

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CO-SIMULACIÓN PARA SISTEMAS CON COMPONENTES MECÁNICOS

Autor:

Christian Díaz Carro

Tutores:

Miguel Á. Naya Villaverde

Francisco J. González Varela

*Trabajo Final de Grado
Ferrol, España, Julio 2019*



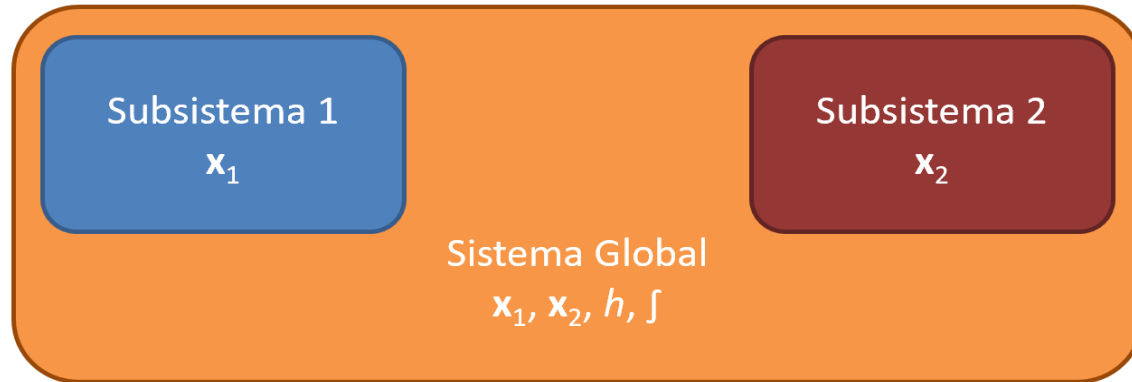
- ❖ **La simulación computacional...**
 - ... reduce costes
 - ... reduce el tiempo en procesos de fabricación
 - ... acorta el ciclo de desarrollo del producto



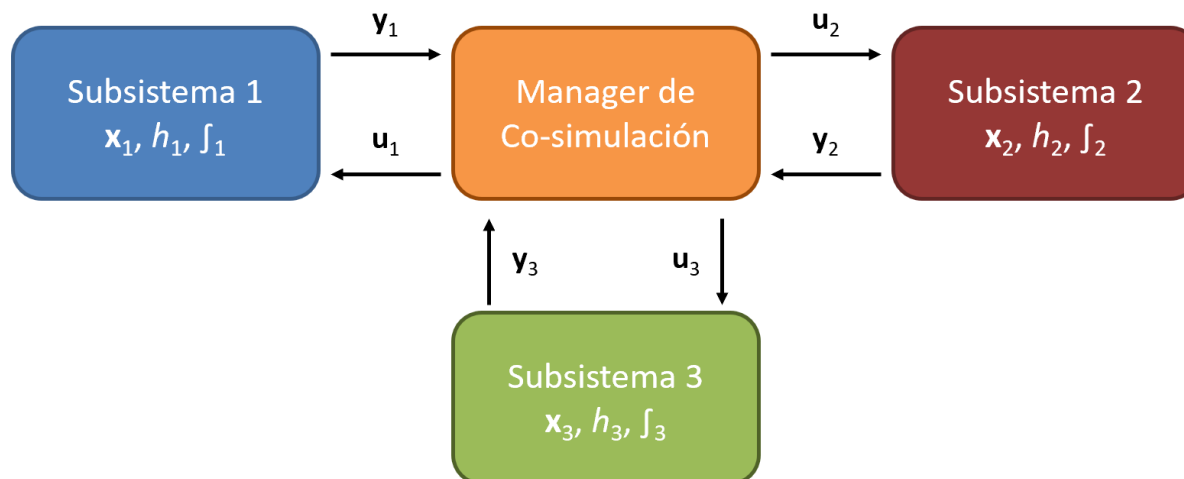
- **Mecánica**
- **Electrónica**
- **Hidráulica**
- ...

Introducción

■ Solución monolítica



■ Co-simulación



- ❖ **Co-simulación frente a la simulación monolítica**
 - **Ventajas:**
 - ✓ **Define** cada subsistema **por separado**
 - ✓ Permite **paralelizar cálculos**
 - ✓ **Distintas opciones** de acoplamiento para los componentes del sistema
 - **Desventajas:**
 - X La **precisión** de la solución puede **empeorar**
 - X La **integración** numérica puede **inestabilizarse**
 - X **Distintas opciones** de acoplamiento para los componentes del sistema

- ❖ **La co-simulación es útil cuando...**
 - ... se deben **acoplar herramientas de simulación** que proceden de **distintos fabricantes**.
 - ... obtener una **formulación monolítica** es **demasiado complejo**.
 - ... es necesario **distribuir la carga de trabajo computacional** entre varias unidades de procesamiento (paralelización).
 - ... las **componentes dinámicas de alta frecuencia** son relevantes.
 - ... existen **componentes físicos** en el entorno de simulación.

Introducción

❖ Campo de aplicación

- Industrial
- Salud
- Videojuegos
- ...



❖ Objetivos

- Seleccionar **ejemplos representativos** que puedan proporcionar información relevante sobre el comportamiento de las técnicas de co-simulación cuando se aplican al estudio de sistemas mecánicos.
- Implementar un **código de simulación genérico** para ejecutar la simulación numérica de los ejemplos seleccionados usando técnicas de acoplamiento de solvers.
- Comparar los **resultados obtenidos** con la experiencia previa investigadora reportada en la literatura.
- Extraer, si es posible, **conclusiones generales** sobre el efecto de variar la configuración de co-simulación en la precisión y estabilidad de los resultados obtenidos.

❖ Métodos y técnicas de co-simulación iterativa

- La **integración** para cada paso de tiempo se repite **más de una vez**
- ✓ En la mayoría de los casos **se logra una solución estable**
- X Son **difíciles de aplicar** en simulaciones en **tiempo real** o **con componentes físicos**

❖ Métodos y técnicas de co-simulación no iterativa

- La **integración** para cada paso de tiempo **no se repite**
- X **Se deben elegir las técnicas adecuadas** para encontrar una solución precisa y estable
- ✓ Es **aplicable** a simulaciones en **tiempo real** o **con componentes físicos**

