

Estudio de la transmisión de información entre entornos virtuales y componentes reales de un banco de ensayos ciber-físico

*Análisis de un banco del Laboratorio de ingeniería
mecánica (LIM)*

Óscar López Seijas

oscar.lopez.seijas@udc.es

Banco de ensayos ciber-físico

Definición y usos

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Definición
 - Plataforma experimental
 - Componentes virtuales y físicos
 - Somete a los componentes físicos a sus condiciones de trabajo en servicio
- Propósito
 - Ensayo de dispositivos sin la necesidad de disponer de un prototipo completo de la máquina final
- Componentes principales
 - DUT (*Device Under Test*)
 - Entorno virtual
 - Actuadores y sensores
 - Gestor de co-simulación

Banco para motores eléctricos

Introducción

Funcionamiento

Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico

Sensor de par

Factores identificados

Programación

Sincrono

Por eventos

Latencia

Desplazamiento-
desplazamiento

Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos

Selección de un intervalo

Comunicación

Par

Velocidad

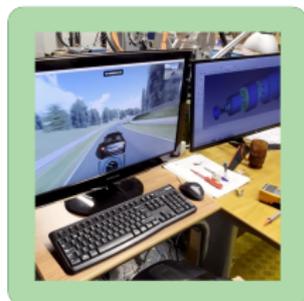
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel

Jacobi

Conclusiones



SOFTWARE DE SIMULACIÓN

SALIDAS



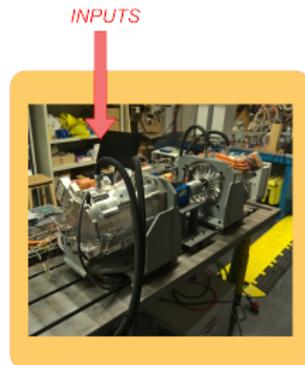
ENTRADAS



ENTRADAS



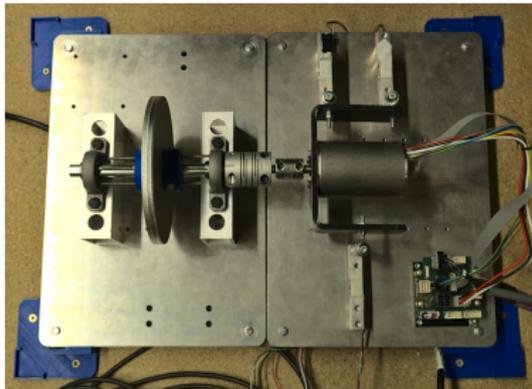
SALIDAS



HARDWARE DEL BANCO

Objetivos del proyecto

- ¿Qué perturba la precisión de un experimento?
 - Programación del manager
 - Intervalo de co-simulación
 - Problemas de comunicación
- ¿Esquemas de co-simulación posibles?
- ¿Acciones correctivas?
- Validar experimentalmente



Introducción

Funcionamiento

Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico

Sensor de par

Factores identificados

Programación

Sincrono

Por eventos

Latencia

Desplazamiento-desplazamiento

Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos

Selección de un intervalo

Comunicación

Par

Velocidad

Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel

Jacobi

Conclusiones

Variabilidad del sistema físico de referencia

Introducción

Funcionamiento

Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico

Sensor de par

Factores identificados

Programación

Síncrono

Por eventos

Latencia

Desplazamiento-desplazamiento

Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos

Selección de un intervalo

Comunicación

Par

Velocidad

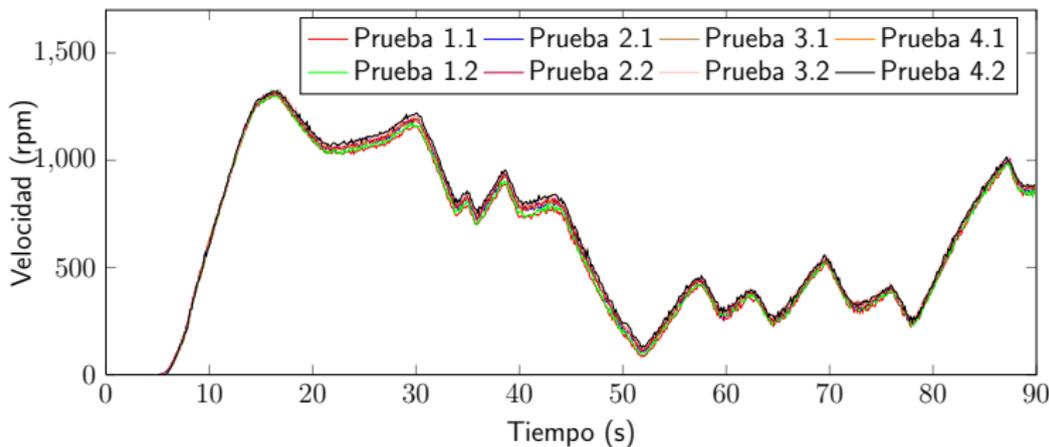
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel

Jacobi

Conclusiones



- Diferencias de hasta 100rpm
- Fuentes de incertidumbre: vibraciones, desalineaciones, agentes ambientales...

