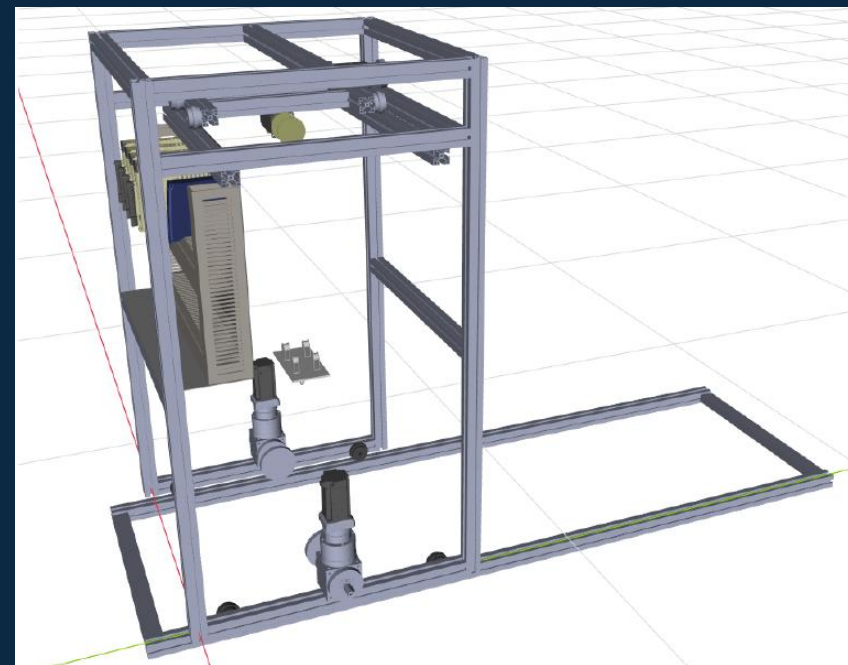


Diseño e implementación del gemelo digital de un sistema mecatrónico

Autor: Álvaro Bello Alvariño

Fecha: 06/07/2026



| ÍNDICE

1. Introducción
2. Objetivo
3. Desarrollo
4. Simulación
5. Calibración
6. Conclusiones



I INTRODUCCIÓN

I OBJETIVO

I DESARROLLO

I SIMULACIÓN

I CALIBRACIÓN

I CONCLUSIONES

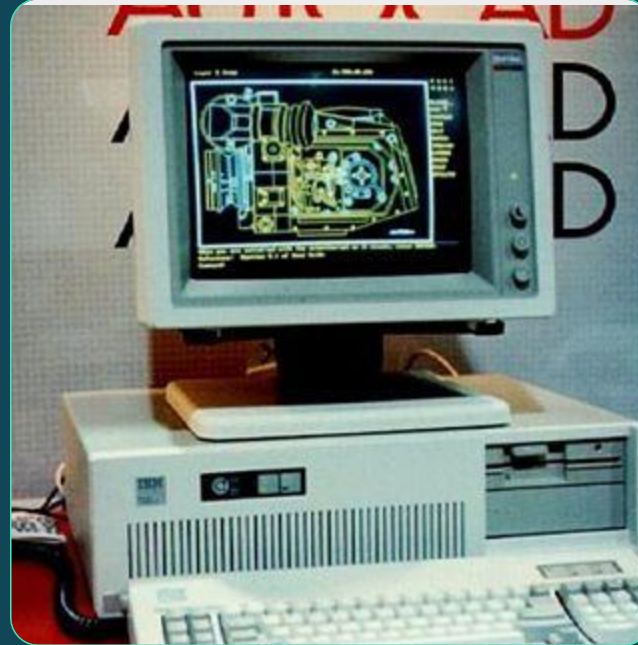
I INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN – Contexto



Aparición de los primeros
lenguajes de alto nivel



Ordenadores personales y
consolidación del CAD



Industria 4.0

INTRODUCCIÓN – Gemelo digital



Representación virtual de un sistema físico

SISTEMA REAL

FLUJO DE DATOS



MODELO VIRTUAL

Objetivo:

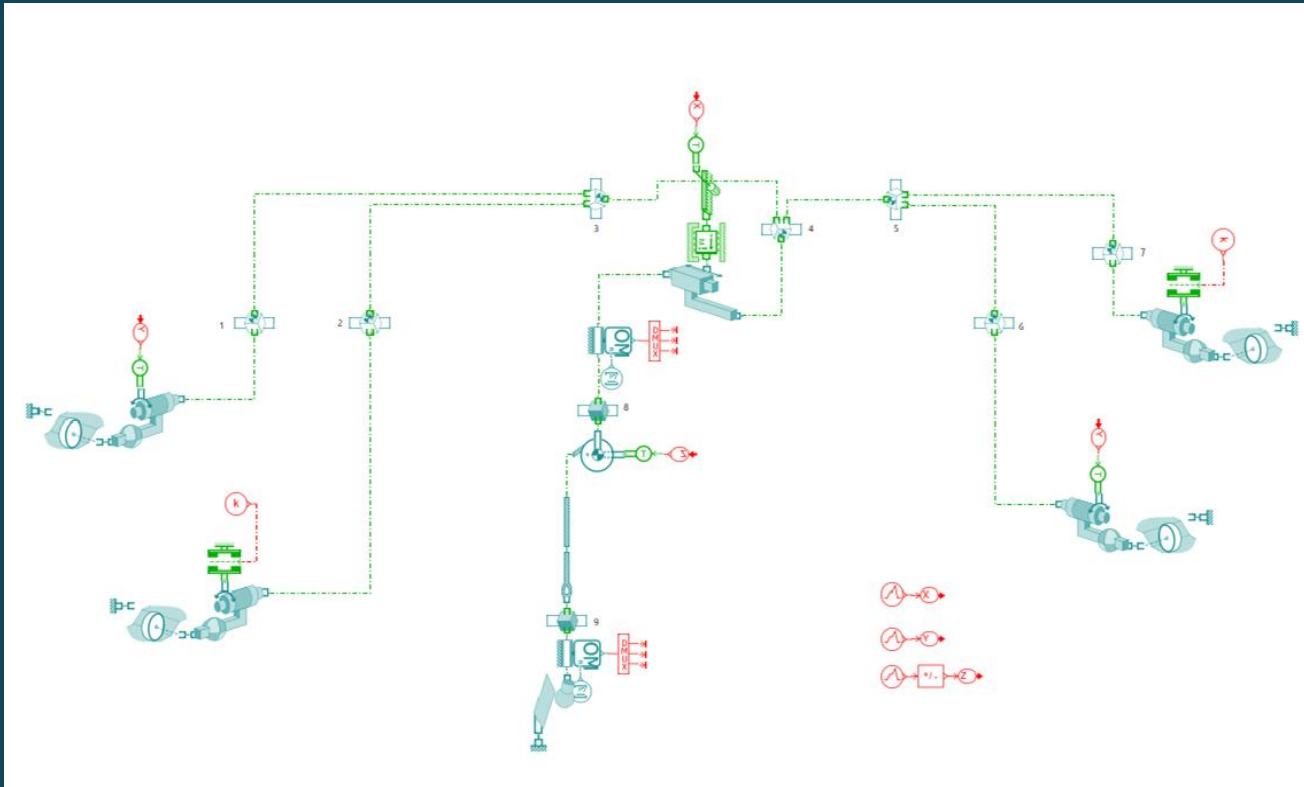
- Reflejar el comportamiento real con la máxima fidelidad posible

Diferencias entre simulación y gemelo digital:

- Incorporación de datos al modelo virtual en tiempo real y de forma continua

INTRODUCCIÓN – Trabajo previo

Trabajo previo realizado que sienta las bases del presente TFG



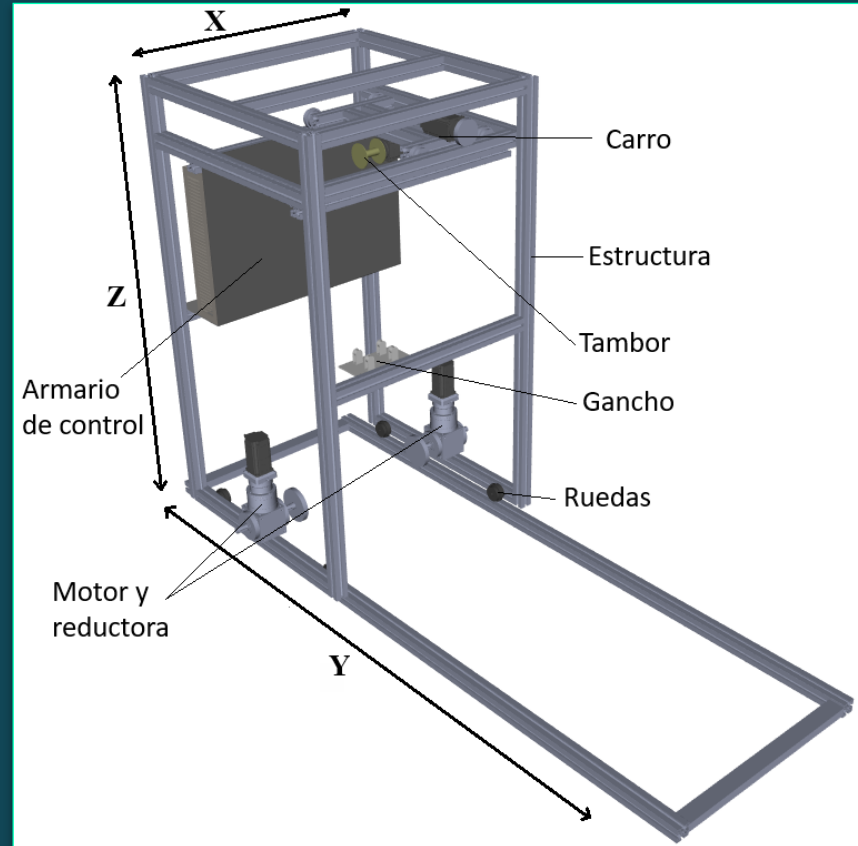
OBJETIVO: Construcción de un modelo 1D en Amesim del prototipo de grúa a escala.