Configuración de la Co-simulación

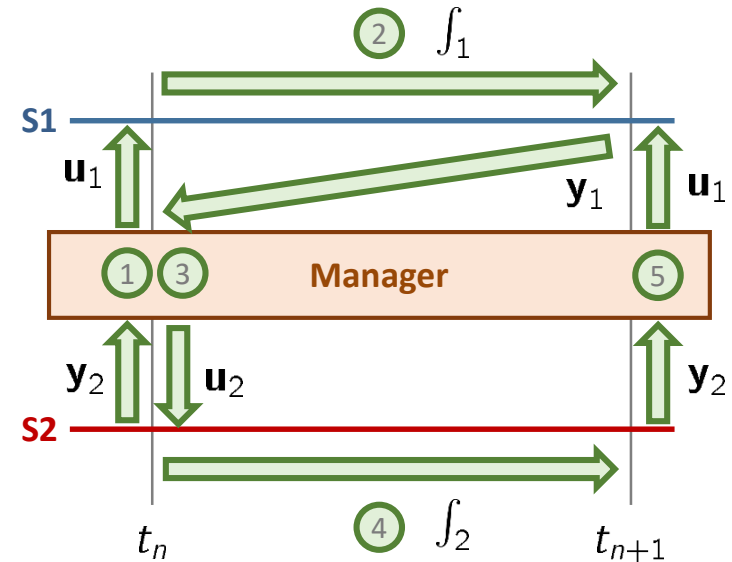
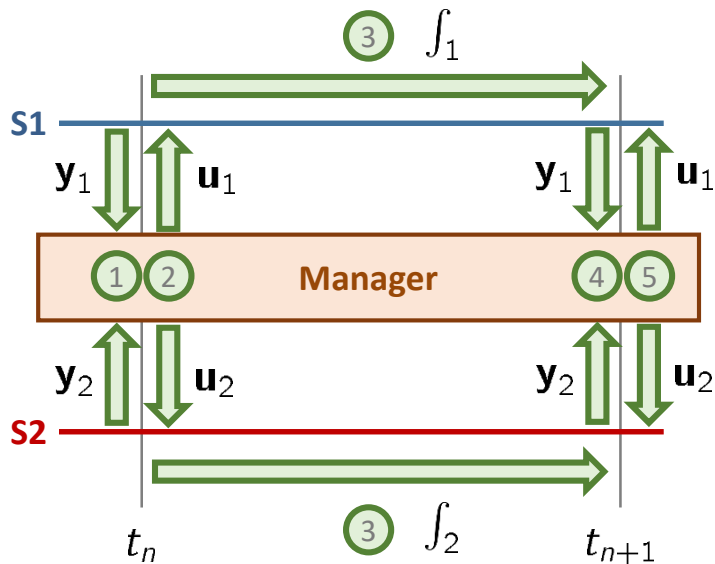
- ❖ Configuración de la co-simulación no iterativa
 - Existe un gran número de algoritmos de co-simulación no iterativa
 - La selección del algoritmo influye en la **precisión** y la **estabilidad**
 - Se ha estudiado el efecto de los siguientes factores:
 - Esquemas de co-simulación
 - Malla de intervalos de tiempo
 - Variables de acoplamiento
 - Método de extrapolación