Variabilidad del sensor de par

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

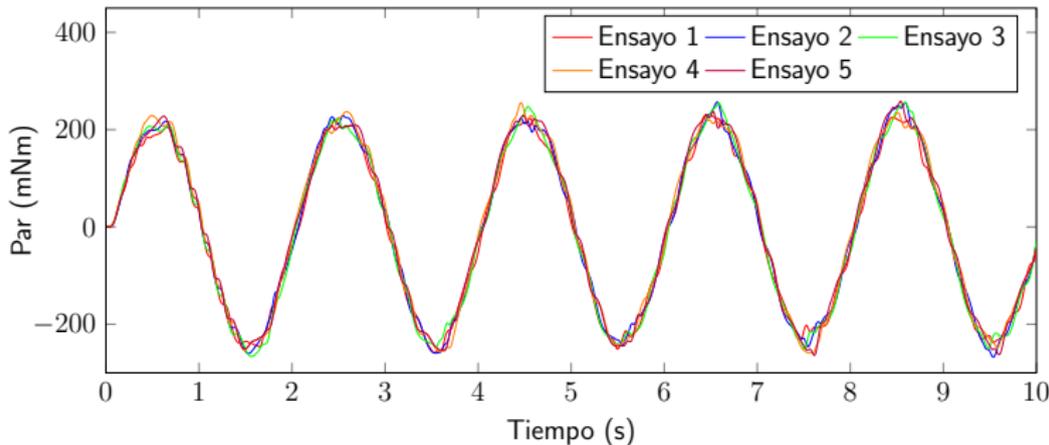
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Variabilidad evidente
- Se mantiene en torno al valor real

Variabilidad del sensor de par

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

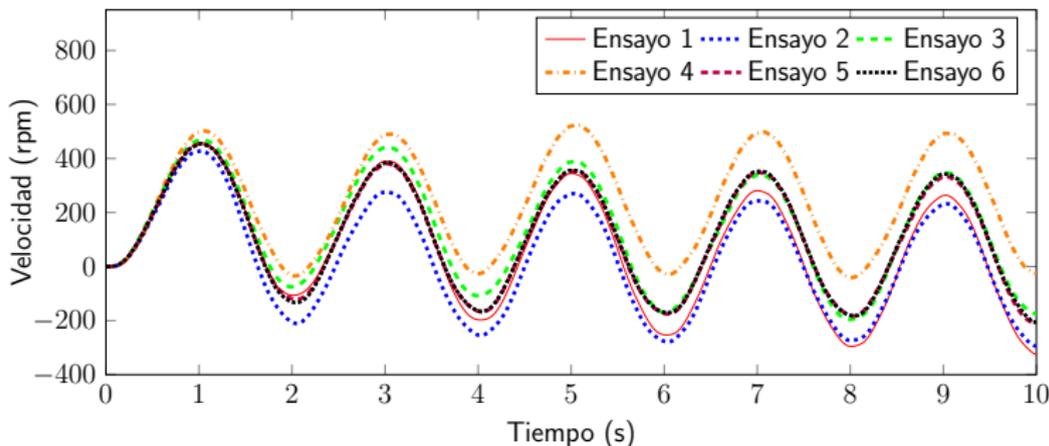
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Reproducibilidad escasa
- Impredecible

Arquitectura de la co-simulación

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo

Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Marca el modo de intercambiar información
- Depende de la forma en la que se programa el Manager
- Dos filosofías posibles:
 - Programación en base a eventos
 - Programación síncrona

Programación síncrona

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación

Síncrono

Por eventos

Latencia

Desplazamiento-
desplazamiento

Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos

Selección de un intervalo

Comunicación

Par

Velocidad

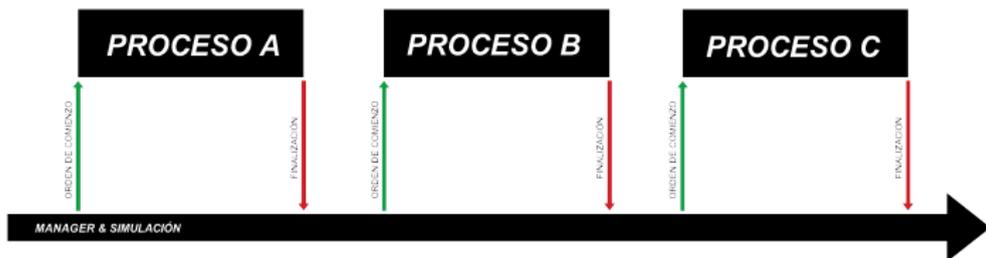
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel

Jacobi

Conclusiones



- Secuencia rígida
- No comienza un proceso sin que termine el anterior
- Predecible y estable

