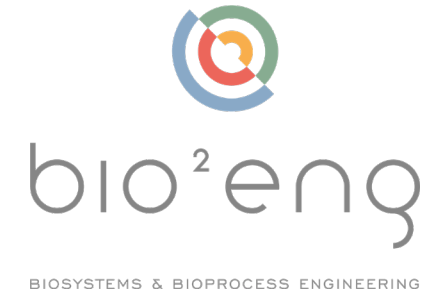




**Universidad
de Valladolid**



Integrated plant-wide control and
optimization for industry4.0



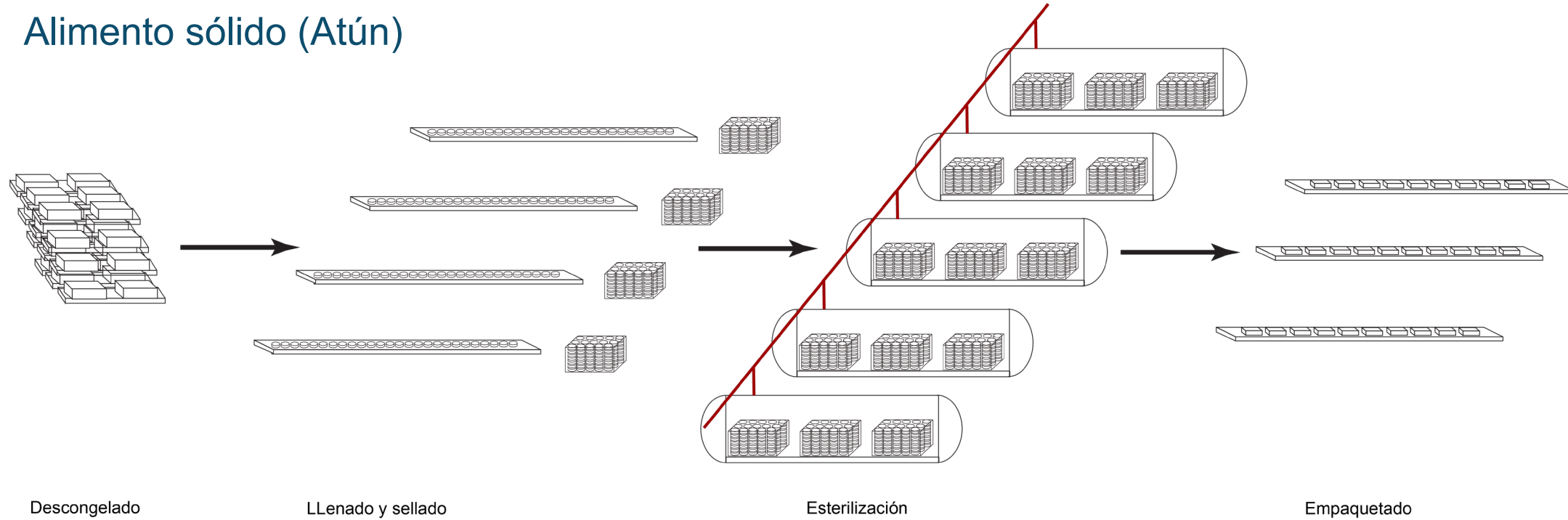
Optimización de la esterilización térmica de alimentos considerando variabilidad entre productos

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

- Descripción breve de la esterilización de alimentos envasados
 - ✓ Procesos en una conservera
 - ✓ Proceso de esterilización
- Variabilidad en el producto (lata)
 - ✓ Causas de la variabilidad
 - ✓ Caracterización de la variabilidad
- Optimización del proceso teniendo en cuenta variabilidad
 - ✓ Optimización multiobjetivo
 - ✓ Optimización dinámica basada en eventos

Proceso de esterilización

Alimento sólido (Atún)



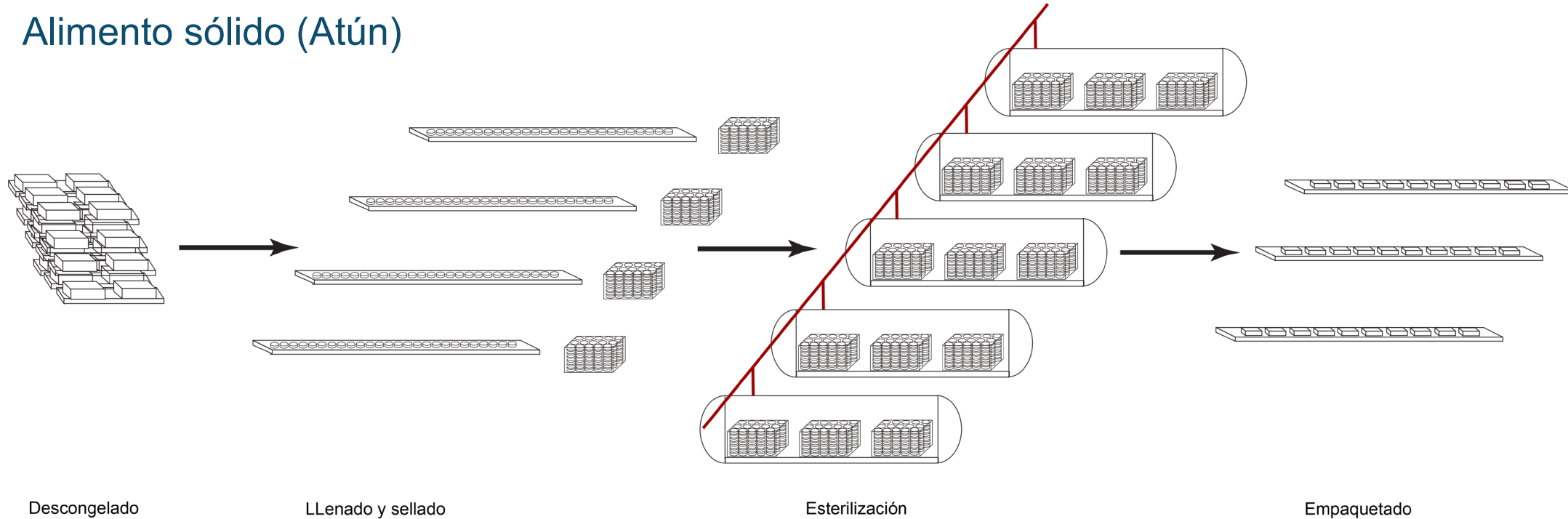
Descongelado

Llenado y sellado

Esterilización

Empaquetado

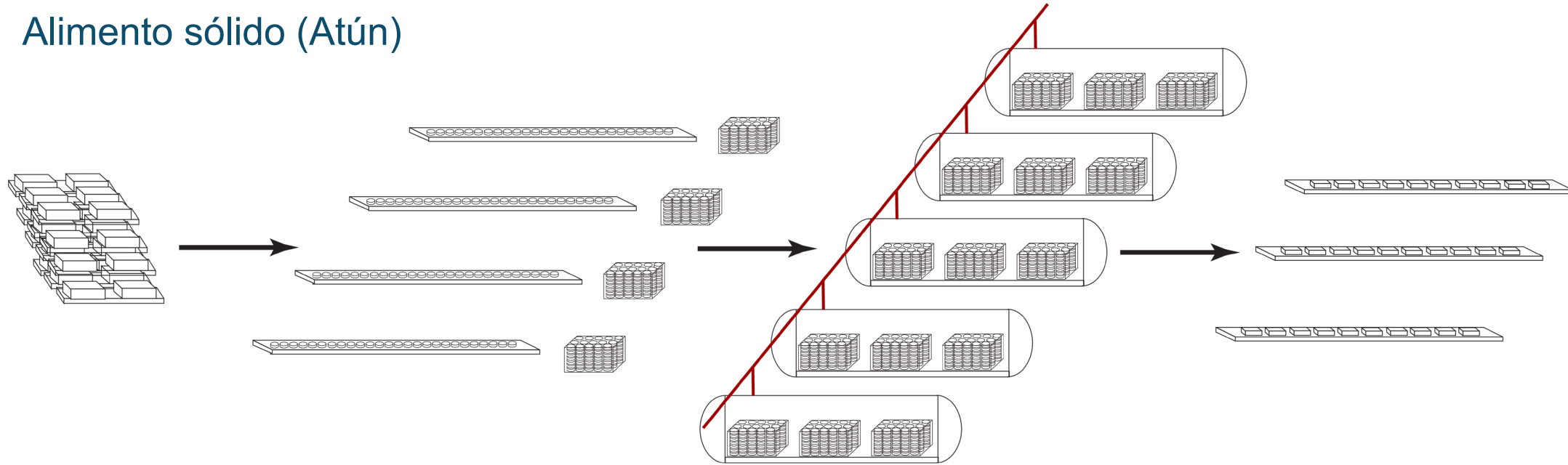
Alimento sólido (Atún)



Cuatro procesos principales:

- Descongelado
- Llenado y sellado
- Esterilización
- Empaquetado

Alimento sólido (Atún)



Descongelado



Llenado y sellado



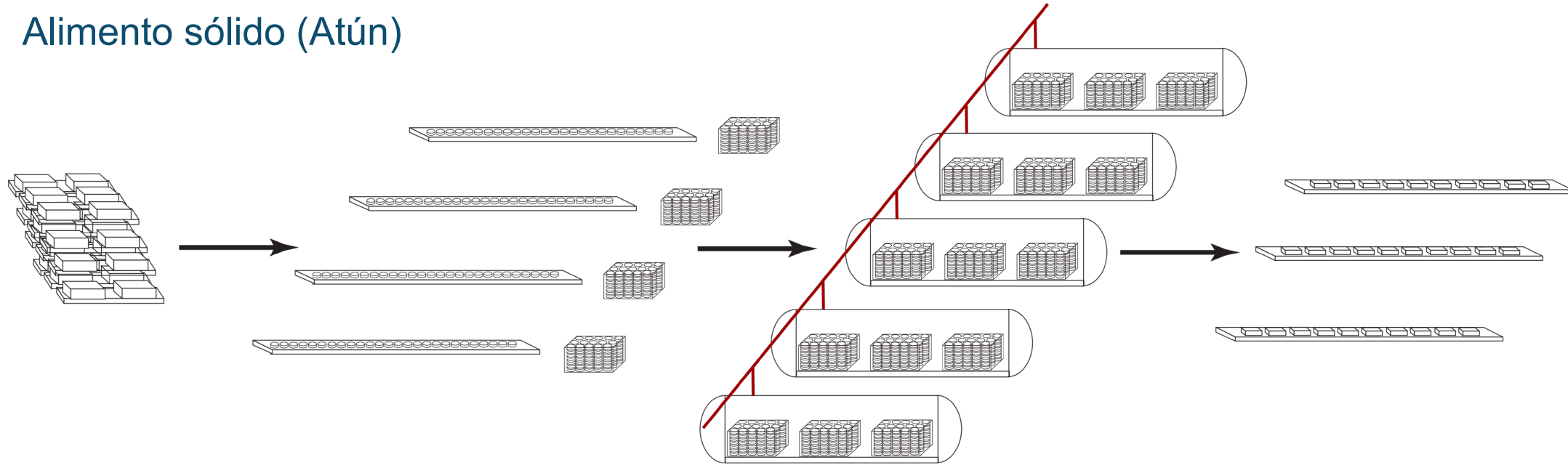
Esterilización

Empaquetado

Cuatro procesos principales:

- Descongelado
- Llenado y sellado
- Esterilización
- Empaquetado

Alimento sólido (Atún)



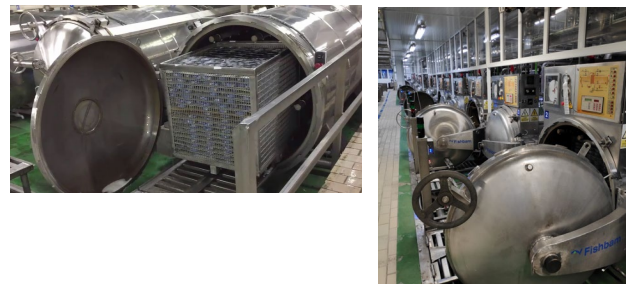
Descongelado



Llenado y sellado



Esterilización

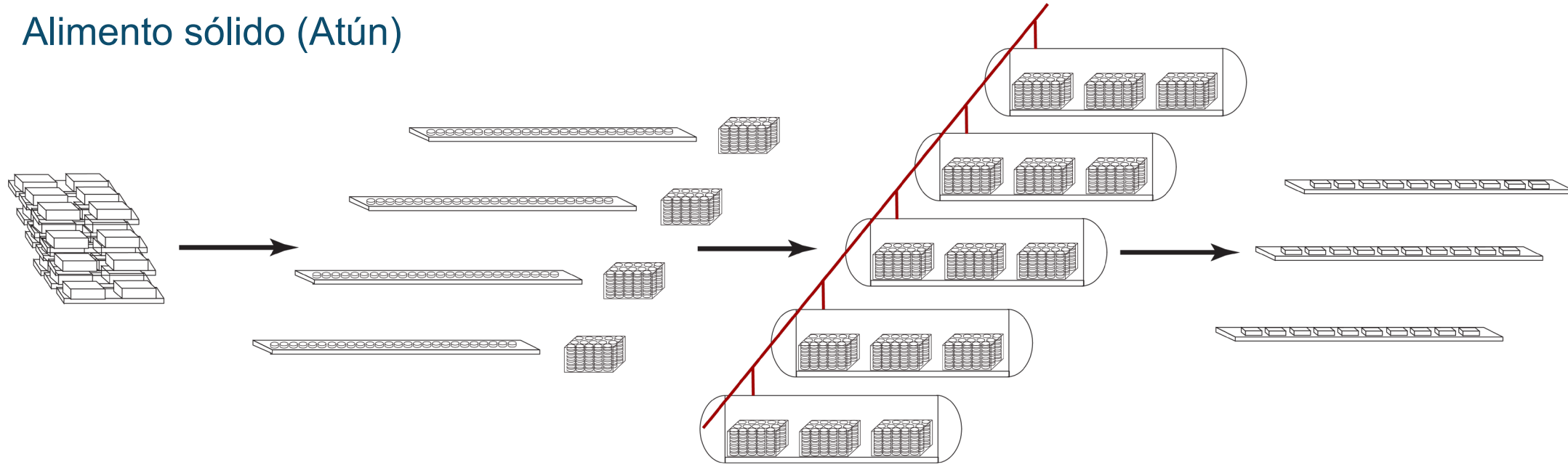


Empaquetado

Cuatro procesos principales:

- Descongelado
- Llenado y sellado
- Esterilización
- Empaquetado

Alimento sólido (Atún)



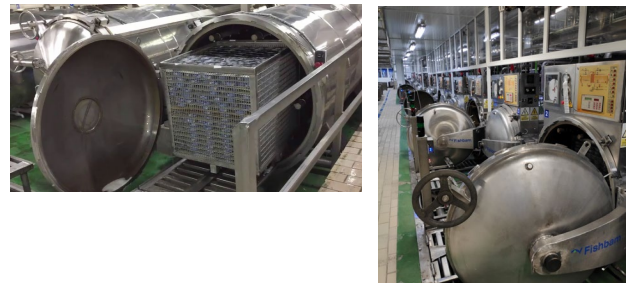
Descongelado



Llenado y sellado



Esterilización



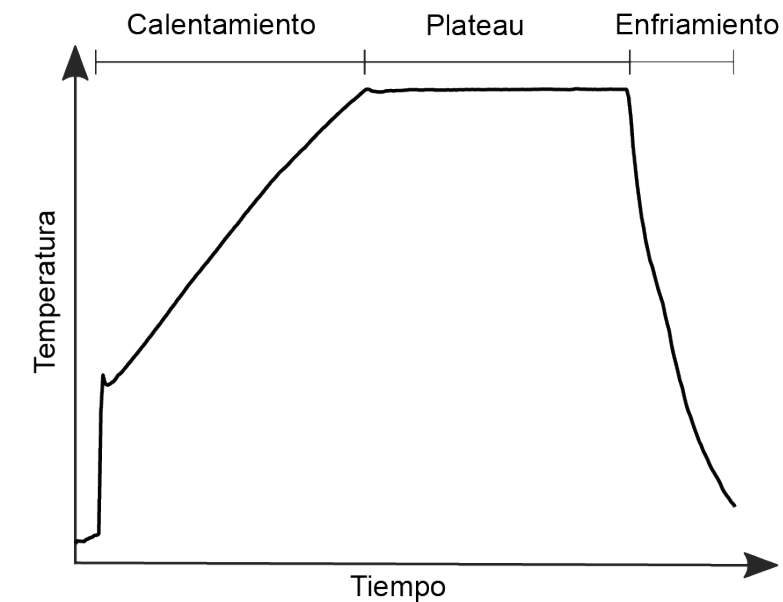
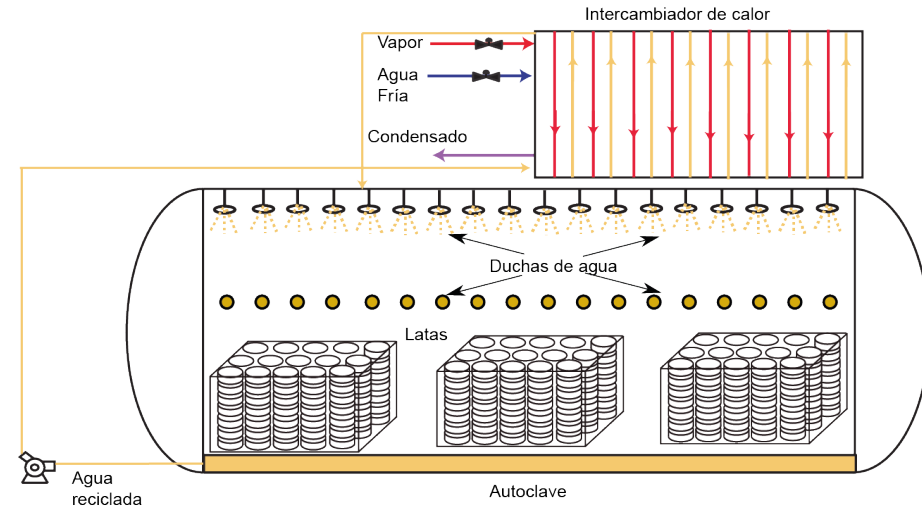
Empaquetado

Cuatro procesos principales:

- Descongelado
- Llenado y sellado
- Esterilización
- Empaquetado

El proceso

- ✓ Uso de vapor saturado para calentar agua (PHE)
- ✓ El agua entra en el autoclave (duchas) → Crece la temperatura
- ✓ Se matan las bacterias (efecto deseado)
- ✓ Se degrada la calidad del producto (efecto no deseado)
- ✓ Se consume energía y tiempo (efecto no deseado)
- ✓ Se enfría el autoclave → Agua fría en el PHE

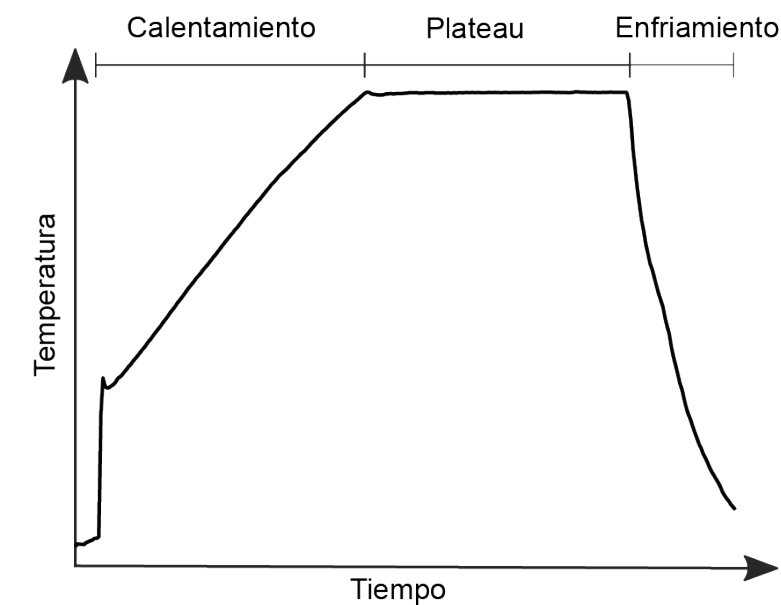
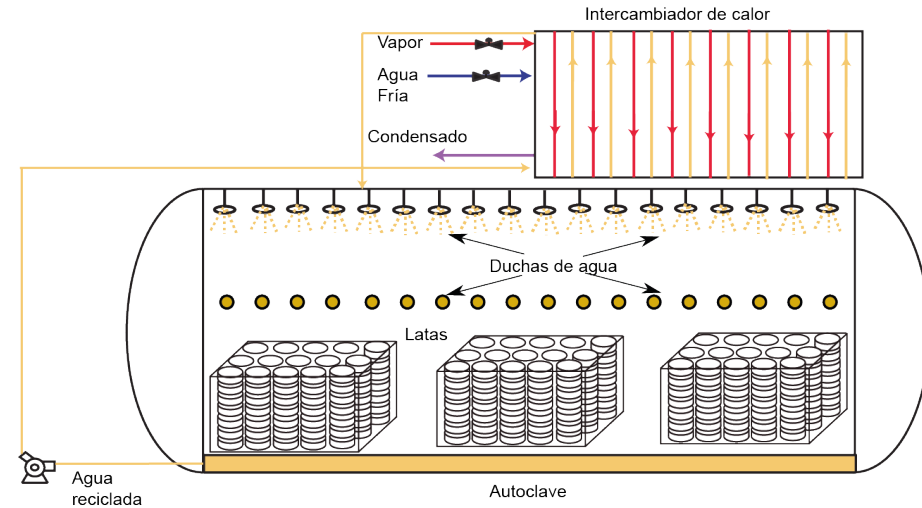


El proceso

- ✓ Uso de vapor saturado para calentar agua (PHE)
- ✓ El agua entra en el autoclave (duchas) → Crece la temperatura
- ✓ Se matan las bacterias (efecto deseado)
- ✓ Se degrada la calidad del producto (efecto no deseado)
- ✓ Se consume energía y tiempo (efecto no deseado)
- ✓ Se enfría el autoclave → Agua fría en el PHE

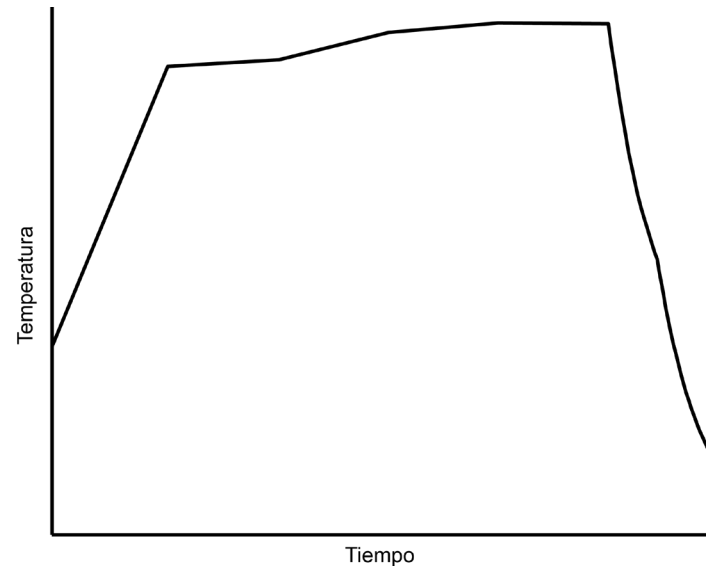
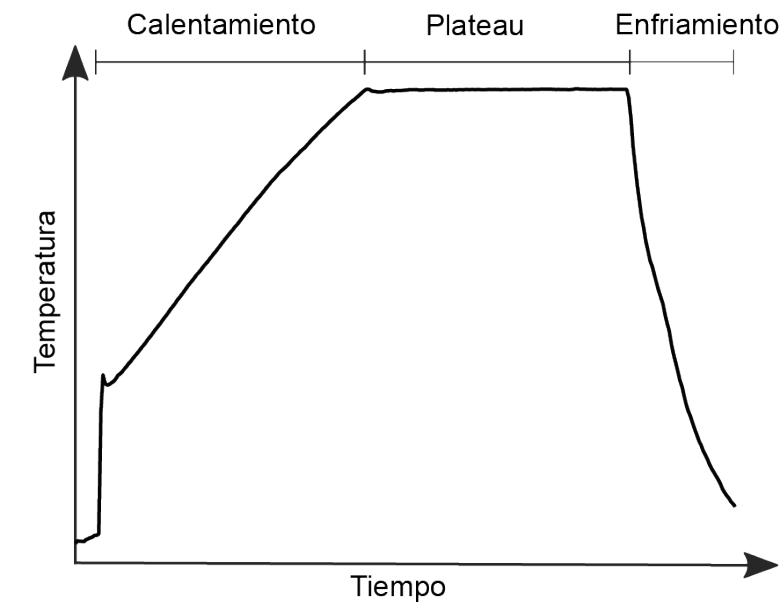
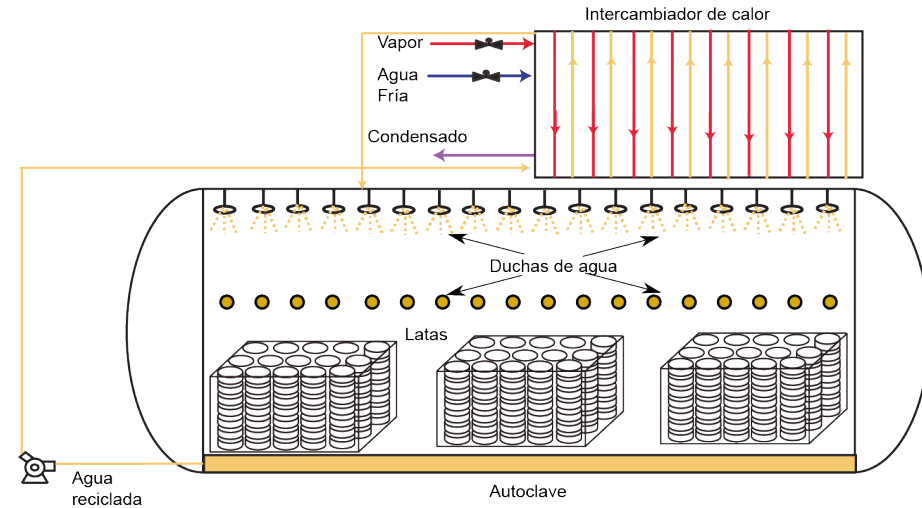
Parámetros relevantes durante la esterilización

- ✓ Tiempo proceso → Varios autoclaves simultáneos, aumenta
- ✓ Consumo de energía
- ✓ Color final del producto (% de pérdida) → Superficie
- ✓ Letalidad bacterias (unidades tiempo) → Punto frío (centro)



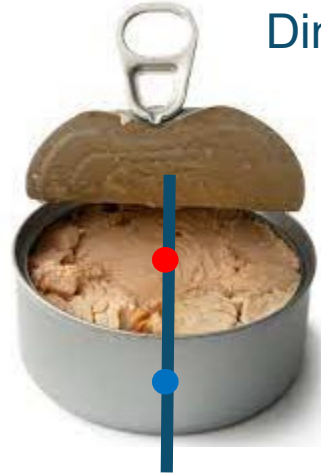
El proceso

- ✓ Uso de vapor saturado para calentar agua (PHE)
- ✓ El agua entra en el autoclave (duchas) → Crece la temperatura
- ✓ Se matan las bacterias (efecto deseado)
- ✓ Se degrada la calidad del producto (efecto no deseado)
- ✓ Se consume energía y tiempo (efecto no deseado)
- ✓ Se enfría el autoclave → Agua fría en el PHE



Plateau: Usar temperatura variable mejora el proceso

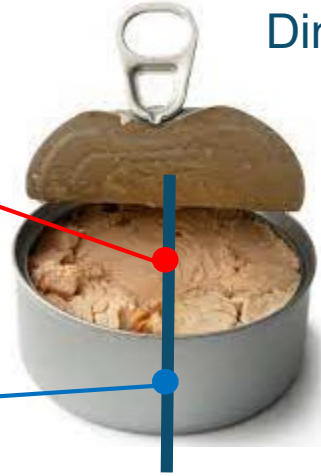
Dinámica de la lata



Dinámica de la lata

Ecuación de color

$$\frac{d\log_{10}(C)}{dt} = -\frac{1}{D_{ref}} 10^{\frac{T_s - T_{ref}}{z_{c,ref}}}$$



Ecuación de letalidad

$$\frac{dF_0}{dt} = 10^{\frac{T_0 - T_{ref}}{z_{ref}}}$$

Dinámica de la lata

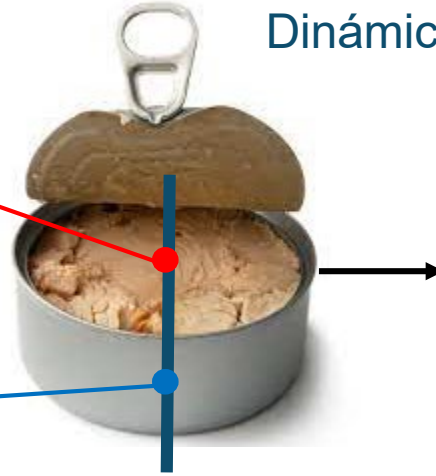
- ✓ Temperatura en todo el producto → Ecuaciones en derivadas parciales
- ✓ Letalidad → Usando la temperatura en el centro
- ✓ Color → Usando la temperatura en la superficie

Ecuación de color

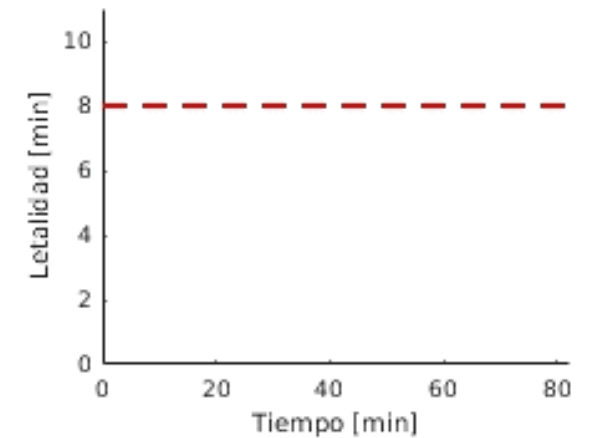
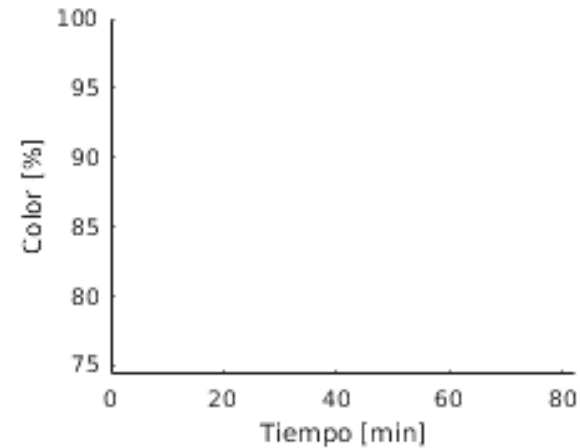
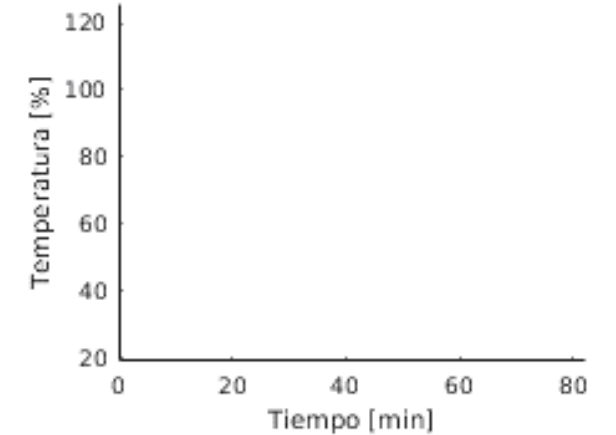
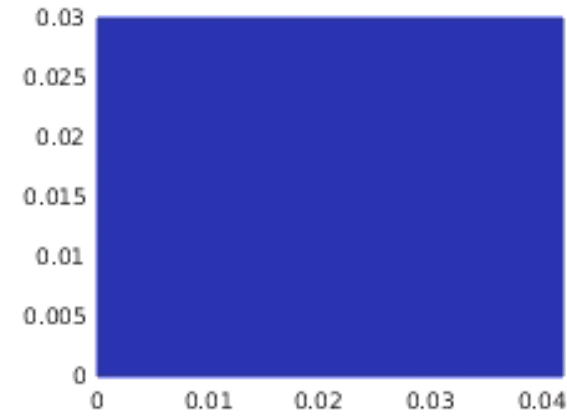
$$\frac{d\log_{10}(C)}{dt} = -\frac{1}{D_{ref}} 10^{\frac{T_s - T_{ref}}{z_{c,ref}}}$$

Ecuación de letalidad

$$\frac{dF_0}{dt} = 10^{\frac{T_0 - T_{ref}}{z_{ref}}}$$



Dinámica de la lata



Dinámica de la lata

- ✓ Temperatura en todo el producto → Ecuaciones en derivadas parciales
- ✓ Letalidad → Usando la temperatura en el centro
- ✓ Color → Usando la temperatura en la superficie

Variabilidad en los productos

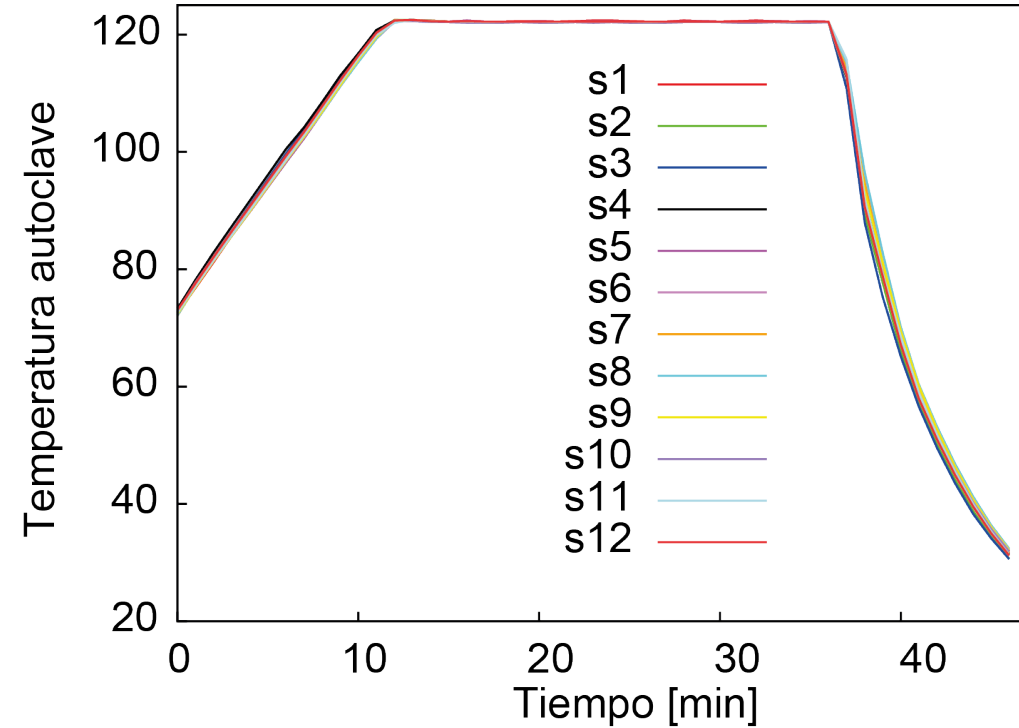
Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave

- Diferencia en el producto envasado

Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado



Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”



Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”



Caracterización

Variabilidad en los parámetros

Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”



Caracterización

Variabilidad en los parámetros

Estimación de parámetros:

- Para cada tipo de lata → Cinco ciclos de esterilización
- Medida de T en tres puntos de la lata
- Datos experimentales de cuatro ciclos → Una estimación coeficientes térmicos
- Cinco estimaciones → media y desviación estándar

Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”

Caracterización

Variabilidad en los parámetros

Estimación de parámetros:

- Para cada tipo de lata → Cinco ciclos de esterilización
- Medida de T en tres puntos de la lata
- Datos experimentales de cuatro ciclos → Una estimación coeficientes térmicos
- Cinco estimaciones → media y desviación estándar

	Parameter		
	α_p [m ² s ⁻¹]	h_t [m s ⁻¹]	h_b [m s ⁻¹]
1	1.31×10^{-7}	9.56×10^{-5}	2.57×10^{-4}
2	1.32×10^{-7}	8.15×10^{-5}	2.86×10^{-4}
3	1.38×10^{-7}	7.85×10^{-5}	1.70×10^{-4}
4	1.29×10^{-7}	9.96×10^{-5}	2.66×10^{-4}
5	1.35×10^{-7}	8.07×10^{-5}	2.42×10^{-4}
Mean	1.33×10^{-7}	8.72×10^{-5}	2.44×10^{-4}
Std	3.48×10^{-9}	9.68×10^{-6}	4.47×10^{-5}

Causas de la variabilidad:

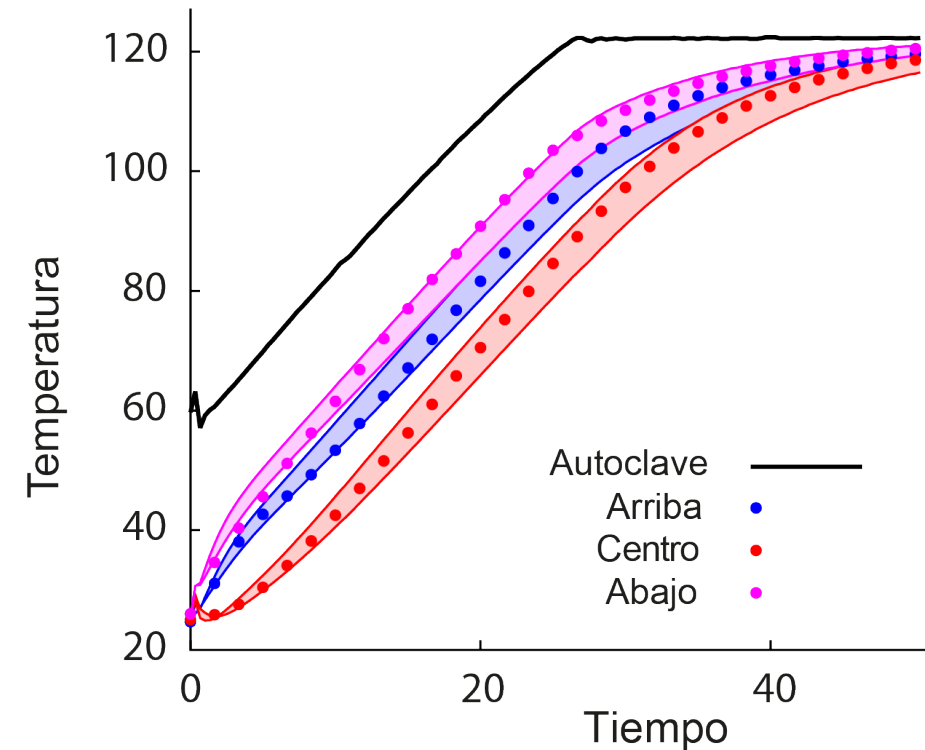
- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”

Caracterización

Variabilidad en los parámetros

Validación:

- Media y desviación estándar de los parámetros
- Distintas combinaciones de parámetros



Causas de la variabilidad:

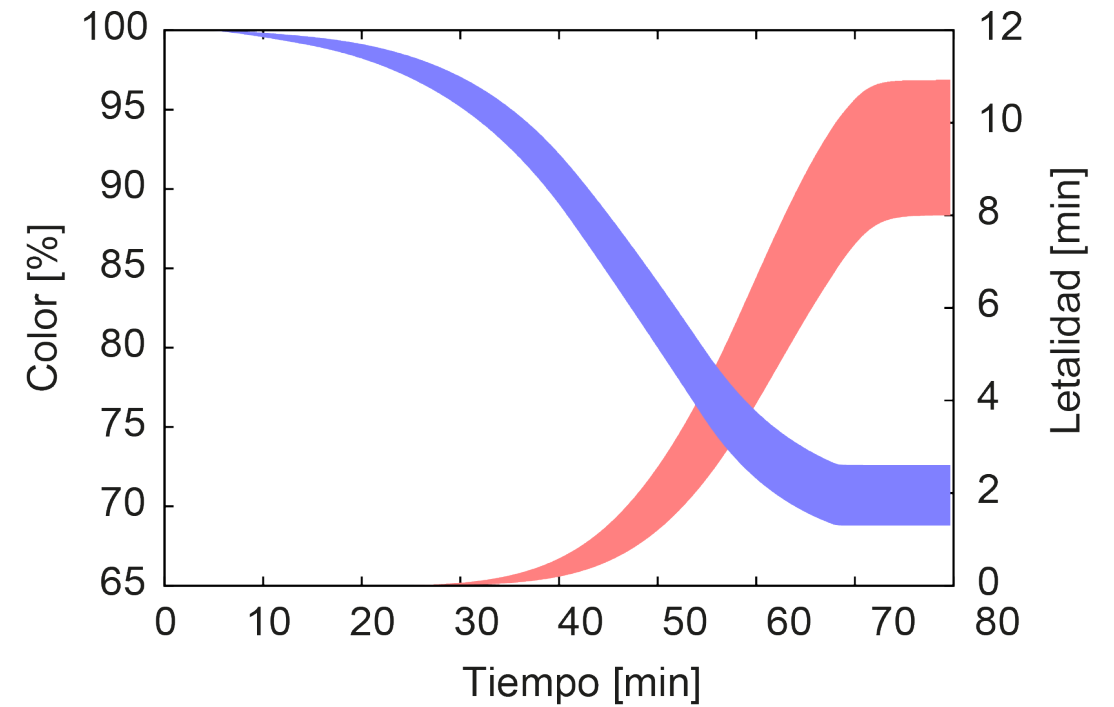
- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”

Caracterización

Variabilidad en los parámetros

Validación:

- Media y desviación estándar de los parámetros
- Distintas combinaciones de parámetros
- Impacto en letalidad y calidad



Causas de la variabilidad:

- Diferencia de temperaturas en el autoclave
 - ✓ Se asumen despreciables
 - ✓ Fácilmente medible en distintos puntos
- Diferencia en el producto envasado
 - ✓ Distinta cantidad de producto/líquido de relleno
 - ✓ Distinta compactación del producto
 - ✓ Diferencias en la transmisión de calor
 - ✓ Cada lata se calienta de forma “distinta”

Validación:

- Media y desviación estándar de los parámetros
- Distintas combinaciones de parámetros
- Impacto en letalidad y calidad

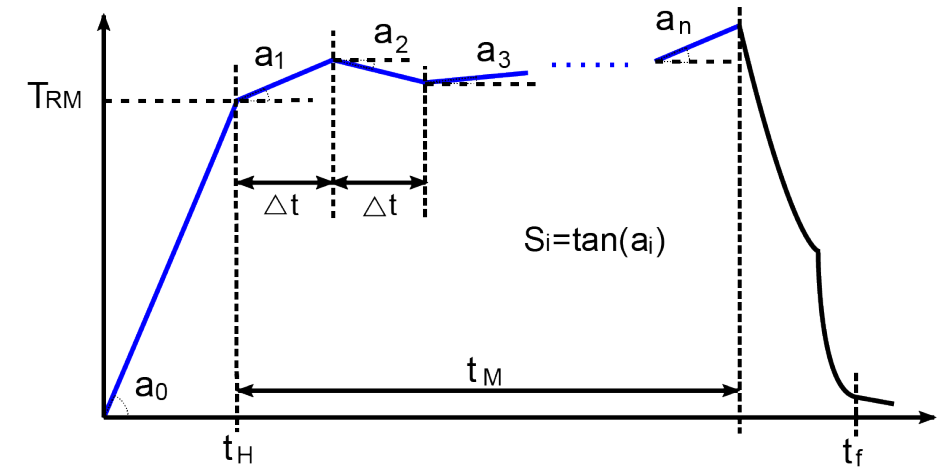
Optimización:

Se debe considerar la Variabilidad

Optimización del proceso considerando variabilidad

Optimización de la esterilización considerando variabilidad

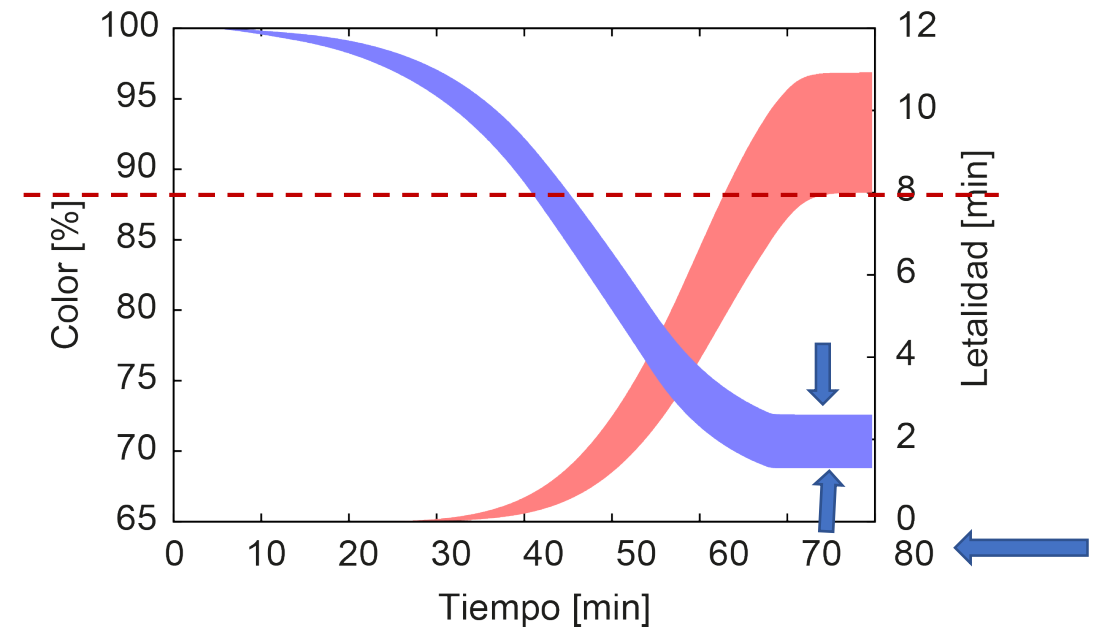
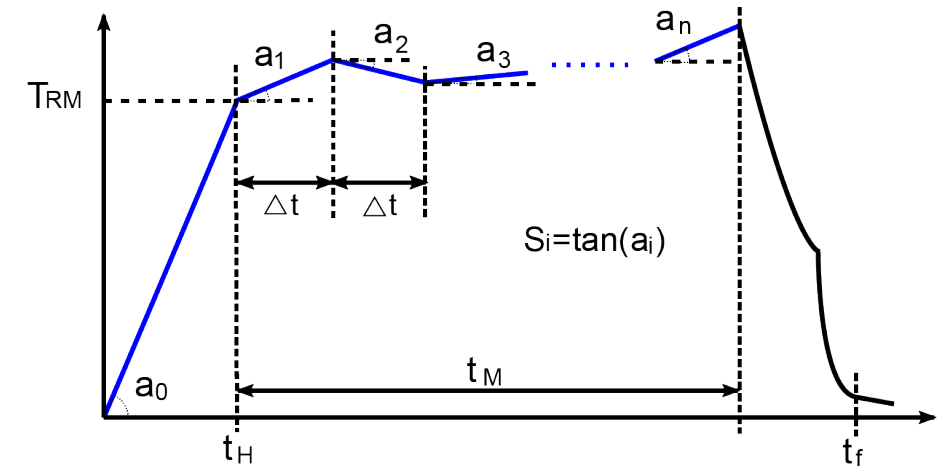
Optimización multiobjetivo: **Calcular perfil de esterilización**



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización multiobjetivo: Calcular perfil de esterilización

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización multiobjetivo: **Calcular perfil de esterilización**

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Definir malla en 2 objetivos (tiempo, variabilidad)
 - ✓ Multiobjetivo → Un objetivo (maximizar calidad para cada punto de la malla)

Minimizar
 $T_{R_M}, t_M, S \in \mathbb{R}^{n+2} \quad J := [-C_{media}, C_{max} - C_{min}, t_f] \in \mathbb{R}^4$

Sujeto a: Din. alimento (EDP),

Din. esterilizador y PHE (EDO),

$\mathcal{F}_0(T_{R_M}, t_M, S, \mu_{\alpha_p} - c\sigma_{\alpha_p}, \mu_{h_t} - c\sigma_{h_t}, \mu_{h_b} - c\sigma_{h_b}) \geq \delta,$

$T_{\min} \leq T_{R_M} \leq T_{\max}, t_{\min} \leq t_M \leq t_{\max}, s_{\min} \leq S_i \leq s_{\max}.$

Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización multiobjetivo: Calcular perfil de esterilización

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Definir malla en 2 objetivos (tiempo, variabilidad)
 - ✓ Multiobjetivo → Un objetivo (maximizar calidad para cada punto de la malla)

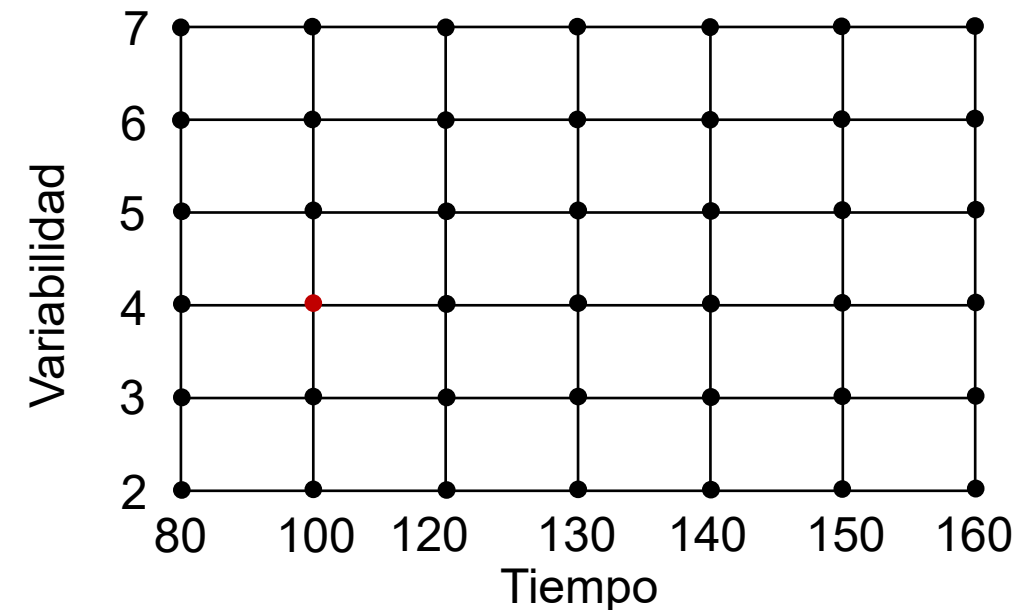
$$\text{Minimizar } T_{R_M}, t_M, S \in \mathbb{R}^{n+2} \quad J := [-C_{media}, C_{max} - C_{min}, t_f] \in \mathbb{R}^4$$

Sujeto a: Din. alimento (EDP),

Din. esterilizador y PHE (EDO),

$$\mathcal{F}_0(T_{R_M}, t_M, S, \mu_{\alpha_p} - c\sigma_{\alpha_p}, \mu_{h_t} - c\sigma_{h_t}, \mu_{h_b} - c\sigma_{h_b}) \geq \delta,$$

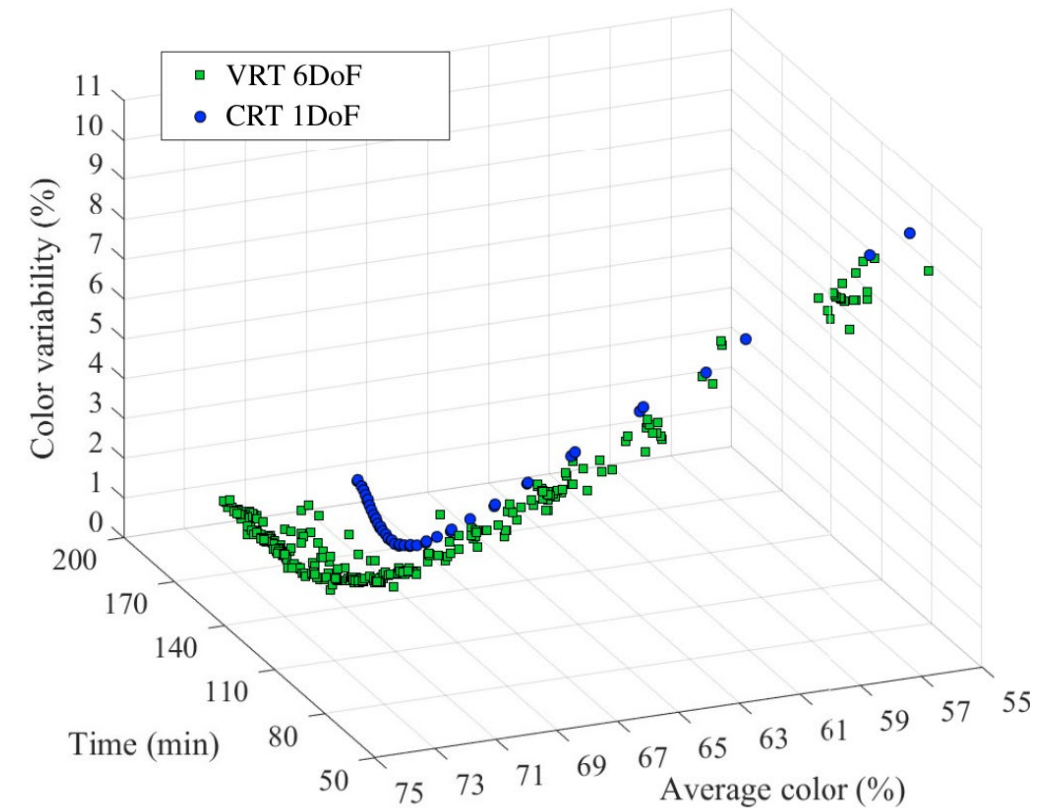
$$T_{\min} \leq T_{R_M} \leq T_{\max}, t_{\min} \leq t_M \leq t_{\max}, s_{\min} \leq S_i \leq s_{\max}.$$



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización multiobjetivo: **Calcular perfil de esterilización**

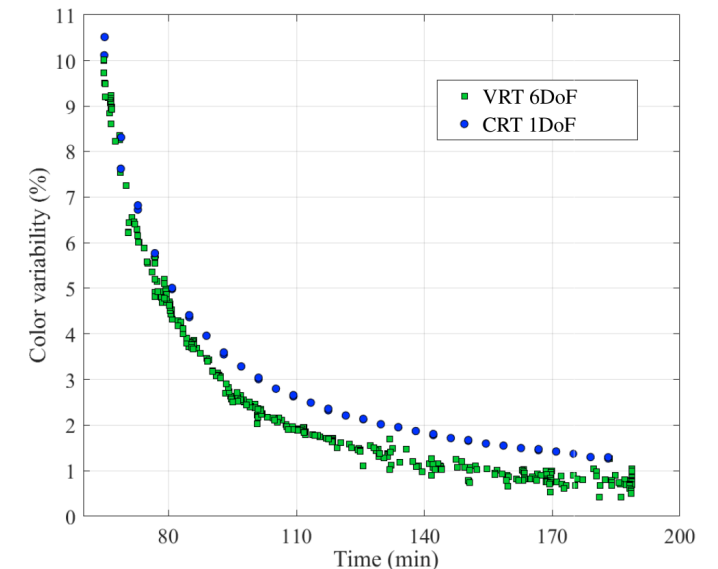
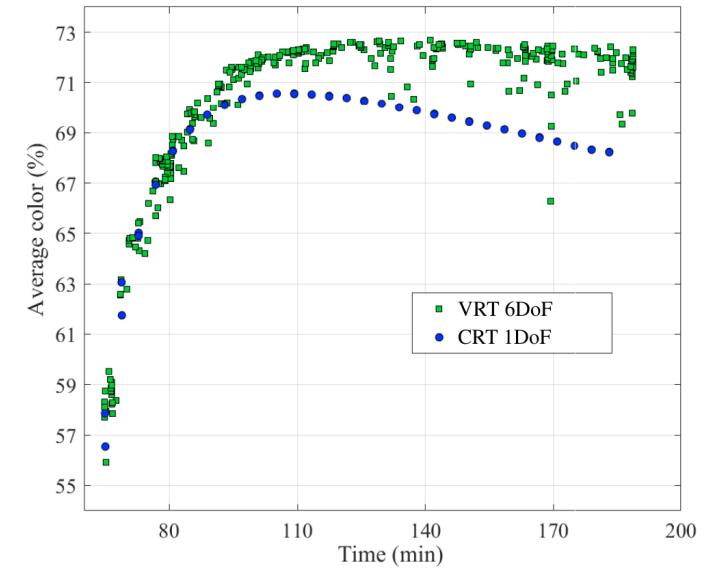
- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Definir malla en 2 objetivos (tiempo, variabilidad)
 - ✓ Multiobjetivo → Un objetivo (maximizar calidad para cada punto de la malla)
- Herramientas: desigualdad de Jensen, Región de pertenencia, optimizador NLP basado en gradiente (diferenciación automática)



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización multiobjetivo: Calcular perfil de esterilización

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Definir malla en 2 objetivos (tiempo, variabilidad)
 - ✓ Multiobjetivo → Un objetivo (maximizar calidad para cada punto de la malla)
- Herramientas: desigualdad de Jensen, Región de pertenencia, optimizador NLP basado en gradiente (diferenciación automática)



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)

Nuevo enfoque: más apropiado para recalcular los perfiles durante el proceso

Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo

Nuevo enfoque: más apropiado para recalcular los perfiles durante el proceso

Problema un multiobjetivo

$$\min_{T_{R,sp}(t_k), t_h \in \mathbb{R}^{n+2}} J := [-\bar{C}_s, C_{s,max} - C_{s,min}, t_f] \in \mathbb{R}^3$$

↓ Pesos en los objetivos

Problema un objetivo

$$\min_{T_{R,sp}(t_k), t_h \in \mathbb{R}^{n+2}} J = -w_1 \bar{C}_s + w_2 (C_{s,max} - C_{s,min}) + w_3 t_f$$

Optimización de la esterilización considerando variabilidad

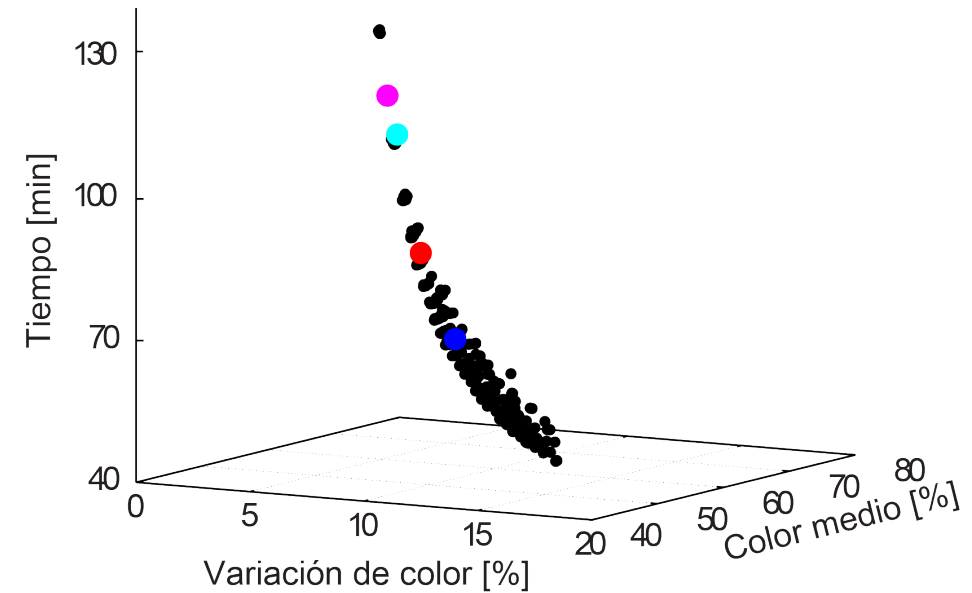
Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo

Problema un objetivo

$$\min_{T_{R,sp}(t_k), t_h \in \mathbb{R}^{n+2}} J = -w_1 \bar{C}_s + w_2 (C_{s,max} - C_{s,min}) + w_3 t_f$$

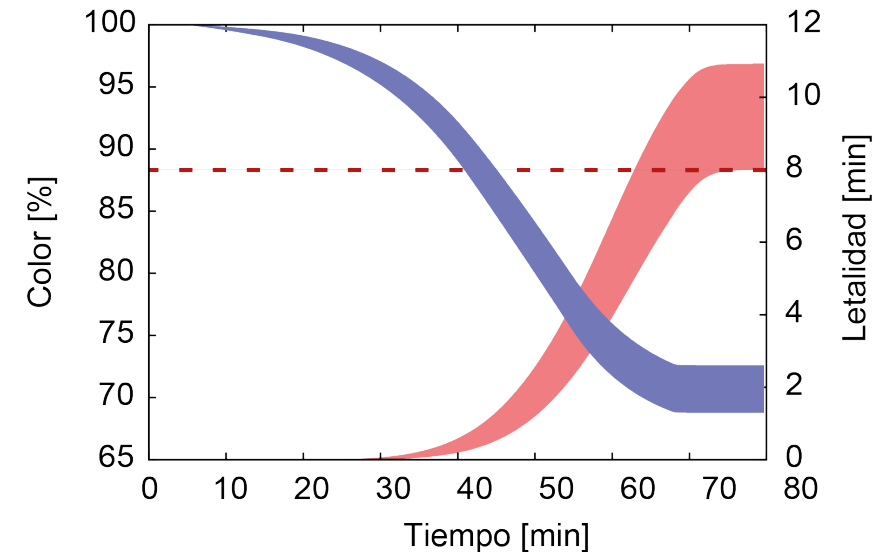
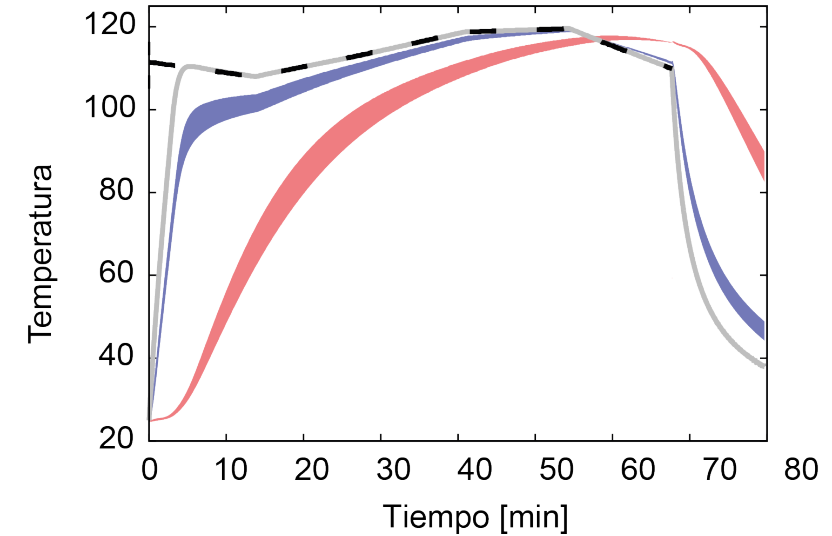
Dependiendo de los pesos, distintas soluciones



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

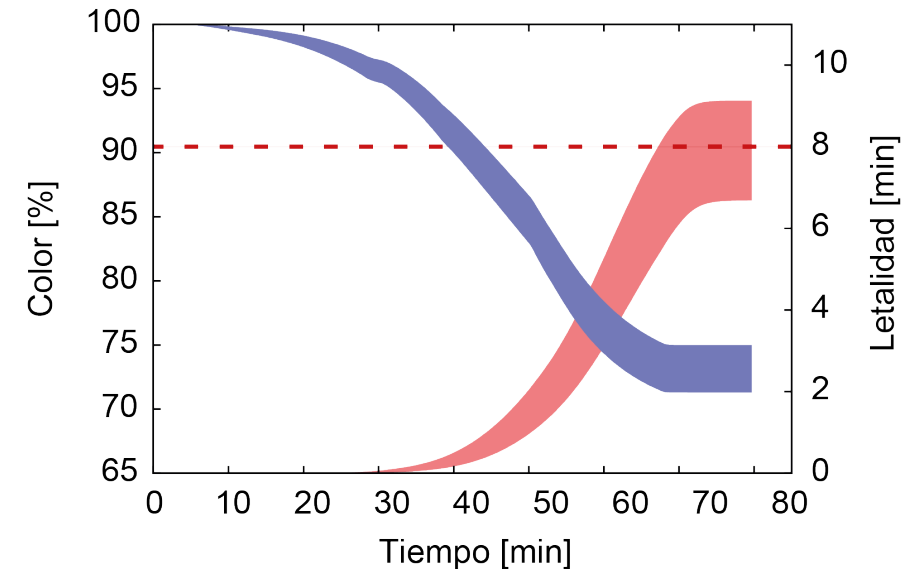
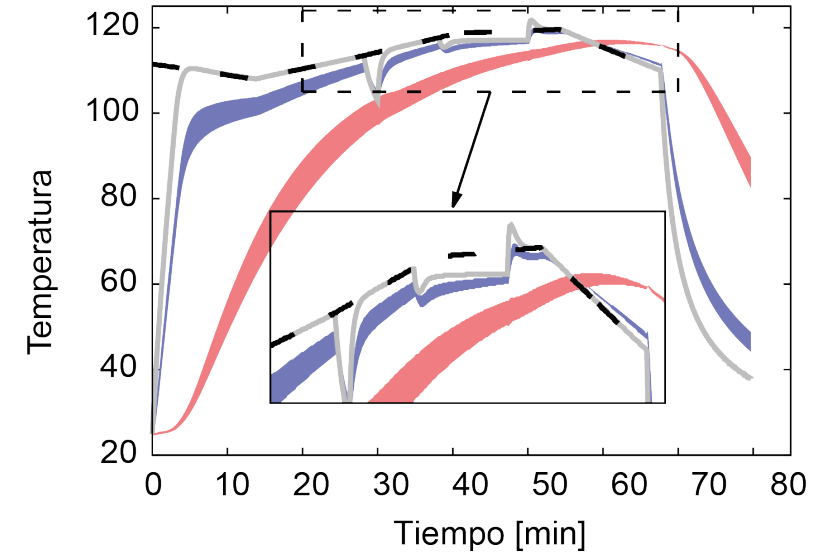
- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo
- Perturbaciones en el sistema → Problemas seguridad o sub-optimalidad

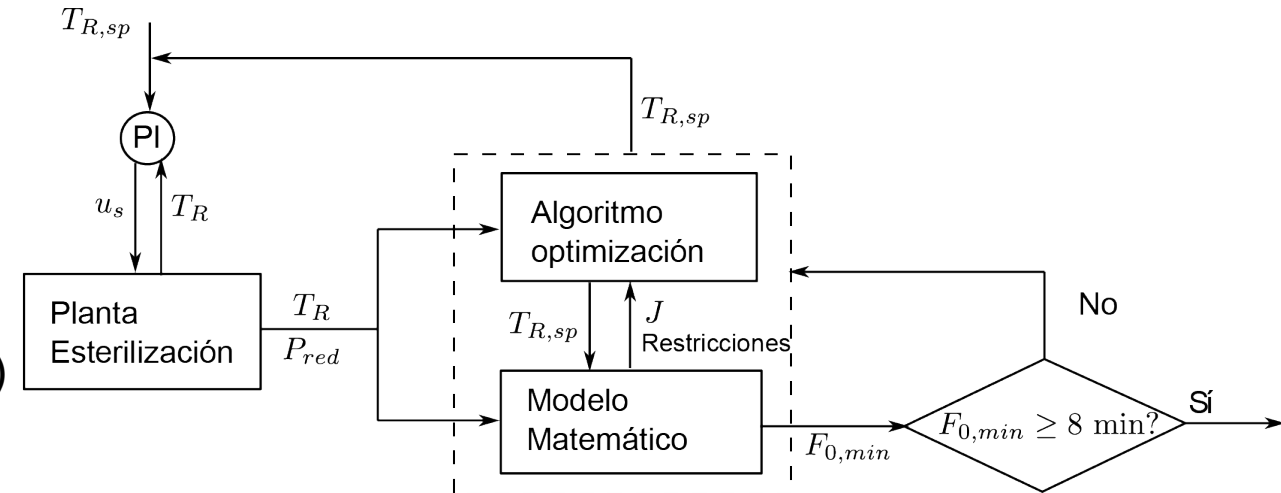


Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo
- Perturbaciones en el sistema → Problemas seguridad o sub-optimalidad
- **Solución:** recalcular perfiles en línea usando medidas del sistema

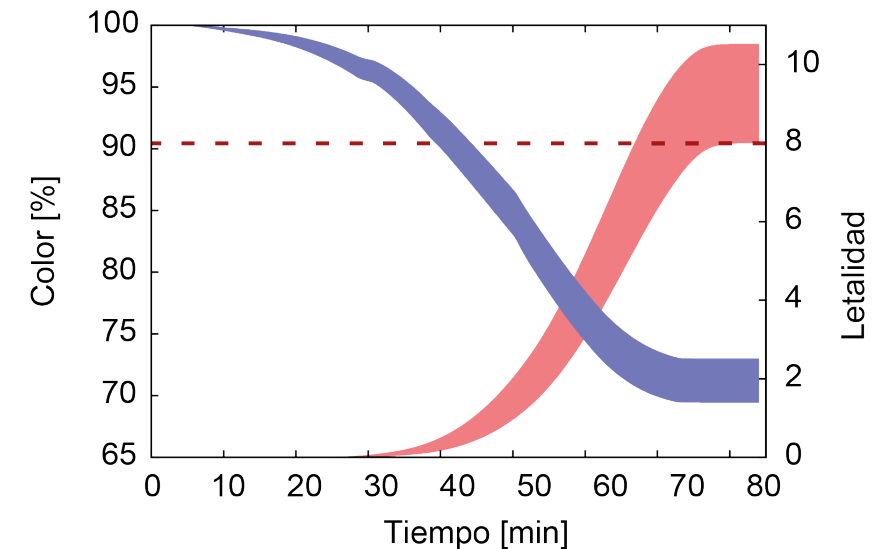
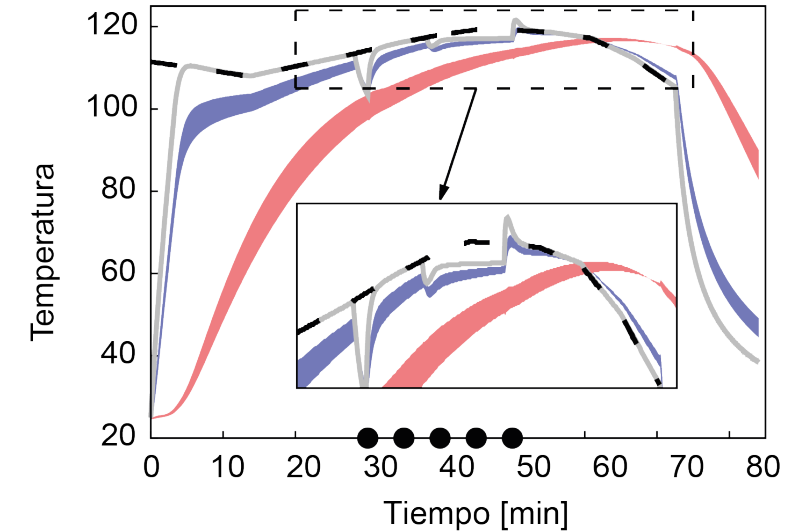
Esquema para recalcular los perfiles



Optimización de la esterilización considerando variabilidad

Optimización dinámica basada en eventos:

- Una restricción, tres objetivos
 - ✓ Asegurar letalidad de los productos
 - ✓ Minimizar tiempo de esterilización
 - ✓ Maximizar calidad de producto
 - ✓ Minimizar diferencia entre productos (variabilidad)
- Optimización
 - ✓ Pesar cada objetivo → Problema un objetivo
- Perturbaciones en el sistema → Problemas seguridad o sub-optimalidad
- **Solución:** recalcular perfiles en línea usando medidas del sistema



Presentación basada en los resultados de las publicaciones:

- J.L. Pitarch, C. Vilas, C. de Prada, C.G. Palacín, A.A. Alonso (2021). Optimal operation of thermal processing of canned tuna under product variability, *Journal of Food Engineering*, 304, 110594.
- A.A. Alonso, J.L. Pitarch, Antelo, C. Vilas (2021). Event-based Dynamic Optimization for Food Thermal Processing: High-Quality Food Production under Raw Material Variability, *Food and Bioproducts Processing*, 127, 162-173.



**Universidad
de Valladolid**



Integrated plant-wide control and
optimization for industry4.0



Gracias por vuestra atención

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