Configuración de la Co-simulación

❖ Esquemas no iterativos de co-simulación

Esquema de co-simulación de Jacobi

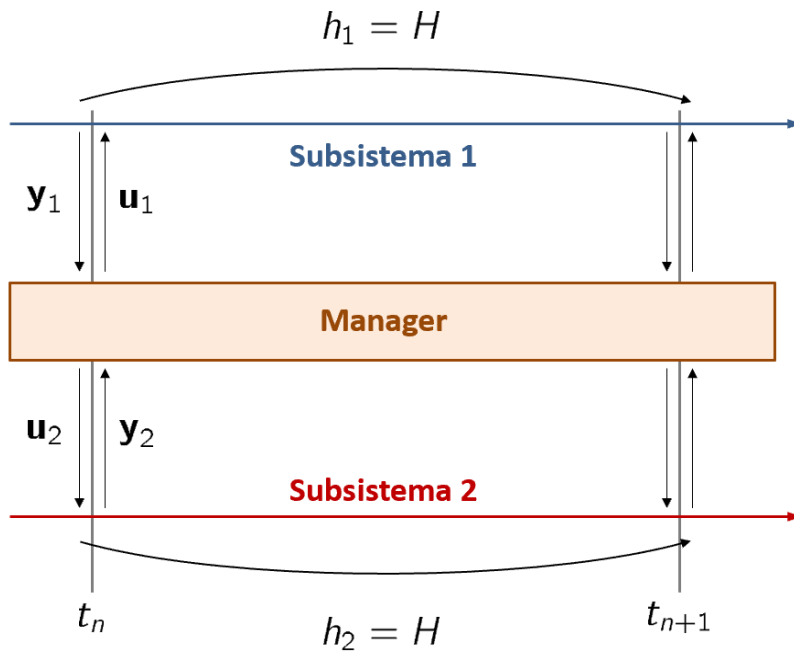
Esquema de co-simulación Gauss-Seidel



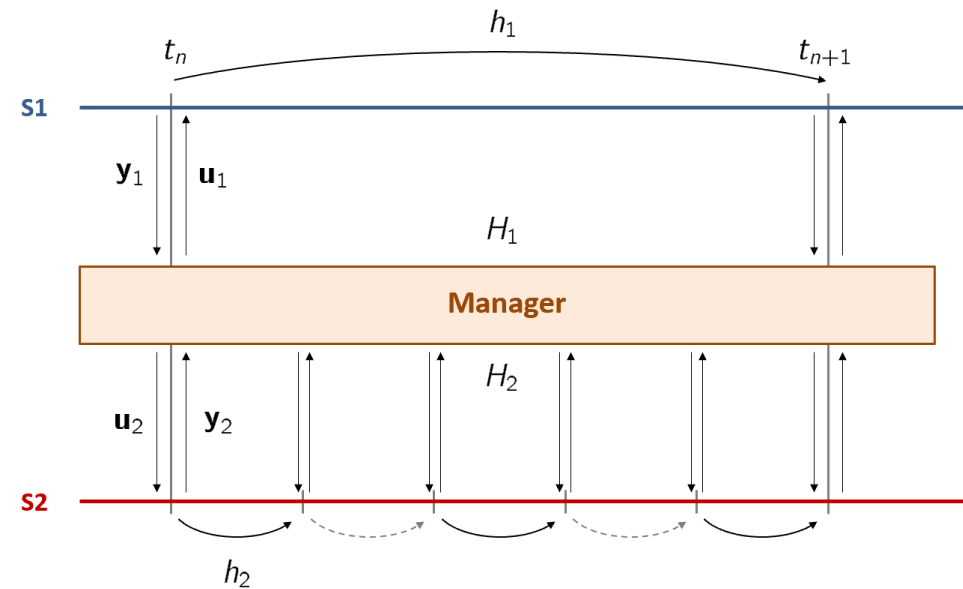
Configuración de la Co-simulación

❖ Malla de intervalos de tiempo

Co-simulación single-rate

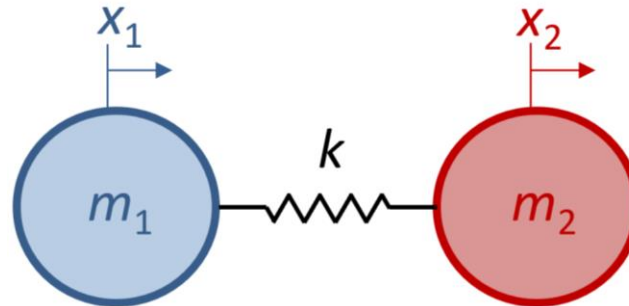


Co-simulación multi-rate

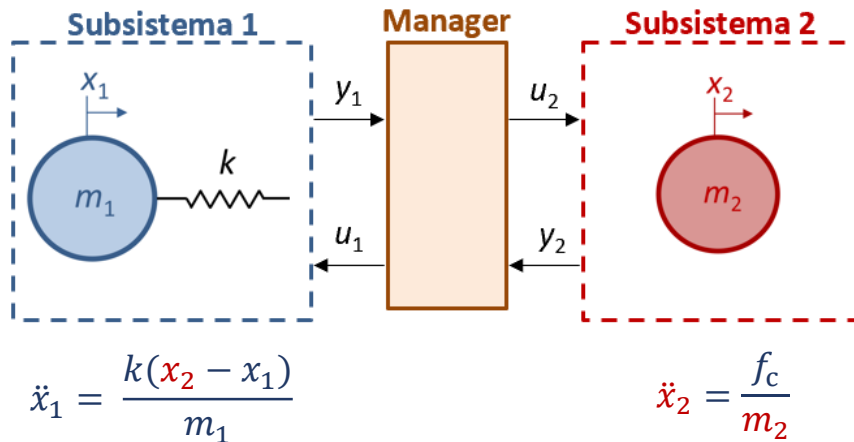


Configuración de la Co-simulación

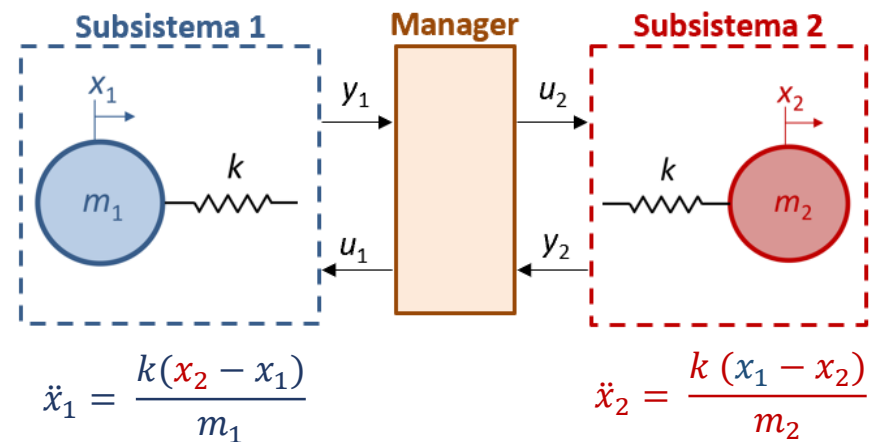
❖ Variables de acoplamiento



■ Fuerza-Desplazamiento



■ Desplazamiento-Desplazamiento



Configuración de la Co-simulación

❖ Variables de acoplamiento

Ecuación diferencial del subsistema \longrightarrow Ecuación de espacio de estados

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}$$

$\dot{\mathbf{z}}$: derivada del estado

\mathbf{y} : output

\mathbf{z} : estado

\mathbf{u} : input

\mathbf{D} : matriz de transmisión directa

■ Fuerza-Desplazamiento

$$\begin{array}{c} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \\ f_c \end{array} = \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 0 \\ -k/m_1 & 0 & k/m_1 \\ \hline k & 0 & -k \end{array} \right] \begin{array}{c} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \end{array}$$

$$\mathbf{D} \neq \mathbf{0}$$

■ Desplazamiento-Desplazamiento

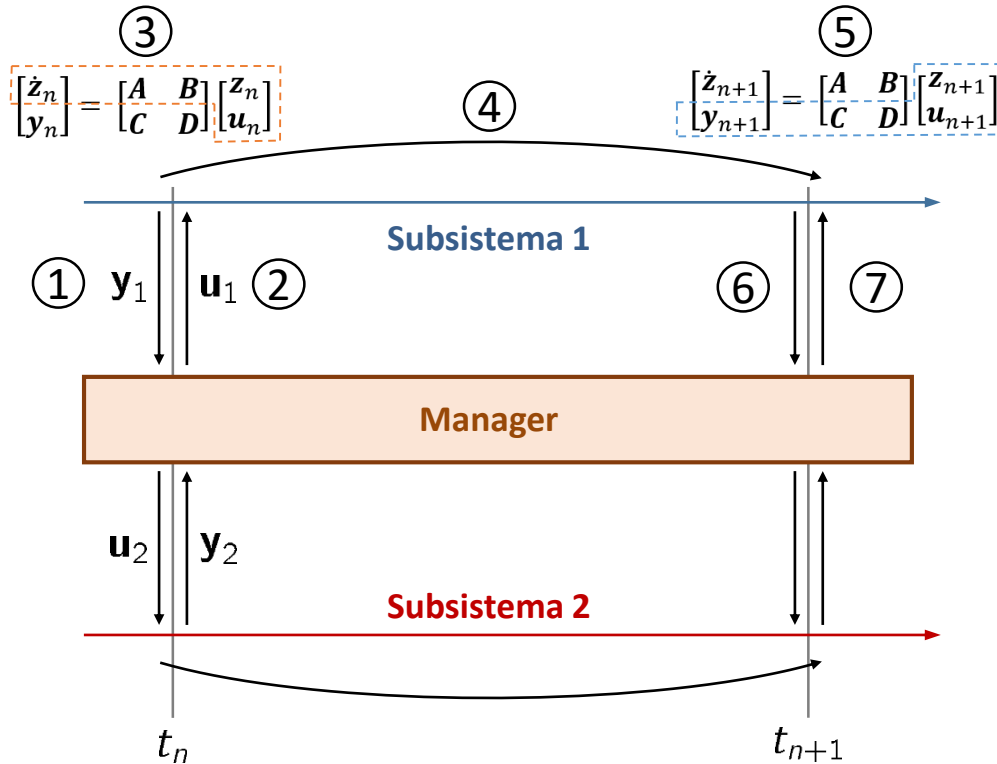
$$\begin{array}{c} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \\ x_1 \end{array} = \left[\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 0 \\ -k/m_1 & 0 & k/m_1 \\ \hline 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \begin{array}{c} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \end{array}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{0}$$

Configuración de la Co-simulación

❖ Variables de acoplamiento

Ejemplo: single-rate Jacobi



$$\dot{z}_n = A z_n + B u_n$$

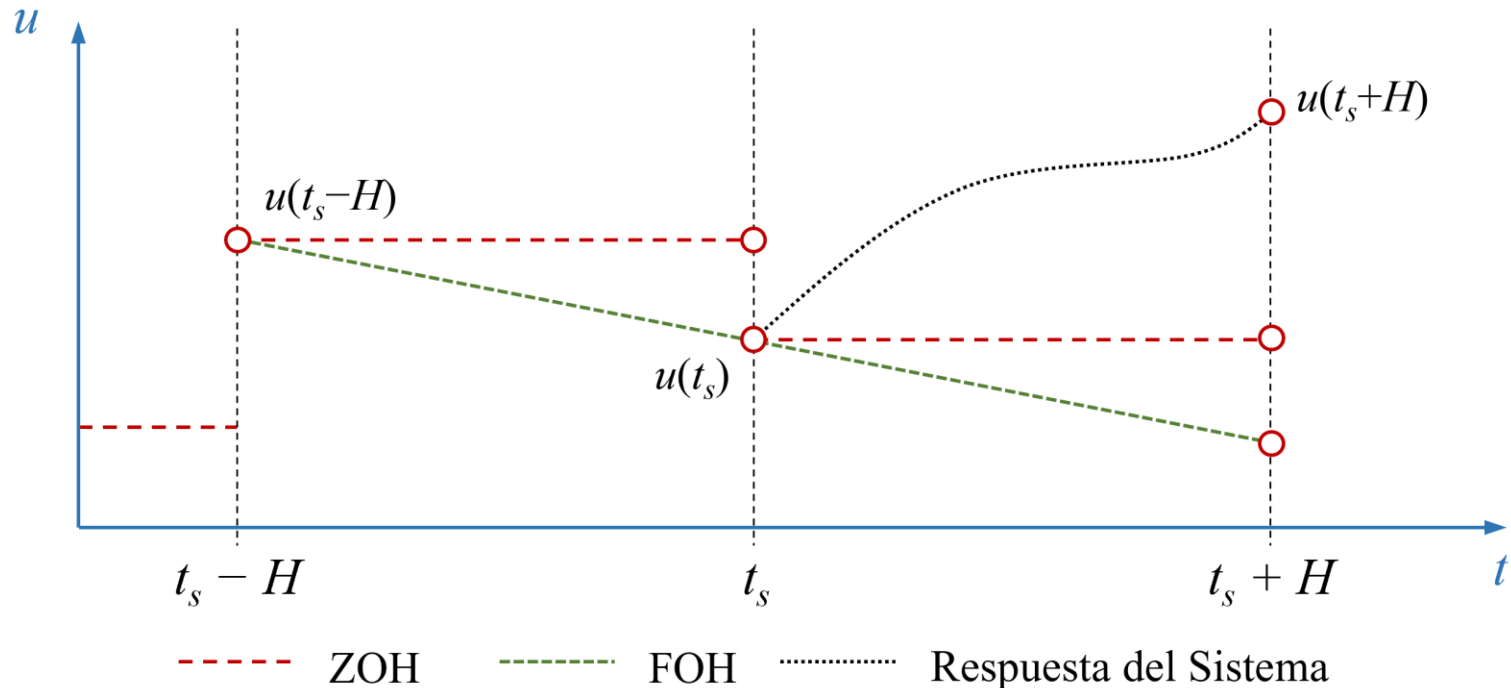
$$y_{n+1} = C z_{n+1} + D u_{n+1}$$

¿Si $D = 0$?

¿Si $D \neq 0$?

Configuración de Co-simulación

❖ Extrapolación o interpolación



■ En ZOH:

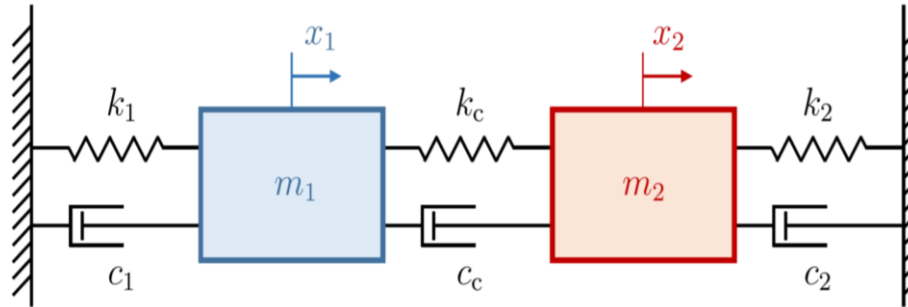
$$\mathbf{u}(t_s) = \mathbf{u}(t_s - H)$$

■ En FOH:

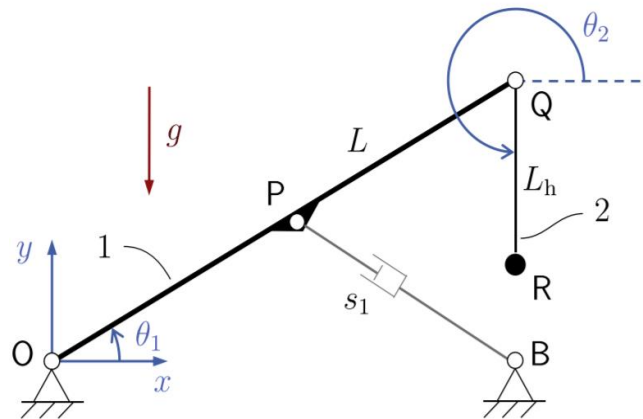
$$\mathbf{u}(t_s) = \mathbf{u}(t_s - H) + (\mathbf{u}(t_s - H) - \mathbf{u}(t_s - 2H))$$

Sistemas estudiados

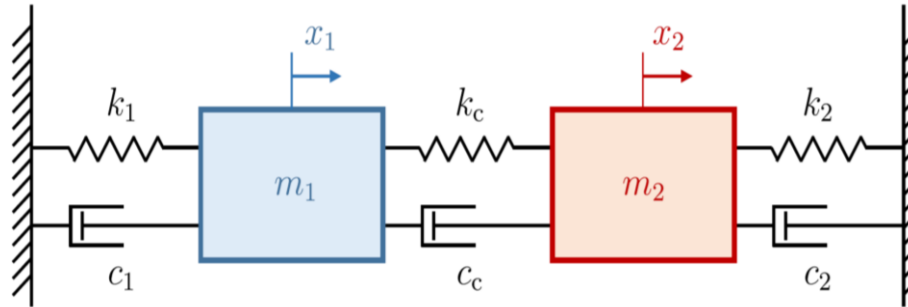
❖ Oscilador lineal de dos grados de libertad (OLDGL)



❖ Grúa hidráulica



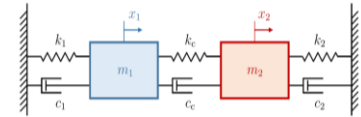
❖ Oscilador lineal de dos grados de libertad (OLDGL)



- Simulación:
 - 10 segundos
 - Condiciones iniciales: posición de equilibrio, $v_1 = 100$ m/s, $v_2 = -100$ m/s
 - $c_c = c_1 = c_2 = 0$
- Referencia: Solución analítica
- Indicador de precisión: Energía mecánica (sistema no amortiguado)

Resultados: OLDGL

❖ Esquema single-rate, $H = h_1 = h_2 = 1$ ms:



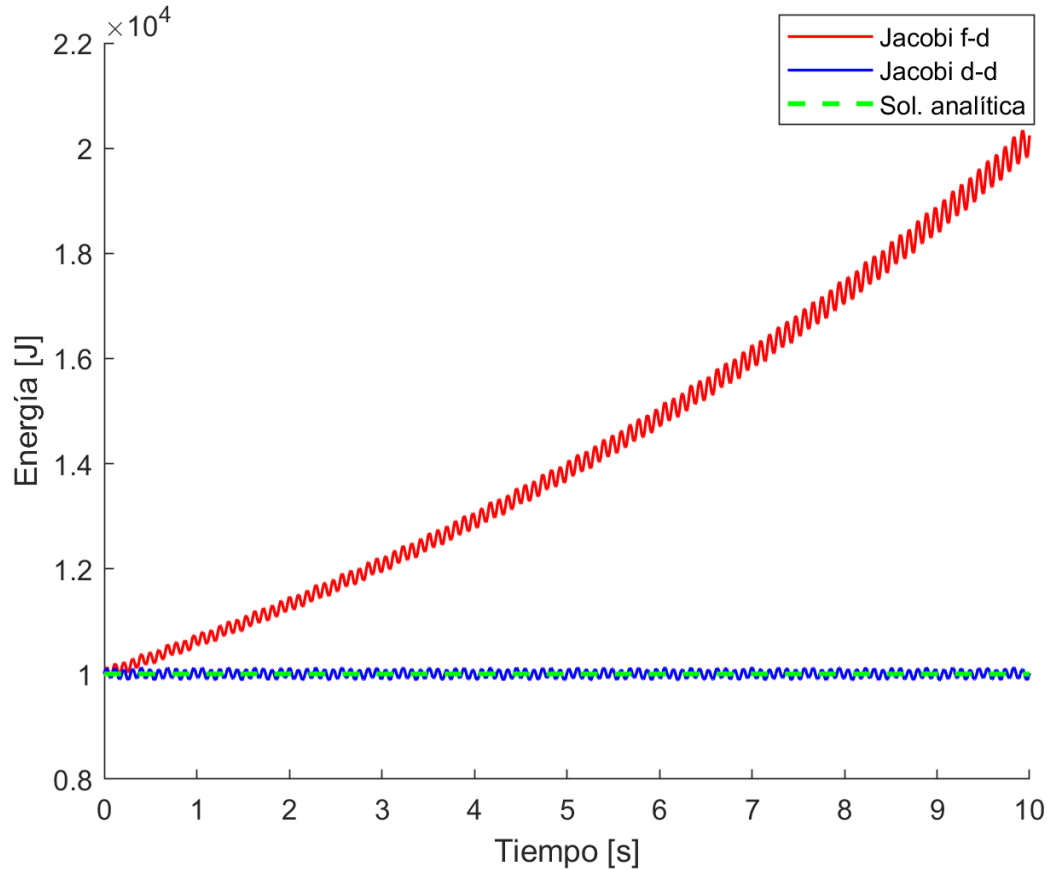
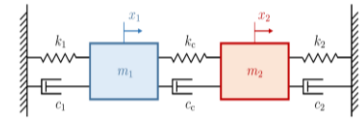
Esquema	Variables	Evalúa primero	Extrapolación SS ₁	Extrapolación SS ₂
Jacobi	f-d		ZOH	ZOH
Jacobi	d-d		ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	SS ₁	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	SS ₂	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	d-d	SS ₁	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	d-d	SS ₂	ZOH	ZOH

❖ Esquema multi-rate, $H = h_1 = 1$ ms, $h_2 = 0.1$ ms:

Esquema	Variables	Evalúa primero	Extrapolación SS ₁	Extrapolación SS ₂
Jacobi	f-d		ZOH	ZOH
Jacobi	f-d		ZOH	FOH u ₂
Jacobi	f-d		FOH y ₁	ZOH
Jacobi	f-d		FOH y ₁	FOH u ₂
Jacobi	d-d		ZOH	FOH u ₂
Gauss-Seidel	f-d	SS ₁	ZOH	FOH u ₂
Gauss-Seidel	f-d	SS ₂	ZOH	FOH u ₂
Gauss-Seidel	d-d	SS ₁	ZOH	FOH u ₂
Gauss-Seidel	d-d	SS ₂	ZOH	FOH u ₂

Resultados: OLDGL

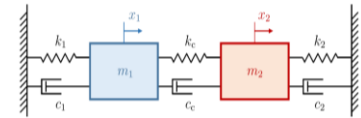
- Comparativa en single-rate para distintos acoplamientos



$$H = h_1 = h_2 = 1 \text{ ms}$$

Resultados: OLDGL

- Comparativa del esquema Gauss-Seidel con acoplamiento f-d y el SS_1 evaluado primero.



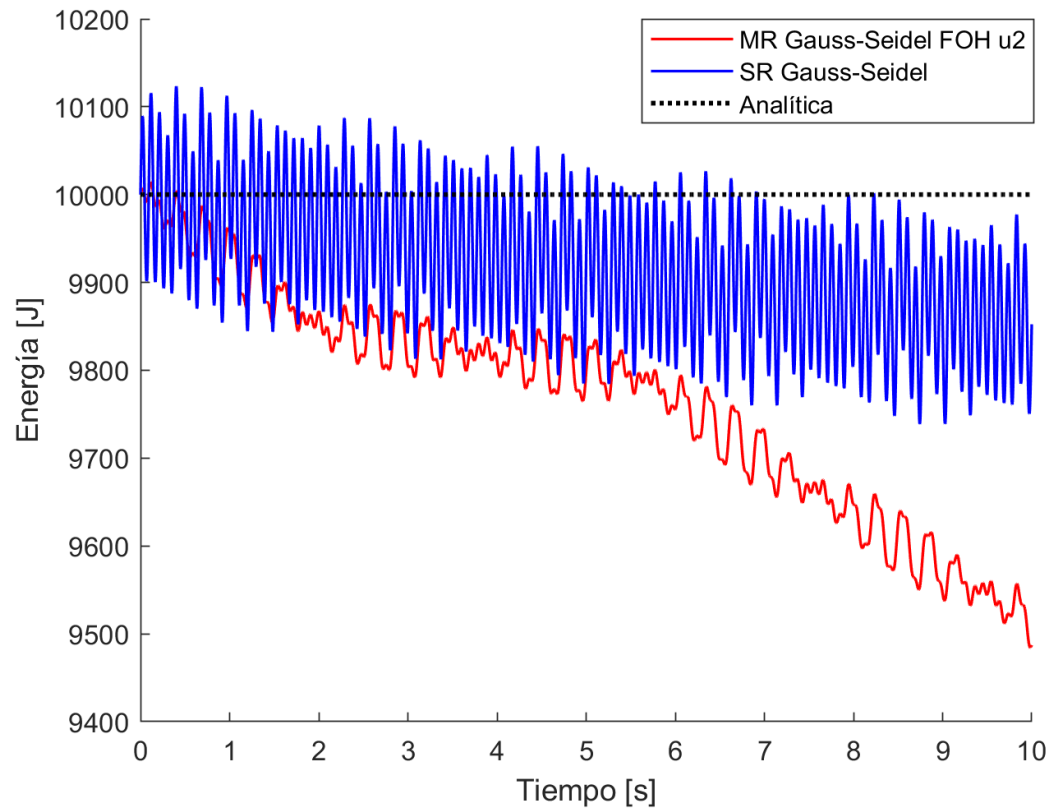
Multi-rate:

$H = h_1 = 1 \text{ ms}$

$h_2 = 0.1 \text{ ms}$

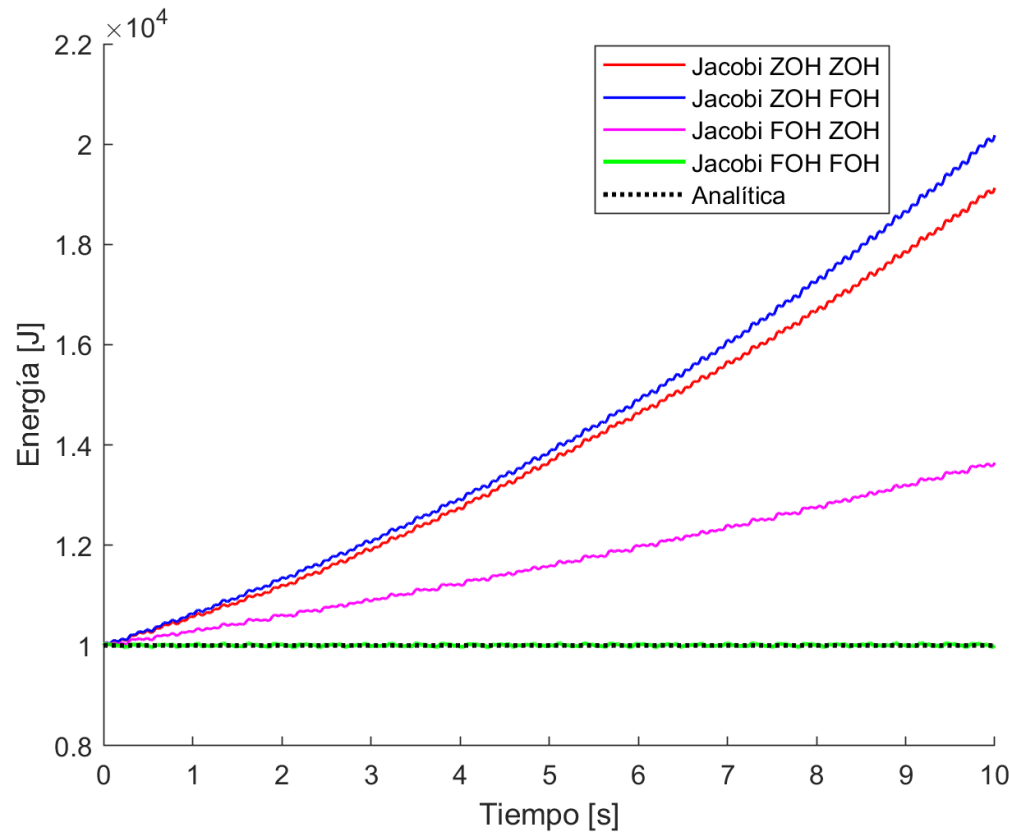
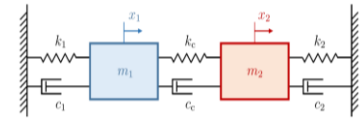
Single-rate:

$H = h_1 = h_2 = 1 \text{ ms}$



Resultados: OLGDL

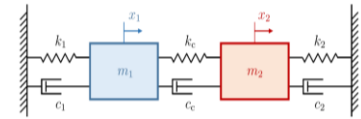
- Comparativa entre distintas extrapolaciones para un esquema Jacobi con acoplamiento f-d



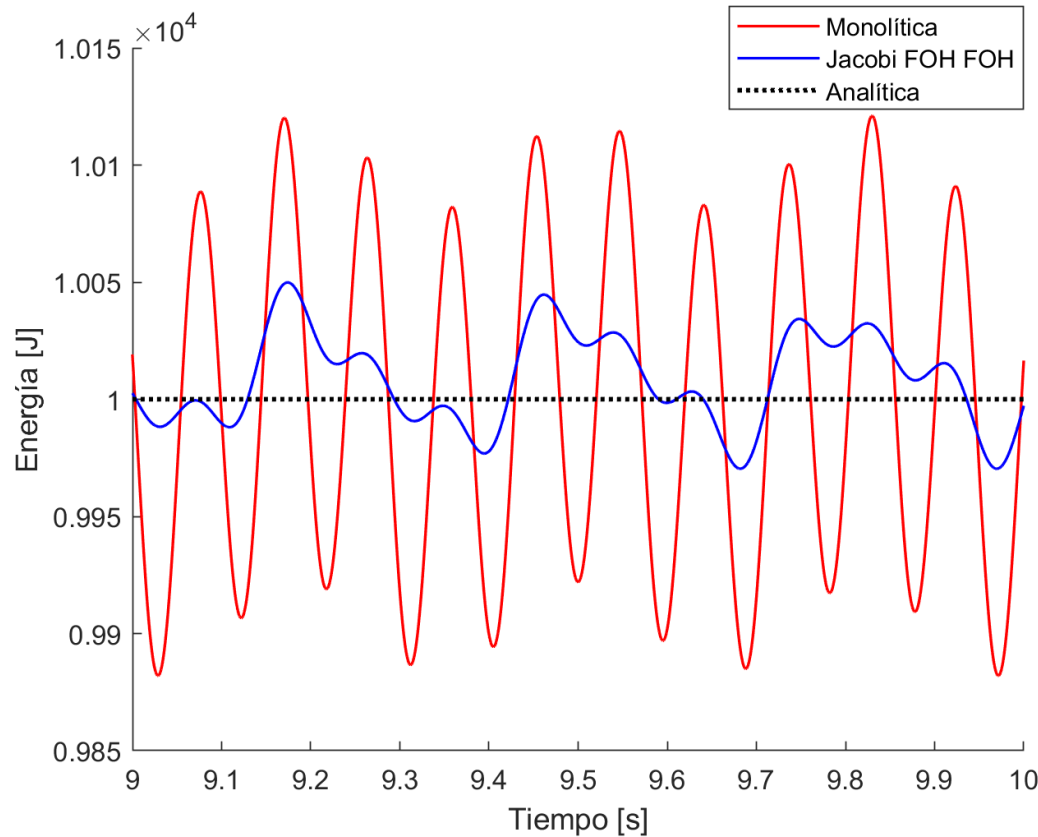
Multi-rate:
 $H = h_1 = 1$ ms
 $h_2 = 0.1$ ms

❖ Esquema Jacobi con acoplamiento f-d

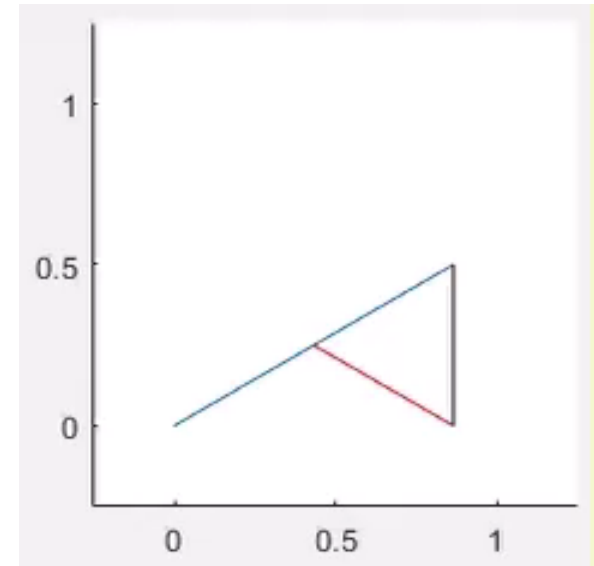
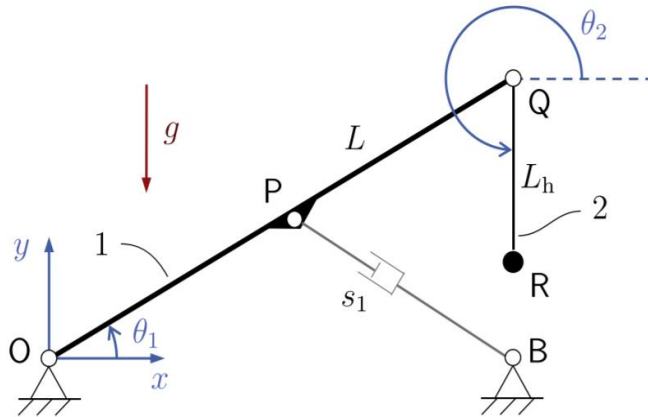
Extrapolación interna FOH para u_1 y extrapolación externa FOH para u_2



Multi-rate:
 $H = h_1 = 1 \text{ ms}$
 $h_2 = 0.1 \text{ ms}$



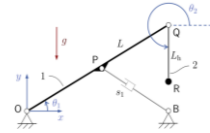
❖ Grúa hidráulica



- Tiempo de simulación: 10 segundos
- Referencia:
 - Sistema no conservativo: la energía mecánica varía
 - Solución de convergencia
- Indicador de precisión: Fuerza y posición del actuador hidráulico

