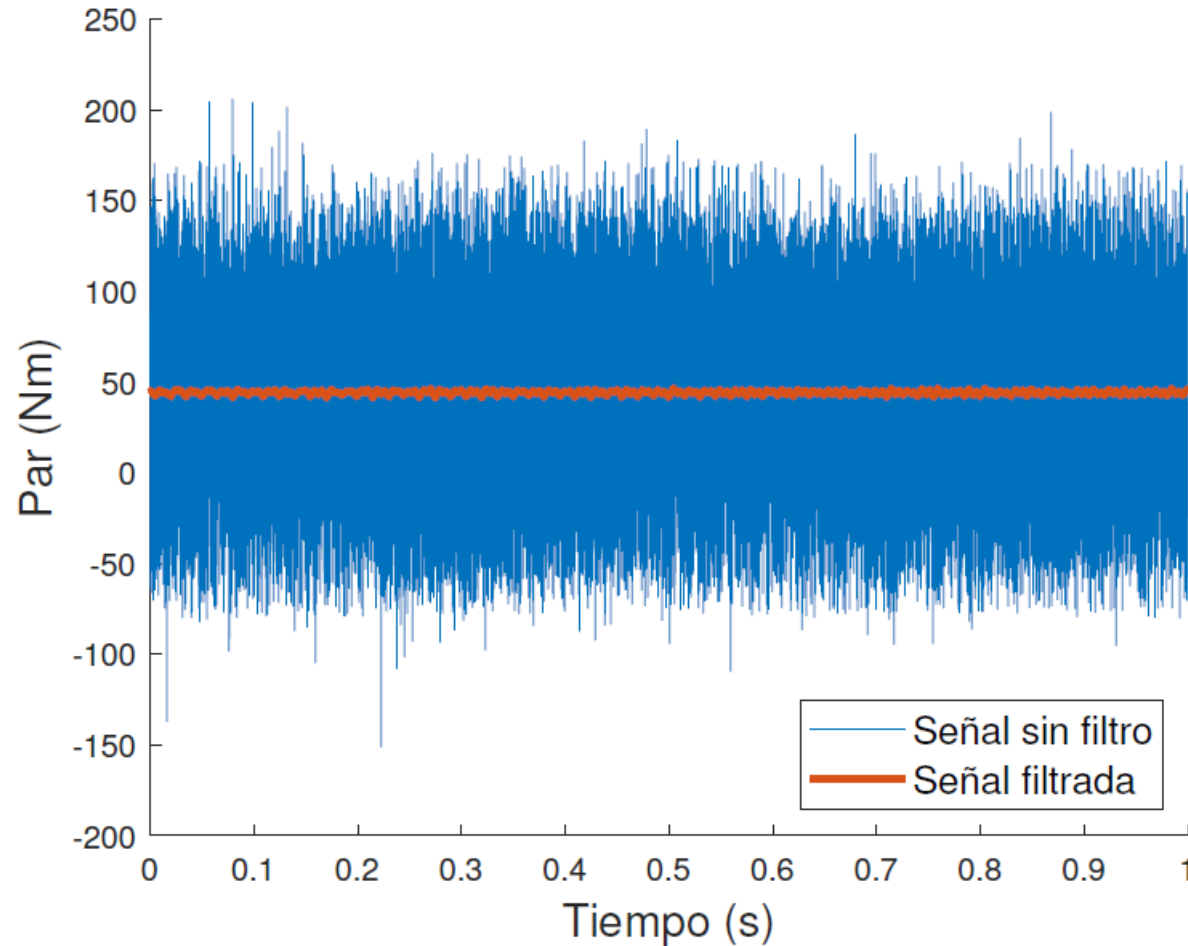
$$f_c \cong 80 \text{ Hz}$$

$$C_C = 0,1 \mu\text{F}$$
$$C_D = 1,0 \mu\text{F}$$
$$R = 1000 \Omega$$

