



**Universidad  
de Valladolid**



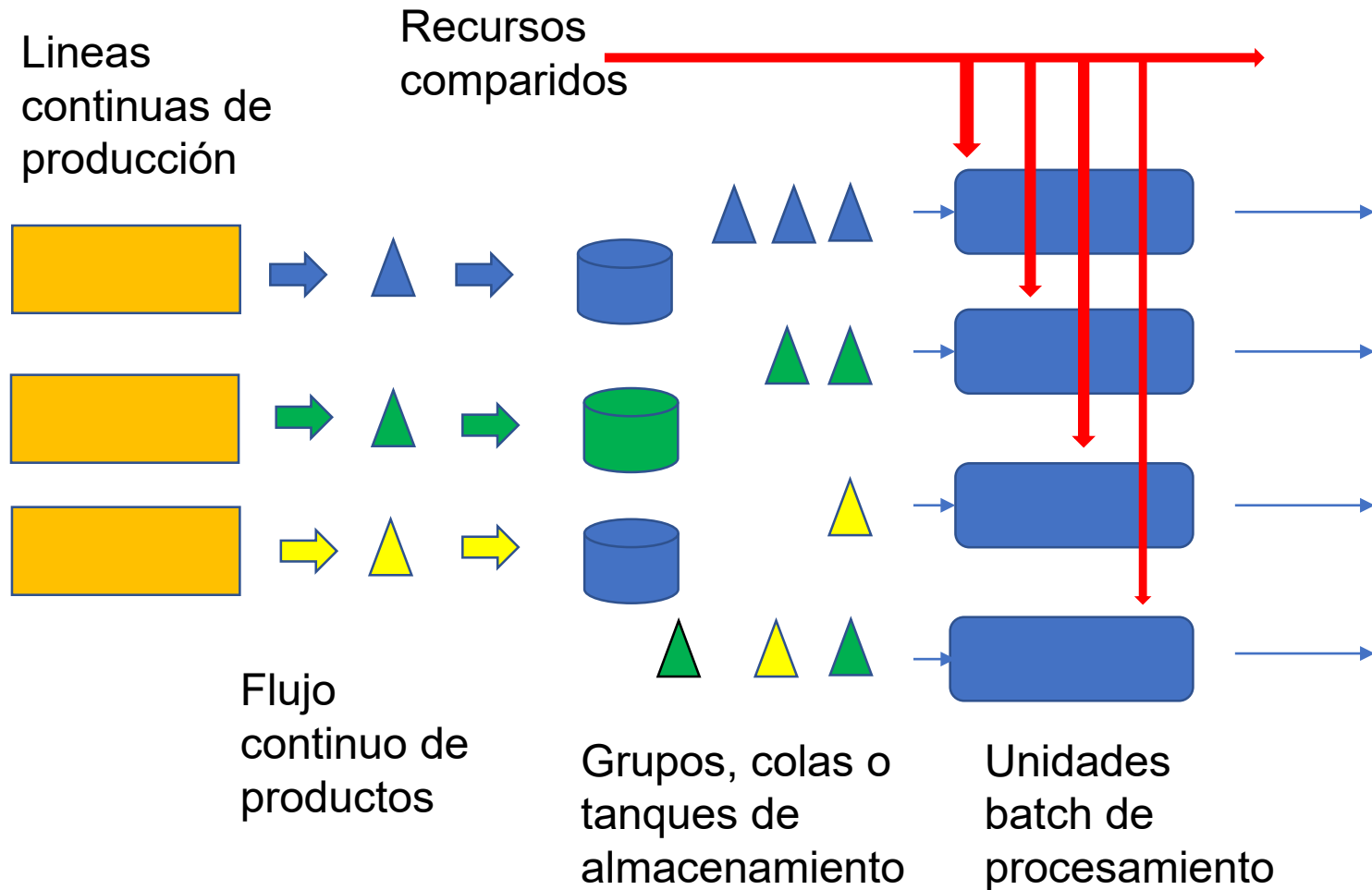
Integrated plant-wide control and  
optimization for industry4.0



# Scheduling on-line de la sección de esterilización en una planta conservera

Carlos Gomez Palacin, Carlos Vilas, Cesar de Prada,

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

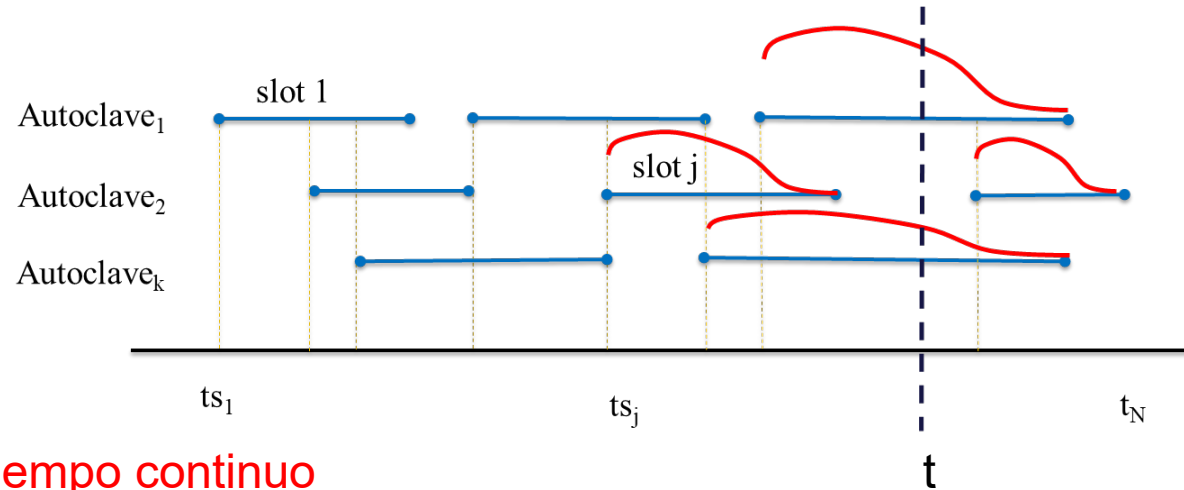


Operación óptima de procesos híbridos (continuo/discretos) con recursos compartidos

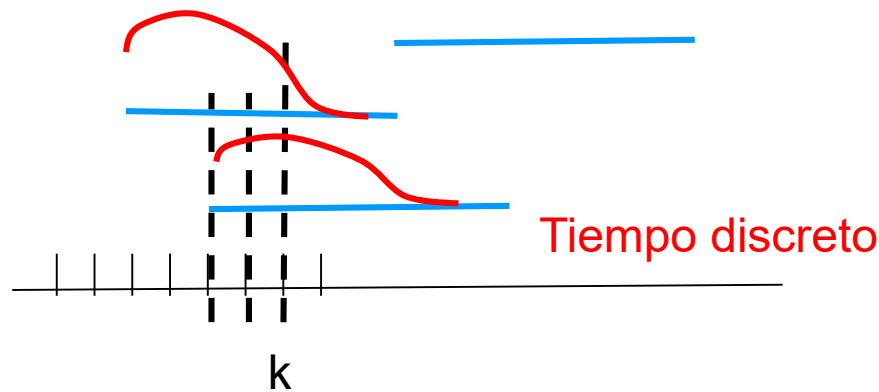
El scheduling (ordenar la producción a lo largo del tiempo) es esencial para evitar cuellos de botella y mejorar la eficiencia de la operación. Típicamente se hace fuera de línea con un horizonte temporal considerable

Buscamos una formulación eficiente

- ✓ En tiempo continuo
- ✓ Operando en lazo cerrado en tiempo real adaptándose al estado del proceso
- ✓ Que considere los recursos compartidos
- ✓ Que pueda integrar la operación de las unidades batch en el scheduling
- ✓ Validada en un caso industrial relevante
- ✓ Integrada con las herramientas MES

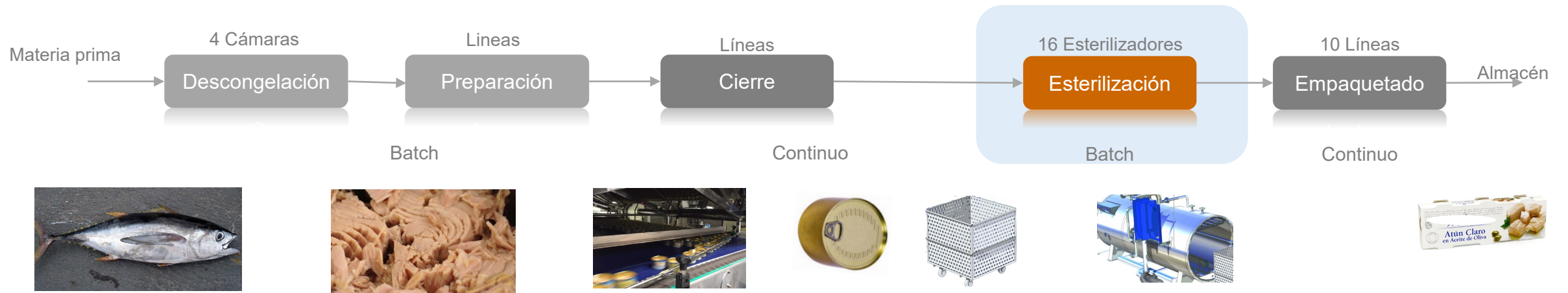


Tiempo continuo



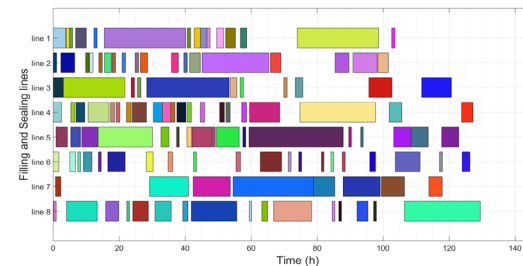
Tiempo discreto

# Proceso general



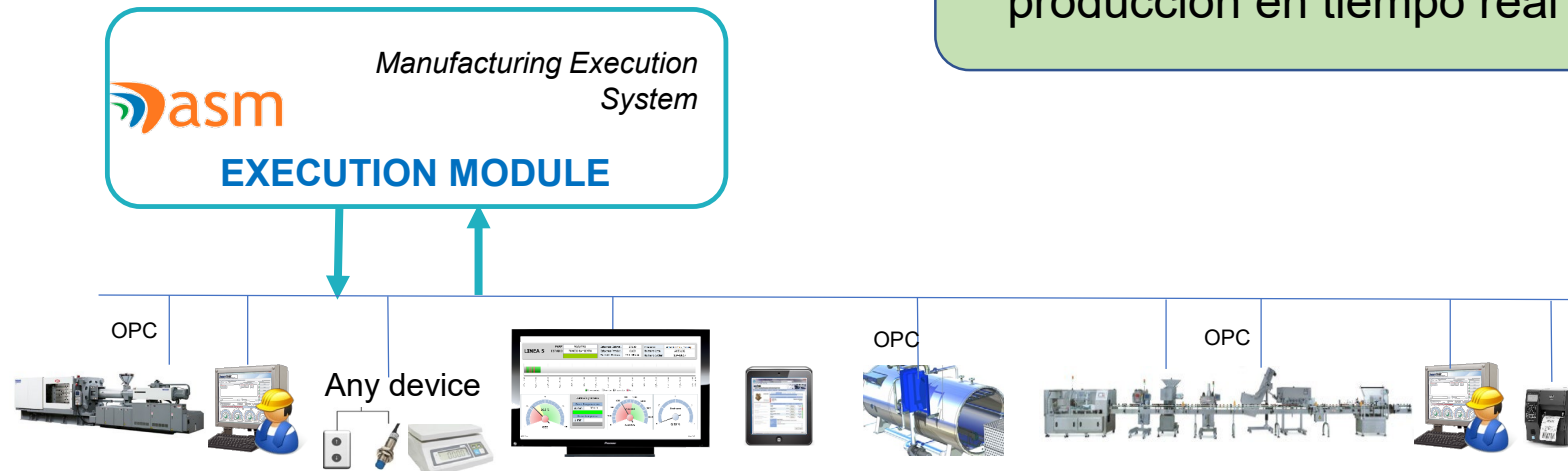
Planificación semanal de la producción

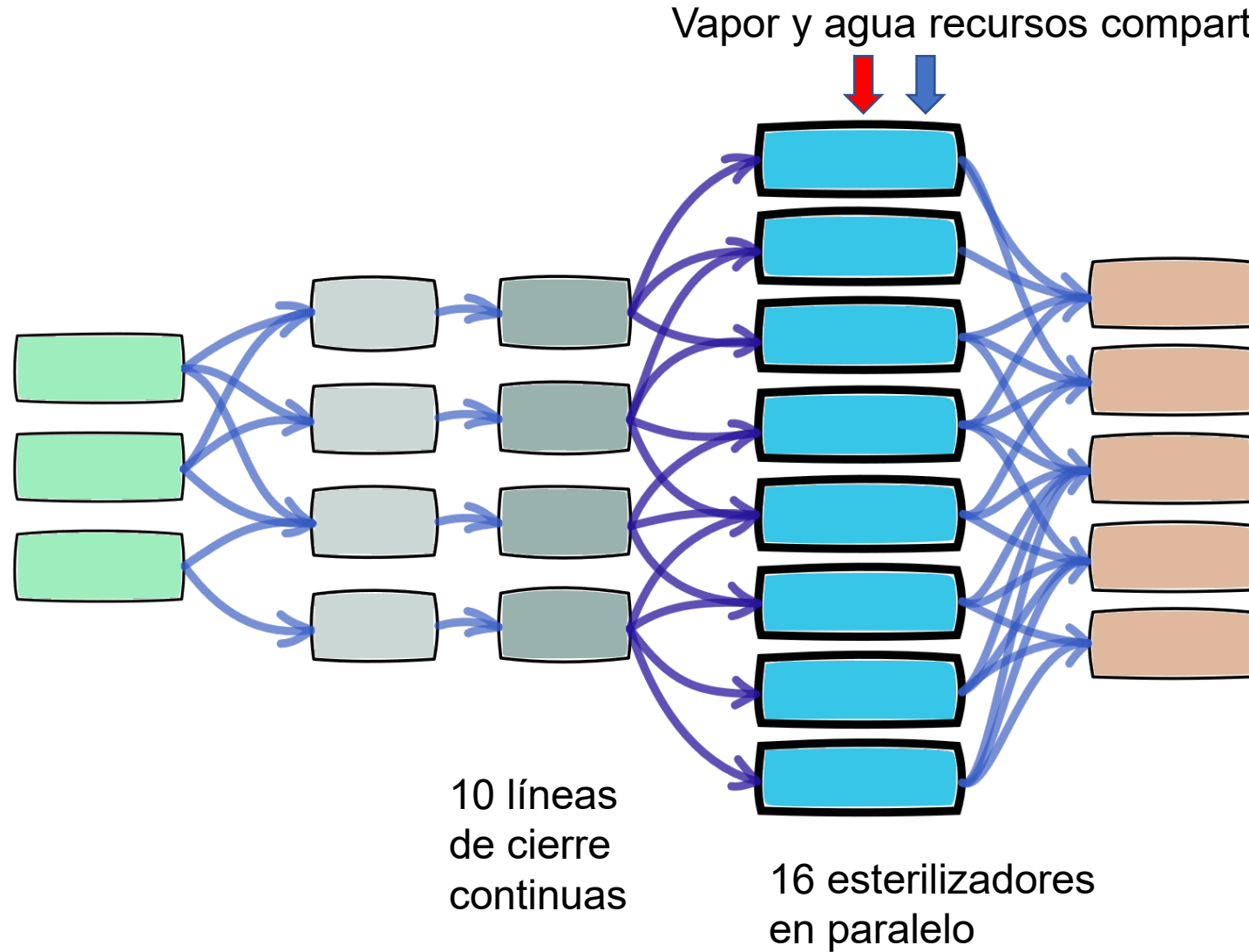
Producción basada en la demanda



Adaptación manual en tiempo real a las incidencias y cambios en el procesos o la demanda

Sistema MES de supervisión de la producción en tiempo real



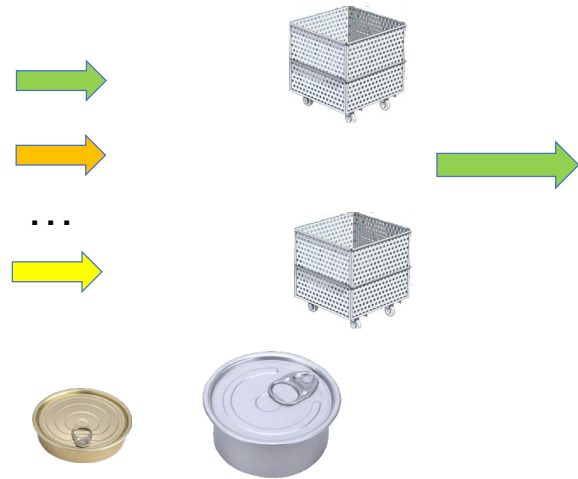


La sección de esterilización es la más crítica del proceso

Diversos objetivos

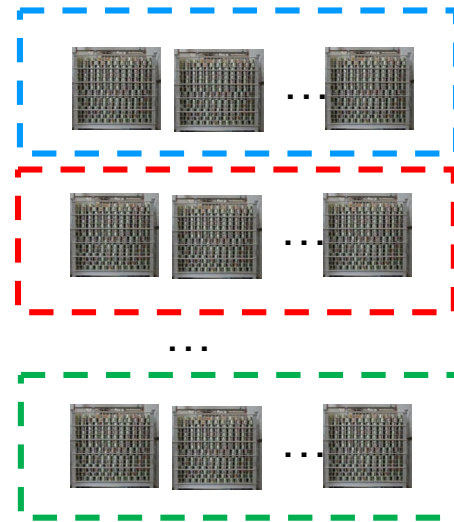
- ✓ Maximizar la producción
- ✓ Minimizar makespan
- ✓ Ahorrar energía
- ✓ Mantener calidad

Carros de latas llegan de las líneas de cierre



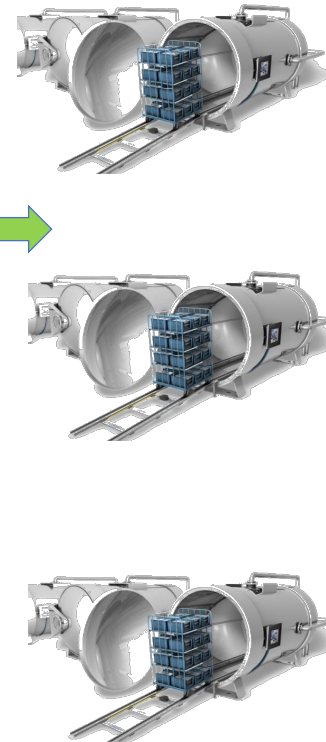
Diferentes flujos y tipos de latas

Formar grupos aceptables de carros

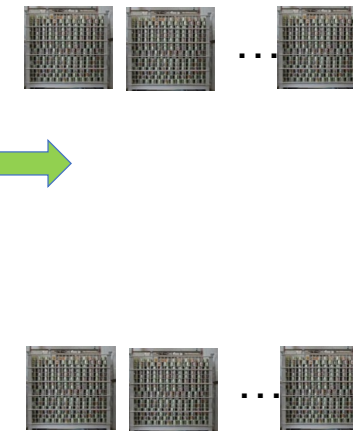


Area de espera

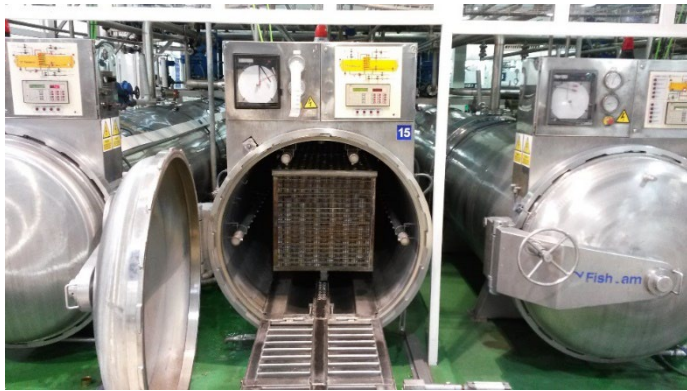
Asignar cada grupo a un autoclave



Descarga y recuperación de carros

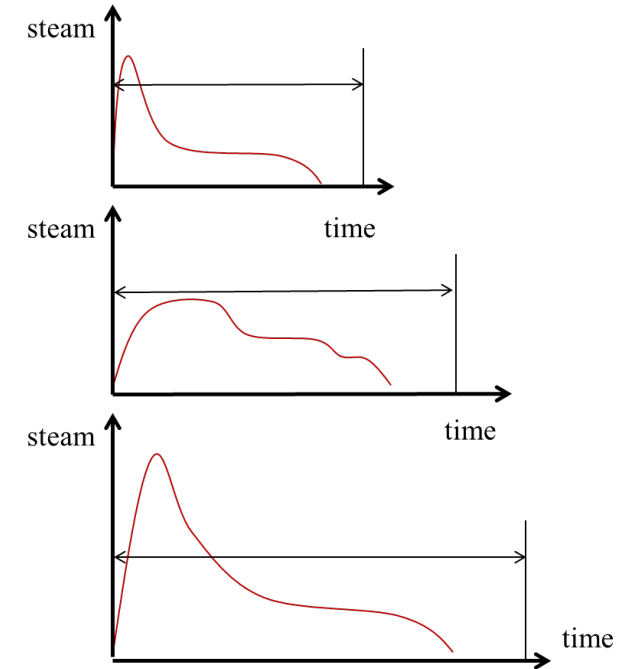
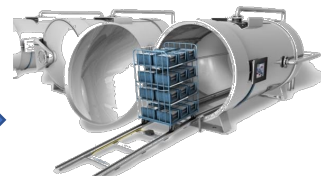


Los autoclaves operan de acuerdo a una receta para cada tipo de lata consumiendo vapor como recurso compartido



Funcionan en paralelo siguiendo recetas en función del tipo de latas a tratar.

Distintos tiempos de ciclo, temperaturas y consumos de vapor



Pueden mezclarse tipos de latas en un grupo de carros que se procesa junto, dentro de ciertos límites

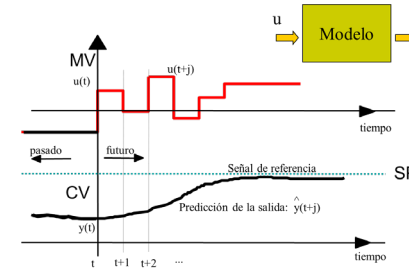
Tiempo de espera máximo de cada carro para evitar la aparición de sustancias tóxicas



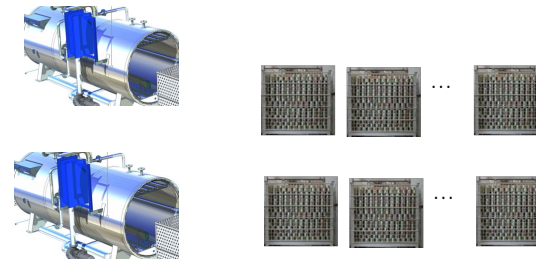
# Formulación del problema de scheduling

## Inspirado en la forma de operar de un MPC

- ✓ Se aplica regularmente con un periodo de muestreo adaptándose al estado real de la producción y de las llegadas esperadas de distintos tipos de carros
- ✓ **Scheduling on-line en tiempo real**  
Genera decisiones optimas sobre el agrupamiento, ordenamiento y asignación de carros, así como tiempos de arranque de esterilizadores y flujo de líneas de cierre.
- ✓ Dos horizontes: Predicción y robusto
- ✓ Dentro del horizonte robusto se congelan ciertas acciones como cambios de grupo o asignación a esterilizadores

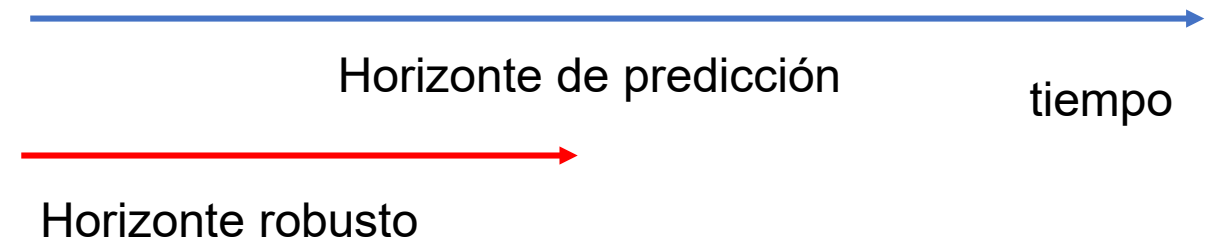
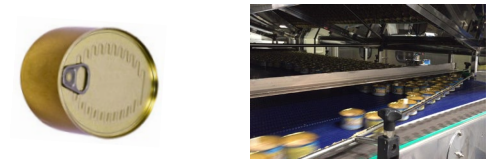


Latas y carros que ya han llegado

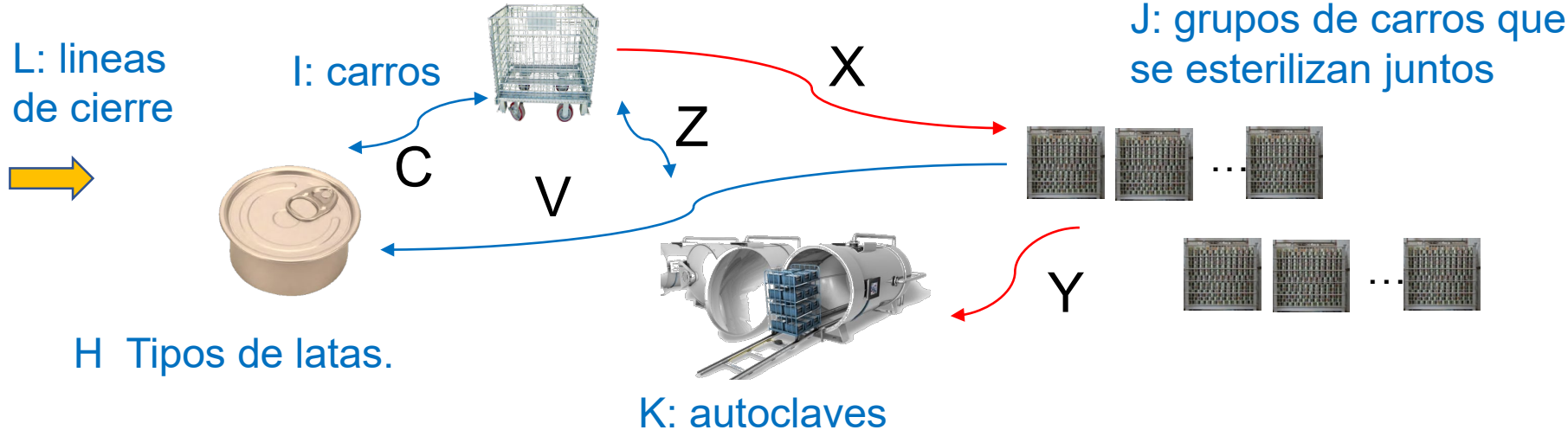


Información dada por el MES en tiempo real

Latas y carros que se prevee lleguen en el horizonte



## Conjuntos



- ✓ ¿Como asignar carros a grupos?
- ✓ ¿Como asignar grupos a esterilizadores?
- ✓ ¿Cuando debe operar cada esterilizador?

## VARIABLES BINARIAS 0/1

- $X_{i,j} = 1$  si el carro  $i$  pertenece al grupo  $j$
- $Z_{i,k} = 1$  indica que el carro  $i$  se procesa en el autoclave  $k$
- $Y_{j,k} = 1$  indica que el grupo  $j$  se esteriliza en el autoclave  $k$
- $V_{j,h} = 1$  el grupo  $j$  incluye un carro tipo  $h$
- $U_j = 1$  el grupo  $j$  se procesa
- $C_{ih} = 1$  el carro  $i$  tiene latas tipo  $h$

## VARIABLES REALES

- $s_j$  tiempo de comienzo del slot  $j$
- $d_j$  duración del slot  $j$
- $o_i$  tiempo previsto de llegada del carro  $i$
- $T_j$  Temperatura para el grupo  $j$

$$\sum_j X_{ij} \leq 1$$

$$\sum_j X_{ij} \geq U_j \cdot \gamma$$

$$\sum_j X_{ij} \leq U_j \cdot \Gamma$$

$$\sum_k Y_{jk} = 1$$

$$\sum_{\mathcal{H}} V_{jh} \leq \zeta$$

$$\sum_{\mathcal{H}} \hat{V}_{jh} = 1$$

$$Z_{ik} \leq \sum_{\mathcal{L}} Q_{il} \cdot L_{lk}$$

$$s_j \geq o_i - M(1 - X_{ij})$$

$$s_j \leq o_i + \theta + M(1 - X_{ij})$$

$$o_i \geq HR - M \left( \sum_j X_{ij} \right)$$

$$d_j \geq e_i - M(1 - X_{ij})$$

$$d_j \leq e_i + \delta + M(1 - X_{ij})$$

$$d_j = \sum_{\mathcal{H}} e_h \cdot \hat{V}_{jh}$$

$$T_j \geq T_i - M(1 - X_{ij})$$

$$T_j \leq T_i + M(1 - X_{ij})$$

$$T_j = \sum_{\mathcal{H}} T_h \cdot \hat{V}_{jh}$$

$$s_j \leq s_{j'} \text{ si } j < j'$$

$$s_j + d_j + (\psi + \xi) \cdot U_j \leq s_{j'} + M(2 - Y_{jk} - Y_{j'k}) \text{ si } j < j'$$

$$s_j \geq \tau_k Y_{jk}$$

Restricciones lógicas de operación

Balances

Restricciones temporales

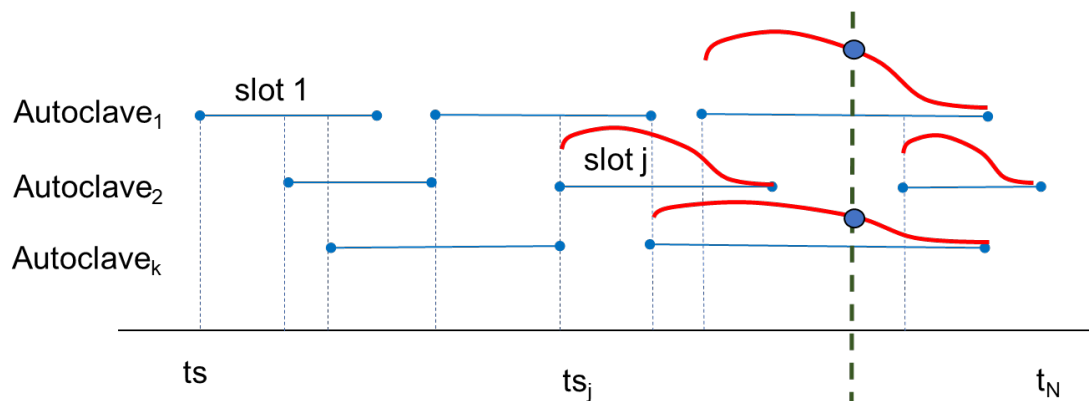
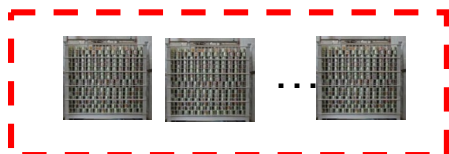
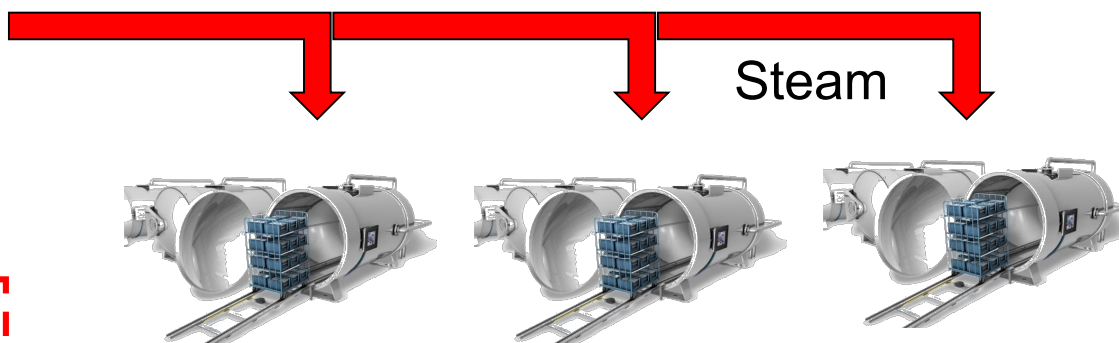
...

Tipos de lata ordenados por rigor: si  $h1 < h2$  los carros de tipo  $h1$  pueden esterilizarse en una receta de  $h2$ , pero no al revés

Precedencia Predefinida  
slots ordenados en tiempo

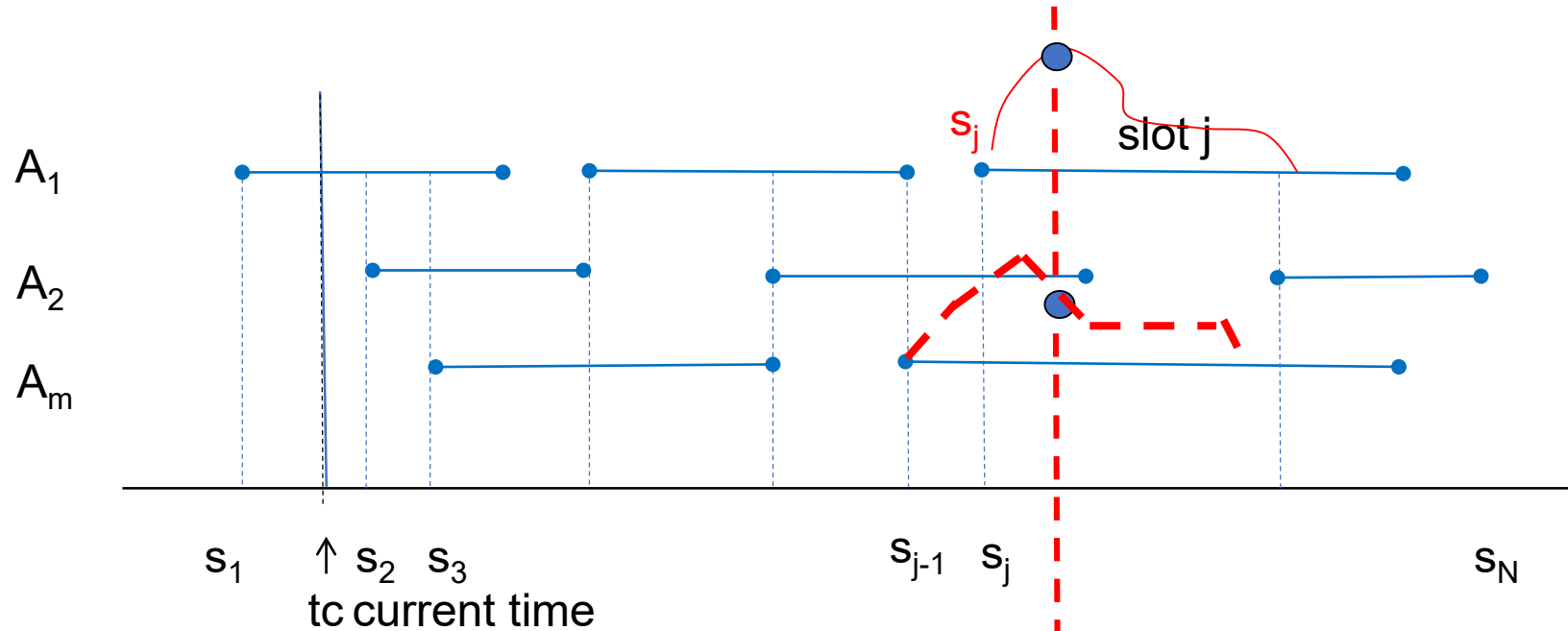
Mantener la demanda total de vapor dentro de un límite máximo

Garantiza tiempos de ciclo



En cada instante de tiempo el consumo máximo de vapor debe estar por debajo del valor máximo admisible.

# Recursos compartidos: limitación de uso



## Formulación con tres bases de tiempo:

- ✓ Problema de asignación con precedencia predefinida en tiempo continuo
- ✓ Base de tiempo fija e irregular para describir los perfiles de consumo de las recetas por tramos
- ✓ Restricciones globales de recursos compartidos sobre una base de tiempos discreta sincronizada con la continua

Se define una base de tiempos discreta adicional  $tm_m$  sobre el horizonte de predicción para imponer restricciones de consumo de vapor

Se aproximan los perfiles de consumo de vapor de cada receta por tramos rectos en una base irregular móvil

$tm_m$

60 carros/hora  
llegando  
aleatoriamente

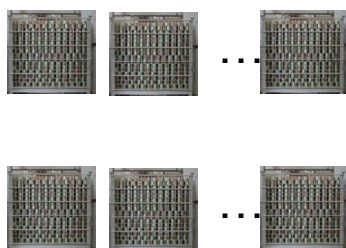


4 tipo de latas

Tiempos de ciclo

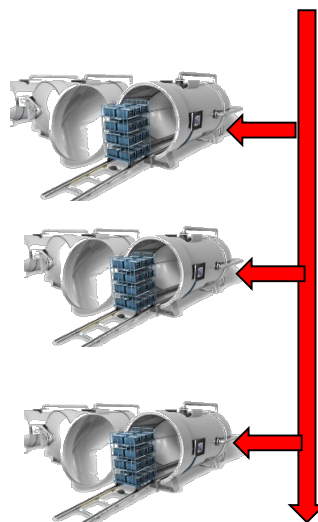
tipo1: 85 min. tipo2: 110  
tipo3: 120 tipo4: 175

Hasta 7  
carros por  
esterilizador



100 min. tiempo máximo de  
espera

3 esterilizadores



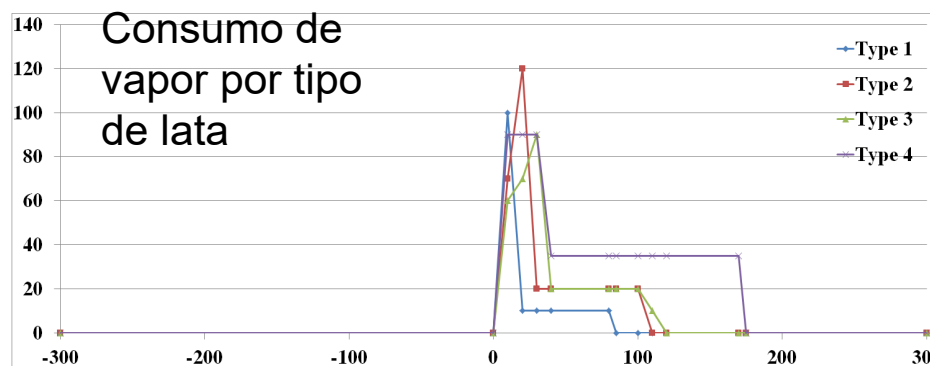
Máximo consumo  
de vapor 160/180  
Ton/h

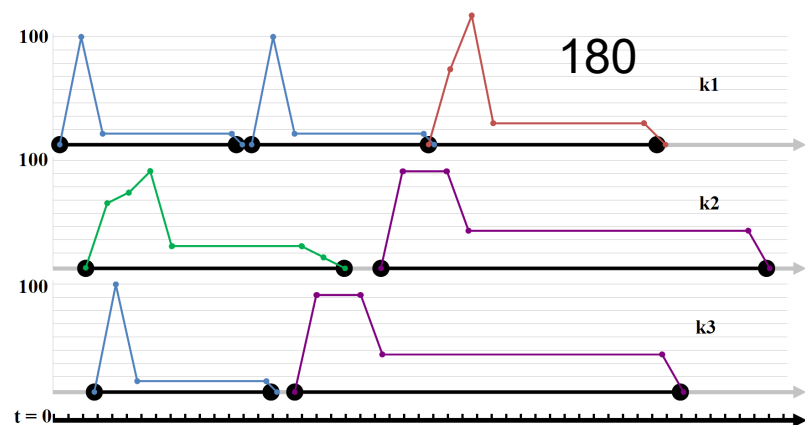
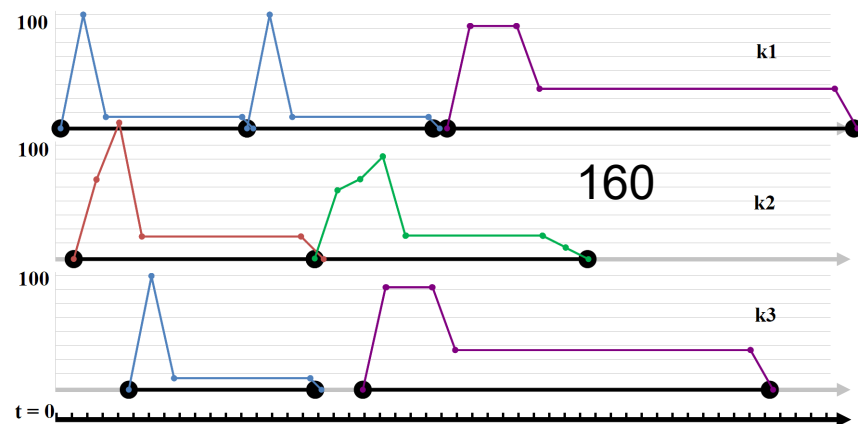
Vapor

Minimizar el numero  
de lotes

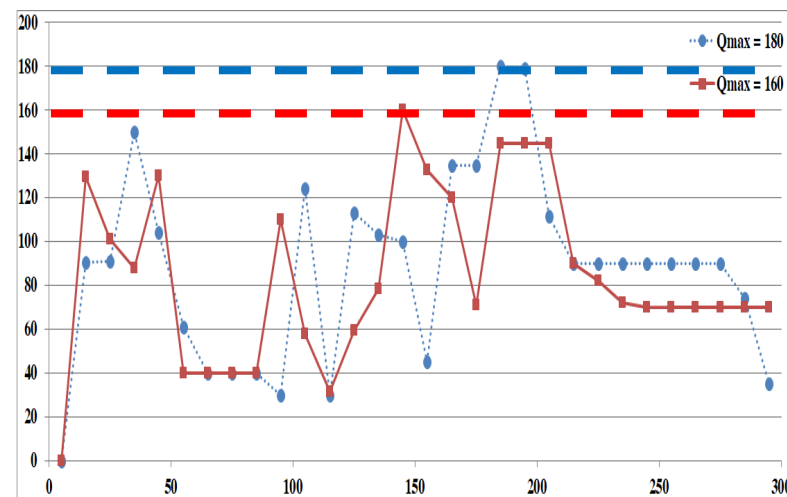
$$\min J = \sum_j \beta s_j + \gamma d_j$$

Procesar los  
carros lo antes  
posible





7 slots  
Horizonte de predicción 5 horas  
Base discreta 10 min.



2 ejercicios con consumos máximos de vapor 160 y 180 Ton/h

GAMS, con Cplex 12.9.0.0.  
CoreTM i7 ~ 1.5 min

Problema MILP

## Precedencia **general**

- 153 336 restricciones
- 76 reales
- 5 655 binarias

Sin solución factible a los 10 minutos

## Precedencia **predefinida**

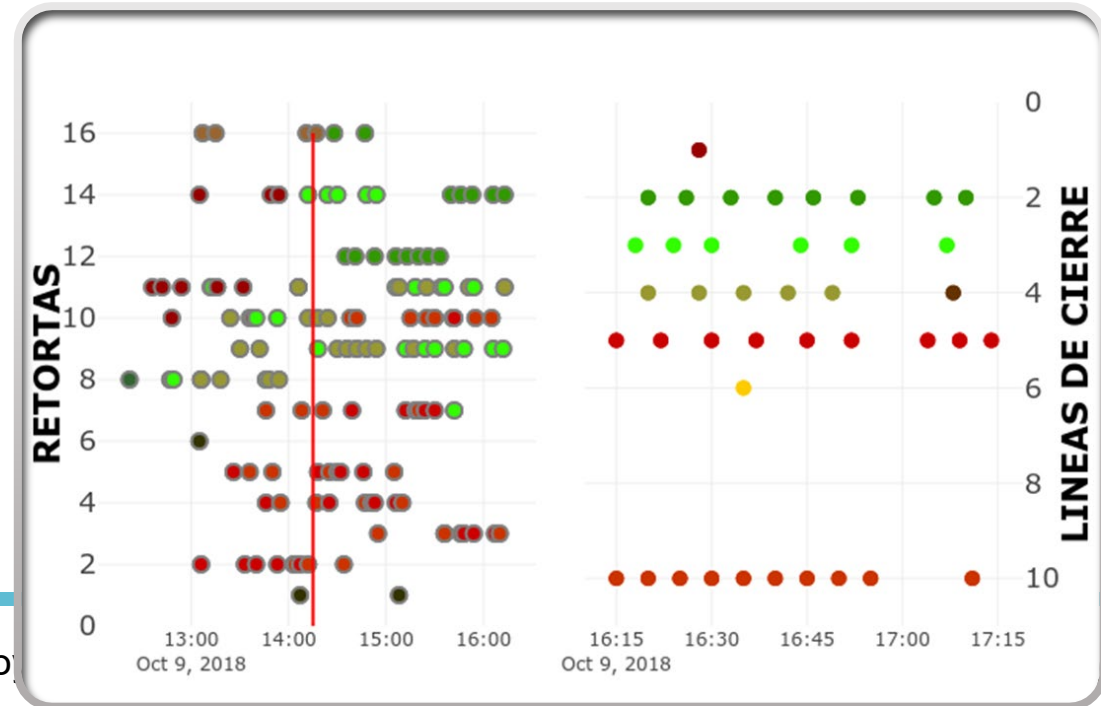
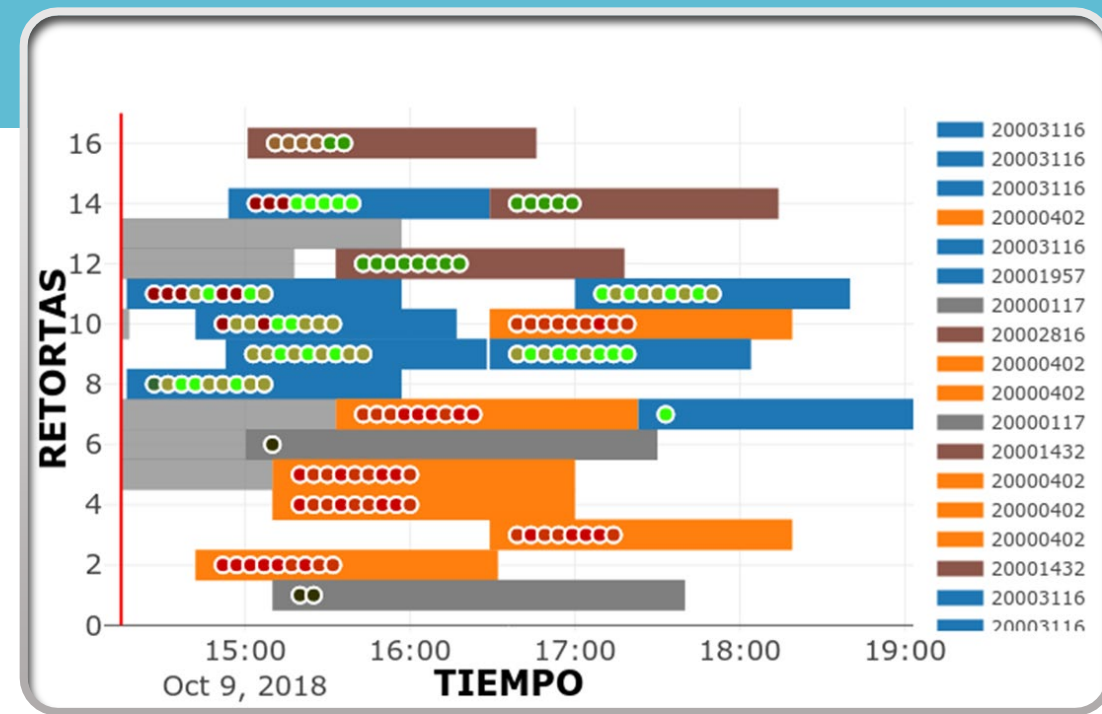
- 136 584 restricciones
- 76 reales
- 5 030 binarias

Solución a los 24 segundos al 0% gap

Proceso en la planta de envasado de atún

16 esterilizadores  
10 líneas de cierre  
30 recetas

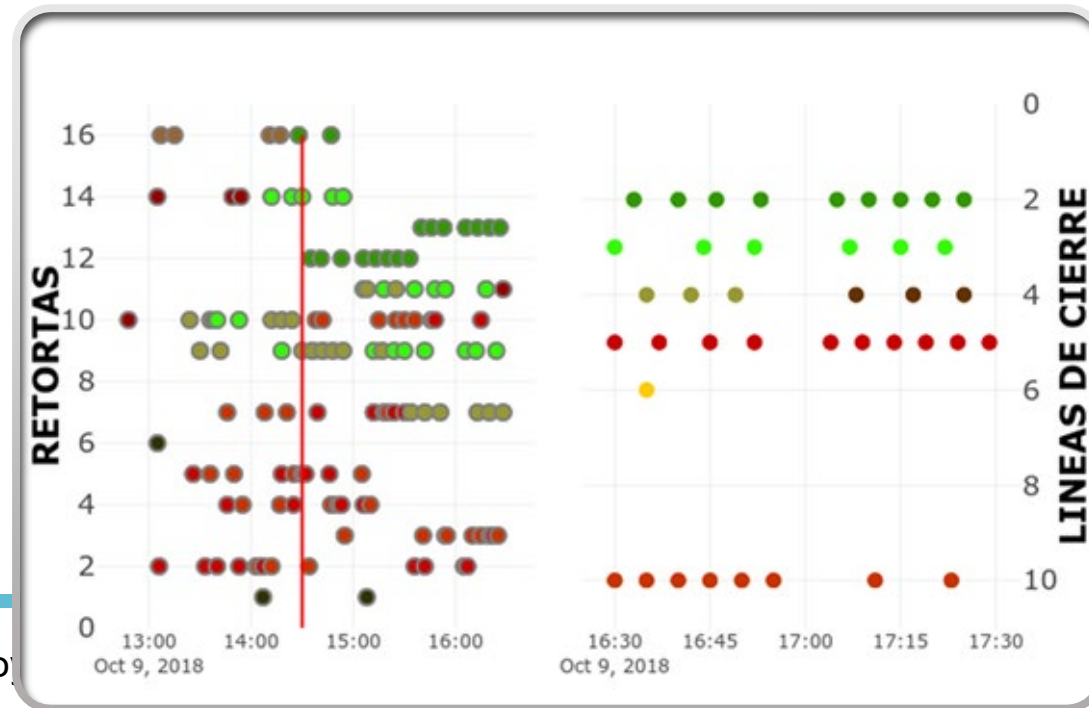
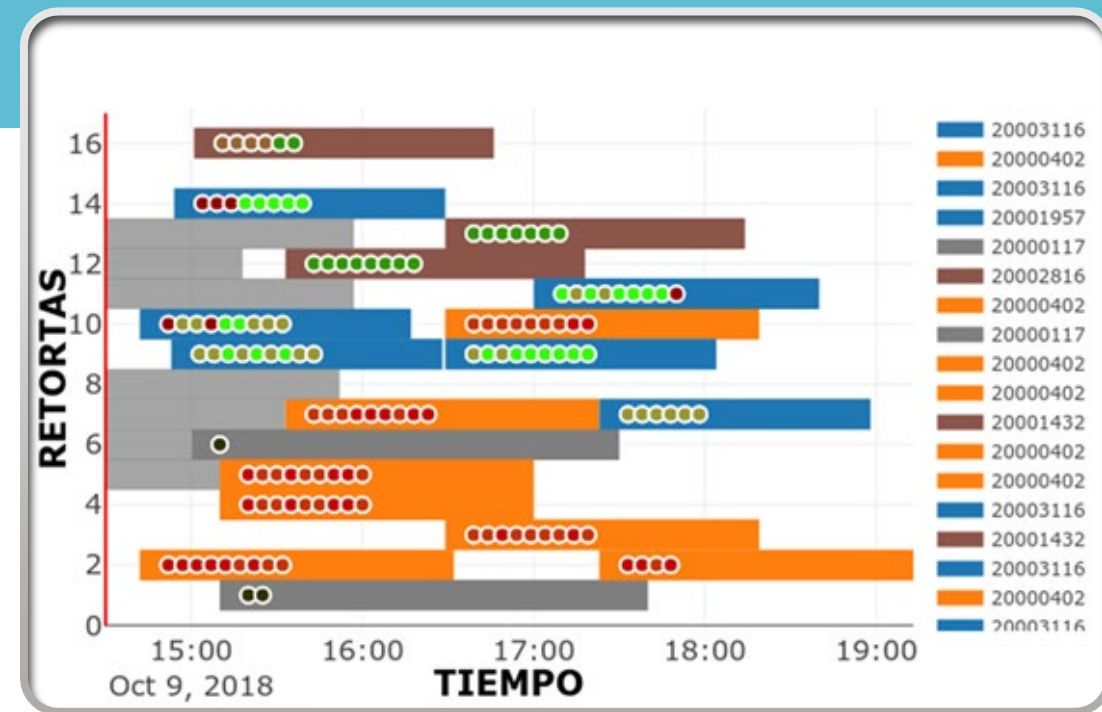
Min MK



16





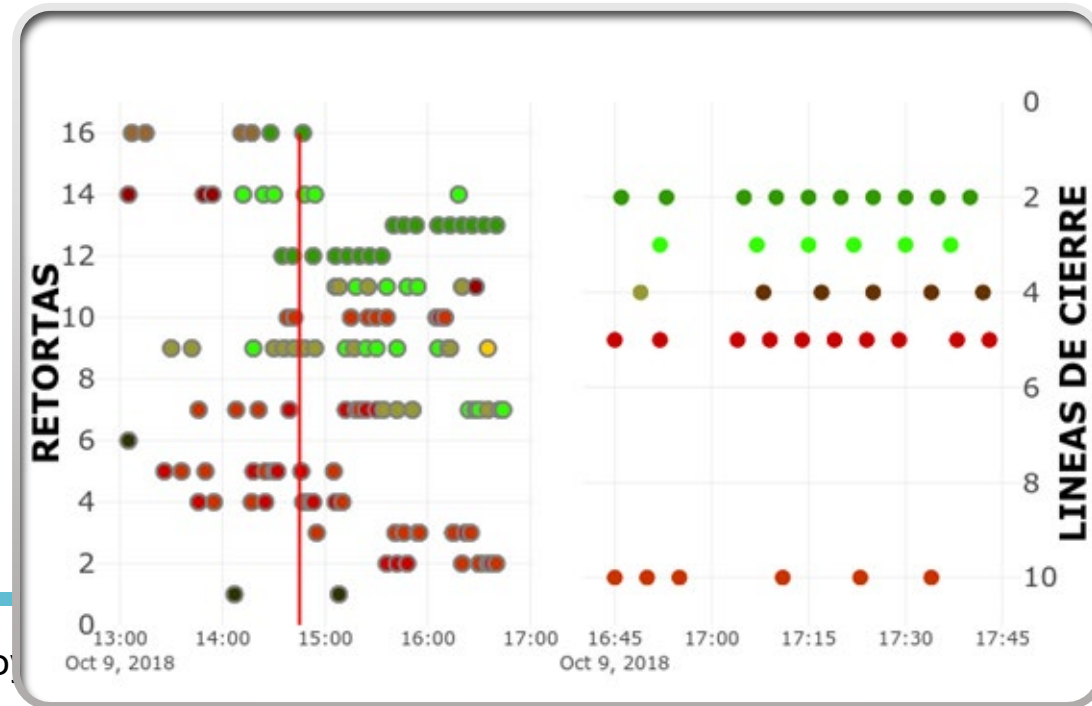
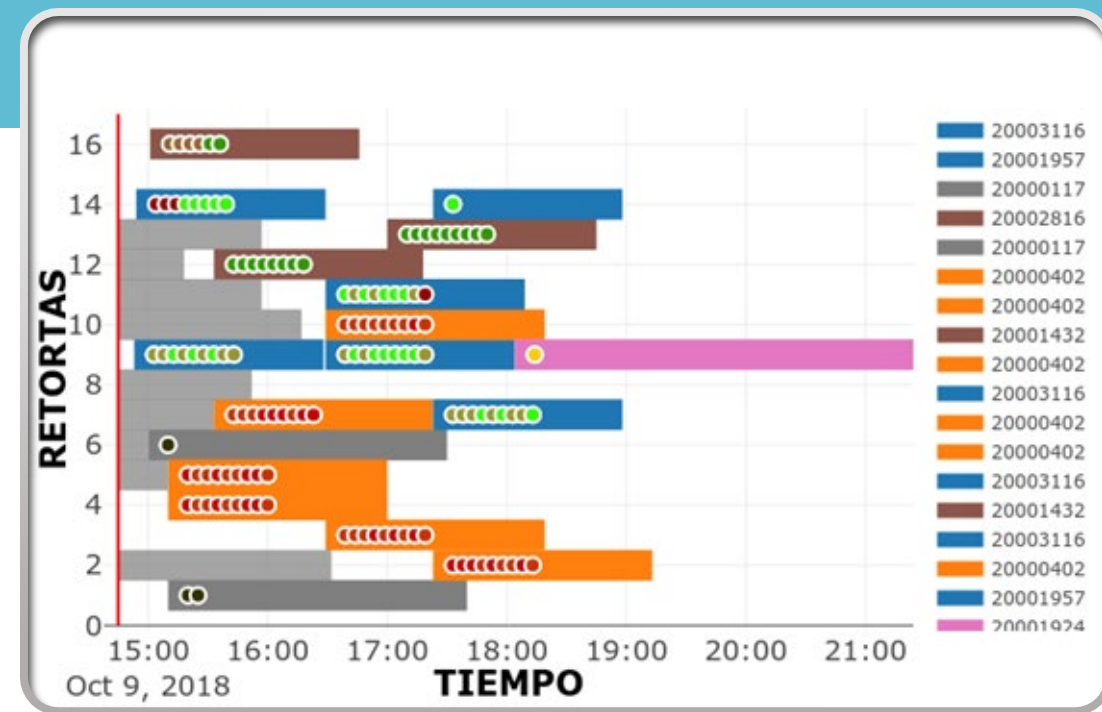


Workshop final del Pro

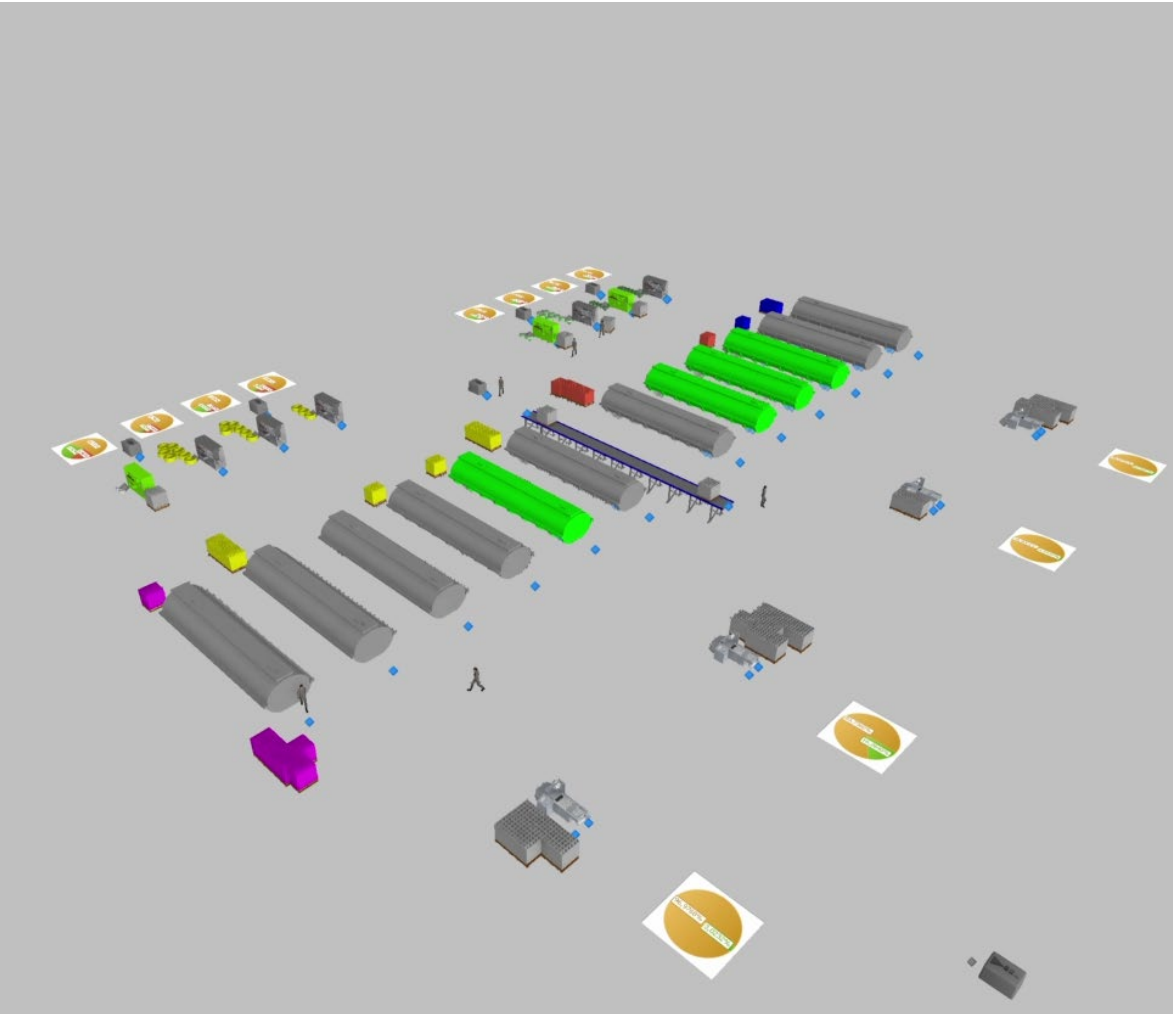


El algoritmo se resuelve en tiempo real a intervalos periódicos de 15 minutos, incorporando el estado actual de la planta y las nuevas predicciones de llegada de carros, de forma parecida a como hace el control predictivo.

Horizonte de predicción tres horas, horizonte robusto dos horas. Asignación para los carros que ya han llegado y flexibilidad para los que están previstos mas allá de un horizonte



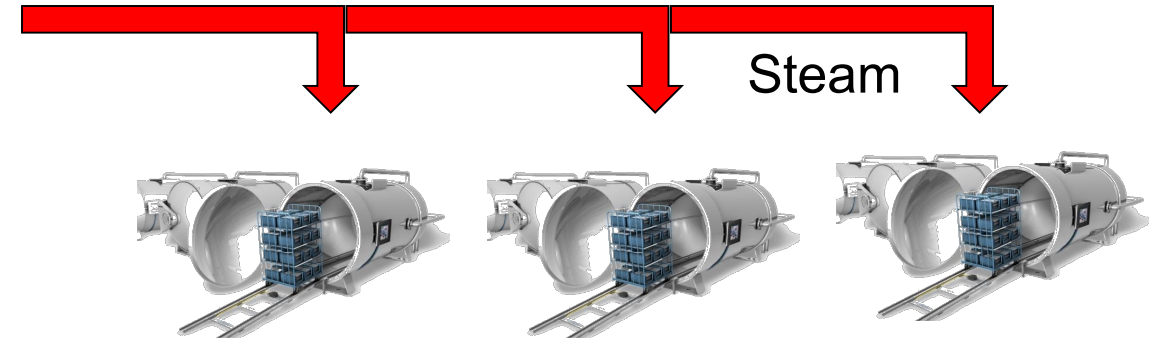
# Simulación del proceso en Simio



Scheduling on-line  
GAMS

# Recursos compartidos: Enfoque 2: Tiempos de ciclo variables

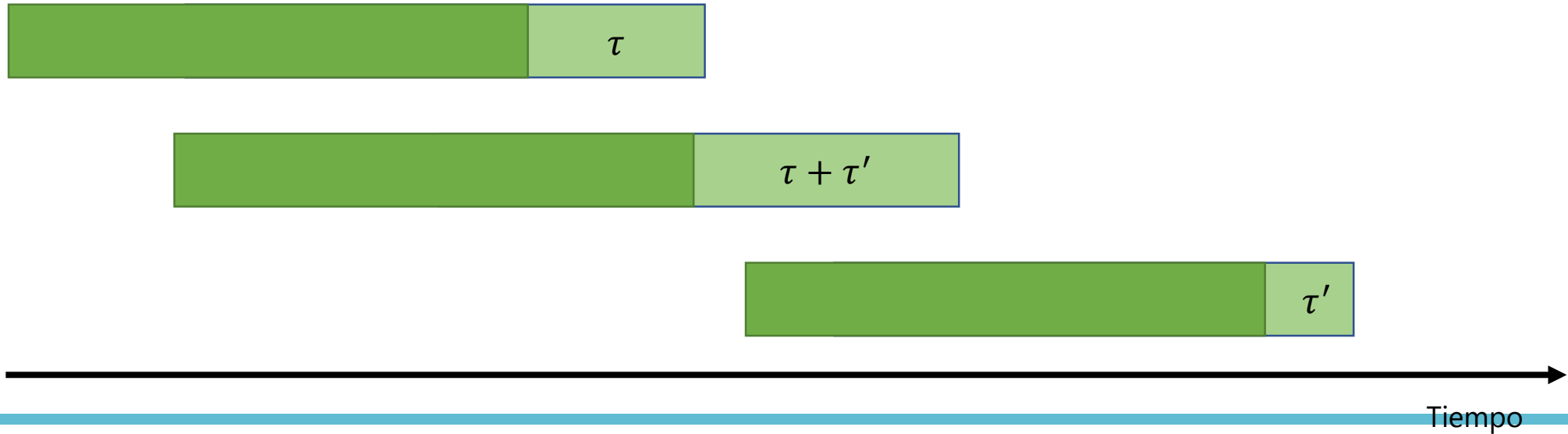
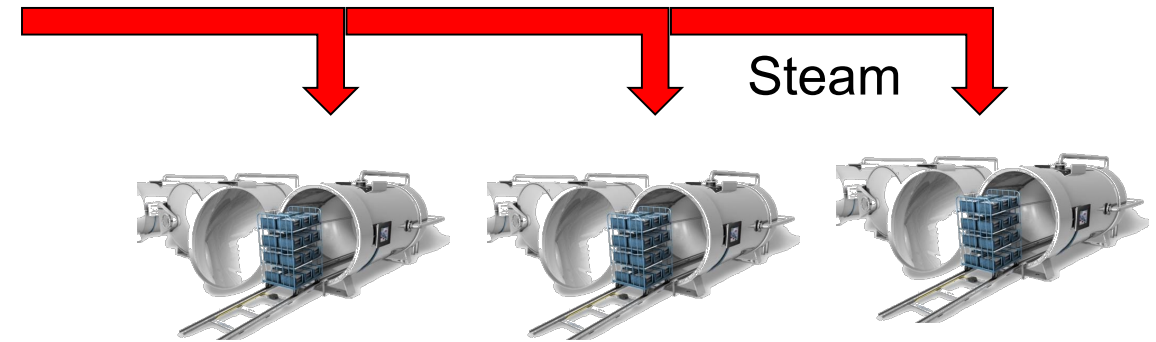
Si no hay solapamiento, el tiempo de ciclo es constante para cada esterilizador



Tiempo

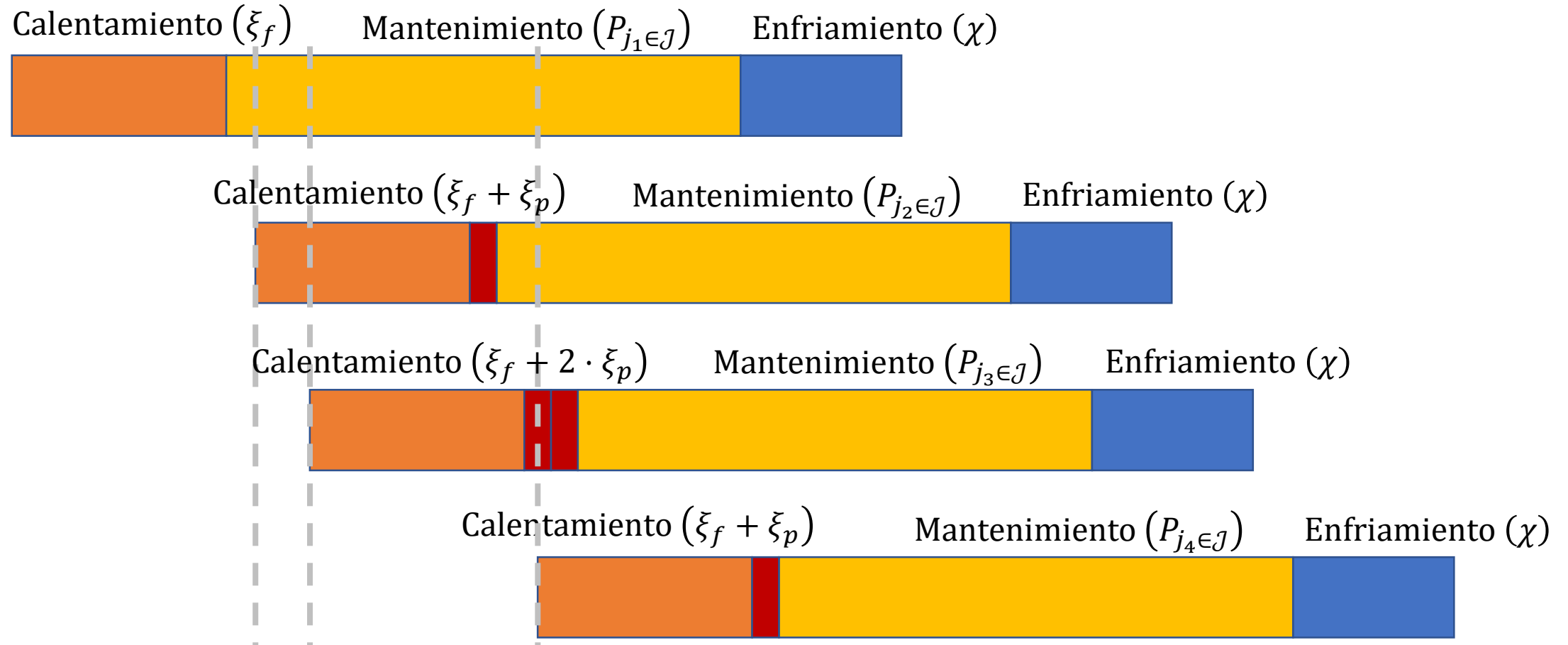
# Recursos compartidos: Enfoque 2: Tiempos de ciclo variables

Si hay solapamiento, el tiempo de ciclo de los esterilizadores involucrados crece dependiendo del mismo



# Recursos compartidos: Enfoque 2: Tiempos de ciclo variables

Desaparecen las bases de tiempo discretas y del perfil de vapor y se sustituyen por nuevas variables y ecuaciones



# Enfoque 2: Tiempos de ciclo variables

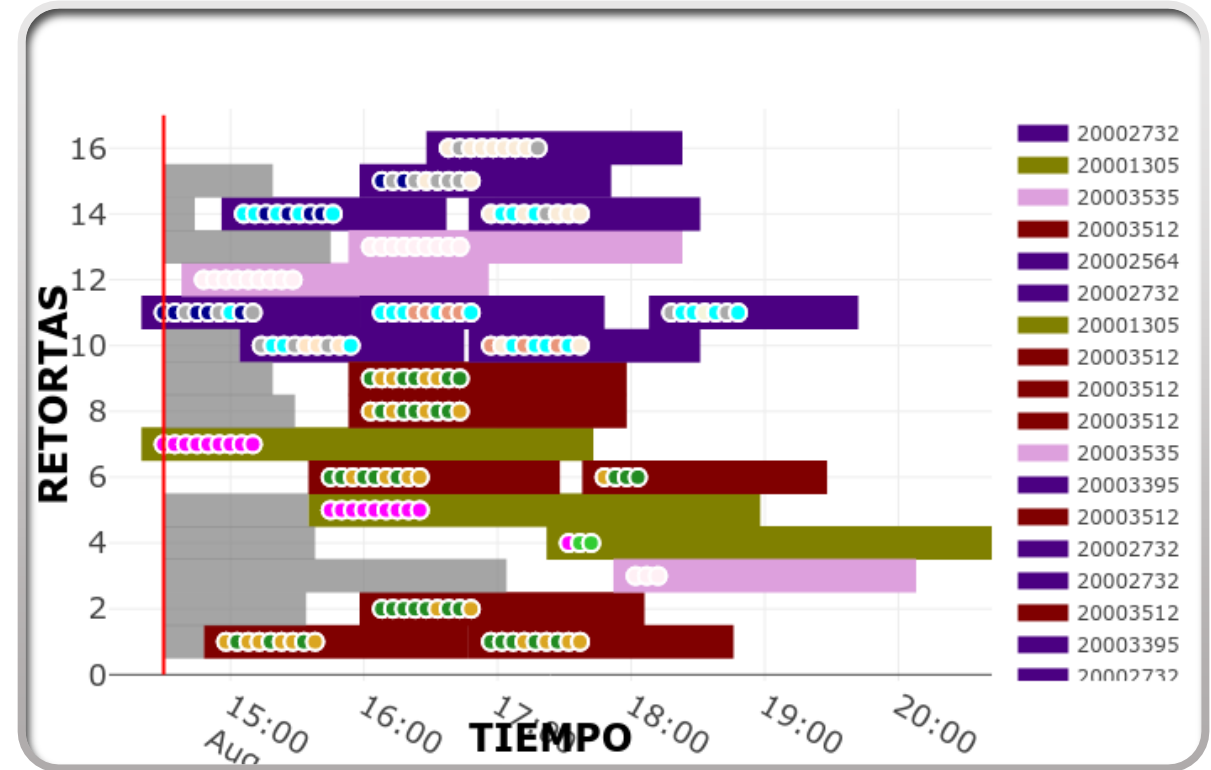
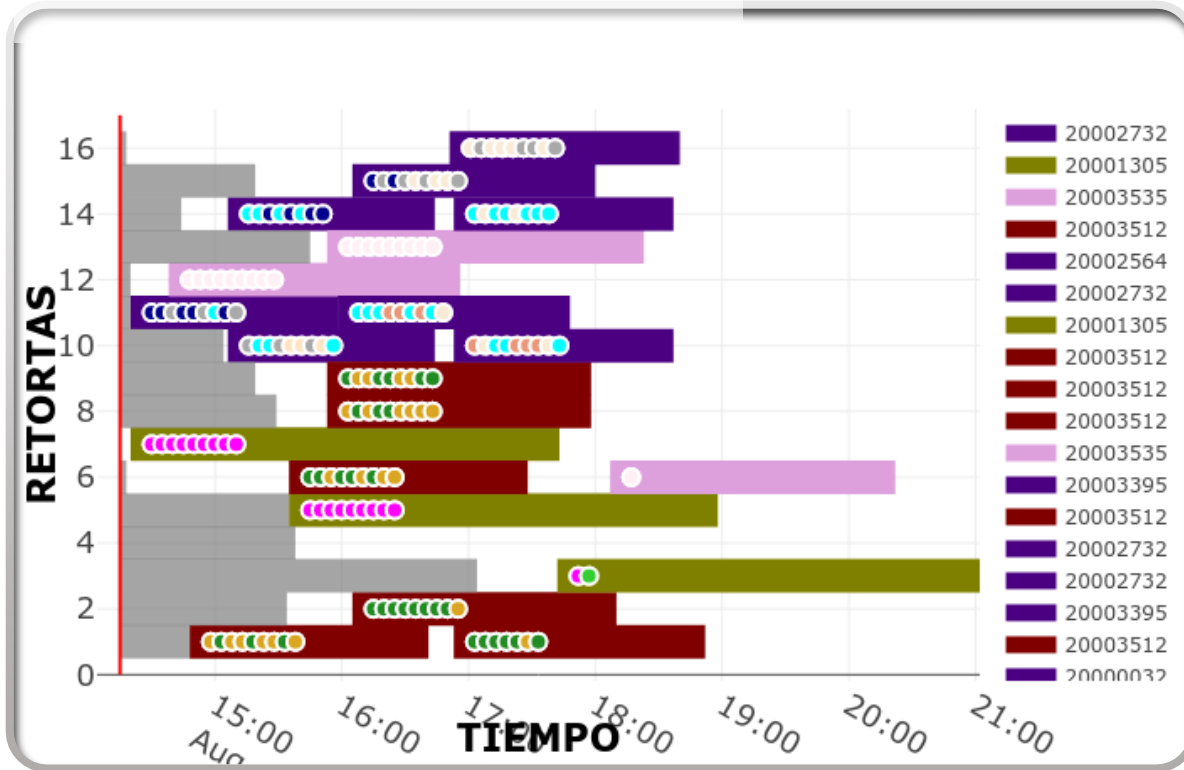
## Precedencia predefinida

- 138 624 restricciones
- 101 reales
- 5 285 binarias

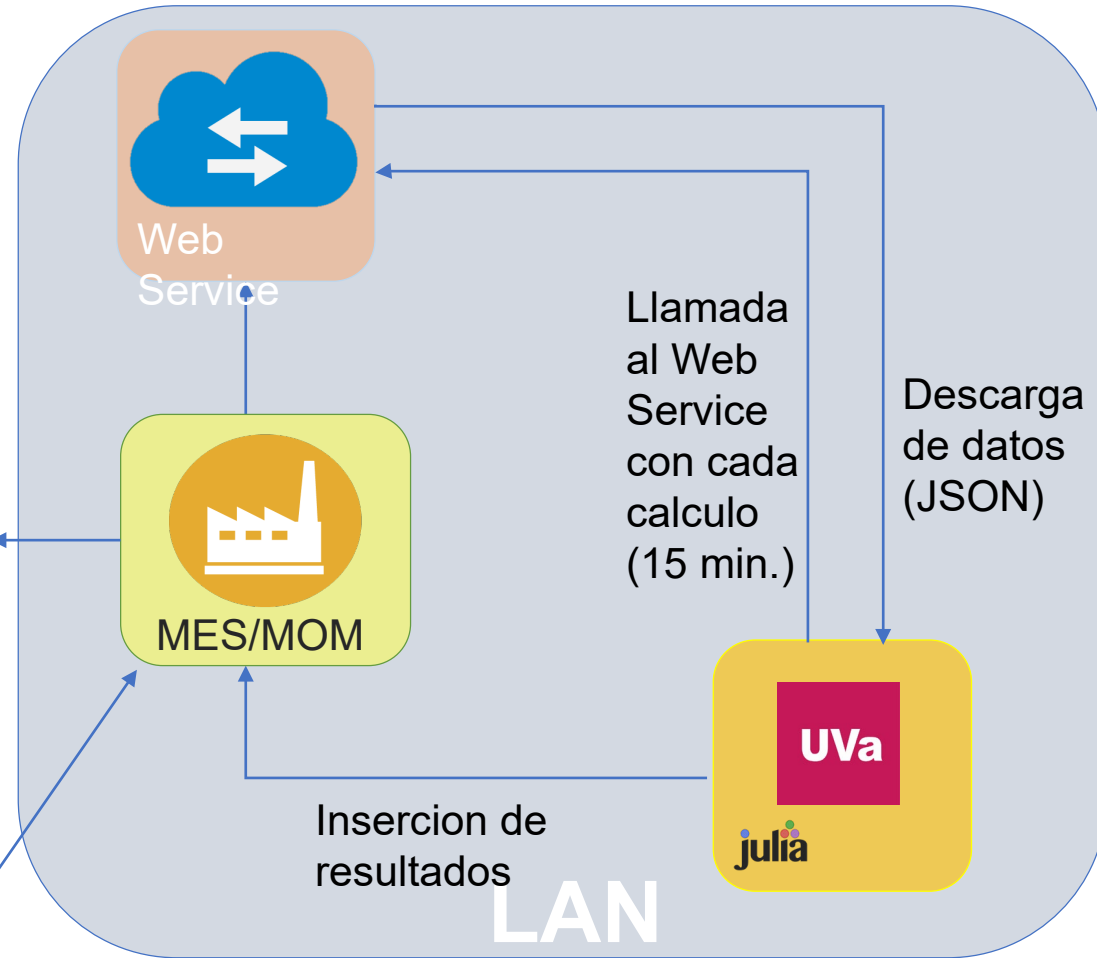
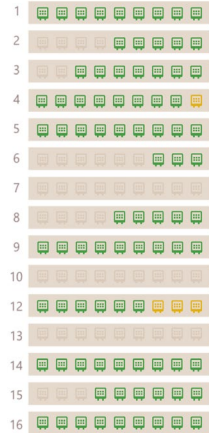
MILP Solución a los 39 segundos al 0% gap

Min MK

## Ejemplo

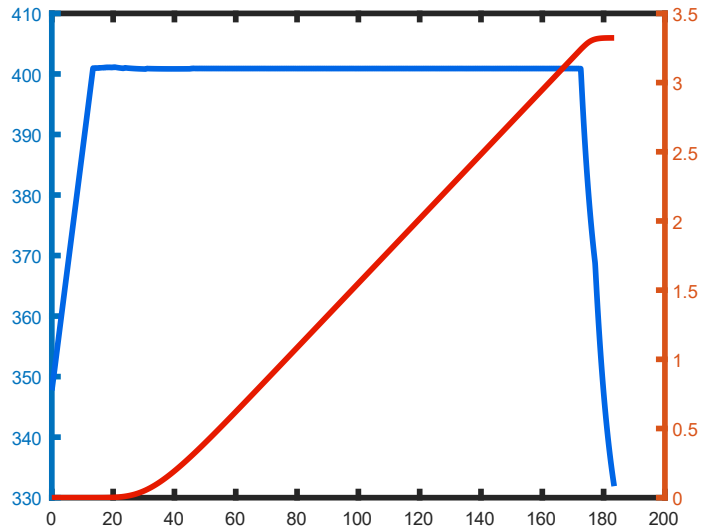


## INTEGRACIÓN

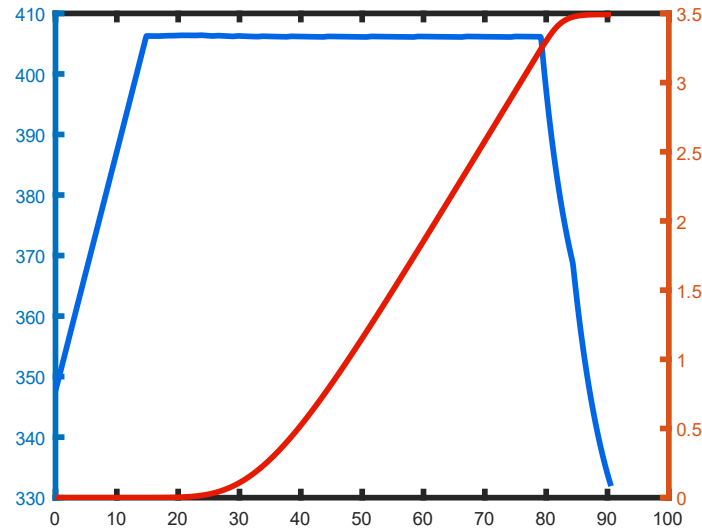




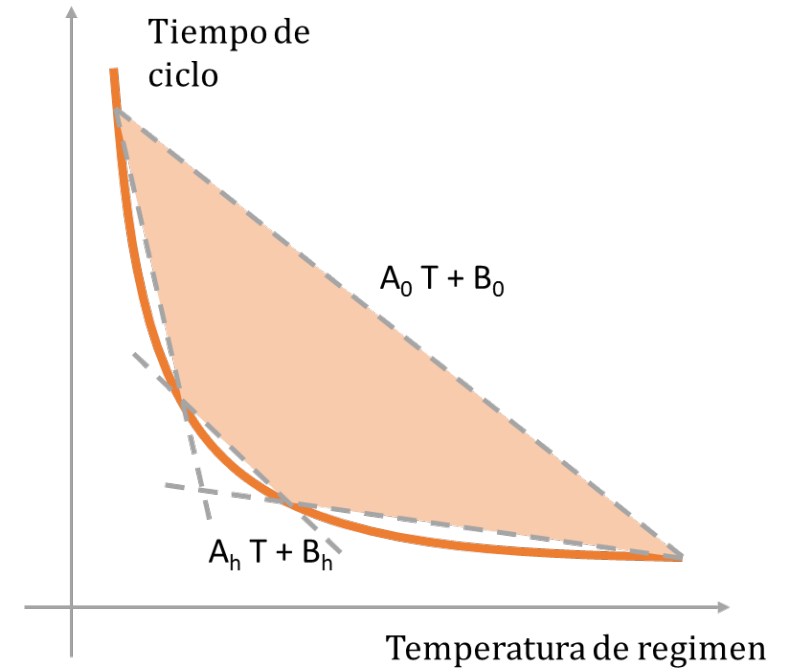
# Integración scheduling / control batch

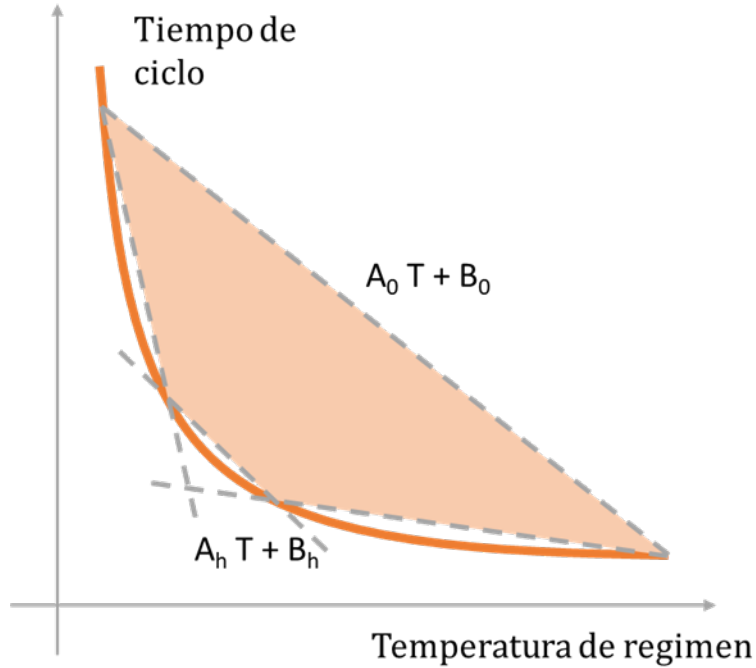


— Temperatura  
— Lethalidad

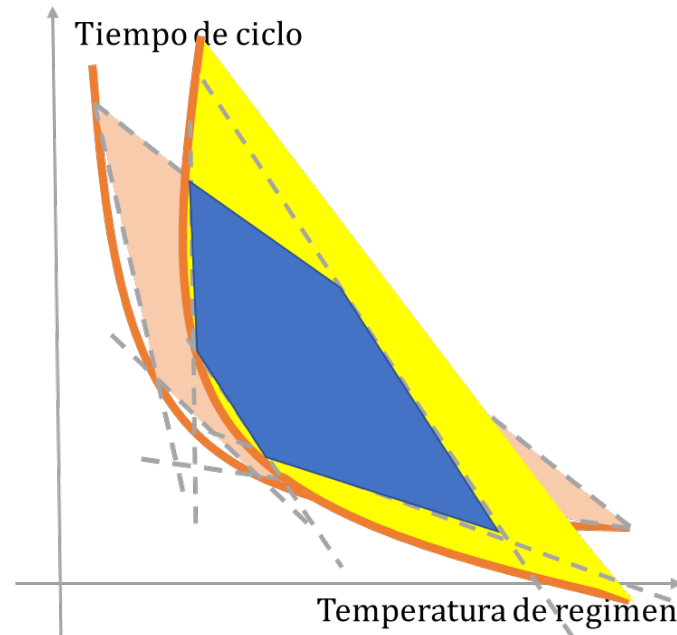


Se puede alcanzar la misma letalidad den distintos tiempos operando a distintas temperaturas, color, energía,..





Requiere aprobación de las nuevas recetas

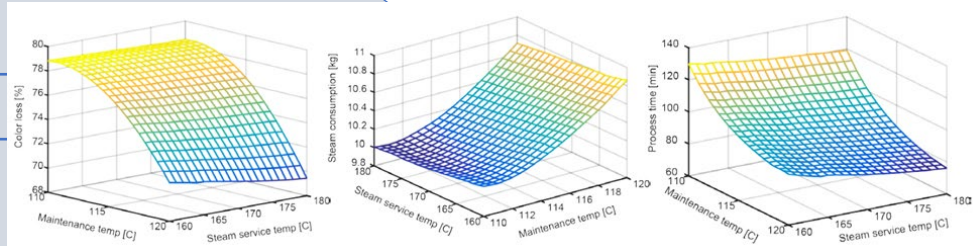
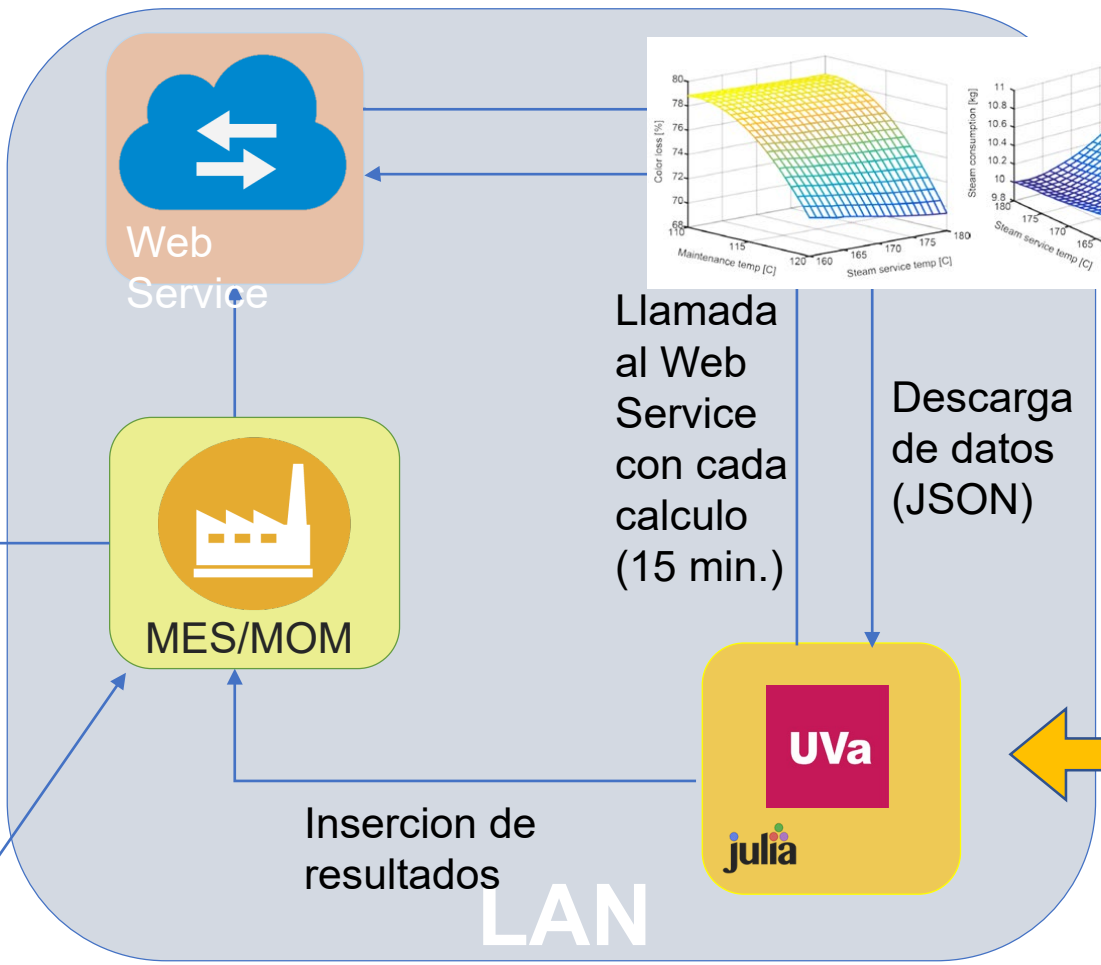
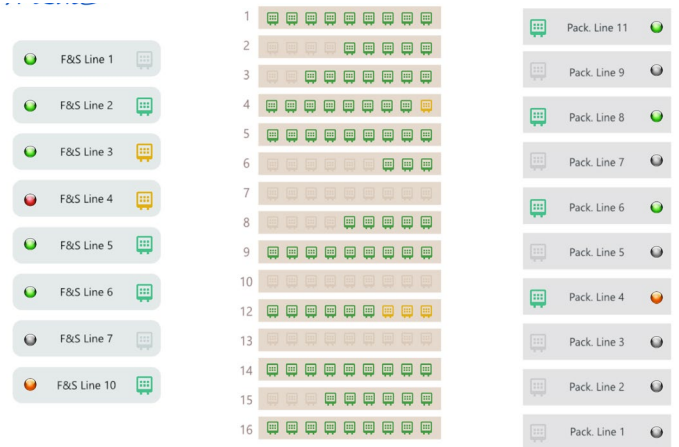


Región de operación admisible con distintas recetas

Se puede trabajar en distintos puntos de operación de los autoclaves (cambiar dinámicamente la receta) en función del objetivo del momento:  
Minimizar makespan, mejorar color, ahorrar energía,...

Parámetros del modelo quedan libres como variables en nuevas ecuaciones incorporadas al modelo

# INTEGRACIÓN



- ✓ Scheduling en lazo cerrado adaptándose al estado del proceso
- ✓ En tiempo continuo
- ✓ Considerando recursos compartidos
- ✓ Integrado la operación de las unidades batch
- ✓ Probado en una instalación industrial relevante

Palacín, Carlos G., Méndez, Carlos A., and de Prada, Cesar (May 2019). "Slots Startup Synchronization with Shared Resources Dependency." In: **Chemical Engineering Transactions** 74, pp.1321–1326.

Palacín, C. G., J. L. Pitarch, Vilas C., and C. de Prada (2021). Integrating continuous-batch process dynamics with shared resources in closed-loop scheduling In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems (*under review*)

o Carlos Gómez Palacín, Carlos Vilas, Antonio A. Alonso, Jose Luis Pitarch, Cesar de Prada (2020). "Closed-Loop Scheduling in a Canned Food Factory". In IFAC-PapersOnLine. *21st IFAC World Congress*

o Palacín, Carlos G. and Cesar de Prada (Jan. 2019). "Optimal Coordination Of Batch Processes with Shared Resources." In: IFAC-PapersOnLine. *12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*

Carlos Gómez Palacín, Pablo Riquelme, Cesar de Prada, Scheduling óptimo de procesos batch de duración interdependiente, XL Jornadas de Automática, CEA-IFAC, paper 115., El Ferrol, 4-6 septiembre 2019

Optimal Scheduling and Operation of a Food Industrial Plant, G. P. Georgiadis, C. Ziogou, B. Mariño, D., M., C. G. Palacín, C. de Prada, C. Vilas, A. A. Alonso, M, C. Georgiadis, 12th EUROPEAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, ECCE12, EFCE, 15-19 September 2019, Florence, Italy. ID: 121

Slots startup synchronization with shared resources dependency, Carlos G. Palacín, Carlos A. Méndez, Cesar de Prada, 14th International Conference on Chemical and Process Engineering, IChEap 14, AIDIC, 26-29 May 2019, Bologna, Italy



Integrated plant-wide control and optimization for industry4.0



Gracias por vuestra atención

Workshop final  
20-21 junio, 2022