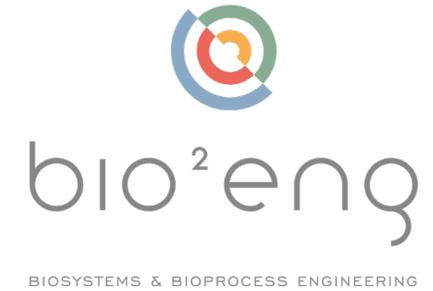




Universidad  
de Valladolid



Integrated plant-wide control and  
optimization for industry 4.0



# Co-simulación de una planta de esterilización usando FMI

Alejandro Merino, Daniel Sarabia, Carlos Vilas, Daniel Hernández, Santos Galán



Workshop final  
20-21 junio, 2022

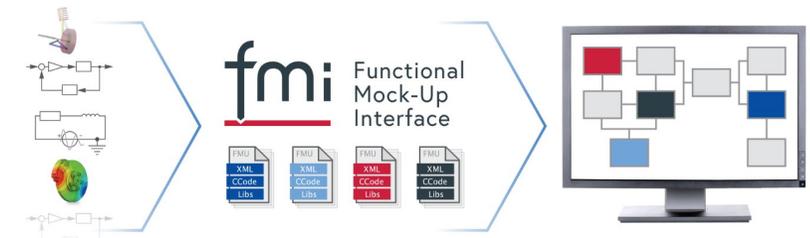
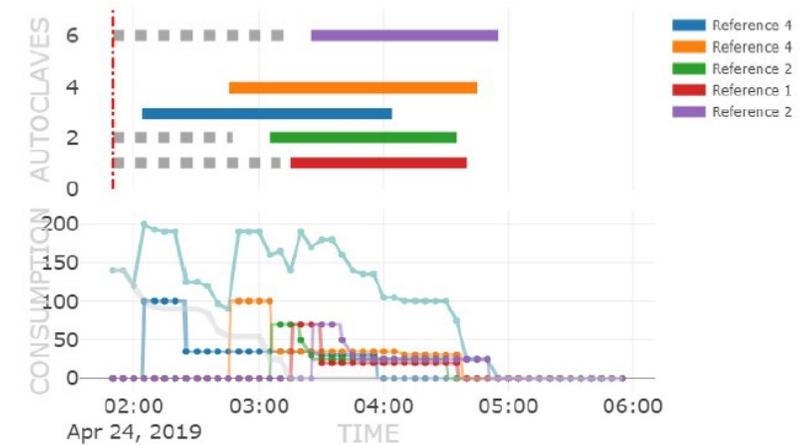


POLITÉCNICA

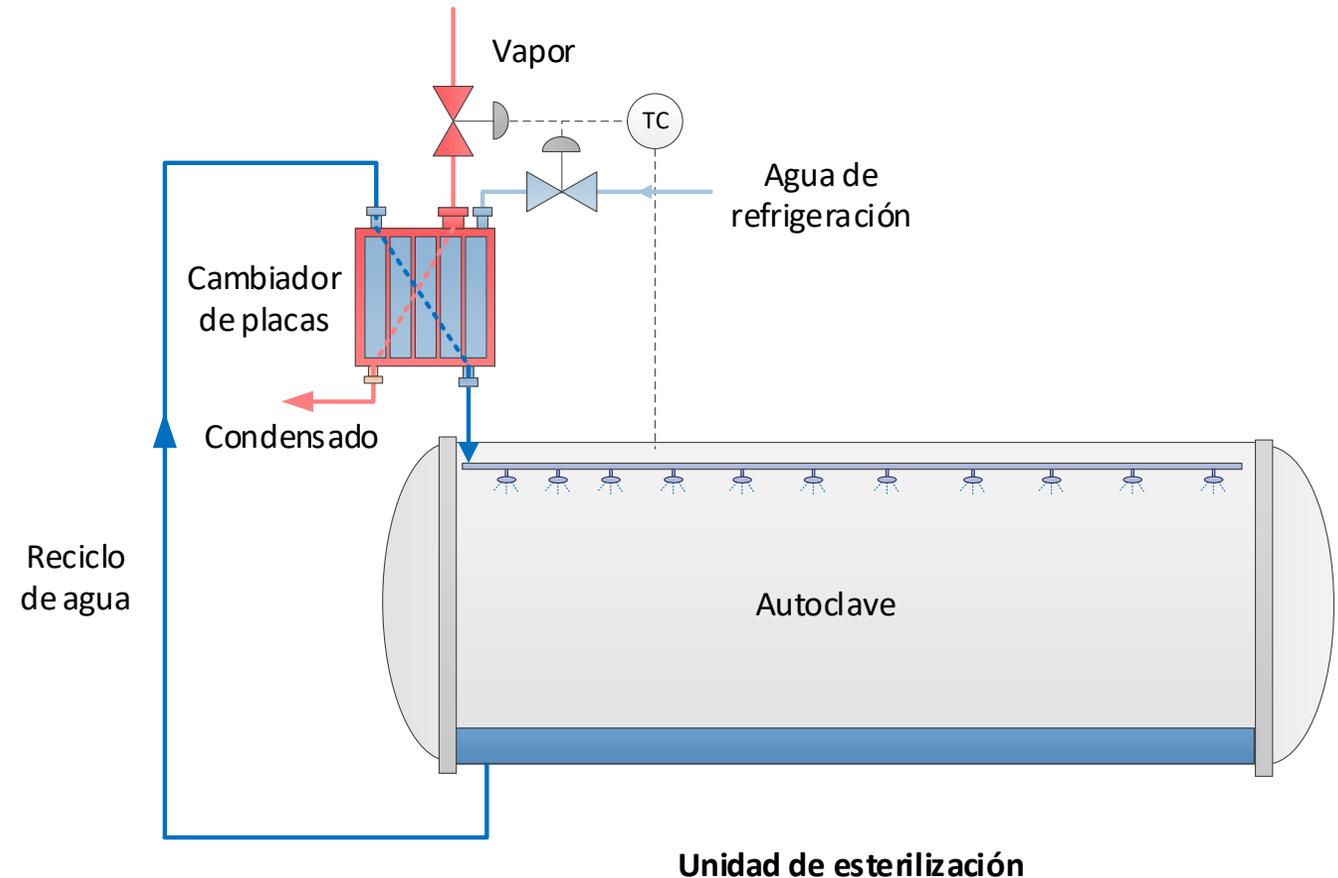
- **Desarrollar un modelo matemático** en Proosis de una planta completa de esterilización que permita:
  - Mejorar los modelos anteriores (fidelidad, FEM completo)
  - Multiplicar el número de unidades de esterilización
  - Modelar las líneas de producción
  - Considerar la variabilidad de los parámetros
  - Probar los algoritmos de planificación usando el modelo desarrollado