$$f_{c(\text{Diff})} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)}$$

$$f_c = 75,8 \text{ Hz}$$

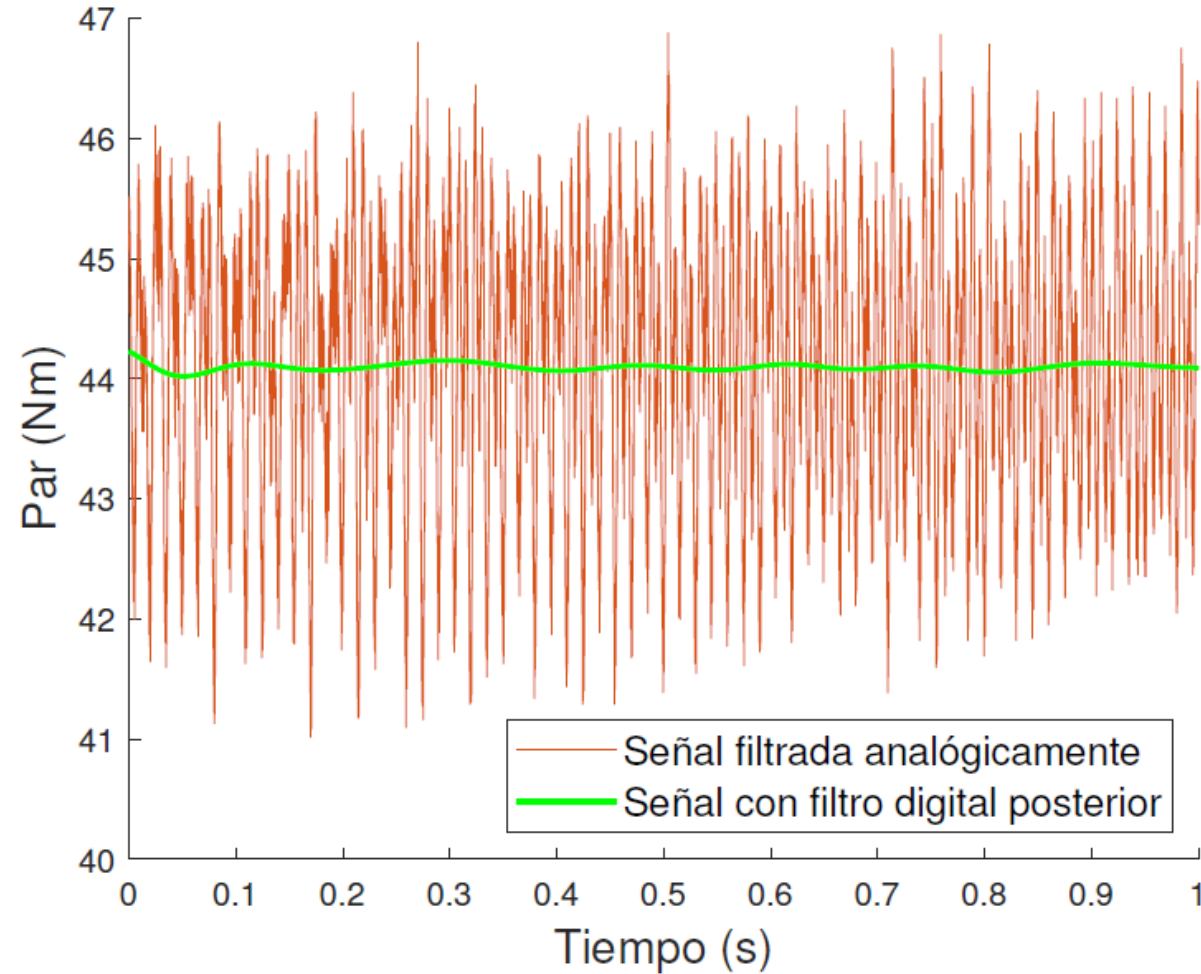
- 40 Nm
- 2000 rpm