Resultados: Grúa hidráulica

❖ Esquema single-rate, $H = 0.2$ ms:



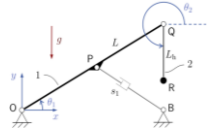
Esquema	Variables	Evalúa primero	Extrapolación Mec	Extrapolación Hid
Jacobi	f-d		ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	Mecánico	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	Hidráulico	ZOH	ZOH
Jacobi	p-d		ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	p-d	Mecánico	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	p-d	Hidráulico	ZOH	ZOH

❖ Esquema multi-rate, $H = h_1 = 4$ ms, $h_2 = 0.2$ ms:

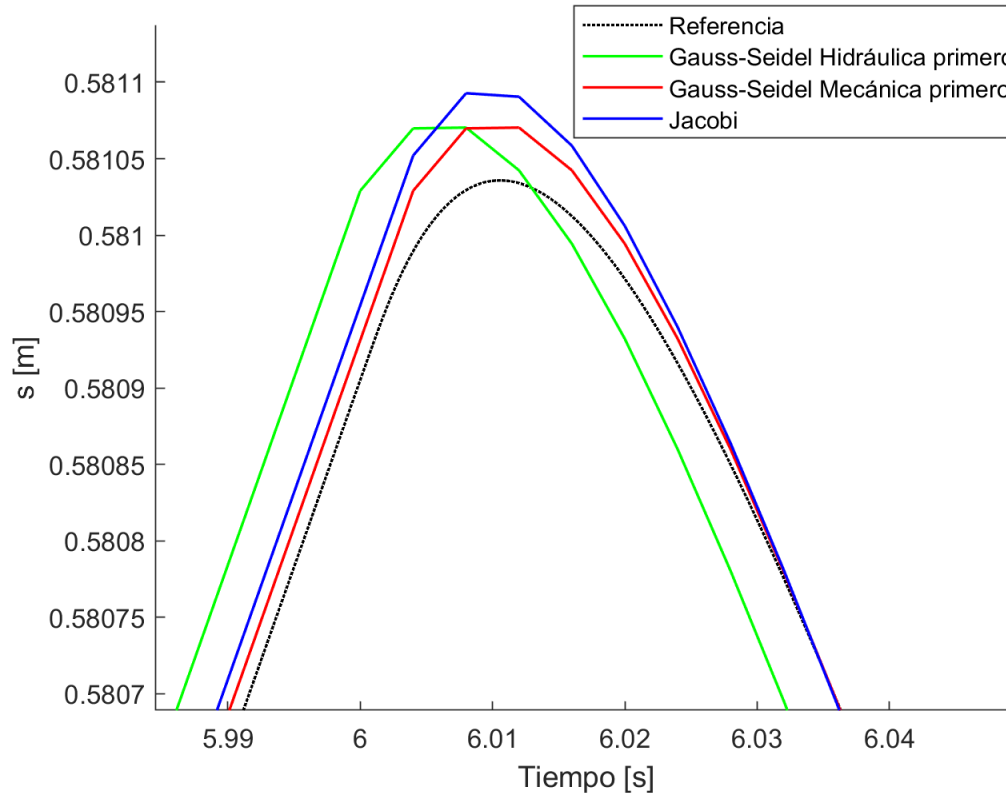
Esquema	Variables	Evalúa primero	Extrapolación Mec	Extrapolación Hid
Jacobi	f-d		ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	Mecánico	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	f-d	Hidráulico	ZOH	ZOH
Jacobi	f-d		ZOH	FOH
Gauss-Seidel	f-d	Mecánico	ZOH	FOH
Gauss-Seidel	f-d	Hidráulico	ZOH	FOH
Jacobi	p-d		ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	p-d	Mecánico	ZOH	ZOH
Gauss-Seidel	p-d	Hidráulico	ZOH	ZOH
Jacobi	p-d		ZOH	FOH
Gauss-Seidel	p-d	Mecánico	ZOH	FOH
Gauss-Seidel	p-d	Hidráulico	ZOH	FOH

Resultados: Grúa hidráulica

- Comparativa de desfase (medido en posición del actuador hidráulico) entre distintos esquemas co-simulados en multi-rate, con un acoplamiento del tipo p-d.

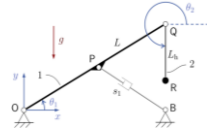


Multi-rate:
 $H = h_1 = 4 \text{ ms}$
 $h_2 = 0.2 \text{ ms}$

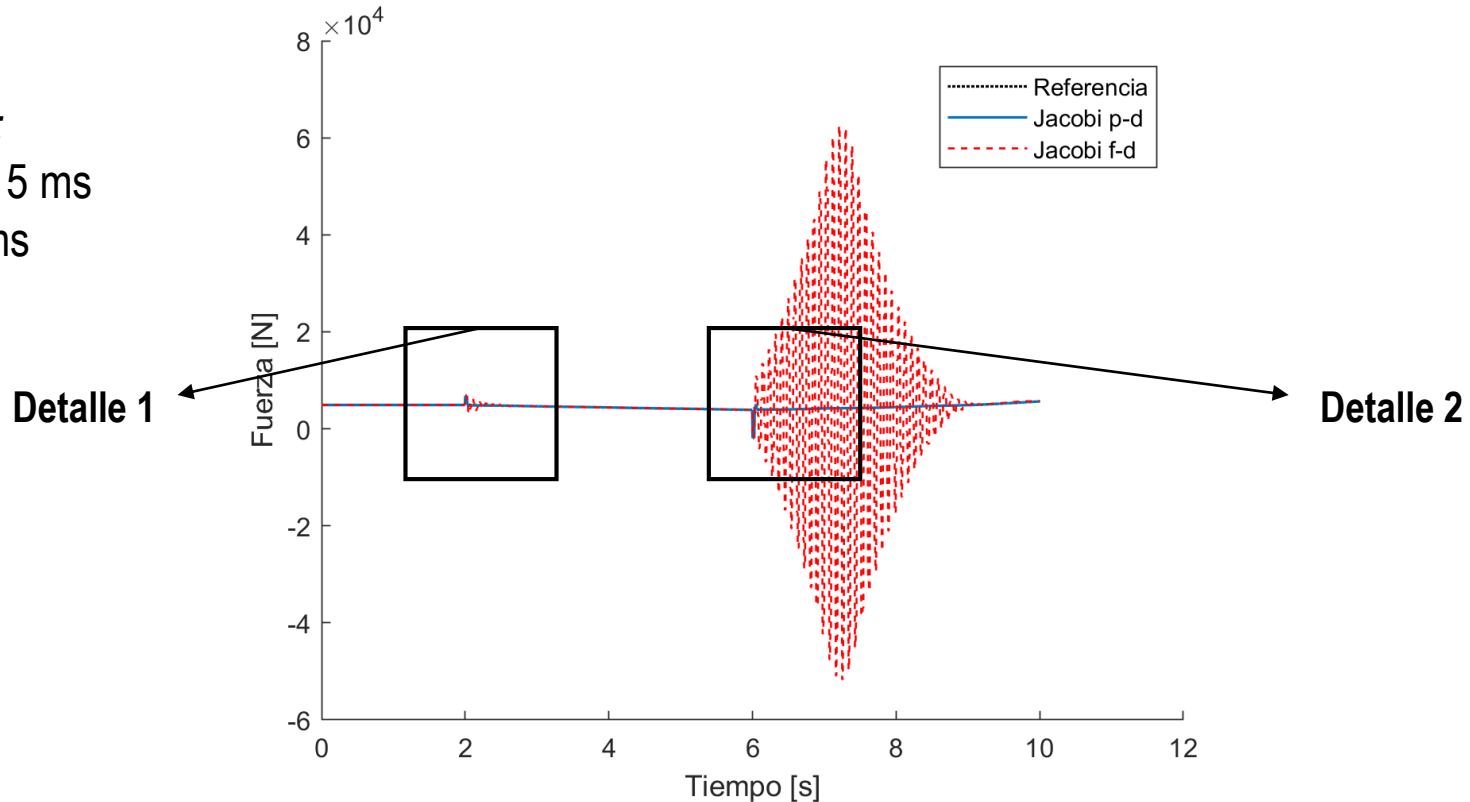


Resultados: Grúa hidráulica

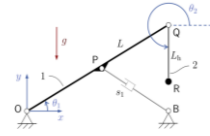
- Comparación en multi-rate de la fuerza que ejerce el actuador hidráulico entre esquemas f-d y p-d usando esquema Jacobi con extrapolación ZOH para ambos subsistemas, $H = 15$ ms.



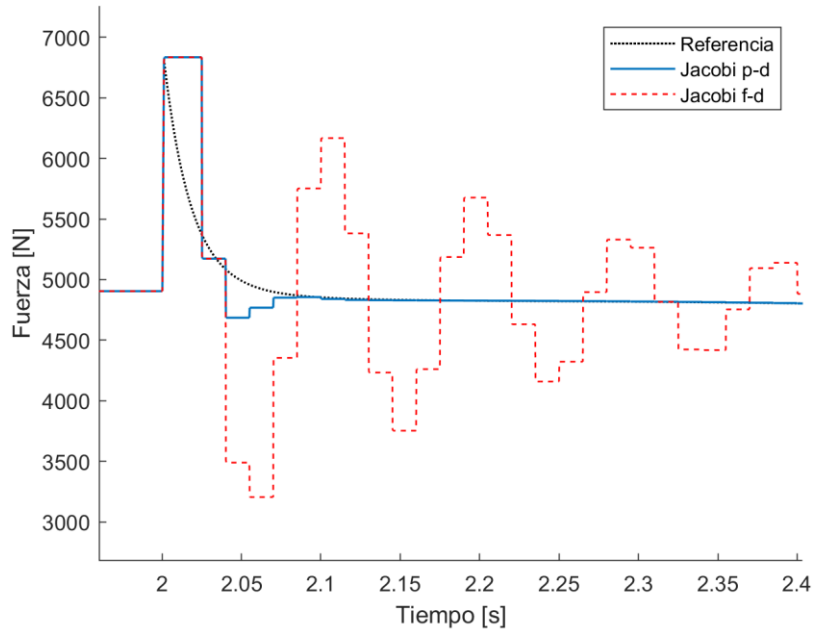
Multi-rate:
 $H = h_1 = 15$ ms
 $h_2 = 0.2$ ms



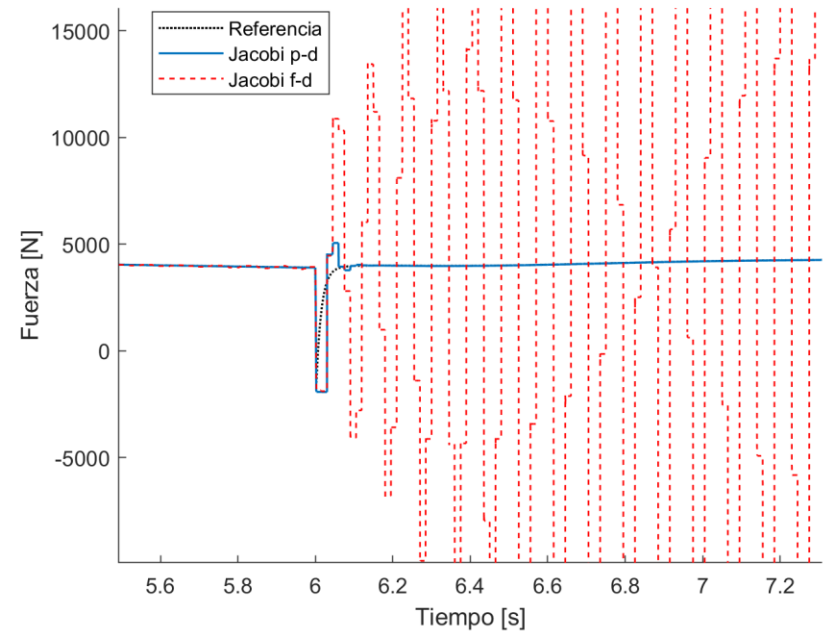
Resultados: Grúa hidráulica



Detalle 1

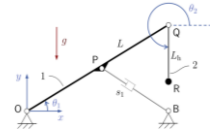


Detalle 2



Resultados: Grúa hidráulica

- ❖ Co-simulación multi-rate con esquema Jacobi acoplamiento p-d y extrapolación del tipo ZOH en ambos subsistemas.



Paso de comunicación H [ms]	Tiempo de cálculo [s]	Error en posición [mm]
0.2 (single-rate)	227.85	0 (referencia)
4	2.25	0.092
10	1.35	0.226
16	1.12	0.459

- ❖ Esquemas de co-simulación realizados con método multi-rate y acoplamiento p-d.

Paso de comunicación H [ms]	Esquema	Error de posición [mm]
4	Jacobi	0.092
	G-S Mec. Primero	0.065
	G-S Hid. Primero	0.219
10	Jacobi	0.226
	G-S Mec. Primero	0.168
	G-S Hid. Primero	0.467
16	Jacobi	0.459
	G-S Mec. Primero	0.367
	G-S Hid. Primero	0.715

Conclusiones

- Es beneficioso utilizar **acoplamientos** donde todos los subsistemas involucrados tienen una **matriz de transmisión directa D** igual a **0**.
- La **extrapolación introduce errores** en la respuesta que se obtiene de la co-simulación. **Sin embargo**, si se halla el tipo de extrapolación que se adapte al comportamiento dinámico del sistema, entonces **la extrapolación será una herramienta beneficiosa** en la co-simulación.
- En general, **el error** debido a la interfaz de co-simulación **aumenta si se incrementa el paso de tiempo de comunicación, H** . En entornos de co-simulación donde todos los subsistemas verifican que **$D = 0$** los procesos de integración son, por lo general, **más estables**, y puede incrementarse el paso de tiempo de comunicación H considerablemente sin comprometer en exceso la precisión de los resultados.
- Para la grúa hidráulica se obtuvo que es **más preciso y estable** al utilizar el esquema Gauss-Seidel evaluar primero el subsistema de respuesta dinámica lenta.

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CO-SIMULACIÓN PARA SISTEMAS CON COMPONENTES MECÁNICOS

Autor:

Christian Díaz Carro

Tutores:

Miguel Á. Naya Villaverde

Francisco J. González Varela

*Trabajo Final de Grado
Ferrol, España, Julio 2019*