ESTRUCTURA

CARRO

TAMBOR

INTRODUCCIÓN – Descripción de prototipo



Componentes principales:

- Estructura principal
- Armario de control
- Carro

I OBJETIVO



OBJETIVO

OBJETIVO PRINCIPAL:

- Desarrollar un modelo de simulación de alta fidelidad en Simcenter Amesim para un prototipo a escala de grúa portuaria.

REQUISITOS:

Compatibilidad con el
ecosistema Siemens

Exportabilidad como
FMU

Modularidad y
parametrización

Modelo de alta
fidelidad

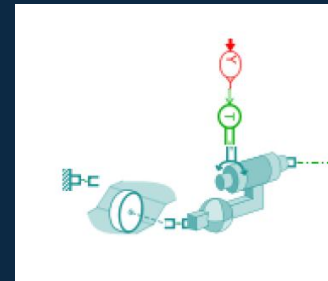
I DESARROLLO



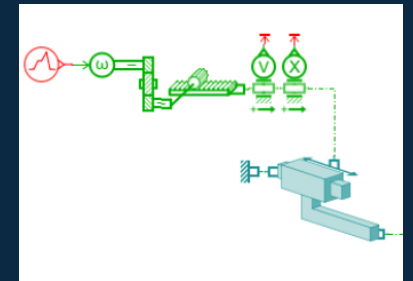
DESARROLLO – Modelo cinemático

La primera etapa consistió en corregir las limitaciones estructurales y cinemáticas del trabajo previo:

- **Sustitución de Tracción Directa:** Las ruedas pasan a ser simples apoyos. Se implementa un **piñón-cremallera** de la biblioteca 1D.

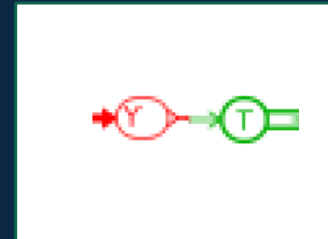


MODELO BASE

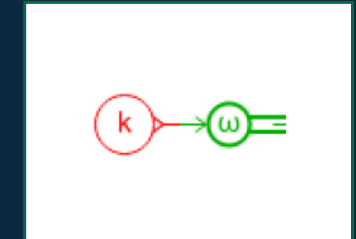


MODELO CINEMÁTICO

- **Comando de Velocidad:** Se cambia el pilotaje de velocidad del modelo base a control por consignas de par.



MODELO BASE



MODELO CINEMÁTICO

DESARROLLO – Modelo cinemático

Integrando todos los cambios, obtenemos el modelo cinemático:

ESTRUCTURA:

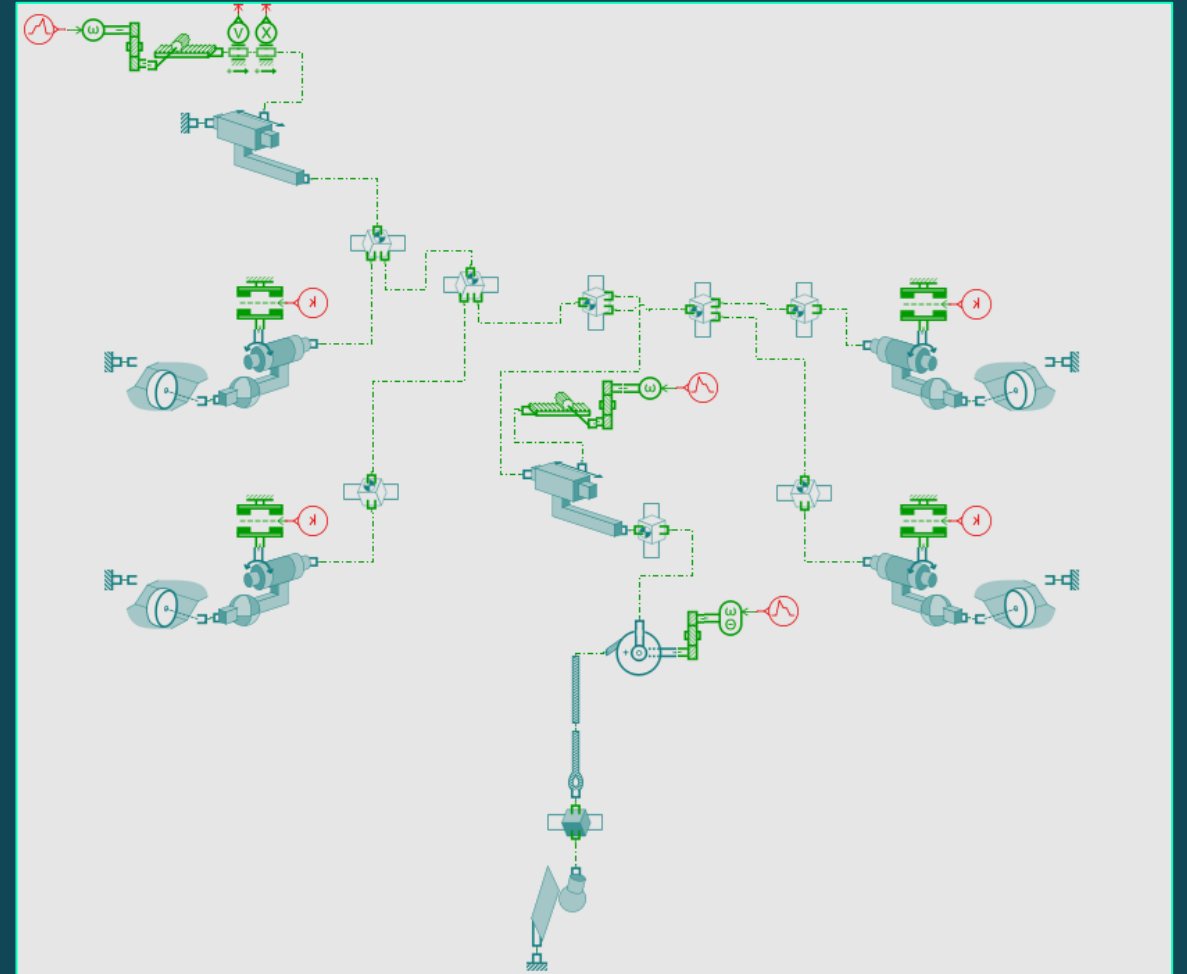
Variaciones en el sistema de traslación, en el control de los motores, y en la disposición de las masas

CARRO:

Cambio de control del motor

TAMBOR:

Cambio de control del motor



| DESARROLLO – Modelo cinemático

Limitaciones del modelo cinemático y aspectos a evolucionar:

LIMITACIONES

- Ausencia de consideración de las causas del movimiento
- Restricción cinemática en el eje Z
- Ausencia de detalles dinámicos en los componentes

EVOLUCIONES

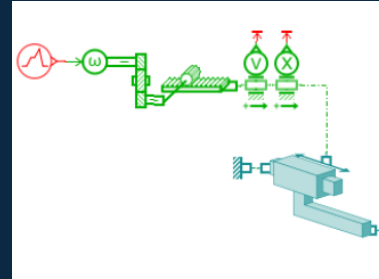
- Cambio de sistema de transmisión por piñón-cremallera de la librería 3D
- Se añade un elemento que modela un engranaje con pérdidas
- Cambio de sistema de traslación del carro
- Cambio de par prismático por junta planar
- Cambio del modelo de motor

DESARROLLO – Modelo dinámico

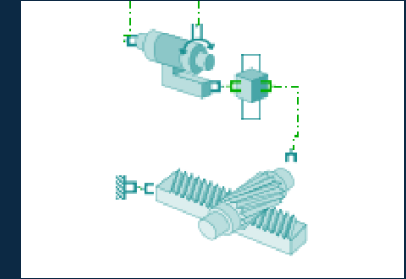
CAMBIOS

PIÑÓN-CREMALLERA

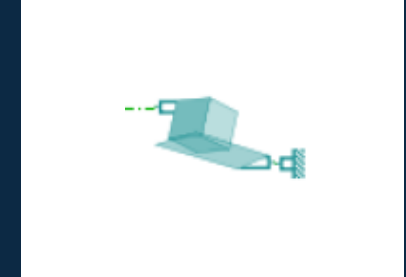
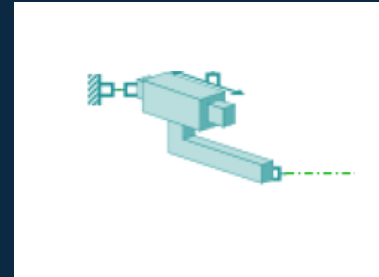
MODELO CINEMÁTICO



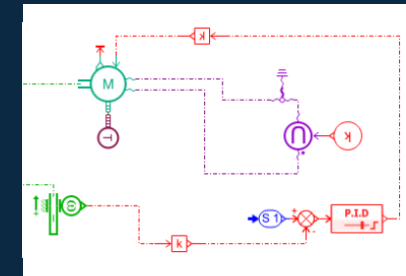
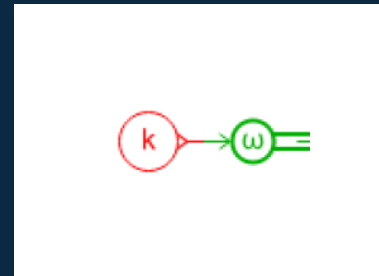
MODELO DINÁMICO