Sensor de par

Implementación de filtros

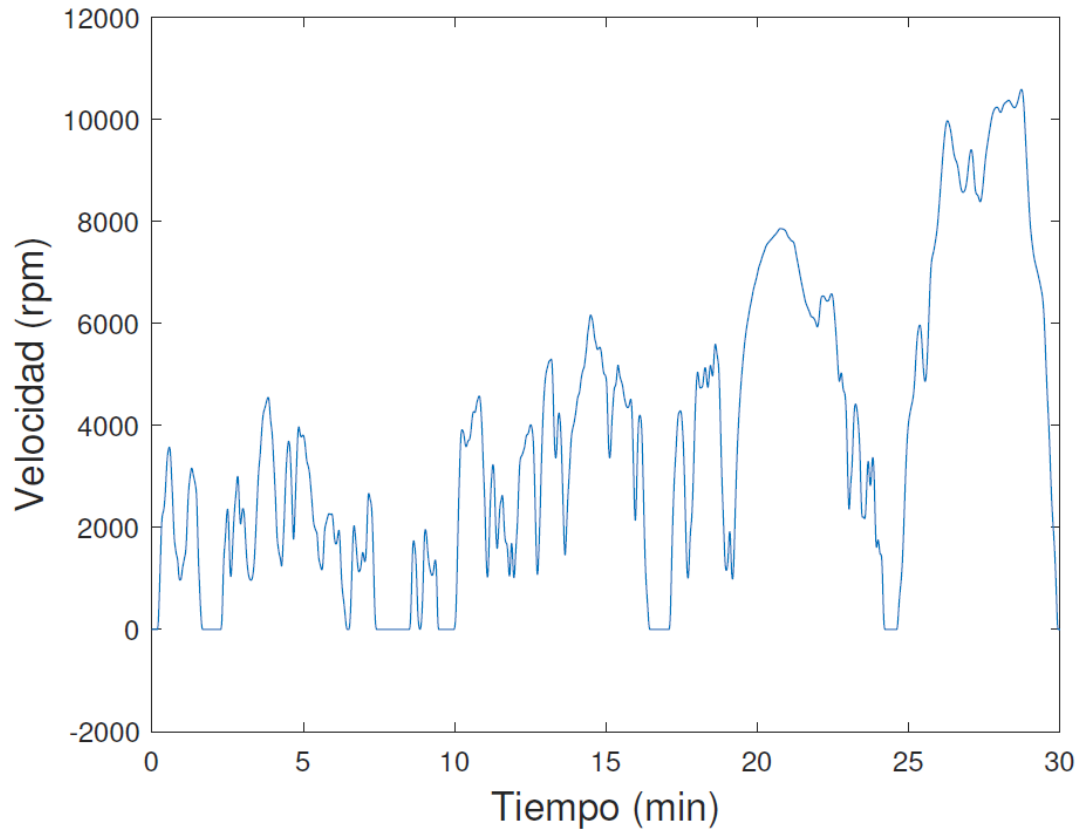
- Resultado de filtro digital $\longrightarrow f_c = 5 \text{ Hz}$