Programación en base a eventos

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

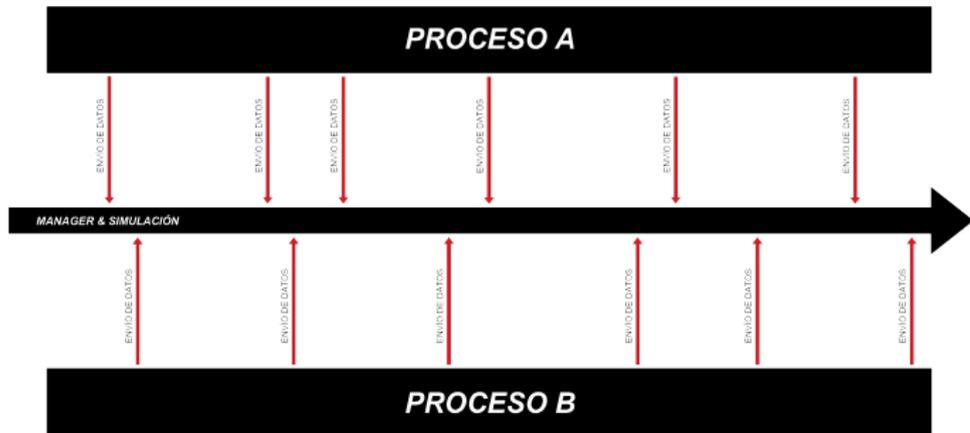
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-
desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Señales emitidas de forma automática
- La secuencia puede no ser rígida
- Conlleva incertidumbre

Influencia del intervalo de co-simulación

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos

Latencia

Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Marca el tiempo transcurrido entre puntos de comunicación
- Puede influir significativamente
- Depende de las operaciones realizadas
- Ejemplo de un oscilador armónico:
 - Caso desplazamiento-desplazamiento
 - Caso fuerza-desplazamiento

Caso 1: desplazamiento-desplazamiento

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Los subsistemas conocen toda la información del entorno
- Se intercambian posiciones y velocidades
- No presenta *direct-feedthrough*
- Ejercicio:
 - Oscilación libre sin amortiguamiento
 - Condiciones iniciales: las masas se aproximan a 5m/s
 - Dos frecuencias de comunicación, 100kHz y 5Hz

Diferencia en la energía

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

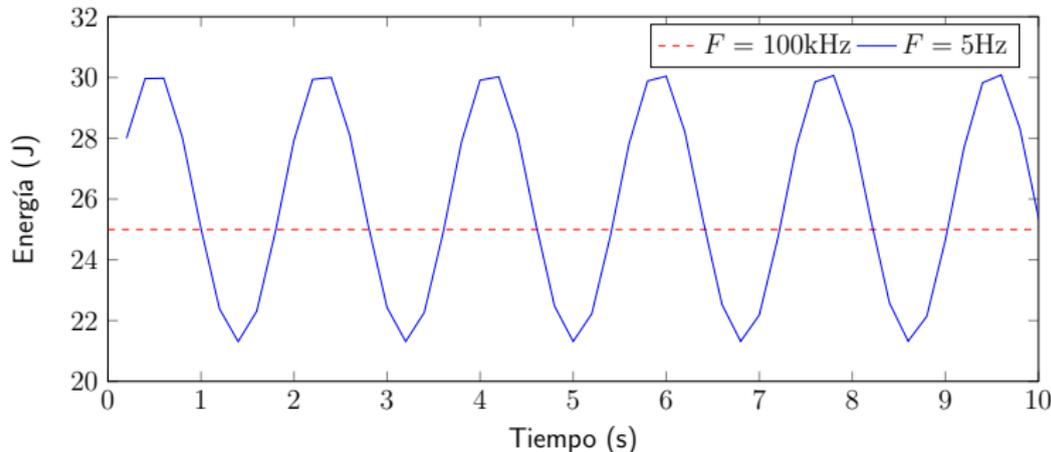
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Oscilaciones en la energía debidas al integrador
- En torno al valor esperado

Caso 2: fuerza-desplazamiento

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Sólo un subsistema conoce toda la información del entorno
- Se intercambian posiciones y velocidades de uno y la fuerza de acoplamiento entre ellos
- Sí presenta *direct-feedthrough*

$$F_c = (x_2 - x_1)k_2 - (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)c_2 \quad (1)$$