JUNTA PLANAR



MODELO MOTOR

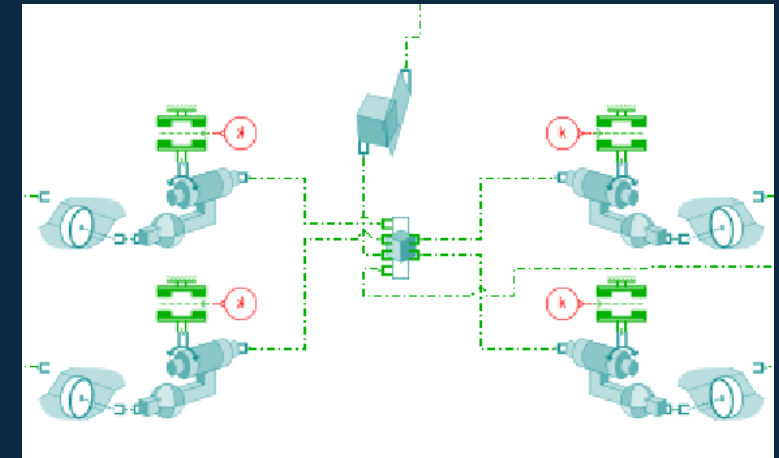
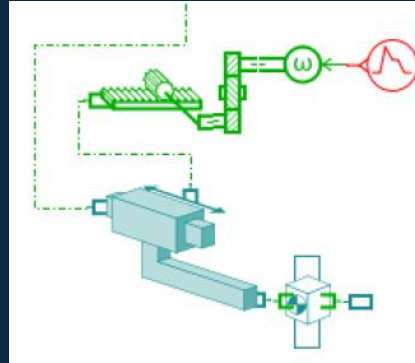