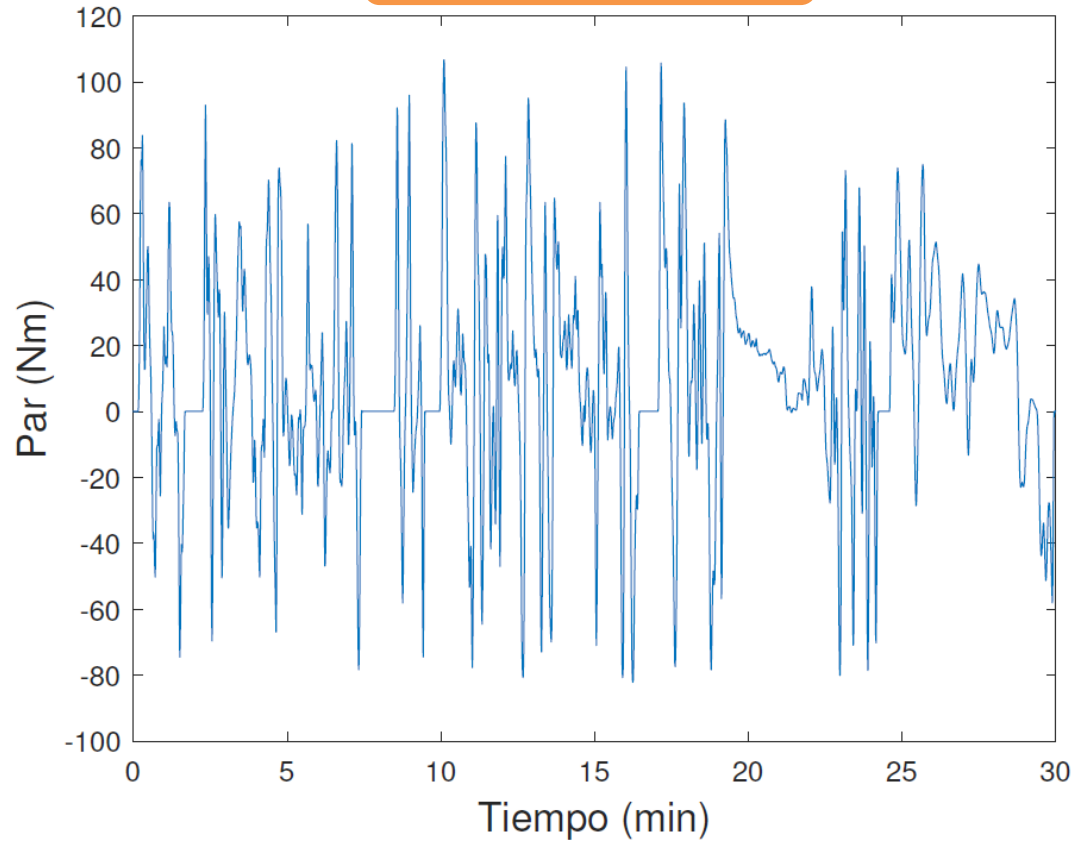
Ciclo WLTP

Consignas para ensayo de estos motores

Motor Load

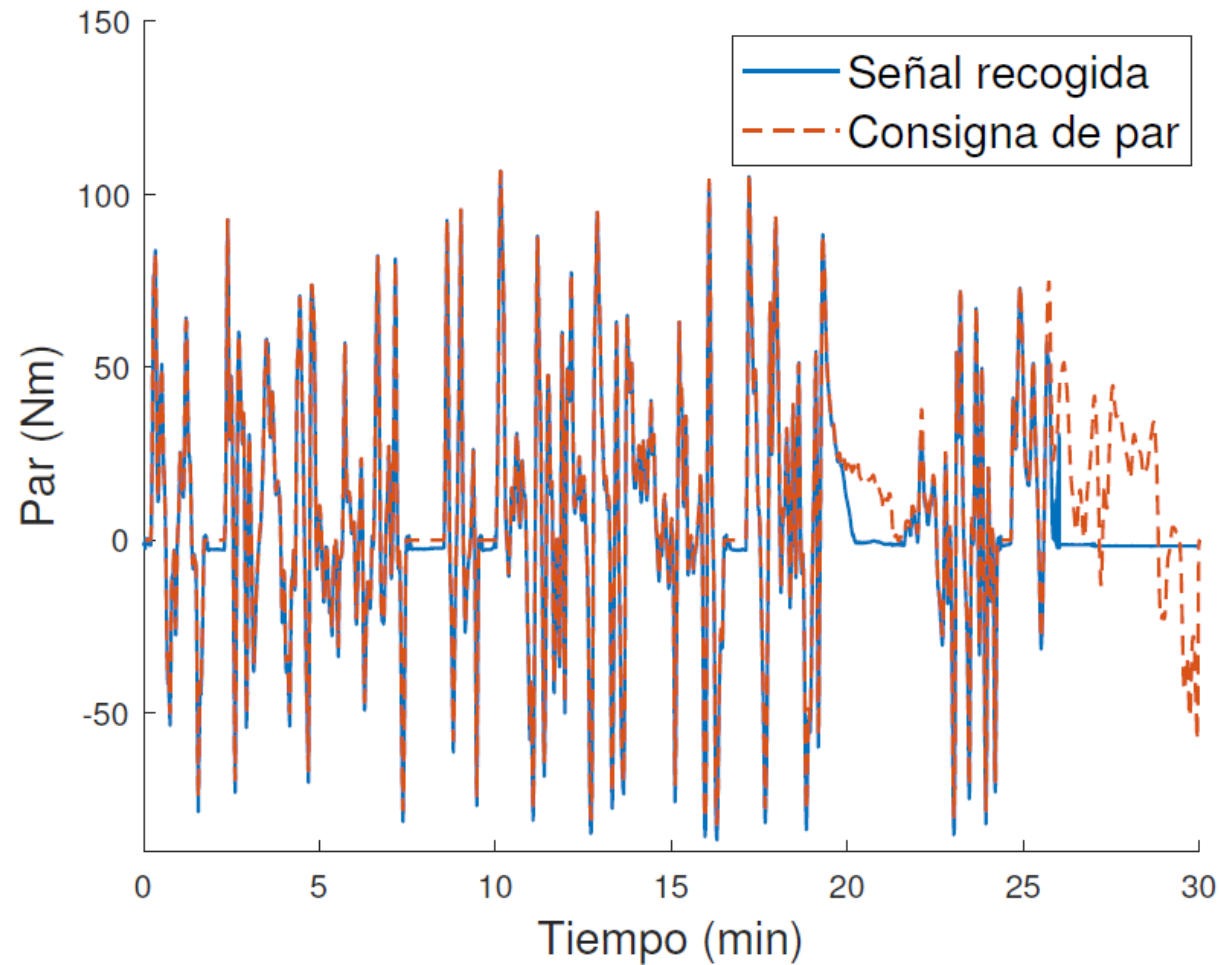


Motor DUT



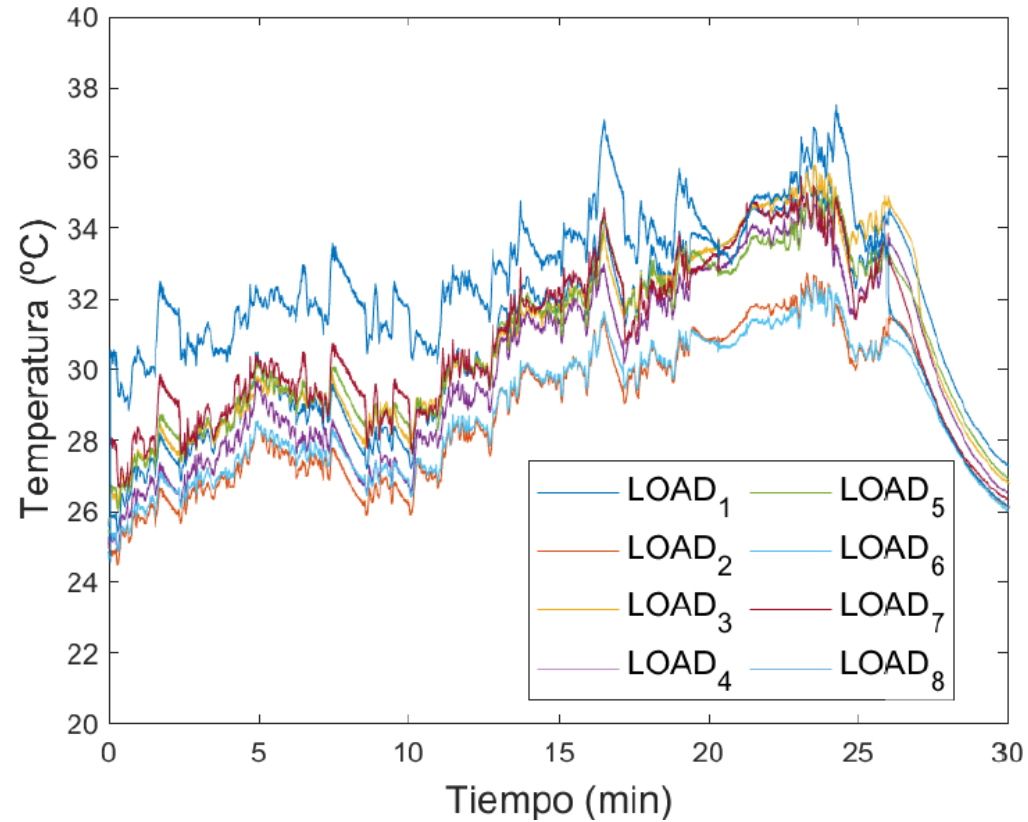
Ciclo WLTP

Resultado en la medida de par

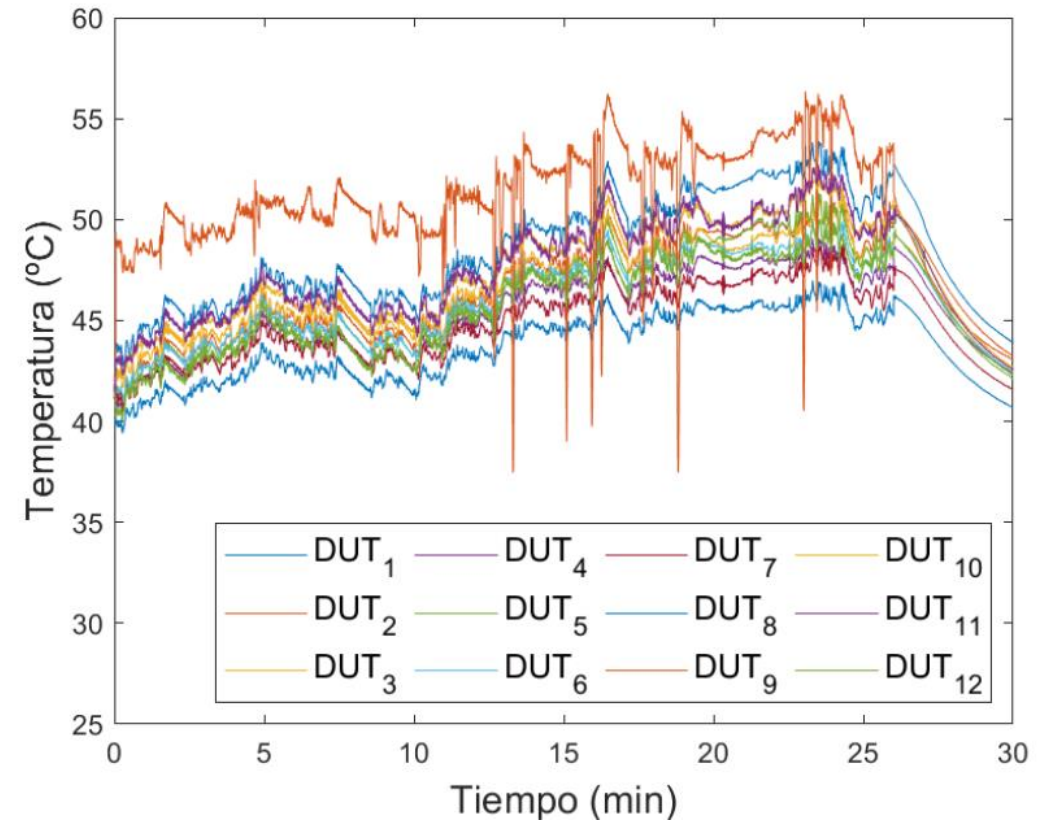


Ciclo WLTP

Resultados en la medida de los termopares



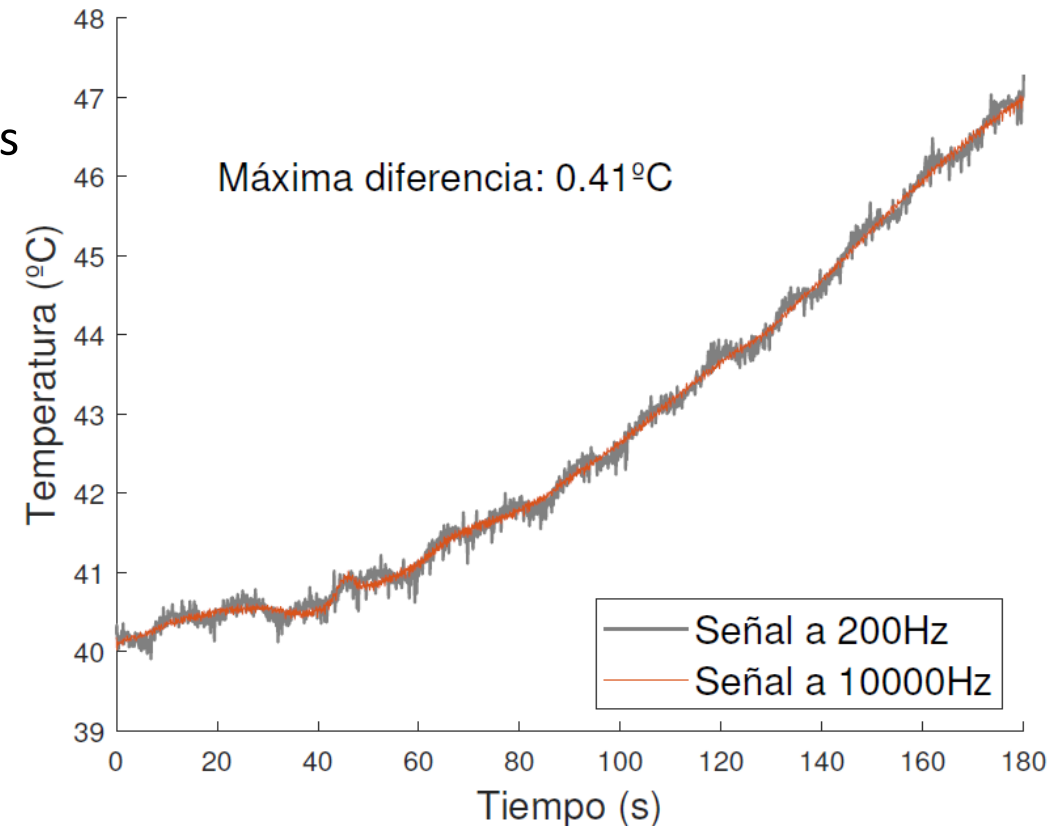
Refrigerado a temperatura ambiente



Refrigerado a 40°C

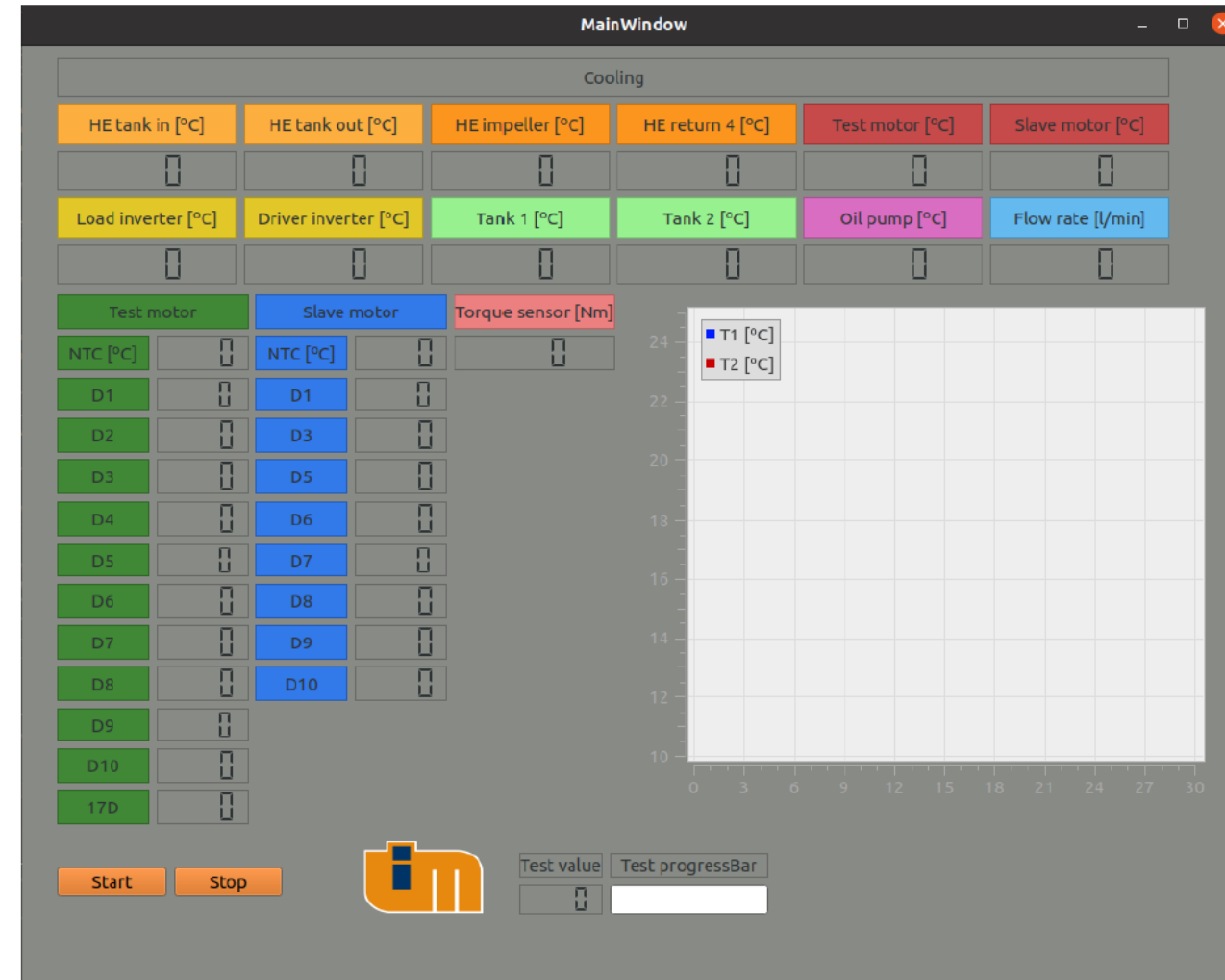
Conclusiones

- Alternativas para la recogida de medidas de termopar
- Adecuación de la señal de termopares mediante dos filtros
 - Analógico
 - Digital
- Adecuación de la señal de la medida del par con filtros
 - Analógico
 - Digital
- Realización de los ensayos que validan el diseño
- Frecuencia de muestreo y filtrado se pueden variar según el ensayo a realizar



Trabajo futuro

- Implementar los acelerómetros
- Recogida de medidas de magnitudes eléctricas
- Conexión de todos los sensores a la DAQ
- Desarrollar un filtrado online
 - Visualizado en tiempo real de parámetros



Diseño de una solución de sensorización para un banco de ensayos de motores eléctricos

Eloy Vázquez Fernández

Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM) -

Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol (EPEF), Universidade da Coruña

Trabajo Fin de Grado – Ingeniería Mecánica

11 de julio de 2023