- Se repite el ejercicio anterior

Diferencia en la energía

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento

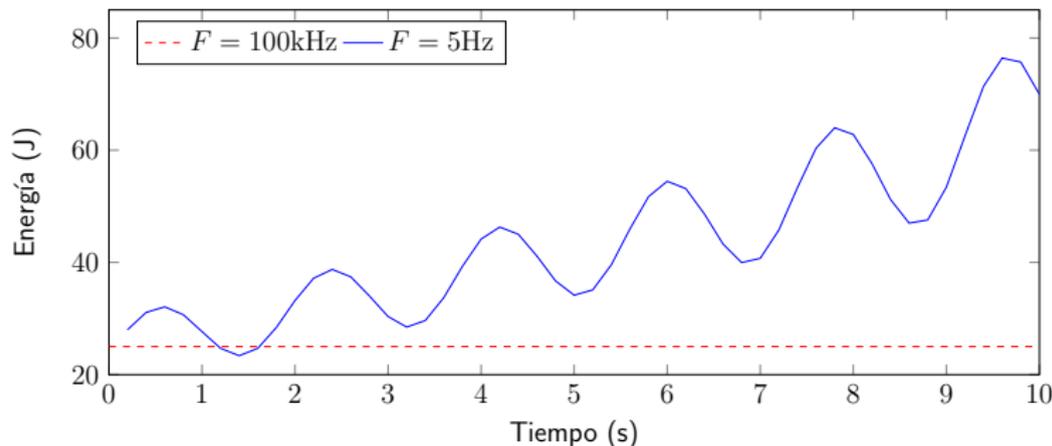
Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- La energía mecánica aumenta
- El comportamiento empeora

Diferencia en posición

Introducción

- Funcionamiento
- Objetivos

Variabilidad

- Ensayo mecánico
- Sensor de par

Factores identificados

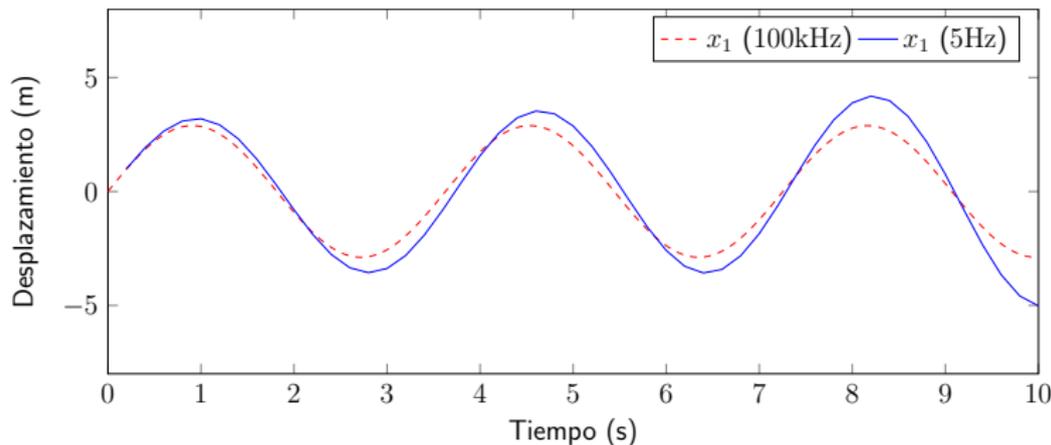
- Programación
- Síncrono
- Por eventos
- Latencia
- Desplazamiento-desplazamiento
- Fuerza-desplazamiento**
- Banco de ensayos
- Selección de un intervalo

- Comunicación
- Par
- Velocidad
- Corte global

Co-simulación

- Gauss-Seidel
- Jacobi

Conclusiones



■ Amplificación del movimiento

Intervalo de co-simulación en el banco de ensayos

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento

Banco de ensayos

Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Marcados por la comunicación entre subsistemas
- Mínimo considerado de 8ms. Instrucciones mínimas:
 - Dos escrituras, velocidad y par
 - Una lectura de par
- Estudio:
 - Input: orden de par sinusoidal de amplitud y frecuencia conocidas
 - Se varía la magnitud del intervalo de co-simulación
 - Se registra la velocidad del eje en la prueba

Evolución del ensayo en función del intervalo

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento

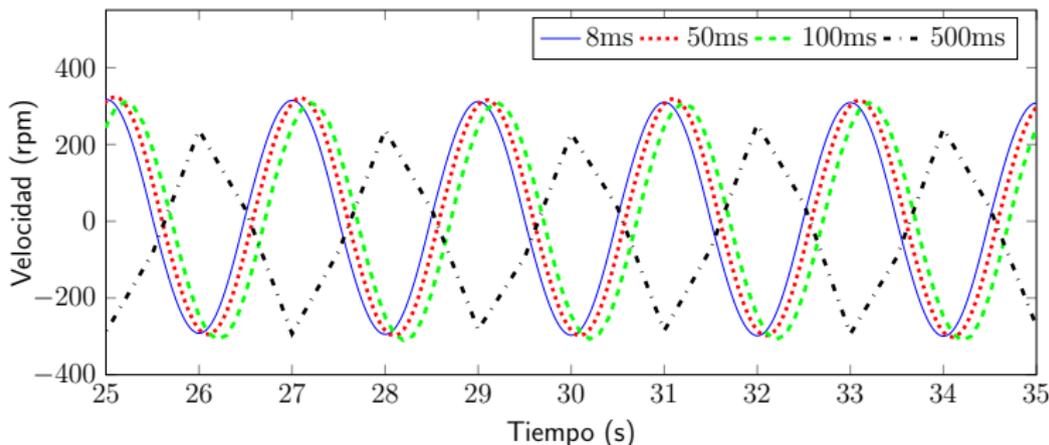
Banco de ensayos

Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Prueba con un input de amplitud 250mNm y frecuencia de 0.5Hz
- Diferentes magnitudes del intervalo de co-simulación

¿Cómo seleccionar un intervalo de co-simulación adecuado?