DESARROLLO – Modelo dinámico

MODELO CINEMÁTICO

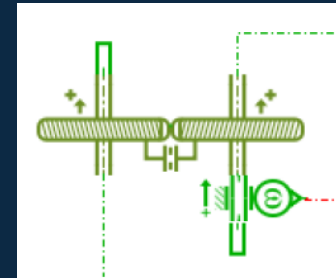
MODELO DINÁMICO

CARRO

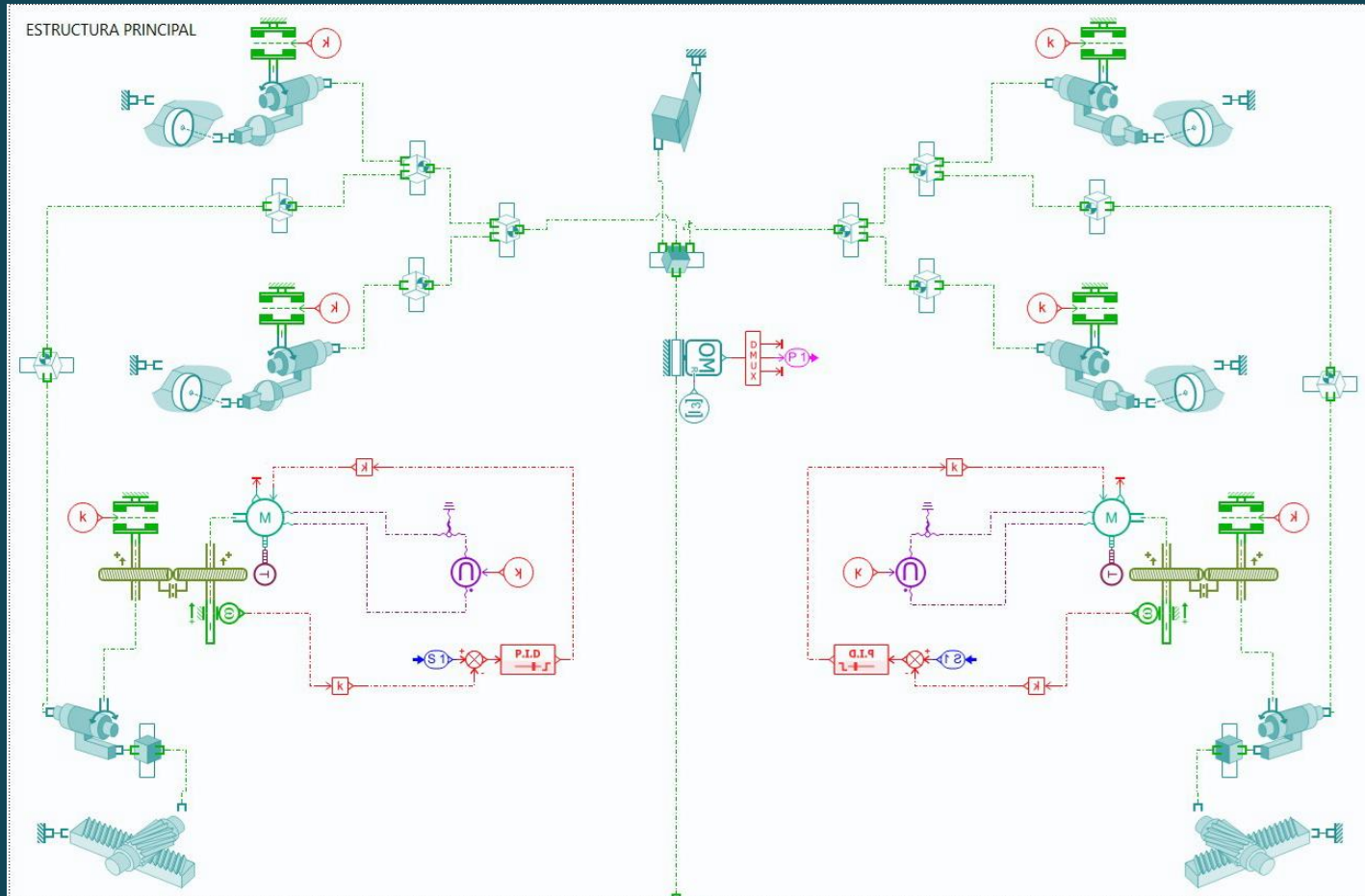


ELEMENTOS NUEVOS

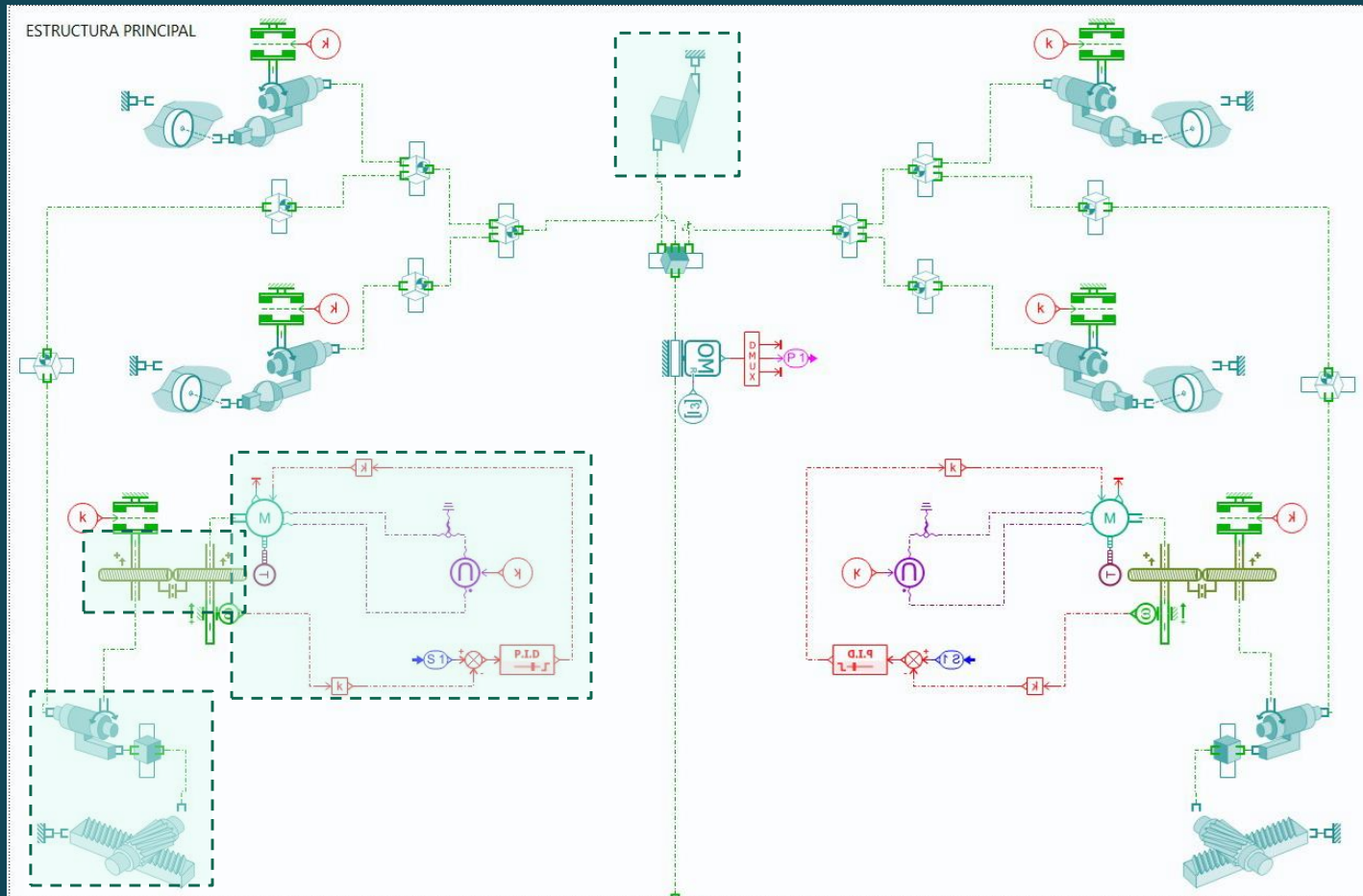
REDUCTORA CON PÉRDIDAS



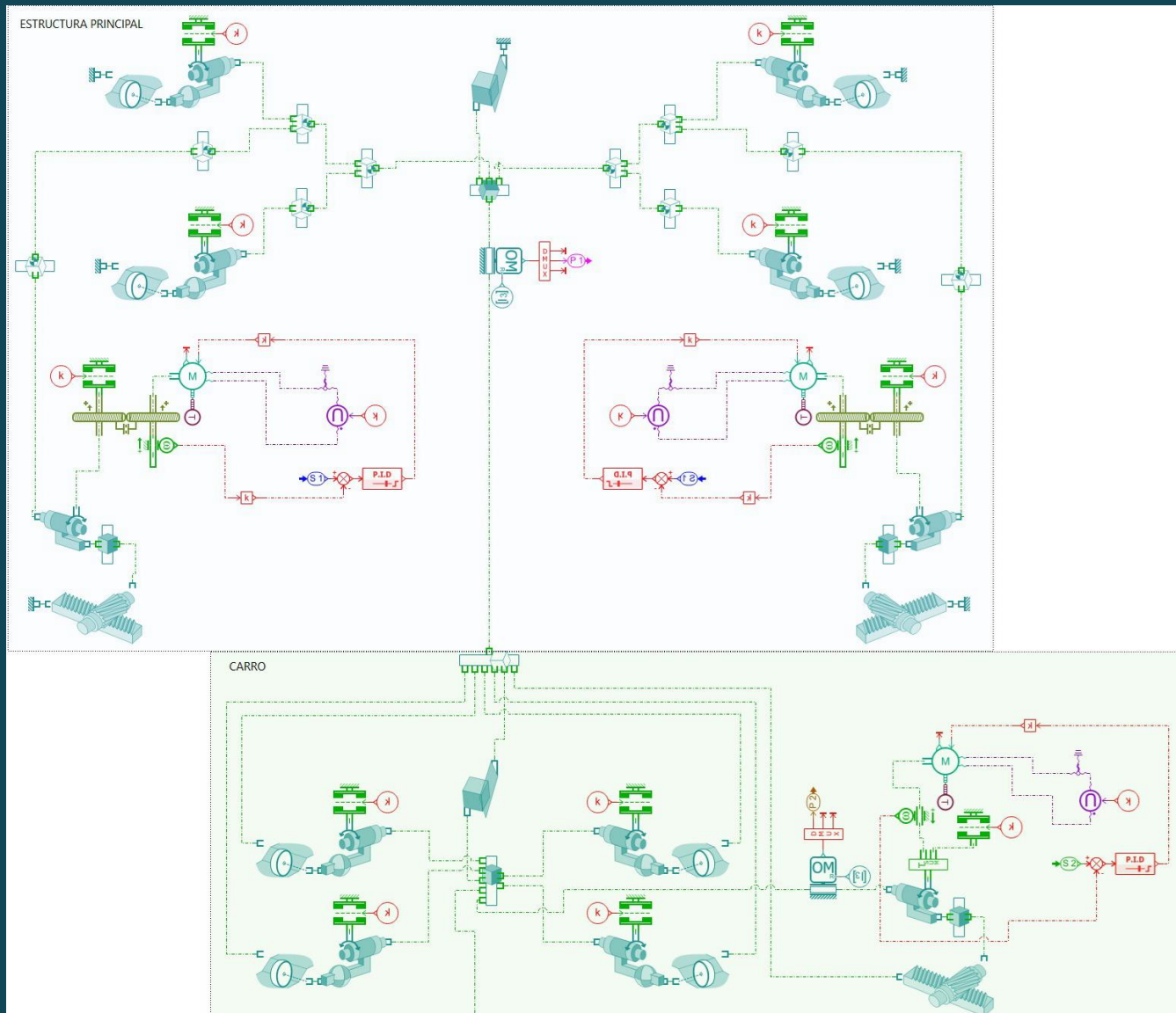
DESARROLLO – Modelo dinámico