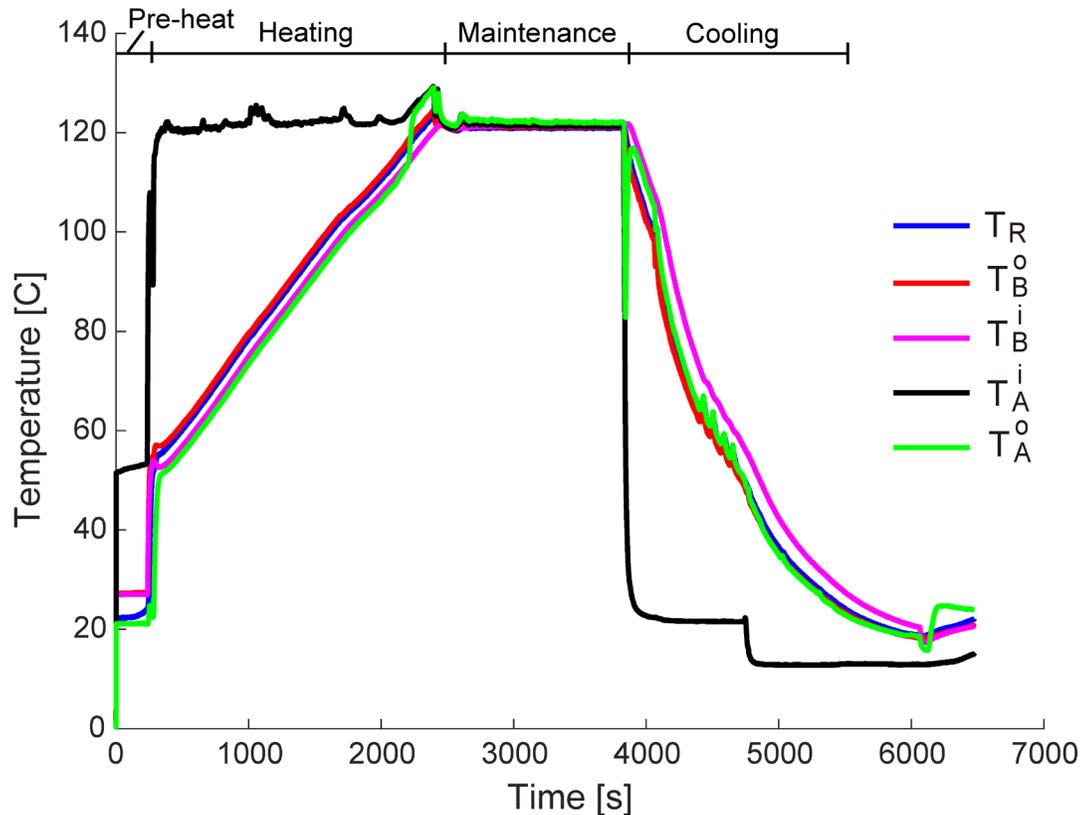


- ✓ **Probar técnicas de distribución** (FMI) y su impacto en los tiempos de cálculo



- Cambiador de placas para producción de agua (líquida) a 120 °C (2 bar) mediante vapor.
- El agua se rocía en el autoclave para esterilizar
- En la fase final en lugar de vapor se enfría con agua de refrigeración en el cambiador





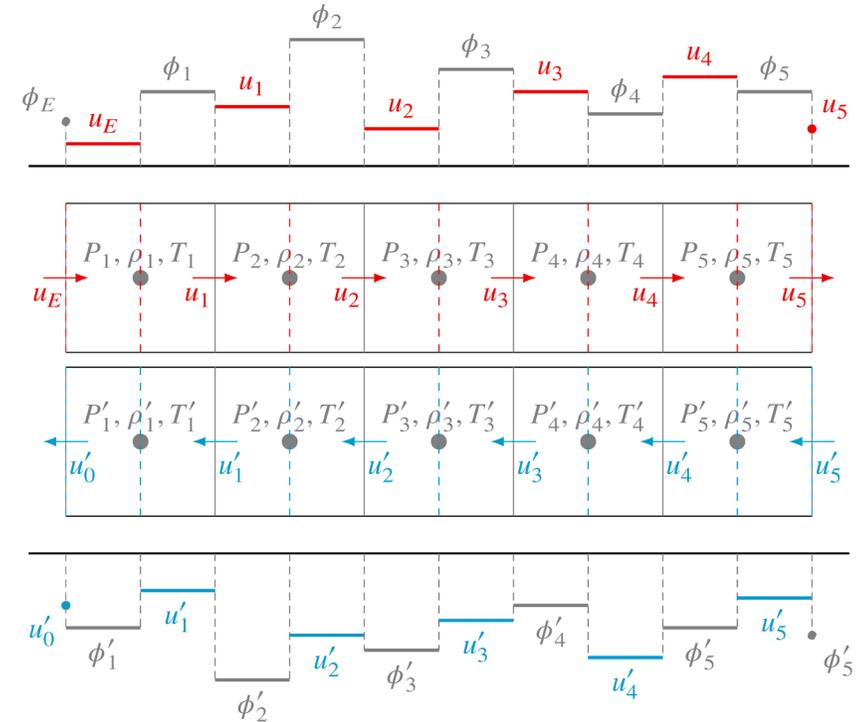
- El modelo inicial en Matlab, seguía adecuadamente el comportamiento del equipo, pero no reproducía algunos de los efectos observados
- En esencia se trataba de un sEDO (sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias)
- El modelo era correcto, pero contenía simplificaciones en las propiedades físicas y equipos

# Ampliación en profundidad: mejora del modelo existente

- Paso a sEDA (sistema de Ecuaciones Diferenciales y Algebraicas), en Proosis
- Planteamiento sistemático de los balances de materia y energía
  - Restricción de equilibrio de fases explícita
- Modelos más exactos para las propiedades físicas
- Coeficientes de transmisión en el cambiador en función de las características de los flujos
- Limitación de flujo crítico para la válvula de control
- Flujo máximo de la válvula que alimenta al colector
- Modelado de la salida de condensado del cambiador con un pseudopurgador

# Ampliación en profundidad: modelo 1D del cambiador

- Mejora del detalle del cambiador de placas para aumentar la fidelidad del modelo
- Paso a un modelo distribuido (1D) de los canales
  - En el lado del vapor se consideraba un único compartimento con equilibrio L/V, significando una única presión y temperatura en todo el recorrido.
- El modelo distribuido presenta una mayor complejidad:
  - Multiplica el número de ecuaciones
  - Flujo bifásico o monofásico dependiendo de la posición en la placa
  - Fluido compresible o incompresible en función de la presencia o ausencia de vapor
- Desarrollo del modelo:
  - Pruebas con FDM
  - Paso a FVM con doble malla alterna
  - Integradores de paso variable violan condición CFL usando MOL



La transferencia de calor y distribución de temperaturas en las latas estaba modelada (CSIC) con un modelo FEM (simetría cilíndrica, 2D) en Matlab

- Sistema lineal de de 889 a 1097 EDOs

Y también con un modelo de orden reducido usando POD (Proper Orthogonal Decomposition)

- Sistema lineal de 12 EDOs

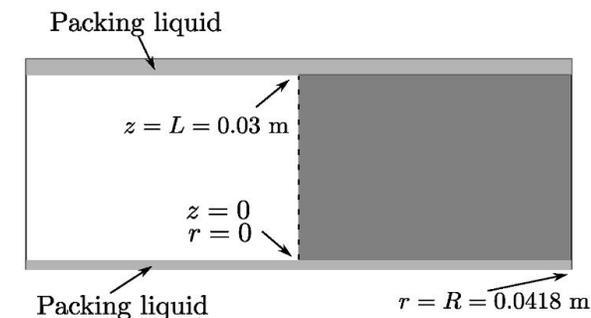
El tiempo de ejecución escala proporcionalmente: para un esterilizador aproximadamente de 35 s (POD) a 3500 s (FEM)

La diferencia en el cálculo de temperatura/letalidad/calidad es mínimo: los modelos POD son una buena solución

(a)



(b)



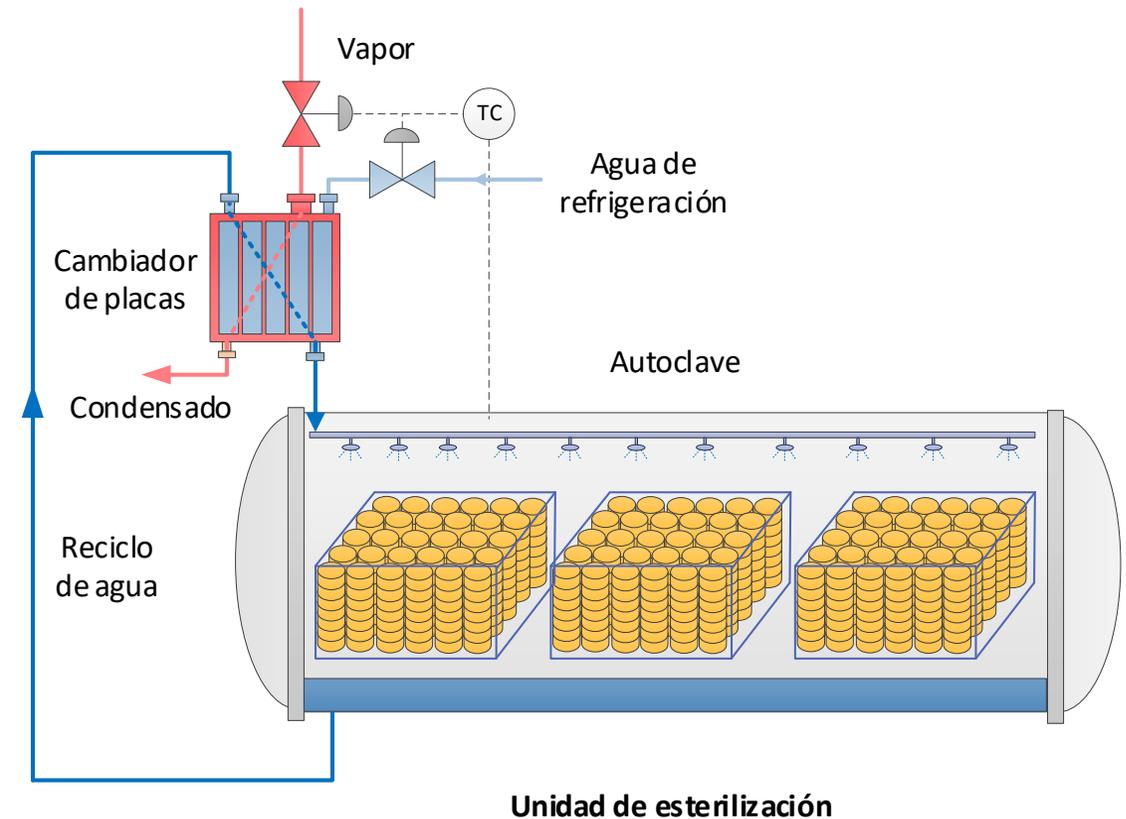
# Ampliación en extensión: inclusión de los modelos de latas