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo

Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Los ensayos empeoran gradualmente con la frecuencia
- Efectos mayores cuando la frecuencia de comunicación es inferior a diez veces la de la consigna
- Recomendación:

$$H < \frac{1}{10F} \quad (2)$$

- *F*: Frecuencia máxima de la consigna
- *H*: Intervalo de co-simulación

Problemas en la comunicación en el banco

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo

Comunicación

Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Pérdida de paquetes:
 - Ausencia de par
 - Ausencia de velocidad
 - Corte global de comunicación
- Retrasos temporales

Ausencia de par

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

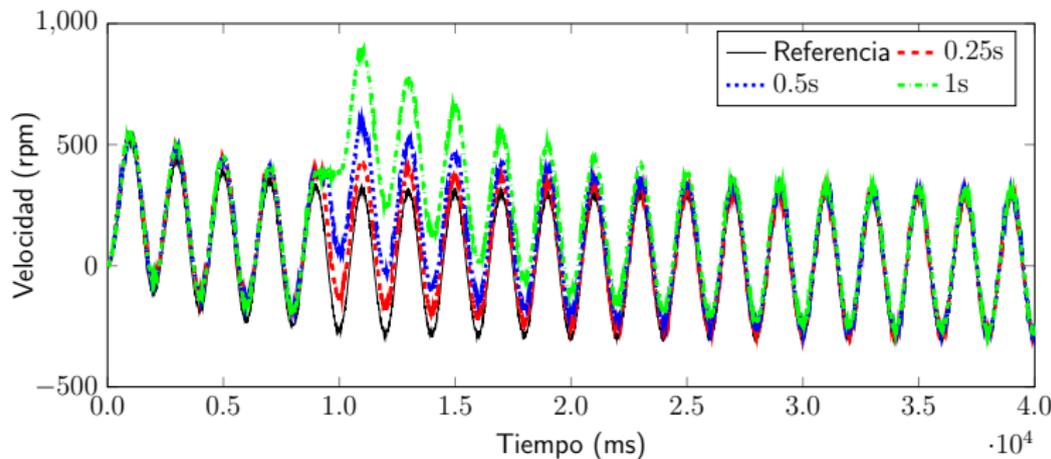
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Intervalo con aceleración constante
- Desviación dependiente del instante en que ocurre
- Diferentes magnitudes del corte: 0.25, 0.5 y 1 s

Ausencia de velocidad

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

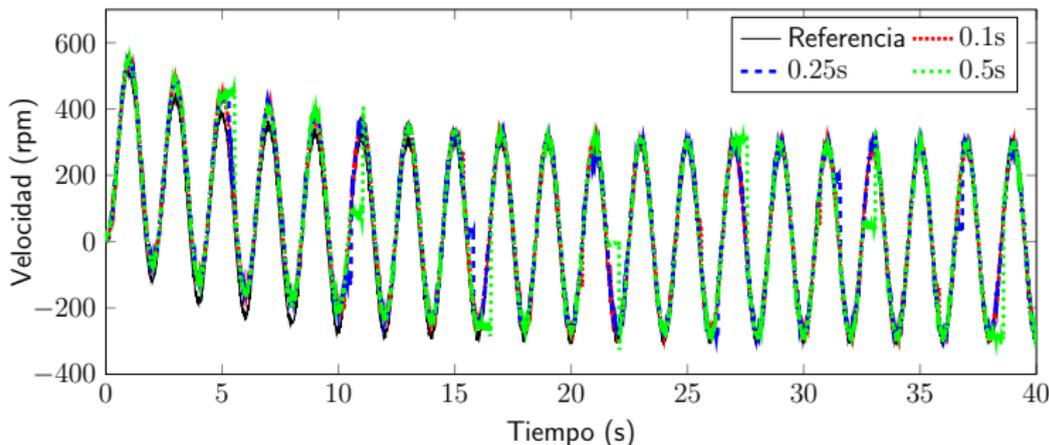
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Se interrumpe la actualización de la velocidad
- Recuperación inmediata
- Diferentes magnitudes del corte: 0.1, 0.25 y 0.5 s