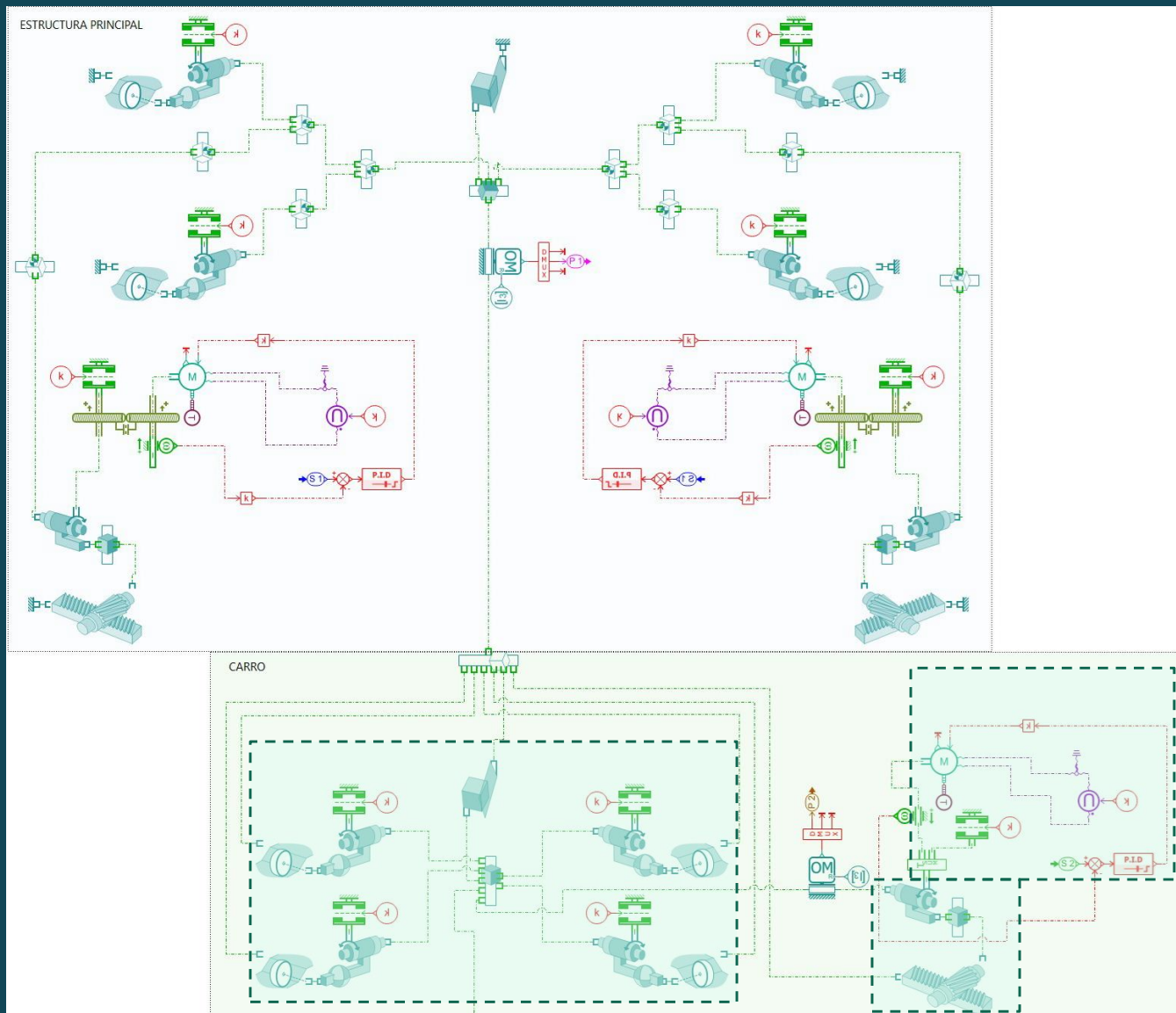
DESARROLLO – Modelo dinámico



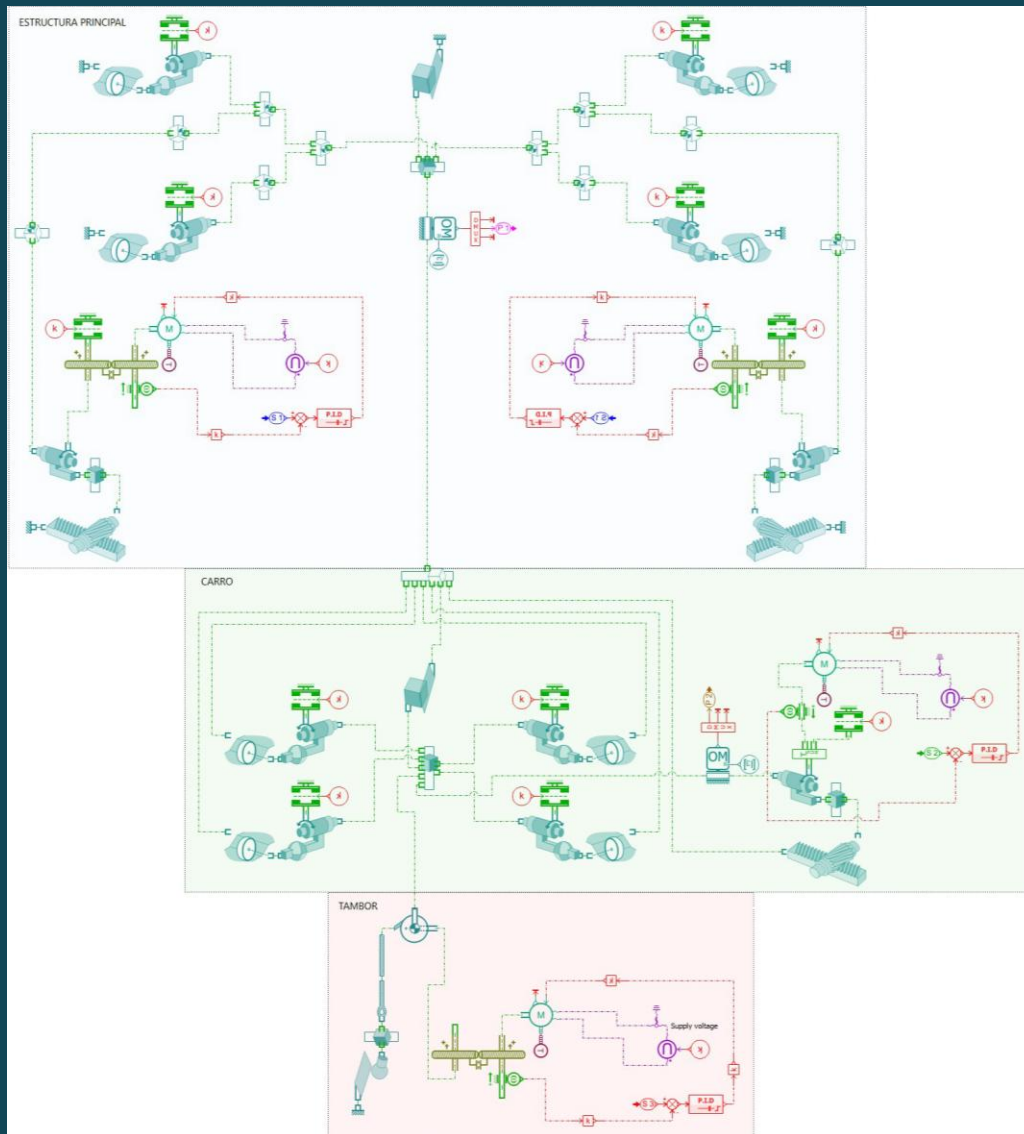
DESARROLLO – Modelo dinámico



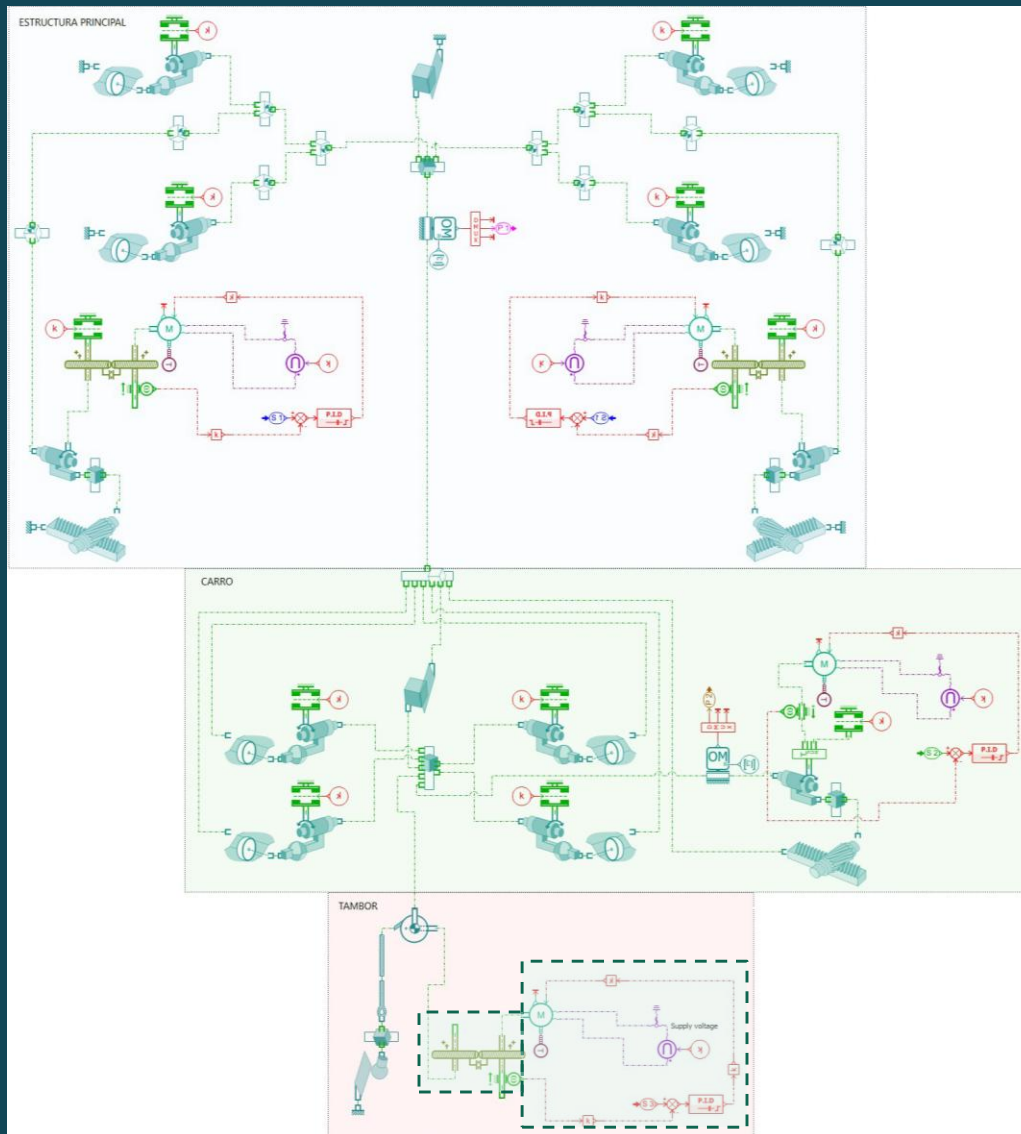
DESARROLLO – Modelo dinámico



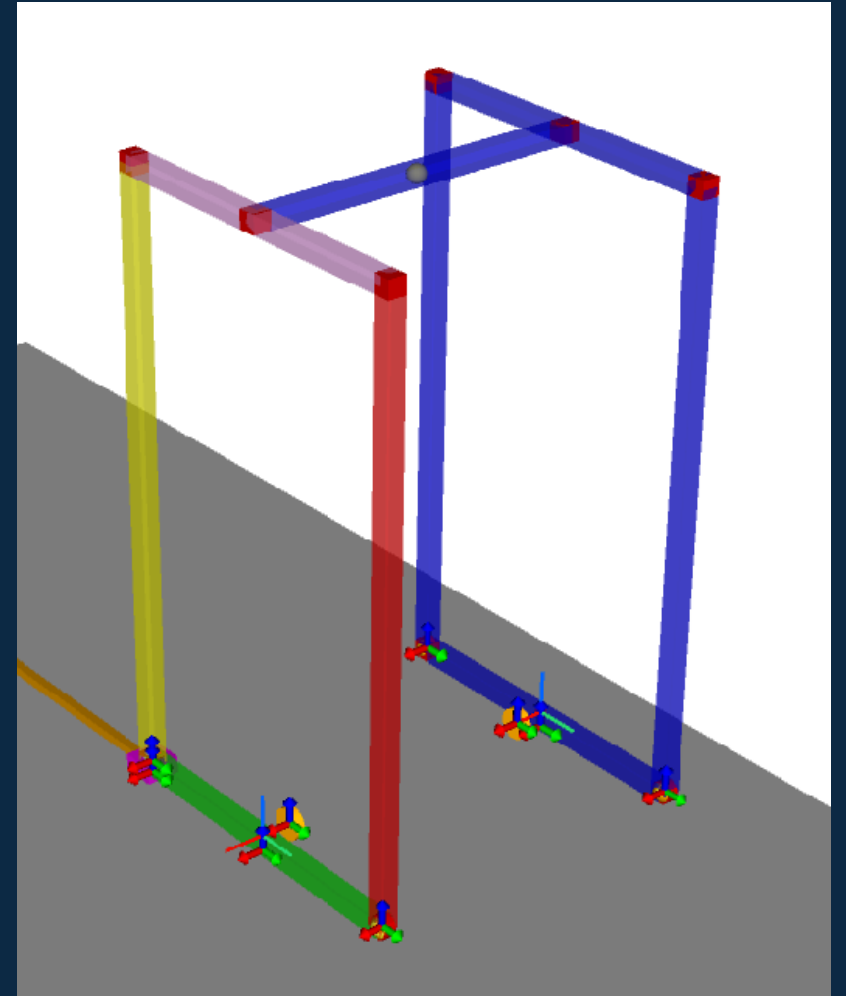
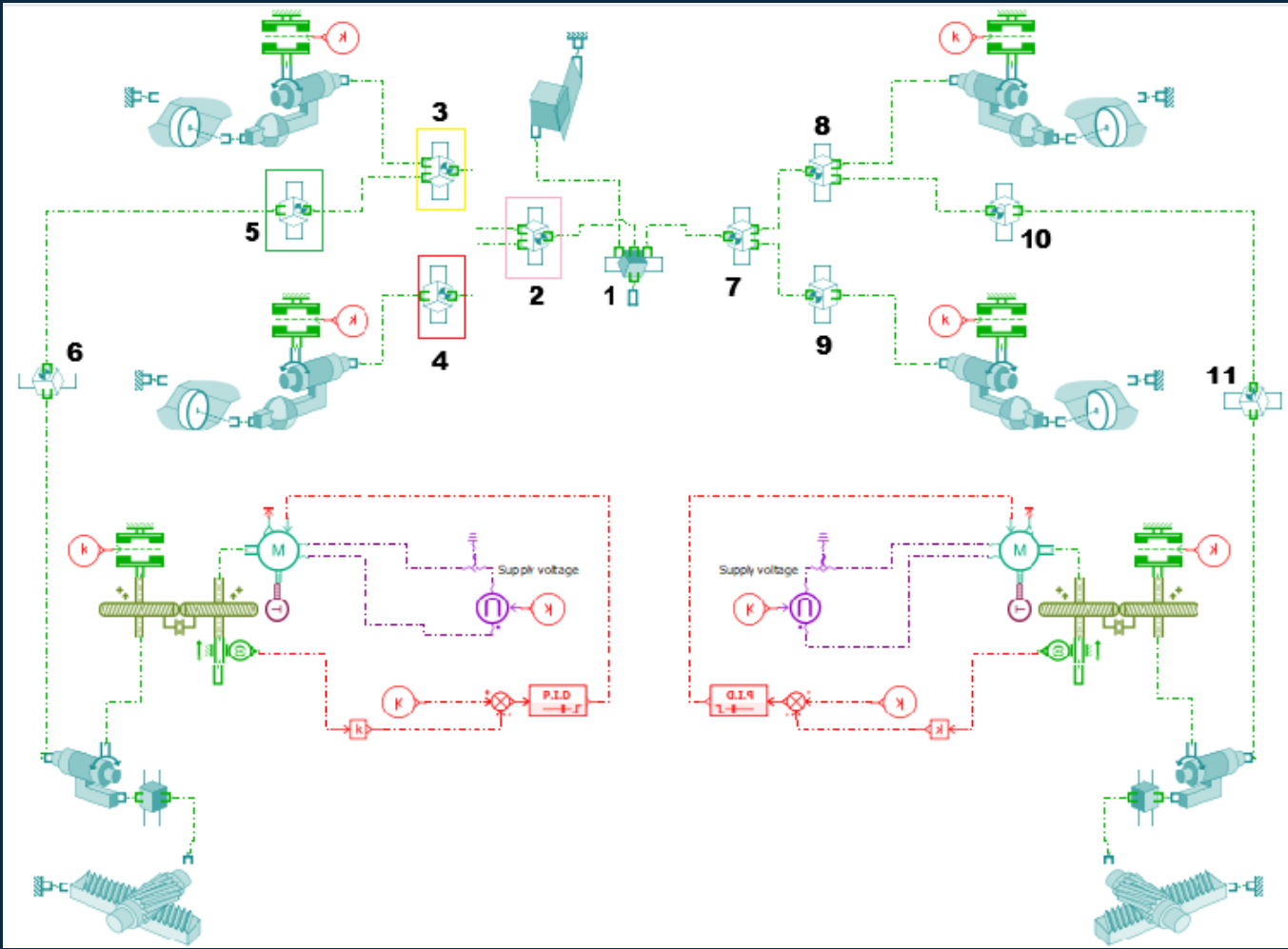
DESARROLLO – Modelo dinámico



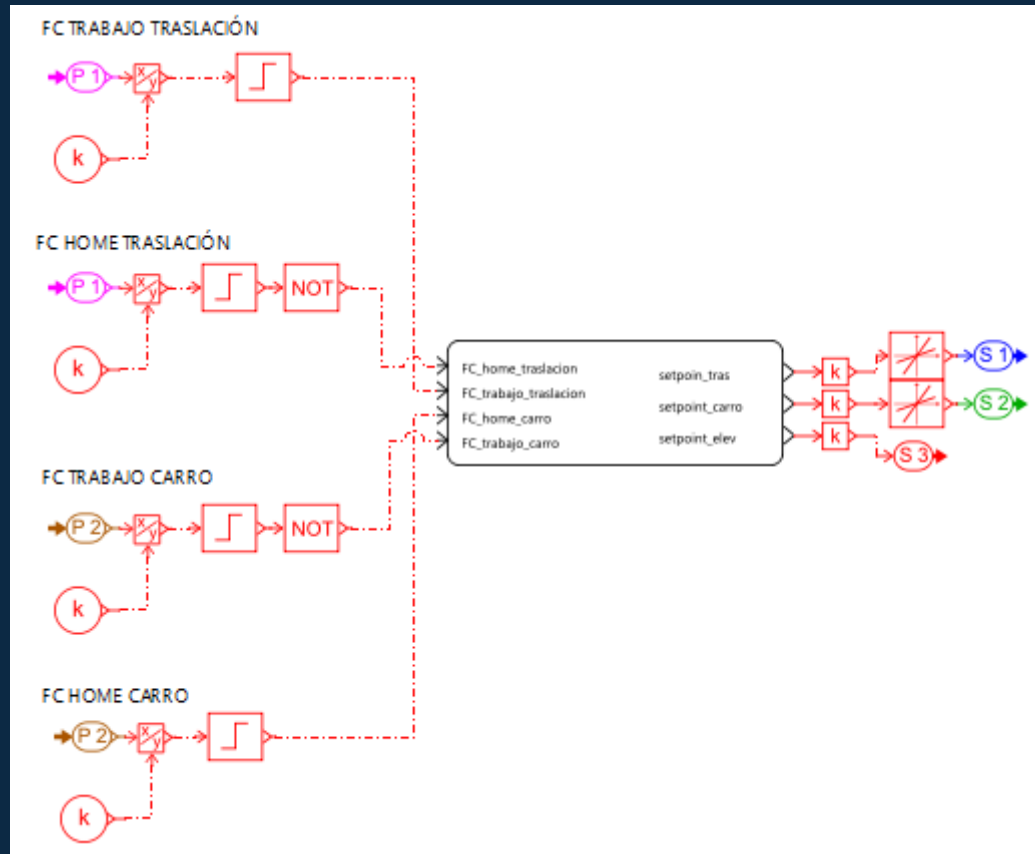
DESARROLLO – Modelo dinámico



DESARROLLO – Modelo dinámico



DESARROLLO – Modelo dinámico



BLOQUE DE INTEGRACIÓN CON EL PLC

Entradas

FC INICIO TRASLACION

FC TRABAJO TRASLACIÓN

FC INICIO CARRO

FC TRABAJO CARRO

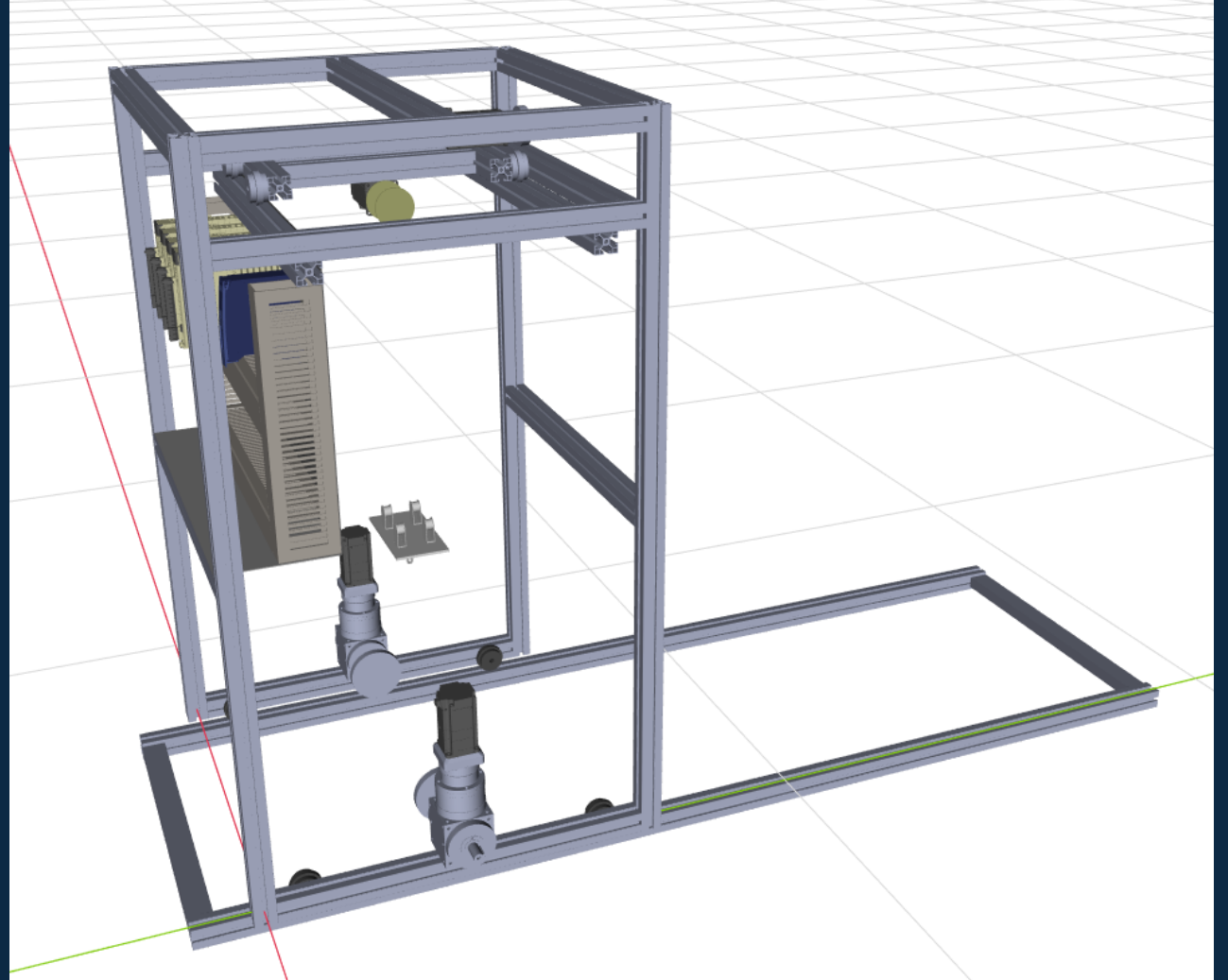
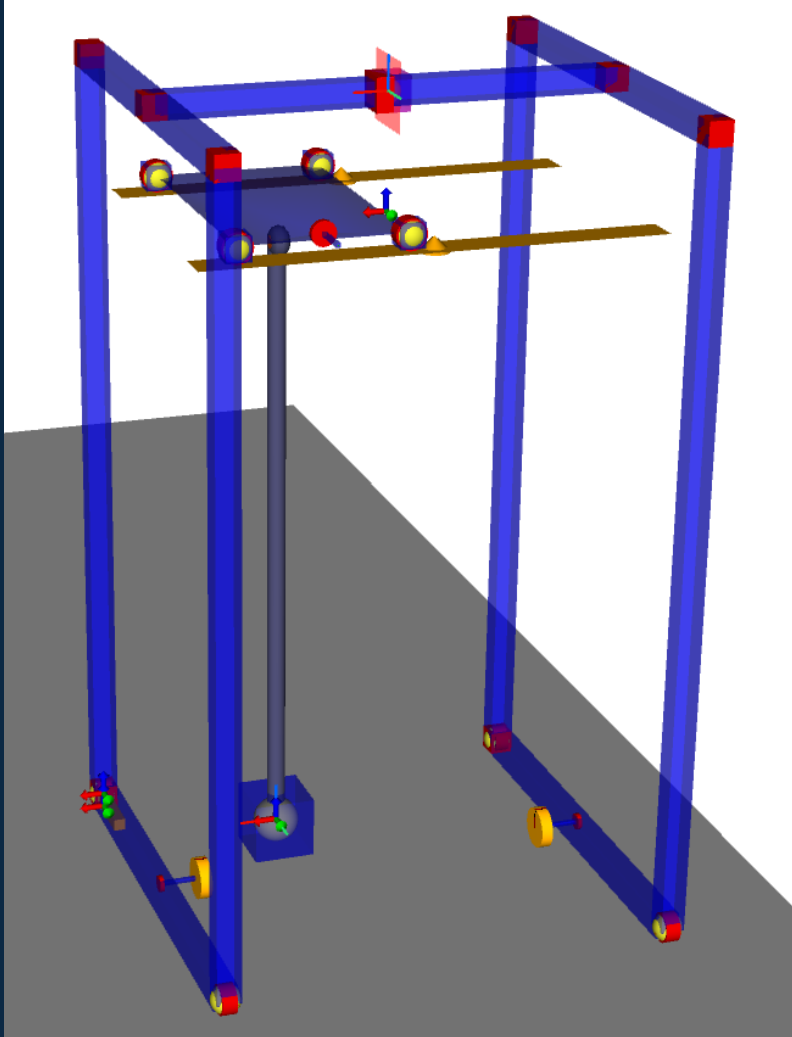
Salidas

SETPOINT TRASLACIÓN

SETPOINT CARRO

SETPOINT ELEVACIÓN

DESARROLLO – Modelo dinámico



| SIMULACIÓN



| SIMULACIÓN

Software-in-the-Loop (SiL)



Paso de Comunicación fijado en 50 ms: Introduce una latencia de 50 ms en la detección lógica de finales de carrera y consignas. El intervalo de integración de la función objetivo se acota al tiempo de trayectoria real $[0, t^*]$.

| CALIBRACIÓN



CALIBRACIÓN – Datos y proceso

Se adopta un enfoque de ajuste basado en análisis de sensibilidad: para cada parámetro libre, se evalúa cuantitativamente como varía una métrica de error seleccionada ante perturbaciones del parámetro en torno a su valor nominal estimado.

DATOS DISPONIBLES

Par de referencia τ_{ref}

Velocidad de giro del motor ω

Velocidad de referencia ω_{ref}

Desplazamiento x

MÉTODO

Función objetivo:
$$\Psi(\rho) = \sum_{k=1}^N (\tau_{ref}^* - \tau_{ref,sim})^2$$

Sensibilidad:
$$S_{rel,i} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta\rho_i} \cdot \frac{\rho_{i,0}}{\Psi(\rho_0)}$$

Error relativo:
$$\varepsilon = \frac{|\tau_{ref}^* - \tau_{ref,sim}|}{\tau_{ref}^*} \cdot 100$$

MANIOBRA ÚNICA: La grúa opera con una secuencia fija y no es posible modificarla ni ejecutar movimientos aislados.

CALIBRACIÓN – Calibración de la traslación del carro

$$\rho = [\mu_r, v_r, \mu_p, v_p, \mu_d, v_d, \eta_m]^T$$

Parámetro	Símbolo	Valor inicial	pi,1	Srel (%)
Coef. Coulomb (ruedas)	μ_r	0,5	0,55	-0,054
Vel. umbral (ruedas)	v_r	0,001	0,0011	-0,016
Coef. Coulomb (pivotes)	μ_p	0,0183	0,02013	+1,39
Vel. umbral (pivotes)	v_p	1	1,1	-0,053
Coef. Coulomb (piñón)	μ_d	0,2	0,22	+1,42
Vel. umbral (piñón)	v_d	1	1,1	-0,033
Rendimiento del motor	η_m	0,90	0,99	-2,98

1. Barrido de η_m con μ_p y μ_d fijos. El valor de η_m que minimiza Ψ se fija.

2. Barrido de μ_d con μ_p y η_m fijos. El valor de μ_d que minimiza Ψ se fija.

3. Barrido de μ_p con μ_d y η_m fijos. El valor de μ_p que minimiza Ψ se fija.

- Tres variaciones acumuladas del **10%** en cada barrido.
- Si $\varepsilon < 3\%$, la variación será del **5%**.
- El criterio de parada es cuando se alcanza $\varepsilon < 1\%$.

CALIBRACIÓN – Calibración de la traslación del carro

Paso 1:

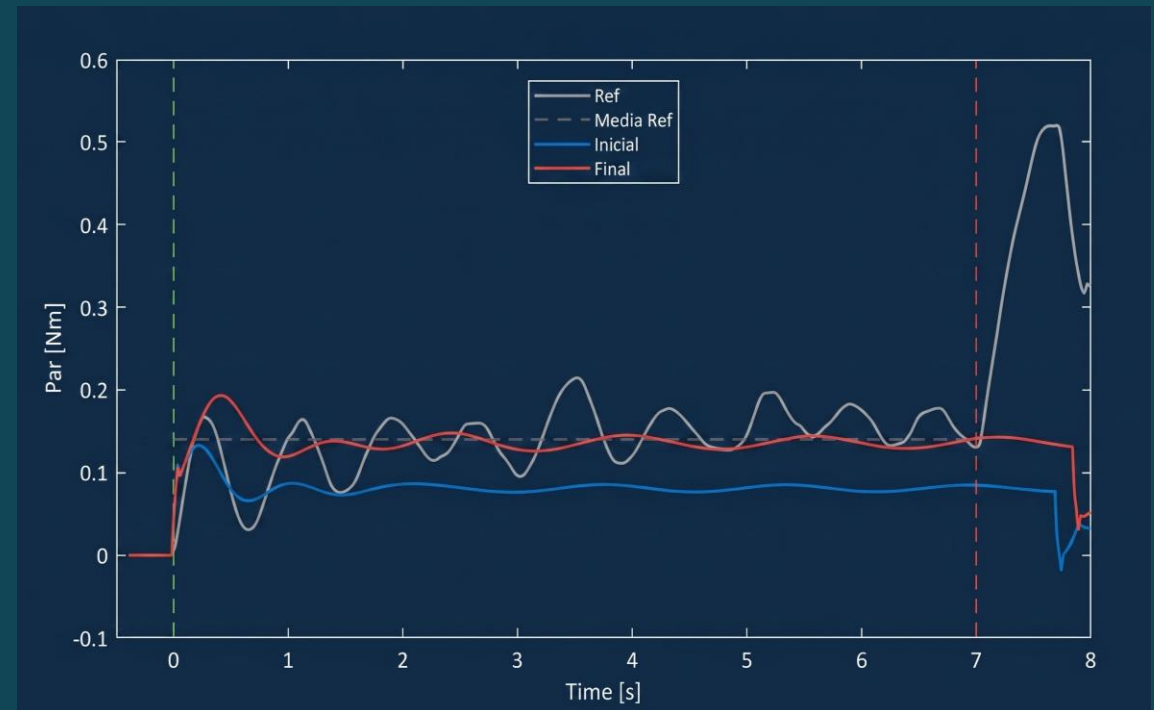
η_m	$\tau_{ref,sim}$ (Nm)	Ψ ((Nm)2)	ε (%)
0,80	0,09261	0,001904	32,02
0,70	0,10556	0,0009411	22,51
0,60	0,12260	0,0001862	10,0

Paso 2:

μ_d	$\tau_{ref,sim}$ (Nm)	Ψ ((Nm)2)	ε (%)
0,22	0,12844	$6,084 \times 10^{-5}$	5,72
0,24	0,13428	$3,864 \times 10^{-6}$	1,44
0,26	0,14038	$1,711 \times 10^{-5}$	-3,03

Paso 3:

μ_p	$\tau_{ref,sim}$ (Nm)	Ψ ((Nm)2)	ε (%)
0,01920	0,13729	$1,102 \times 10^{-6}$	-0,77
0,02013	0,14005	$1,450 \times 10^{-5}$	-2,79
0,02105	0,14281	$4,301 \times 10^{-5}$	-4,82



Parámetros	Símbolo	Valor final
Rendimiento del motor	η_m	0,60
Coef. Coulomb (piñón)	μ_d	0,24
Coef. Coulomb (pivotes)	μ_p	0,0192

CALIBRACIÓN – Calibración de la traslación de la estructura

$$\rho = [\mu_r, v_r, \mu_p, v_p, \mu_d, v_d, \eta_r]^T$$

Parámetro	Símbolo	Valor inicial	pi,1	Srel (%)
Coef. Coulomb (ruedas)	μ_r	0,5	0,55	+0,027
Vel. umbral (ruedas)	v_r	0,001	0,0011	-0,0060
Coef. Coulomb (pivotes)	μ_p	0,04	0,044	+3,00
Vel. umbral (pivotes)	v_p	1	1,1	+0,064
Coef. Coulomb (piñón)	μ_d	0,4	0,44	+3,26
Vel. umbral (piñón)	v_d	1	1,1	+0,017
Rendimiento de la reductora	η_m	0,94	0,846	-6,19

1. Barrido de η_r con μ_p y μ_d fijos. El valor de η_m que minimiza Ψ se fija.

2. Barrido de μ_d con μ_p y η_r fijos. El valor de μ_d que minimiza Ψ se fija.

3. Barrido de μ_p con μ_d y η_r fijos. El valor de μ_p que minimiza Ψ se fija.

- Tres variaciones acumuladas del **10%** en cada barrido.
- Si $\varepsilon < 3\%$, la variación será del **5%**.
- El criterio de parada es cuando se alcanza $\varepsilon < 1\%$.

CALIBRACIÓN – Calibración de la traslación de la estructura

Paso 1:

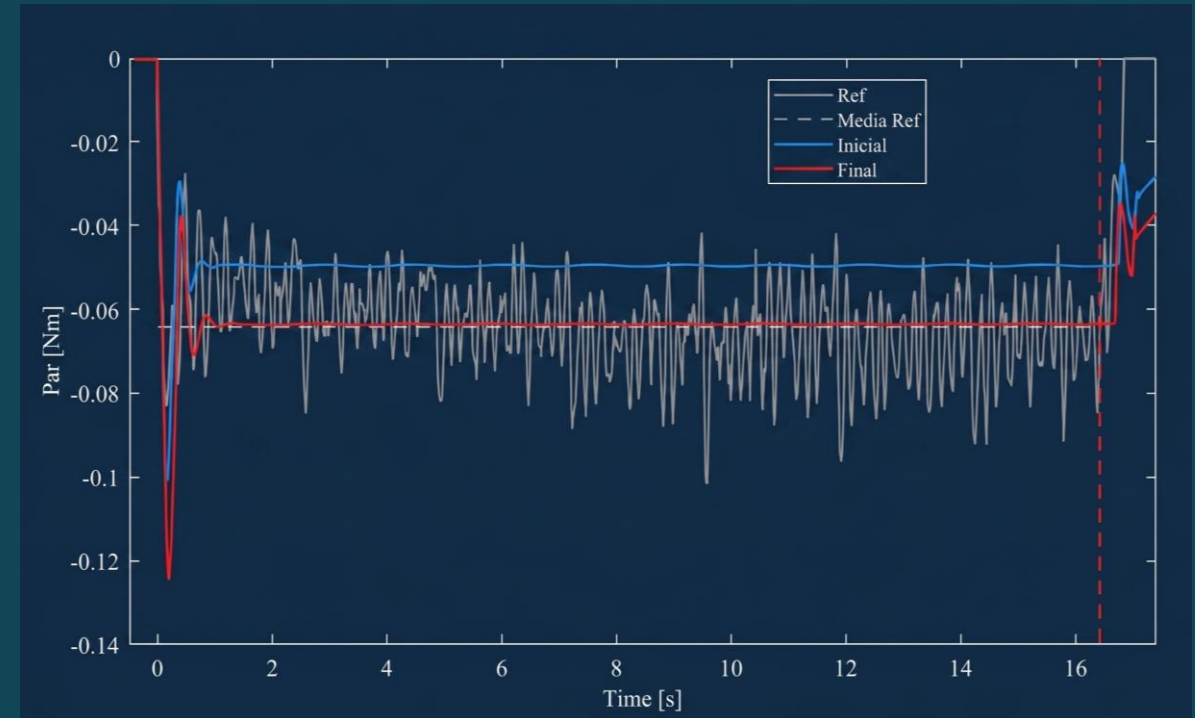
η_r	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,846	-0,05553	$7,955 \times 10^{-5}$	13,89
0,752	-0,06215	$4,213 \times 10^{-6}$	3,20
0,658	-0,07094	$4,533 \times 10^{-5}$	-10,48

Paso 2:

μ_d	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,44	-0,06536	$1,327 \times 10^{-6}$	-1,79
0,48	-0,06854	$1,878 \times 10^{-5}$	-6,75
0,52	-0,07162	$5,497 \times 10^{-5}$	-11,54

Paso 3:

μ_p	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,038	-0,06385	$1,310 \times 10^{-7}$	0,56
0,036	-0,06232	$3,578 \times 10^{-6}$	2,95
0,034	-0,06091	$1,089 \times 10^{-5}$	5,14



Parámetros	Símbolo	Valor final
Rendimiento de la reductora	η_m	0,752
Coef. Coulomb (piñón)	μ_d	0,44
Coef. Coulomb (pivotes)	μ_p	0,038

CALIBRACIÓN – Calibración de la elevación

$$\rho = [b_t, \eta_r]^T$$

Parámetro	Símbolo	Valor inicial	$\rho_{i,1}$	Srel (%)
Coef. Fricción viscosa (tambor)	b_t	0,05	0,055	-12,15
Rendimiento de la reductora	η_r	0,94	0,846	-8,27

1. Barrido de η_r con μ_p y μ_d fijos. El valor de η_m que minimiza Ψ se fija.

2. Barrido de μ_d con μ_p y η_r fijos. El valor de μ_d que minimiza Ψ se fija.

3. Barrido de μ_p con μ_d y η_r fijos. El valor de μ_p que minimiza Ψ se fija.

- Tres variaciones acumuladas del 5% en cada barrido.
- El criterio de parada es cuando se alcanza $\varepsilon < 1\%$.

CALIBRACIÓN – Calibración de la elevación

Paso 1:

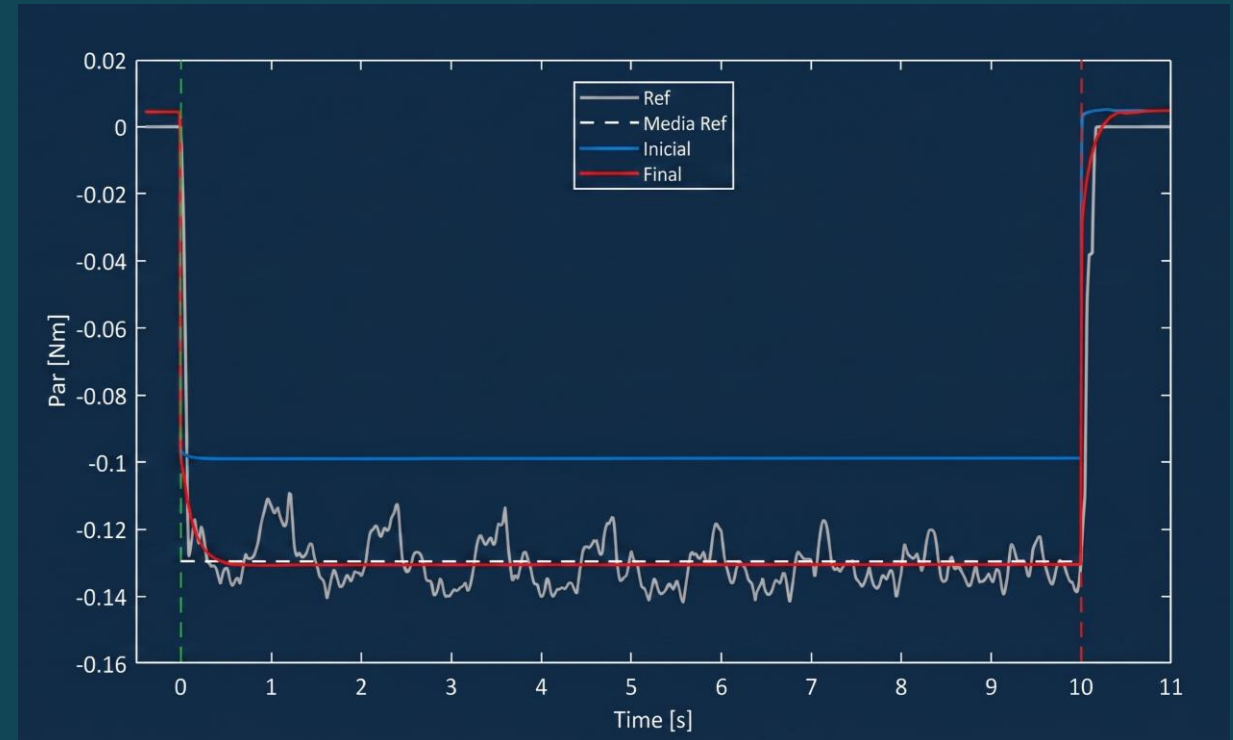
b_t	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,0105	-0,10382	$6,677 \times 10^{-4}$	19,93
0,0110	-0,10892	$4,299 \times 10^{-4}$	15,99
0,0115	-0,11408	$2,426 \times 10^{-4}$	12,01

Paso 2:

η_r	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,855	-0,11998	$9,359 \times 10^{-5}$	7,46
0,810	-0,12659	$9,393 \times 10^{-6}$	2,36
0,765	-0,13393	$1,828 \times 10^{-5}$	-3,30

Paso 3:

b_t	$\tau_{\text{ref,sim}} \text{ (Nm)}$	$\Psi \text{ ((Nm)2)}$	$\varepsilon \text{ (\%)}$
0,0118	-0,13001	$1,233 \times 10^{-7}$	-0,27
0,0121	-0,13340	$1,403 \times 10^{-5}$	-2,89
0,0123	-0,13567	$3,626 \times 10^{-5}$	-4,64



Parámetros	Símbolo	Valor final
Rendimiento de la reductora	η_m	0,81
Coef. Fricción viscosa	μ_d	0,0118

| CONCLUSIONES



| CONCLUSIONES – Problemas encontrados

FALTA DE DATOS DE MOTOR :

No se conocían datos de inductancias, flujo de imanes, resistencias, etc. Necesidad de adoptar un modelo de motor simple.

FALTA DE DATOS PARA CALIBRACIÓN:

Solo se cuentan con datos extraídos de SigmaWin+. La calibración se hace únicamente comparando con el par de referencia.

MANIOBRA ÚNICA:

Sin posibilidad de adaptar la secuencia o aislar movimientos. Todos los experimentos se realizaron bajo la misma secuencia.

LATENCIA EN CO-SIMULACIÓN:

Retraso en las comunicaciones entre el PLC virtual y el modelo de Amesim. Se transforma en un retraso de 50ms. Se toman medidas antes de que llegue al final de carrera.

| CONCLUSIONES – Análisis de soluciones y conclusiones

- Los valores de los rendimientos de los motores y de las reductoras son más bajos de lo esperado. Esto puede explicarse porque pueden actuar como coeficientes de ajuste global, absorbiendo pérdidas que no estén representadas en el modelo.
 - Con los datos que se disponen, no es posible asegurar con más precisión la exactitud de cada parámetro.
-
- Se desarrollo un modelo de simulación del prototipo de la grúa, partiendo del modelo entregado en el TFG previo, abordando sus limitaciones y ejecutando las mejoras pertinentes.
 - Se ha requerido de la exploración de numerosas librerías y elementos compatibles con los ya existentes en el modelo base.
 - Simulación llevada a cabo contra medidas reales tomadas directamente de las controladoras de los motores.
 - Programas: TIA Portal, SigmaWin+, PLCSIM Advanced, Automation Connect.

| CONCLUSIONES – Líneas de trabajo futuras

MODELO DE MOTOR AVANZADO

CALIBRACIÓN CON MANIOBRAS ESPECÍFICAS

MODELO DE ENGRANAJE AVANZADO

VERIFICACIÓN FMU Y CONEXIÓN CON PLC FÍSICO

| FIN



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

SIEMENS