## Usos de los modelos de latas:

- Considerar esterilizadores con más de un tipo de lata
- Considerar variaciones de parámetros de propiedades entre latas del mismo tipo
- Usar los modelos completos FEM para poner a prueba la co-simulación con condiciones más exigentes

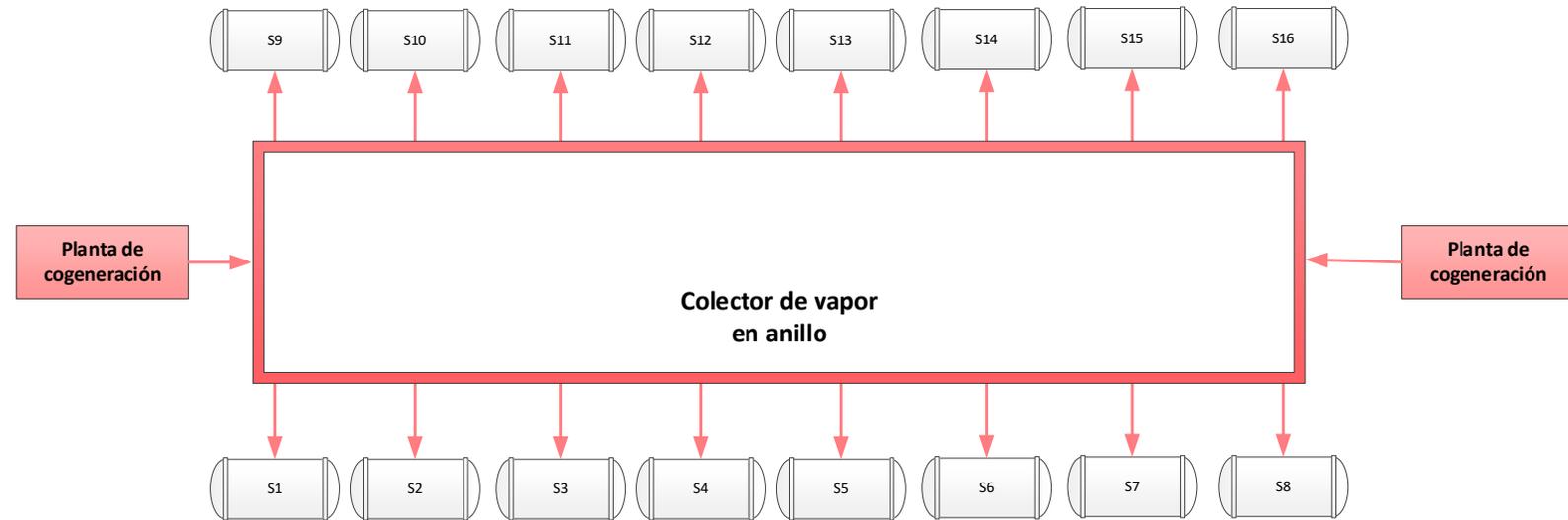
## Estos modelos usan matrices. Se han probado dos métodos:

- Librería de algebra lineal en Proosis
- Llamada a función externa en C (generada desde Matlab)
- La función externa es mucho más rápida



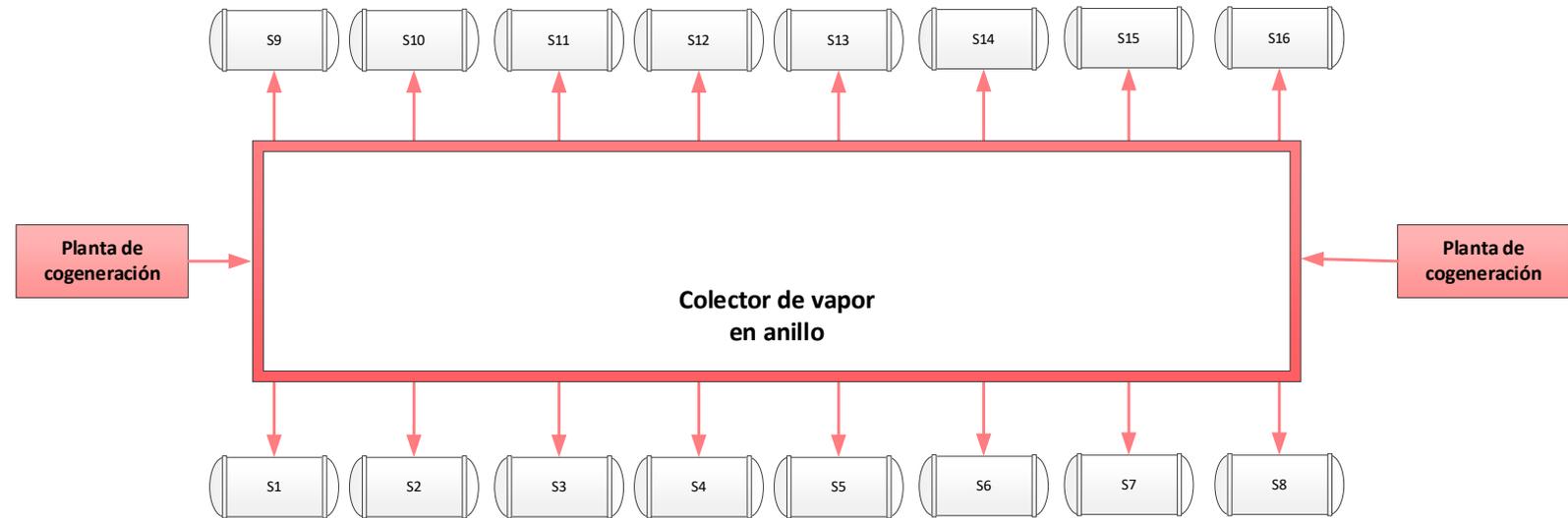
# Ampliación en extensión: red de esterilizadores

- Se han añadido el modelo del anillo y generación de vapor.
- Se han conectado los componentes aprovechando la capacidad de orientación a objetos de Proosis

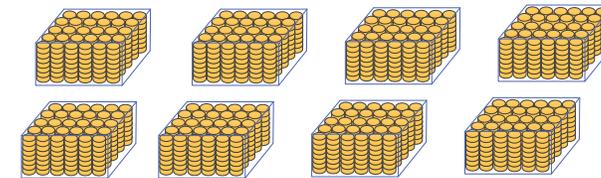
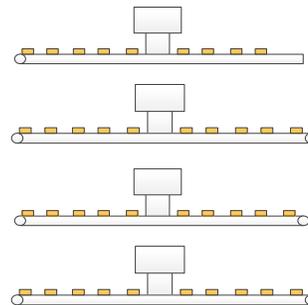


# Ampliación en extensión: generación de latas y carros

- Se han añadido el modelo del anillo y generación de vapor.
- Se han conectado los componentes aprovechando la capacidad de orientación a objetos de Proosis
- Se han añadido las líneas de producción de latas y su almacenamiento en carros.