Pérdida de comunicación entre subsistemas

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

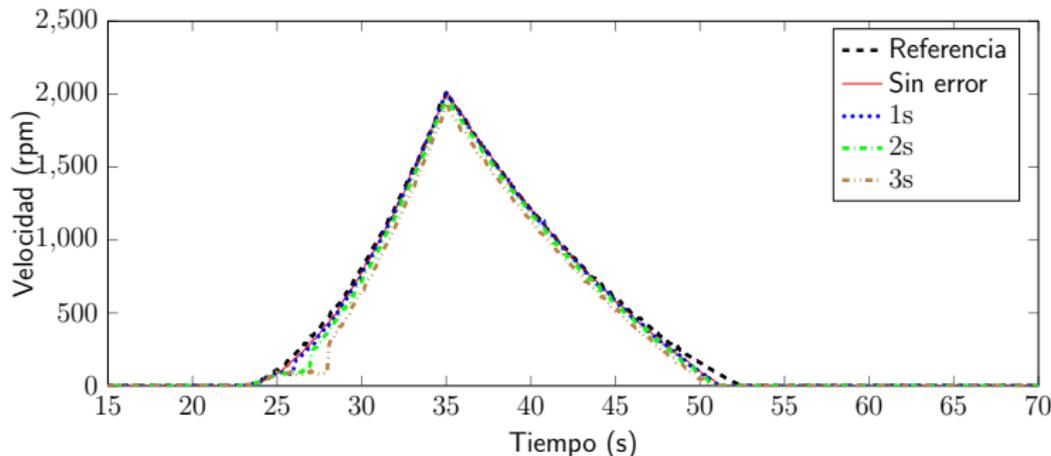
Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Efectos para consigna rampa:
 - Velocidad constante
 - Desviación por el problema de lectura de par
- Diferentes magnitudes del corte: 1,2 y 3 s

Pérdida de comunicación. Maniobra pregrabada

Introducción

- Funcionamiento
- Objetivos

Variabilidad

- Ensayo mecánico
- Sensor de par

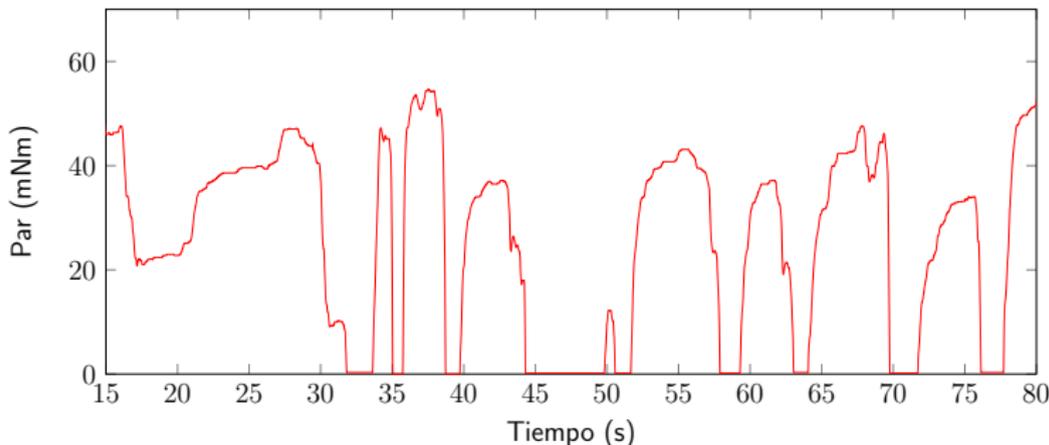
Factores identificados

- Programación
- Síncrono
- Por eventos
- Latencia
- Desplazamiento-desplazamiento
- Fuerza-desplazamiento
- Banco de ensayos
- Selección de un intervalo
- Comunicación
- Par
- Velocidad
- Corte global**

Co-simulación

- Gauss-Seidel
- Jacobi

Conclusiones



Pérdida de comunicación. Maniobra pregrabada

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

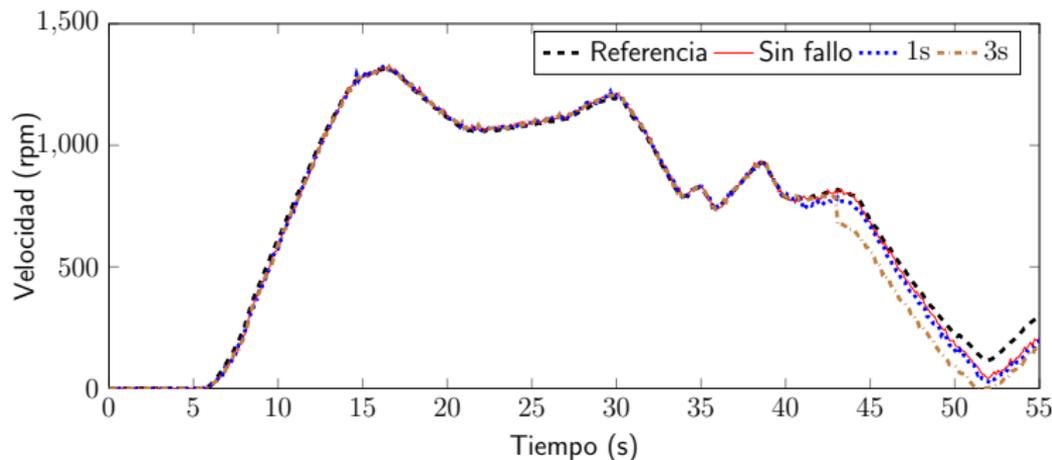
Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Los efectos se reproducen. De nuevo las curvas se aproximan al ejercicio sin fallos
- Diferentes intervalos de corte: 1 y 3 s