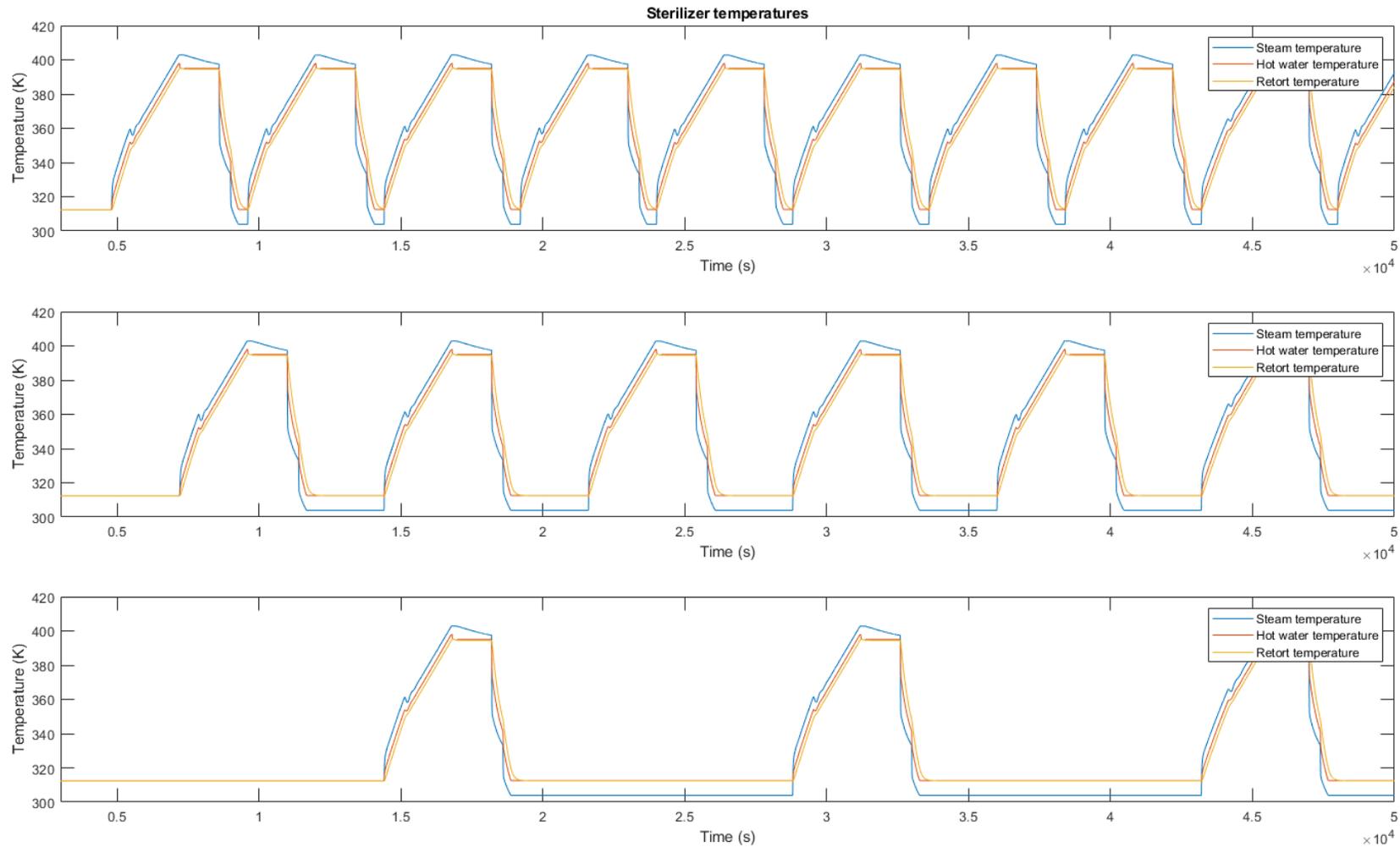


Líneas de producción de latas

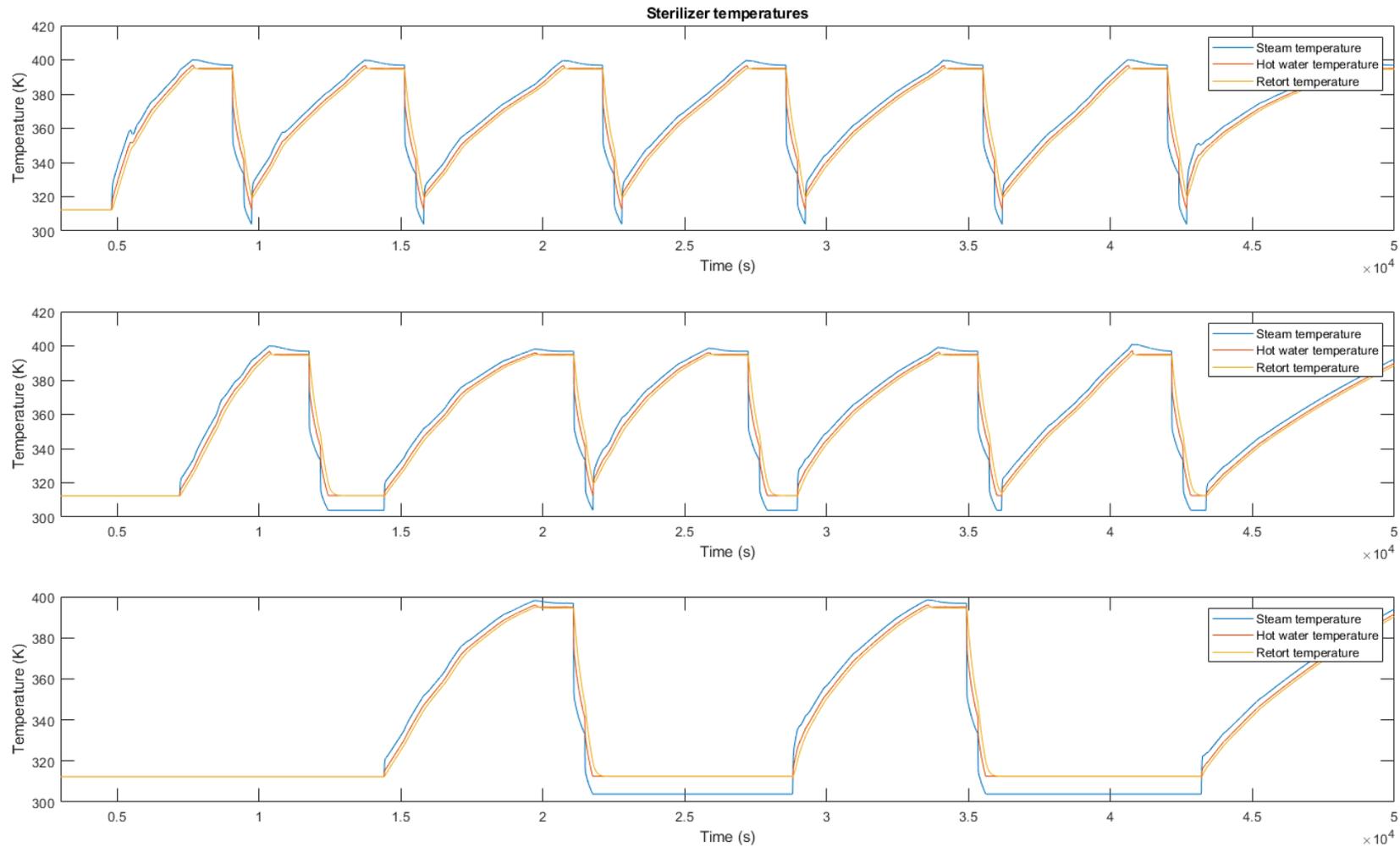


Llenado de carros

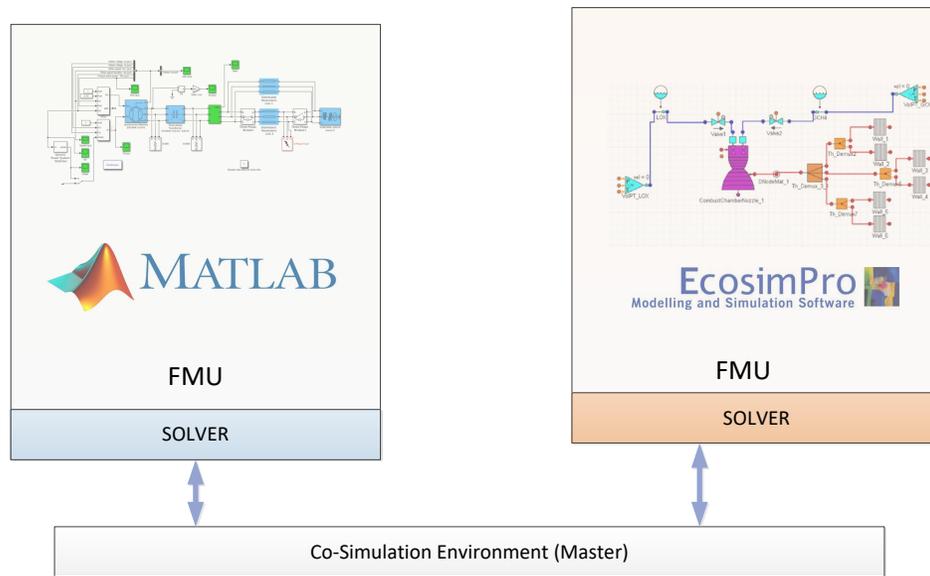
# Operación de tres esterilizadores: generación de vapor ilimitada



# Operación de tres esterilizadores: generación de vapor limitada



- Dado la elevada complejidad del modelo, se plantea su distribución para tratar de conseguir ejecución rápida
- Se utilizan técnicas de **co-simulación** (continua):
  - En co-simulación, el modelo se subdivide en varias unidades que ejecutan su solución de forma independiente, comunicándose para obtener la solución global
  - Esto permite combinar y distribuir diferentes programas y fuentes, pero se introduce error numérico y el acoplamiento puede ser problemático
  - Se ha usado co-simulación para distribuir la carga computacional en los distintos núcleos de la CPU, con el objetivo de mejorar los tiempos de cálculo
- Se han probado varias arquitecturas
  - Pruebas para 8 esterilizadores
  - PODs



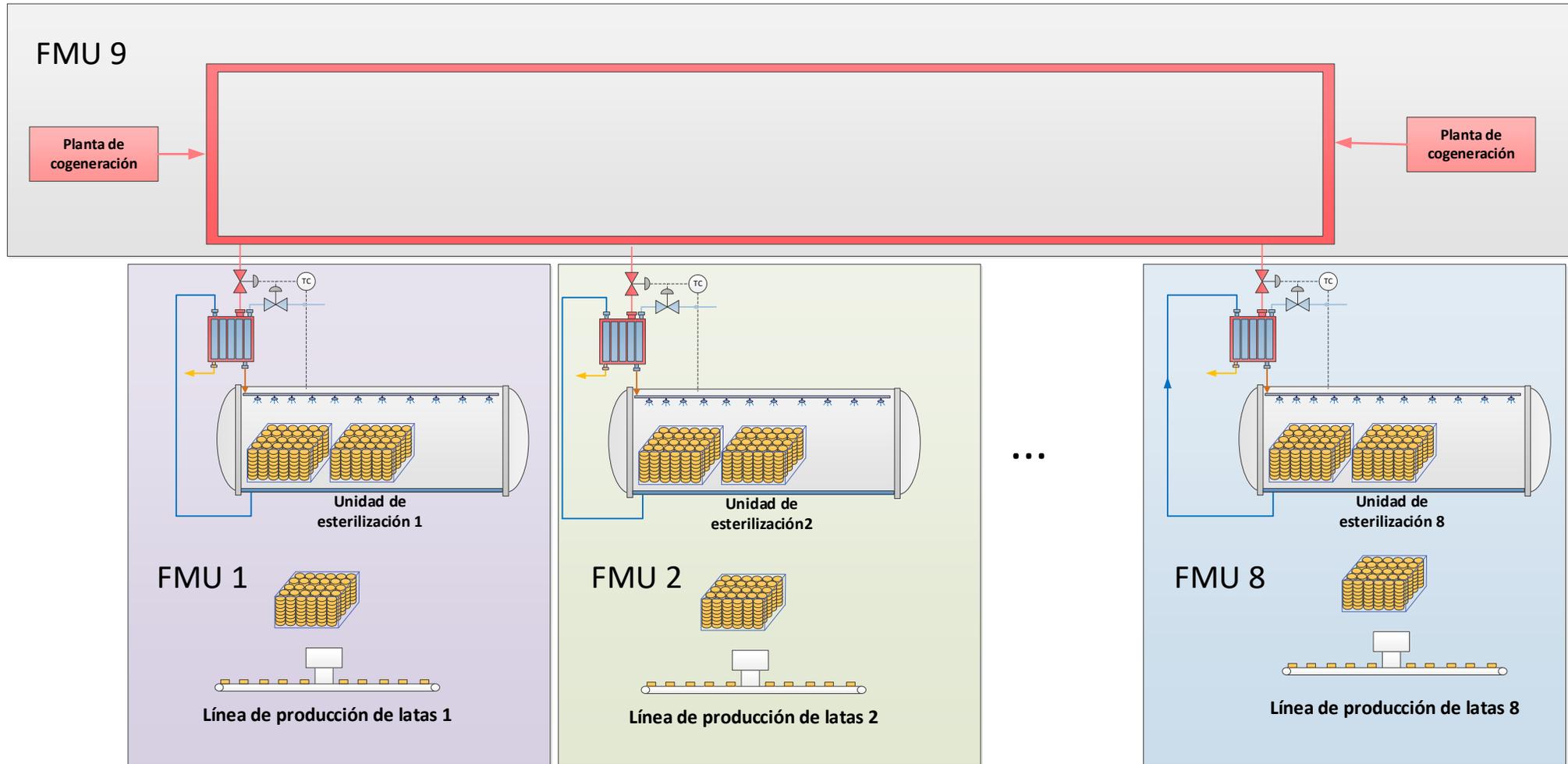
**fmi:** Functional Mock-Up Interface

FMI (Functional Mock-Up Interface) es un estándar que proporciona tanto el formato de los contenedores (FMU), como las interfaces para el uso conjunto de modelos de simulación de distintos proveedores.

- Soportado por numerosas herramientas de modelado
- Define su uso tanto para co-simulación como para *Model Exchange* o *Scheduled Execution*
- Existen distintas arquitecturas y versiones, actualmente 3.0
  - Proosis en el momento de hacer las pruebas disponía únicamente de la versión 1.0
  - Actualmente en desarrollo de la versión 2.0, ya se permite *Model Exchange*, pero no se ha probado.

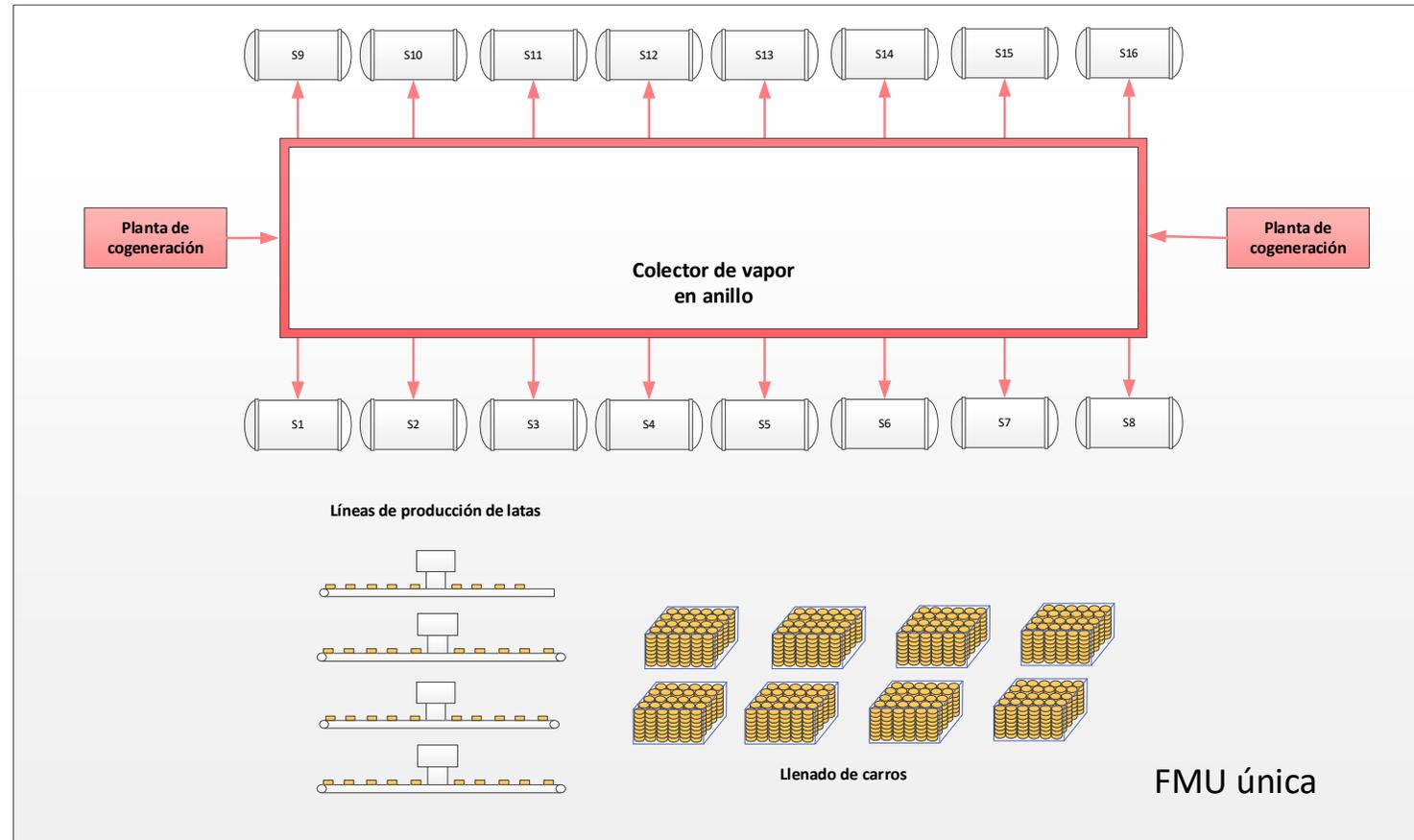
# Arquitectura I: 1 FMU de anillo + 8 FMUs de esterilizadores con carros

- Maximiza el uso de los núcleos.



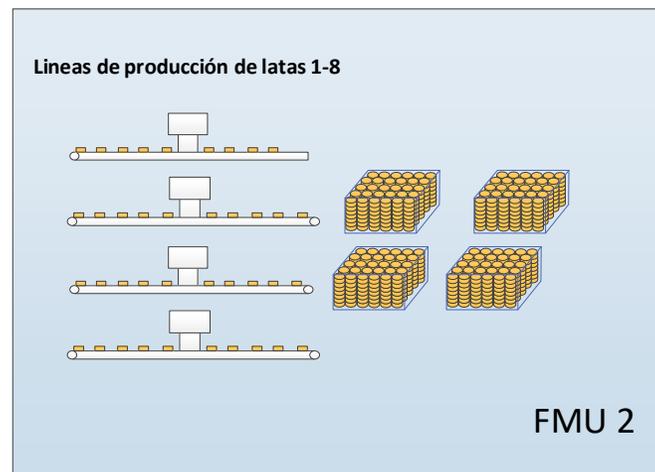
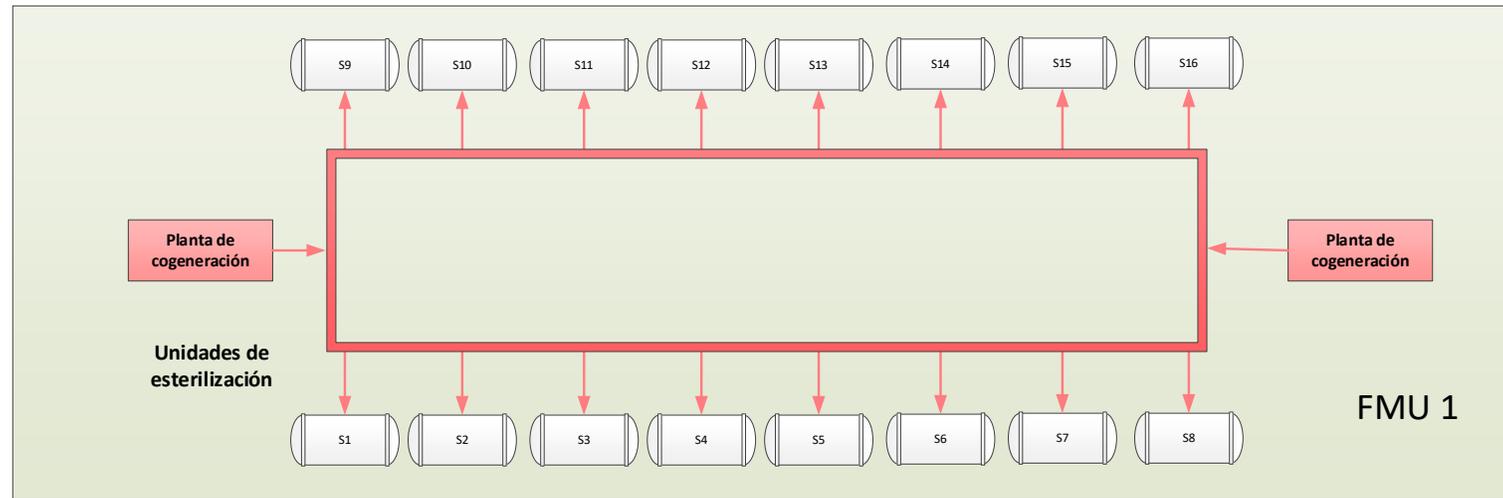
# Arquitectura de distribución II: FMU única con todo el modelo

- Para poder comparar los resultados con el modelo monolítico

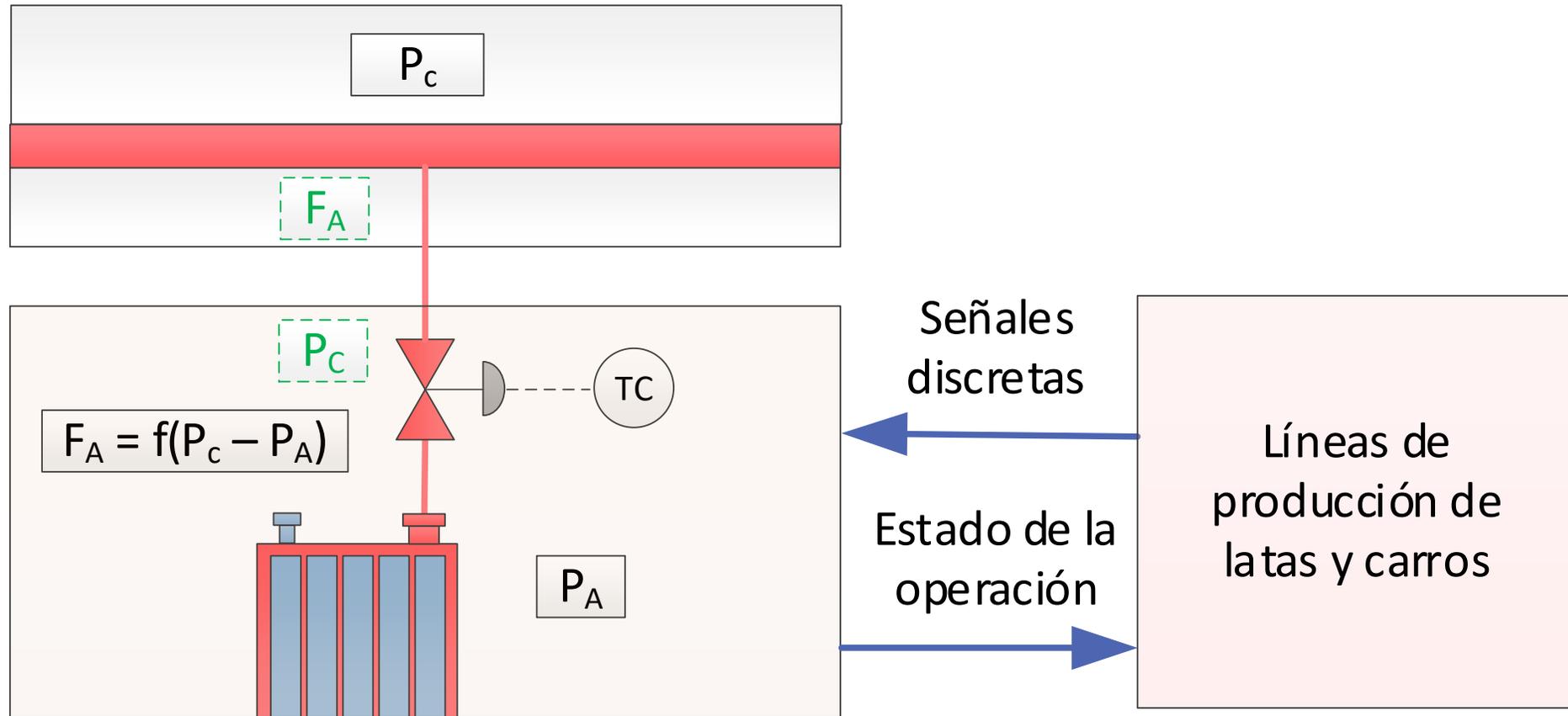


# Arquitectura III: 1 FMU continua + 1 FMU discreta

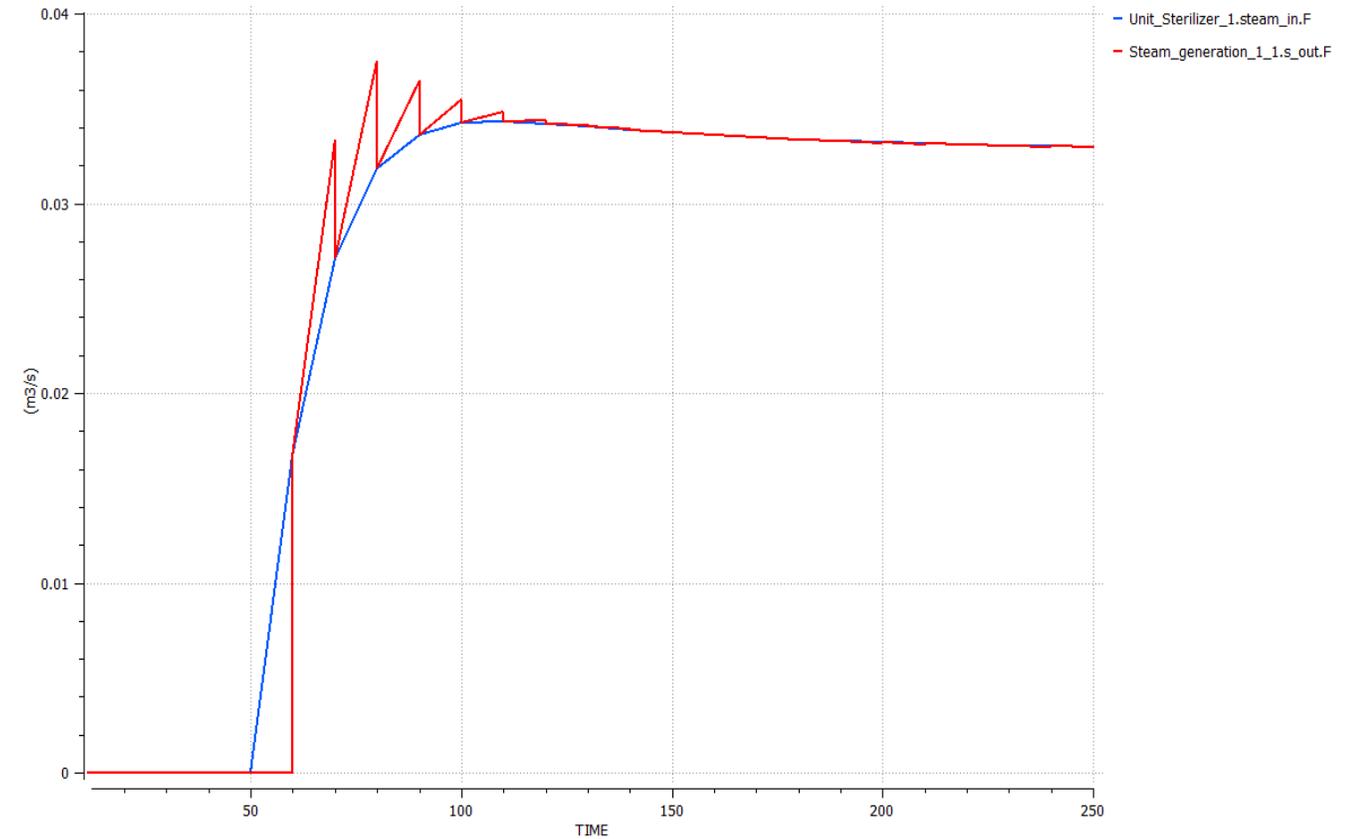
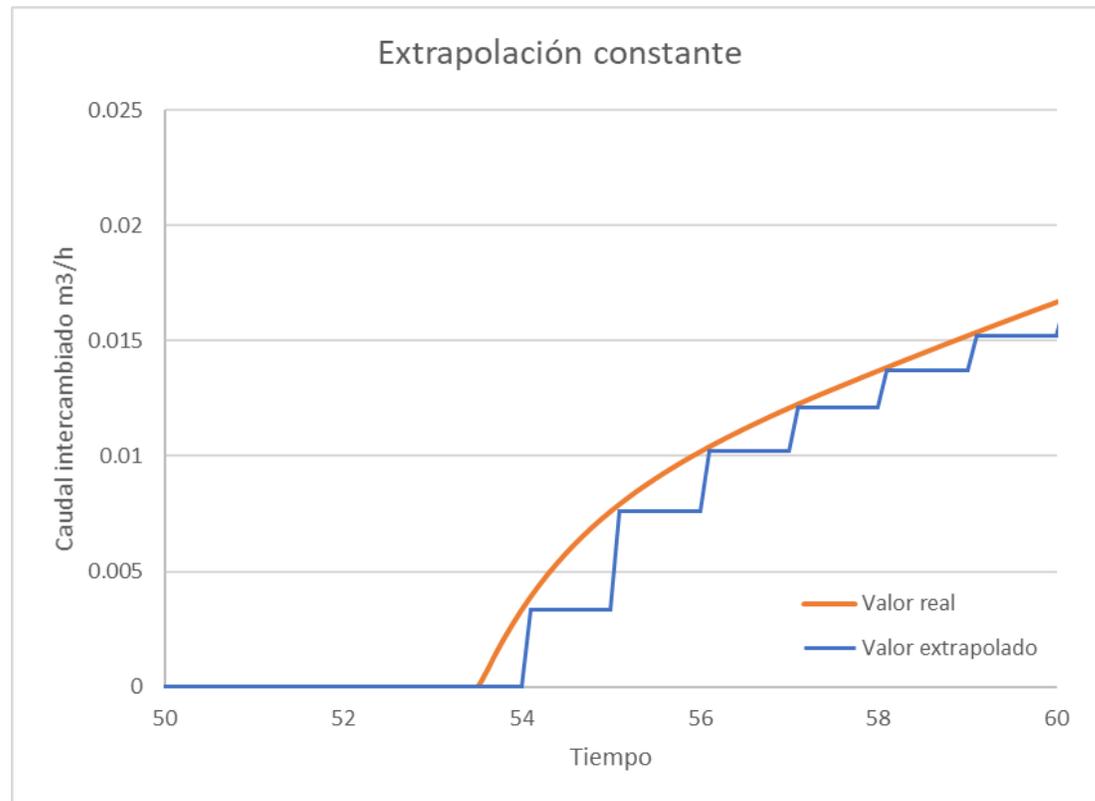
- Para aislar el efecto de la generación de carros que tiene muchos eventos



# Co-simulación: esquema de conexión



# Co-simulación: esquemas de interpolación



# Comparaciones iniciales: tiempos de ejecución

- Sobre arquitectura FMI con un FMU por esterilizador

	Tiempo (s) MINT = 1 IDAS	Tiempo (s) MINT = 1 IDAS SPARSE	Tiempo (s) MINT = 5 IDAS SPARSE	Tiempo (s) MINT = 10 IDAS SPARSE
Monolítico 1 esterilizador	22.0	18.7	<b>0.55</b>	<b>0.10</b>
Distribuido 1 esterilizador const	1434	976	<b>22.1</b>	<b>3.4</b>
Distribuido 1 esterilizador lineal	1396	979	<b>22.1</b>	<b>3.3</b>
Monolítico 8 esterilizadores	2152	496	<b>2.87</b>	<b>2.24</b>
Distribuido 8 esterilizadores const	3285	2484	<b>58.3</b>	<b>10.6</b>
Distribuido 8 esterilizadores lineal	3231	2446	<b>55.3</b>	<b>10.5</b>

Calculo matricial en Proosis eSetConfig(CFG\_FORCE\_STOP\_CINT,FALSE)

- Extrapolación lineal
- Proper Orthogonal Decomposition (POD)
- Tiempo de Simulación (10 000 s)

	Time (s) MINT = 1 s IDAS_SPARSE	Tiempo (s) MINT = 10 s IDAS SPARSE	Tiempo (s) MINT = 100 s IDAS SPARSE
Monolítica	17.9	11.3	8.6
Una única FMU	190.5	27.2	4.0
1 FMU discreta/1 FMU continua	196.4	23.1*	8.9*
1 FMU anillo/ 8 FMUs esterilizadores	63.8	<b>9.9</b>	<b>5.6</b>

- Alta sobrecarga solo por usar FMI
- Equilibrio entre el tiempo de cálculo y el de comunicación

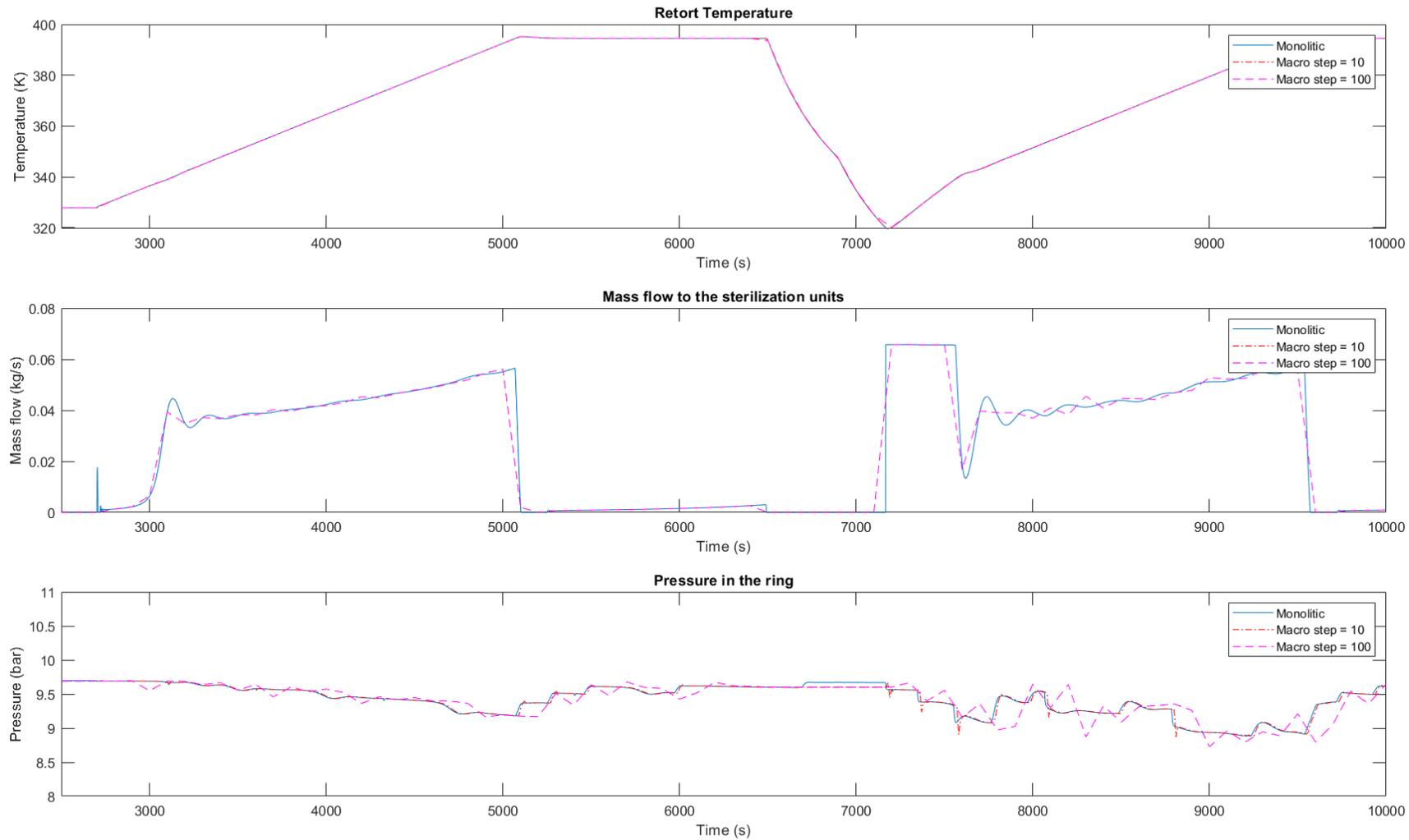
\* Resultados inválidos por pérdida de eventos

# Resultados: Tiempos de ejecución incluyendo variabilidad

	Time (s) MINT = 1 s IDAS_SPARSE	Tiempo (s) MINT = 10 s IDAS SPARSE	Tiempo (s) MINT = 100 s IDAS SPARSE
Monolítica	398.9	313.2	206.7
Una única FMU	6492.1	914.8	192.5
1 FMU discreta/1 FMU continua	6890.49	655.5*	67.0*
1 FMU anillo/ 8 FMUs esterilizadores	1976.61	<b>226.05</b>	<b>34.0</b>

\* Resultados inválidos por pérdida de eventos

# Errores respecto a la simulación monolítica



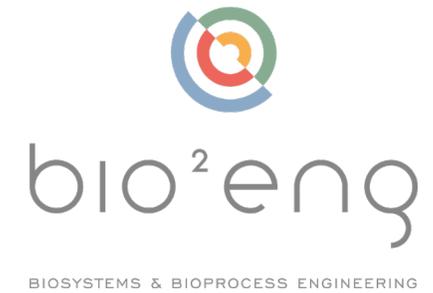
# Errores respecto a la simulación monolítica

	Flujo de vapor	Presión de vapor	Temperatura en autoclave
	% error	% error	% error
Una única FMU	0	0	0
1 FMU discreta / 1 FMU continua MINT = 1	0	0	0
1 FMU anillo / 8 FMUs esterilizadores MINT = 1	0.087	0.044	0.0015
1 FMU anillo / 8 FMUs esterilizadores MINT = 10	1.820	0.109	0.0054
1 FMU anillo / 8 FMUs esterilizadores MINT = 100	2.309	0.847	0.0087

- El uso de modelos realistas en la industria implica la combinación de formalismos y programas, así como una escala potencialmente grande en extensión y profundidad
- Incluso en casos aparentemente sencillos, la consecución de un alto grado de fidelidad con el proceso puede ser difícil
- Estas condiciones conducen a las técnicas de co-simulación, que no han alcanzado aún el grado de madurez, pero cuyo desarrollo se está intensificando
  - Se requieren adaptaciones en los programas y normas. También un mayor desarrollo teórico
- En este proyecto, con FMI, hemos encontrado un compromiso entre intervalo de comunicación y distribución que reduce el tiempo de simulación con error bajo
  - La mejora puede no ser muy alta y depende de la topología y dinámica del modelo
- Para próximos proyectos se han planteado arquitecturas e interfaces que faciliten la comunicación y el uso de modelos distribuidos multiformalismo y sirvan para conectar el planificador con el modelo de la planta



Integrated plant-wide control and optimization for industry 4.0



**Gracias por la atención**

**Workshop final  
20-21 junio, 2022**