Esquema de co-simulación

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Determina la secuencia de ejecución del ensayo
- Depende de las características de los subsistemas
- Clasificación:
 - En función de los subsistemas:
 - Continuos
 - Discretos
 - Co-simulación híbrida
 - En función del orden de ejecución:
 - Jacobi
 - Gauss-Seidel

Esquema Gauss-Seidel

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

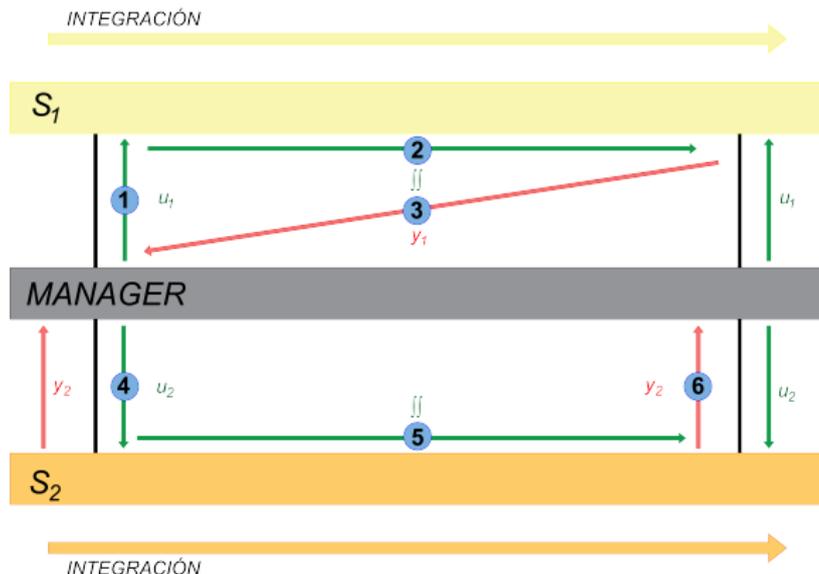
Factores identificados

Programación
Síncrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



Esquema Jacobi

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

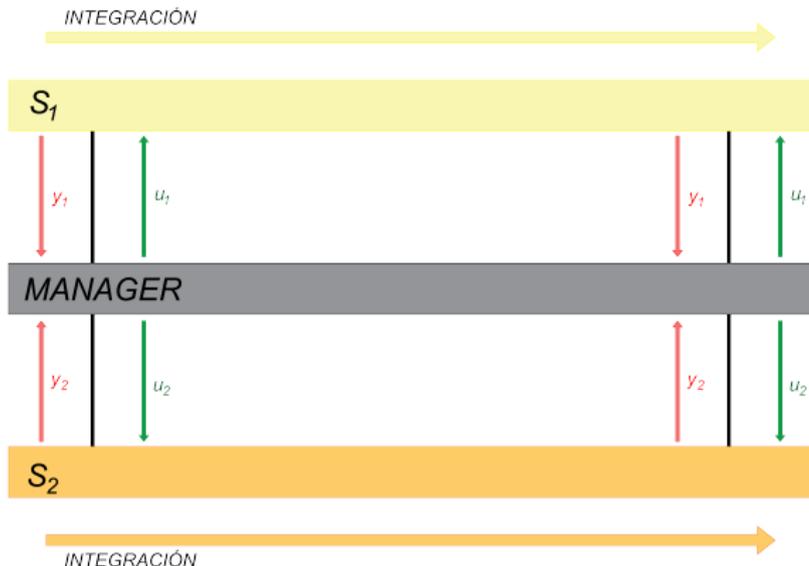
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



Opción A

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

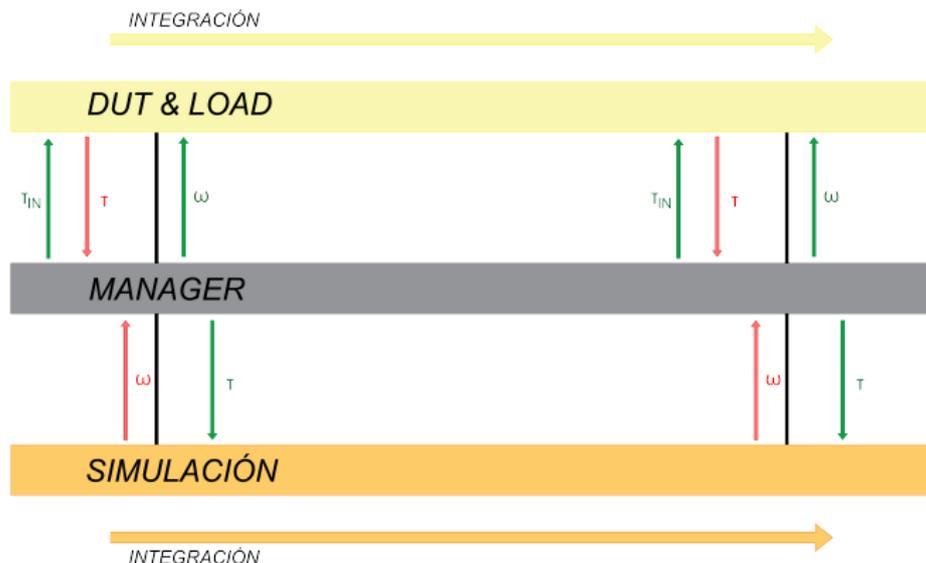
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



Opción B

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

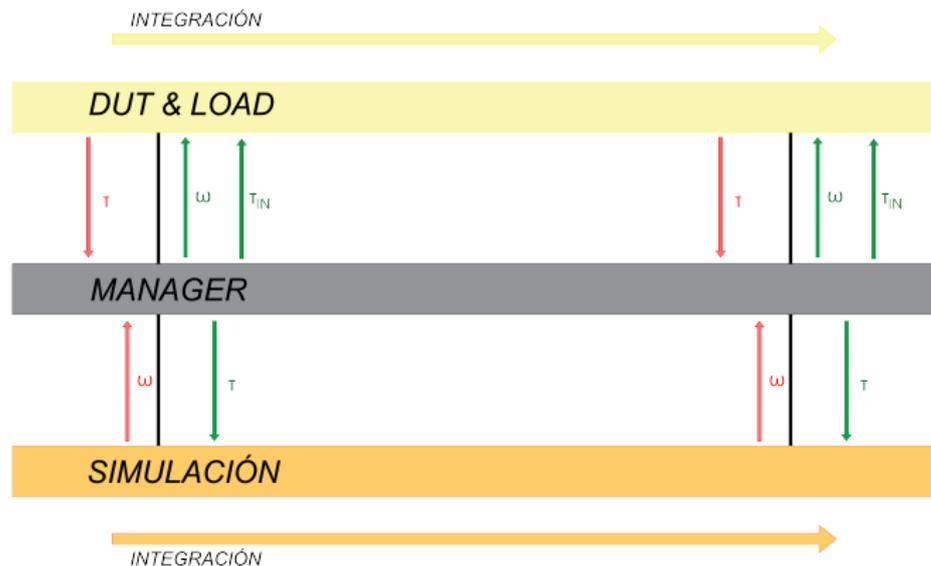
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



Comparación entre opciones

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

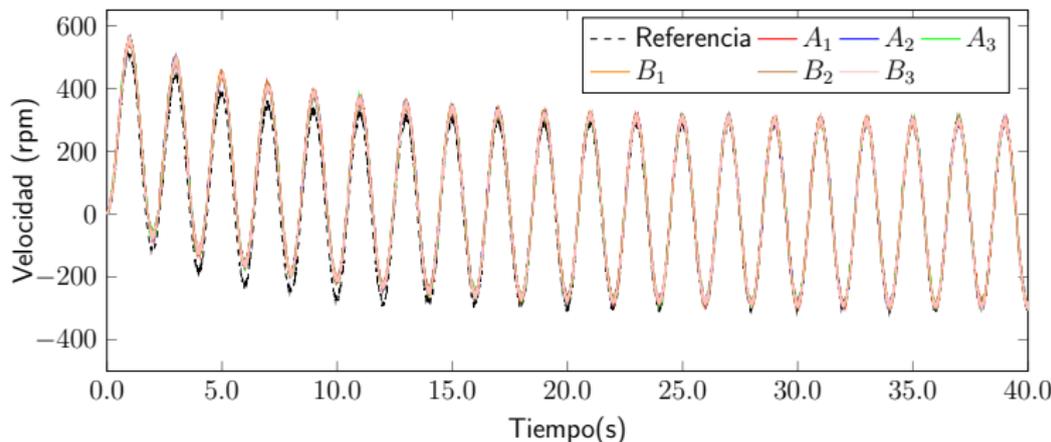
Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones



- Referencia de un ensayo en configuración mecánica
- Gran similitud
- En concordancia con la referencia

Conclusiones del estudio

Introducción

Funcionamiento
Objetivos

Variabilidad

Ensayo mecánico
Sensor de par

Factores identificados

Programación
Sincrono
Por eventos
Latencia
Desplazamiento-desplazamiento
Fuerza-desplazamiento
Banco de ensayos
Selección de un intervalo
Comunicación
Par
Velocidad
Corte global

Co-simulación

Gauss-Seidel
Jacobi

Conclusiones

- Esquemas de co-simulación:
 - Jacobi
- Factores identificados:
 - Pérdida de comunicaciones:
 - Evolución estable
 - Intervalo de co-simulación:
 - Marcado por la comunicación
 - No es crítico en el banco
- Trabajo futuro
 - Aplicación a banco de categoría industrial
 - Estudio de errores forzados en el modelo de simulación
 - Mejora del protocolo CAN

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol