

# **Simple Modeling Technique for Heat Exchange Recirculating Mash System HERMS with Cross Flow Heat Exchanger**



**29 Congreso AADECA  
Agosto 2025**

**Jorge Quelas**

# Índice

---

## 1. Maceración escalonada

Descripción del proceso de maceración escalonada.

## 2. Identificación del modelo

Generación de modelo no lineal para simulaciones.

## 3. Validación de modelo

Comparación del modelo respecto a la respuesta medida en la planta.

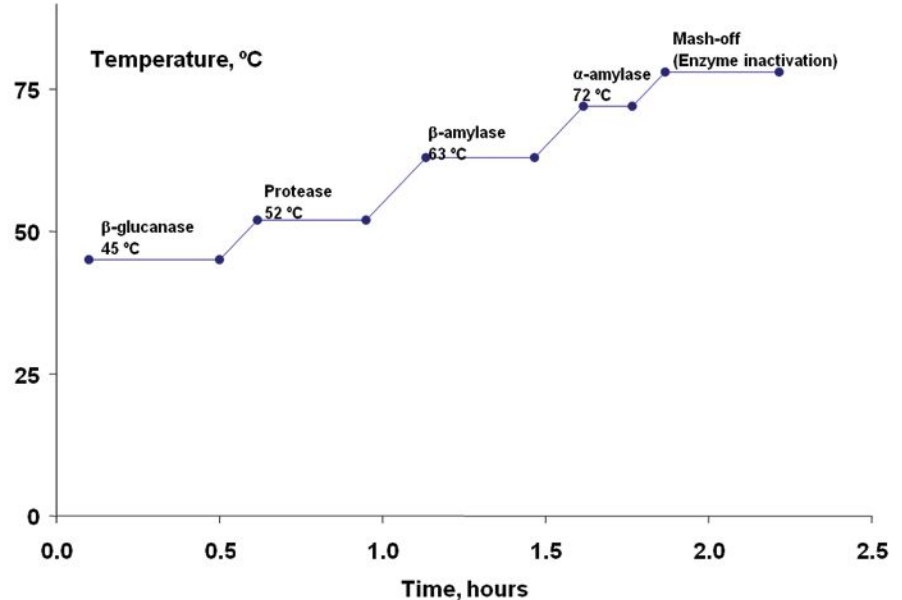
1.

# Maceración Escalonada

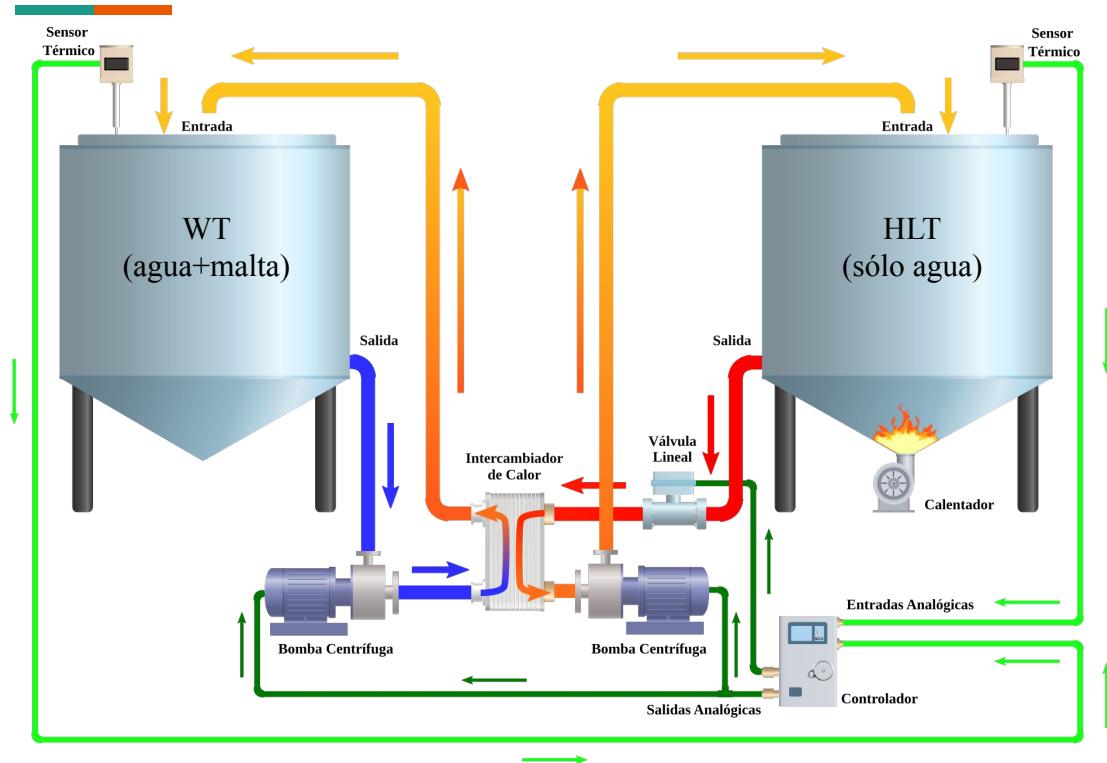
# Maceración escalonada

Cada escalón activa una reacción en el grano.

- **42 °C:** La enzima beta-glucanasa se activa y se encargan de romper los beta-glucano.
- **52 °C:** La proteasa se activa haciendo soluble las reservas de proteínas insolubles de la cebada.
- **65 °C:** La enzima beta-amilasa se activa partiendo el almidón del grano en fragmentos de glucosa (maltosa).
- **71 °C:** La enzima alfa-amilasa se activa cortando cadenas de almidón en distintas variedades de azúcares y dextrinas, incluyendo maltosa.



# Planta Piloto



Densidad:

- Agua:  $1000 \text{ kg/m}^3$
- Agua con malta:  $1015 \text{ a } 1060 \text{ kg/m}^3$

Calor Específico:

- Agua:  $4.18 \text{ kJ/kgK}$
- Agua con malta:
  - $4.1 \text{ kJ/kgK}$  ( $1030 \text{ kg/m}^3$ )
  - $3.6 \text{ kJ/kgK}$  ( $1060 \text{ kg/m}^3$ )

Temperatura de ebullición:

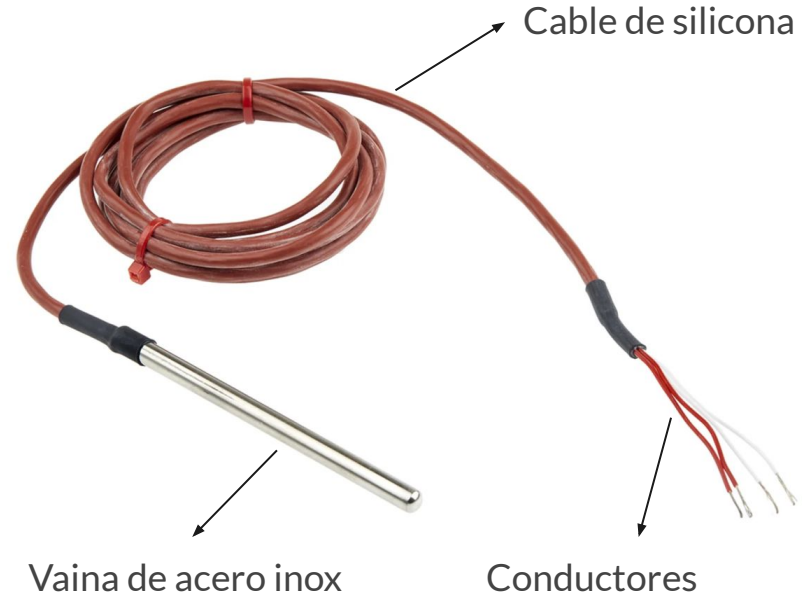
- Agua:  $100^\circ\text{C}$
- Agua con malta:  $100,236^\circ\text{C}$

# Instrumentación

## Sensor RTD NB-PTCO-186

### TE Connectivity

- Conforms to DIN EN 60751
- Wide operating temperature range: -50 °C to +600 °C (Ni/Au wire and Class F 0.3, Ag-Wire versions are limited to 300 °C)
- Standard nominal resistances values: R0: 100 and 1000Ω (others available upon request) Class F 0.1 (T = AA), F 0.15 (A), F 0.3 (B) and F 0.6 © accuracy
- Very low drift over lifetime
- Fast response time due to low thermal mass



Modelo utilizado :  $RTD(T) \approx RTD_0 \cdot (1 + \alpha T)$

# Instrumentación



## Bomba Centrífuga *Beltrando SRL*

- Conexión a la línea: Monofásica, 220V a 50Hz.
- Potencia: 0,5 HP.
- Velocidad: 1400 RPM.
- Caudal: 2500 l/h (litros por hora), dependiendo del acople puede alcanzar los 3300l/h.
- Material del cabezal: Acero inoxidable AISI 304L.
- Tipo de turbina: Abierta.
- Material del sello: Viton.
- Temperatura de trabajo: 110°C.

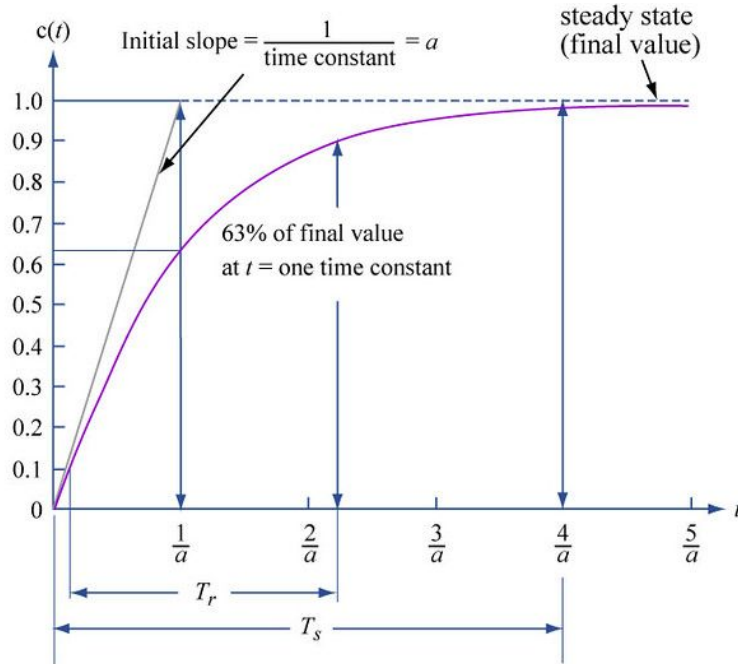
La bomba es simulada como una llave que habilita el flujo de líquido a través de los circuitos hidráulicos del sistema.

2.

# Identificación del Modelo



# Respuesta de un sistema de primer orden



Ecuación del sistema:

$$r(t) = K \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

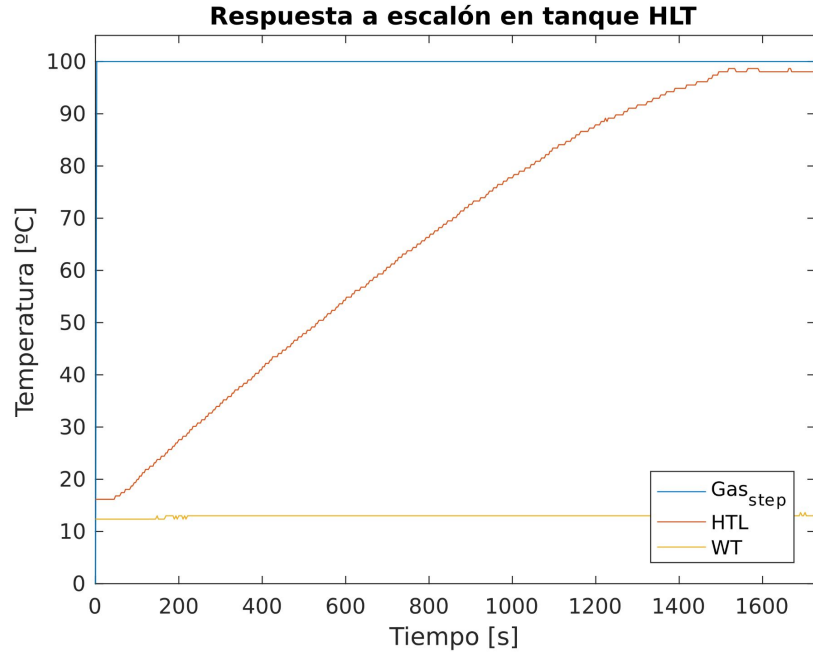
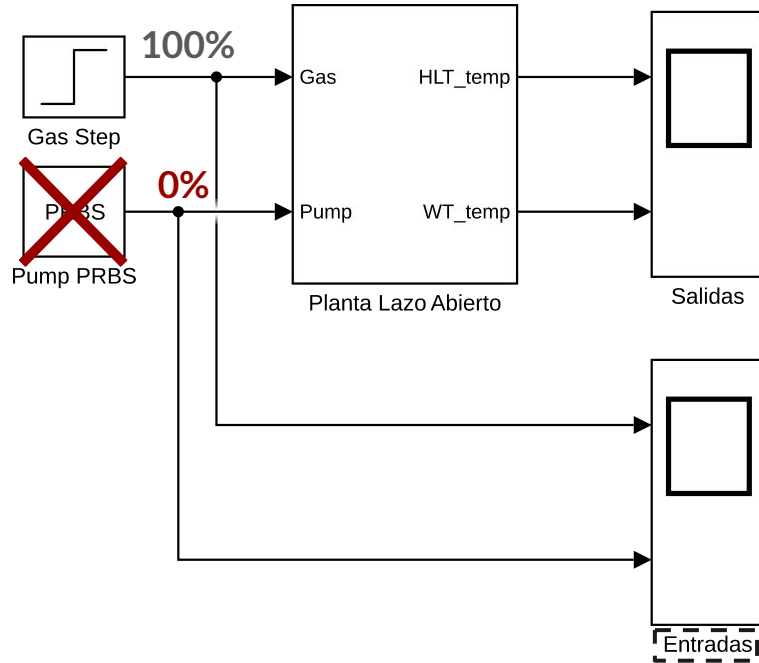
Si  $t = \tau$ , entonces:

$$r(\tau) = 0,632 \cdot K$$

Por teorema del muestreo:

$$T_m < \tau/2$$

# Respuesta a un escalón

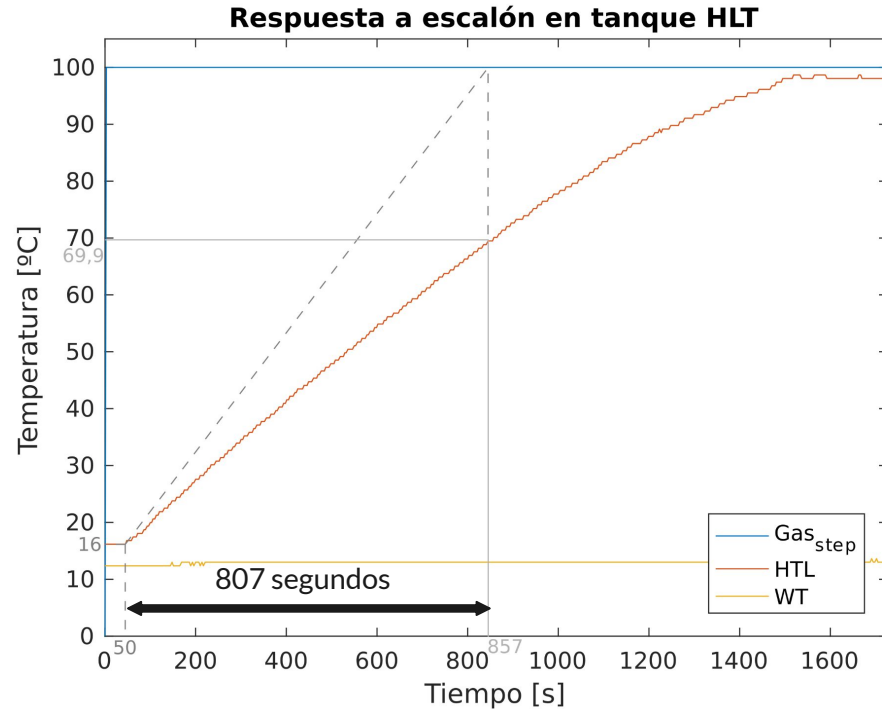


# Constante de tiempo del sistema HLT

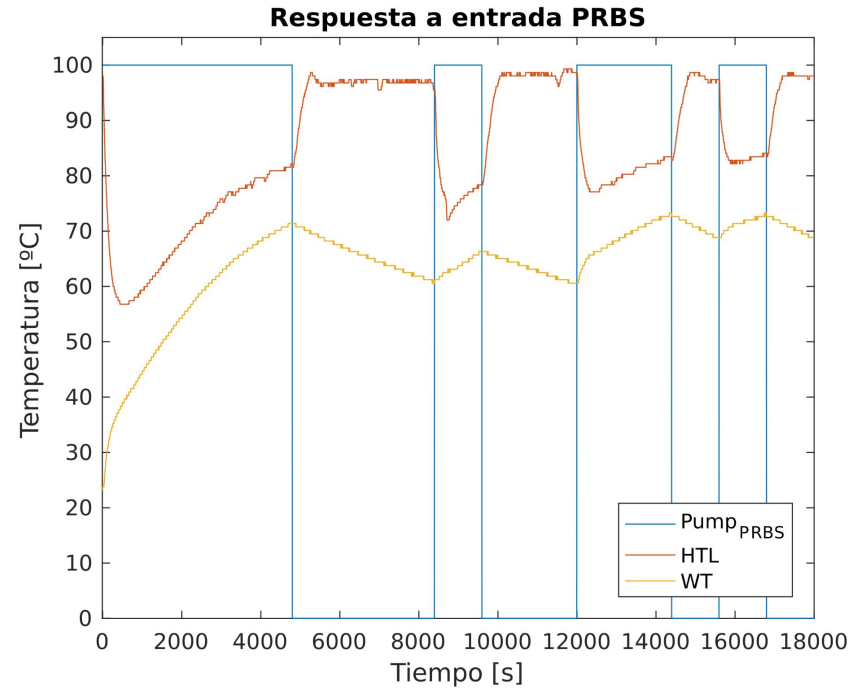
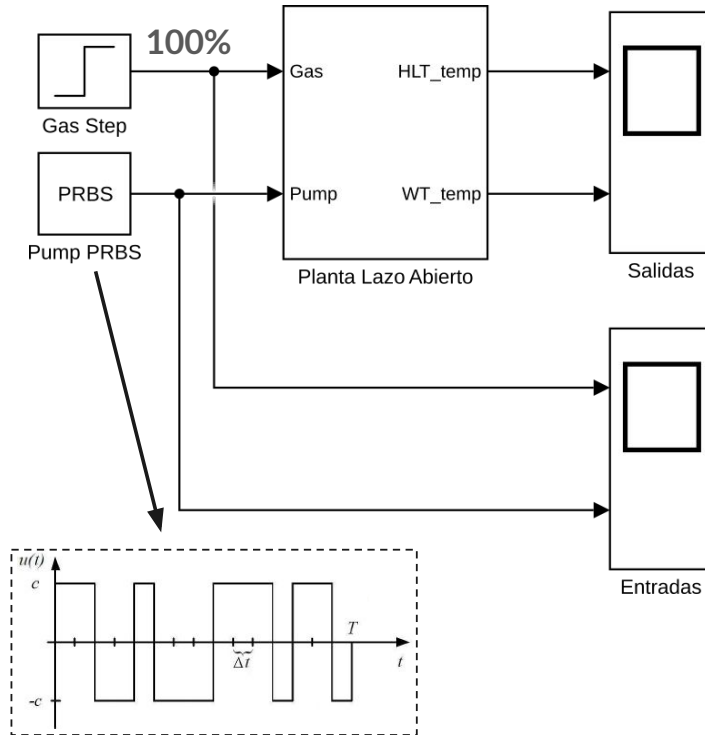
$\tau = 807 \text{ s} \rightarrow$  Constante de tiempo del sistema HLT

$T_m = 3,65 \text{ s} \rightarrow$  Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo del sistema es 221 veces más rápido que el sistema HLT.



# Respuesta a un señal PRBS

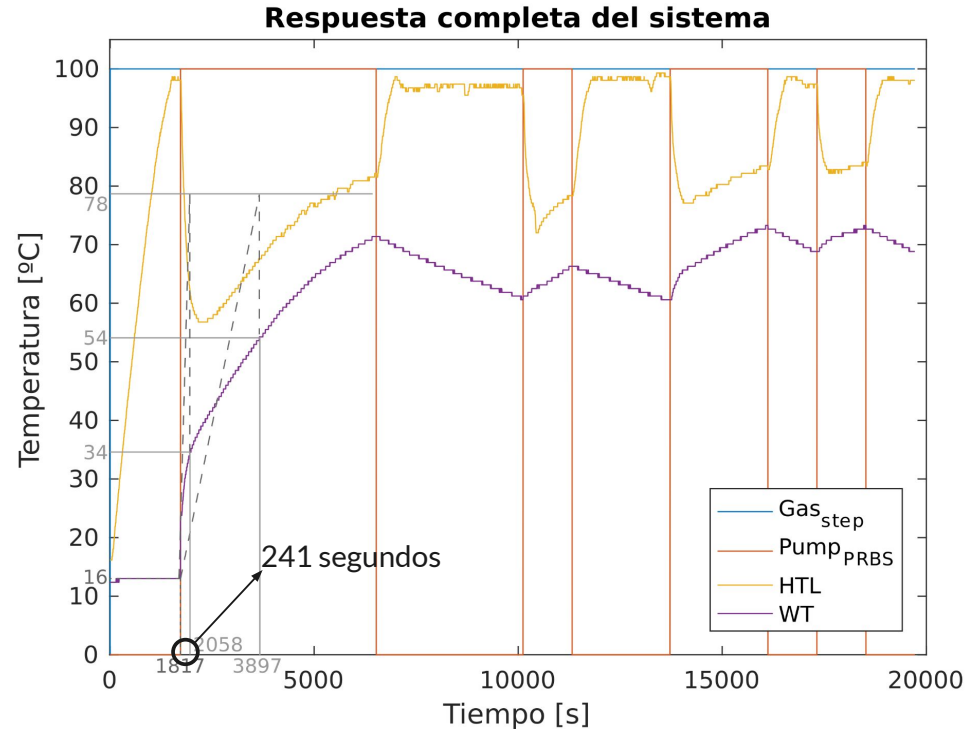


# Constante de tiempo del sistema WT

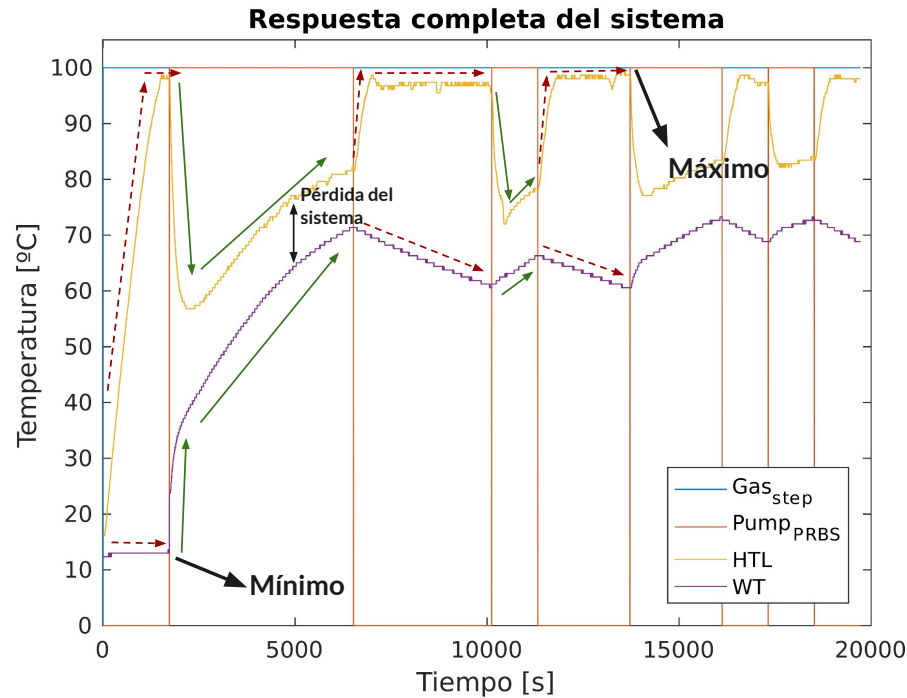
$\tau = 241s \rightarrow$  Constante de tiempo del sistema WT

$T_m = 3,65 s \rightarrow$  Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo del sistema es 66 veces más rápido que el sistema WT.



# Respuesta completa del sistema

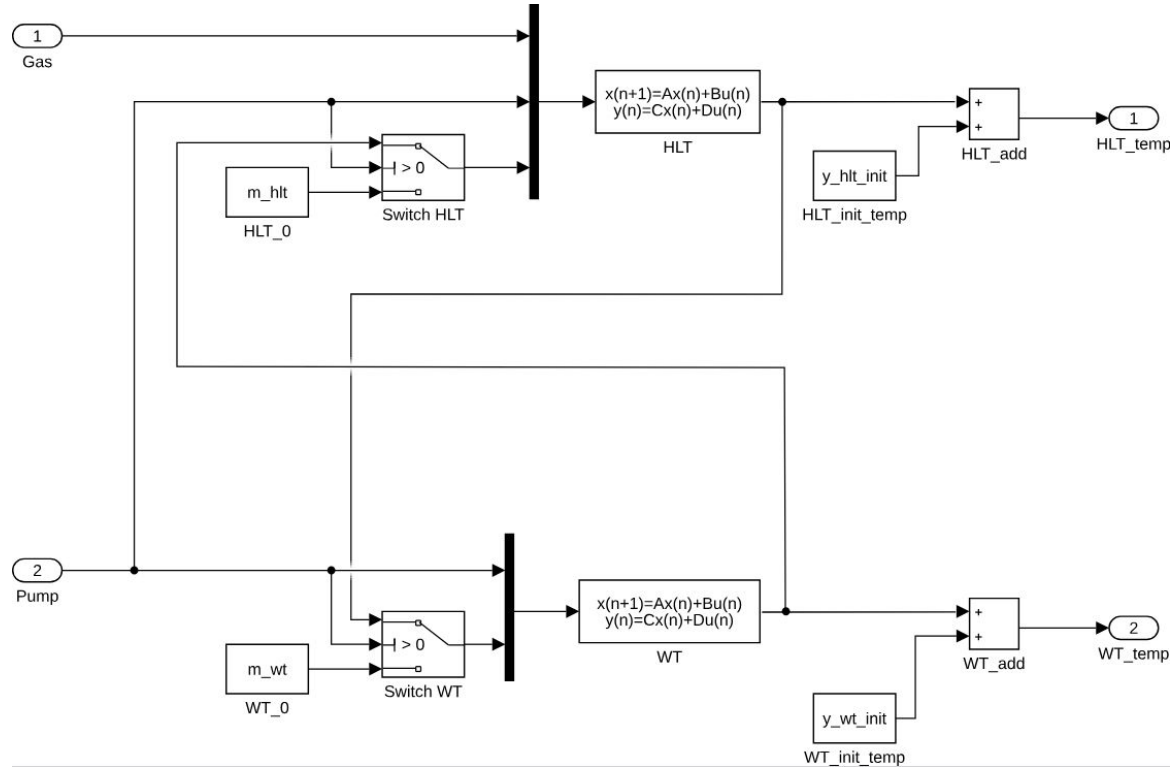


- Sistemas acoplados
- Sistemas desacoplados

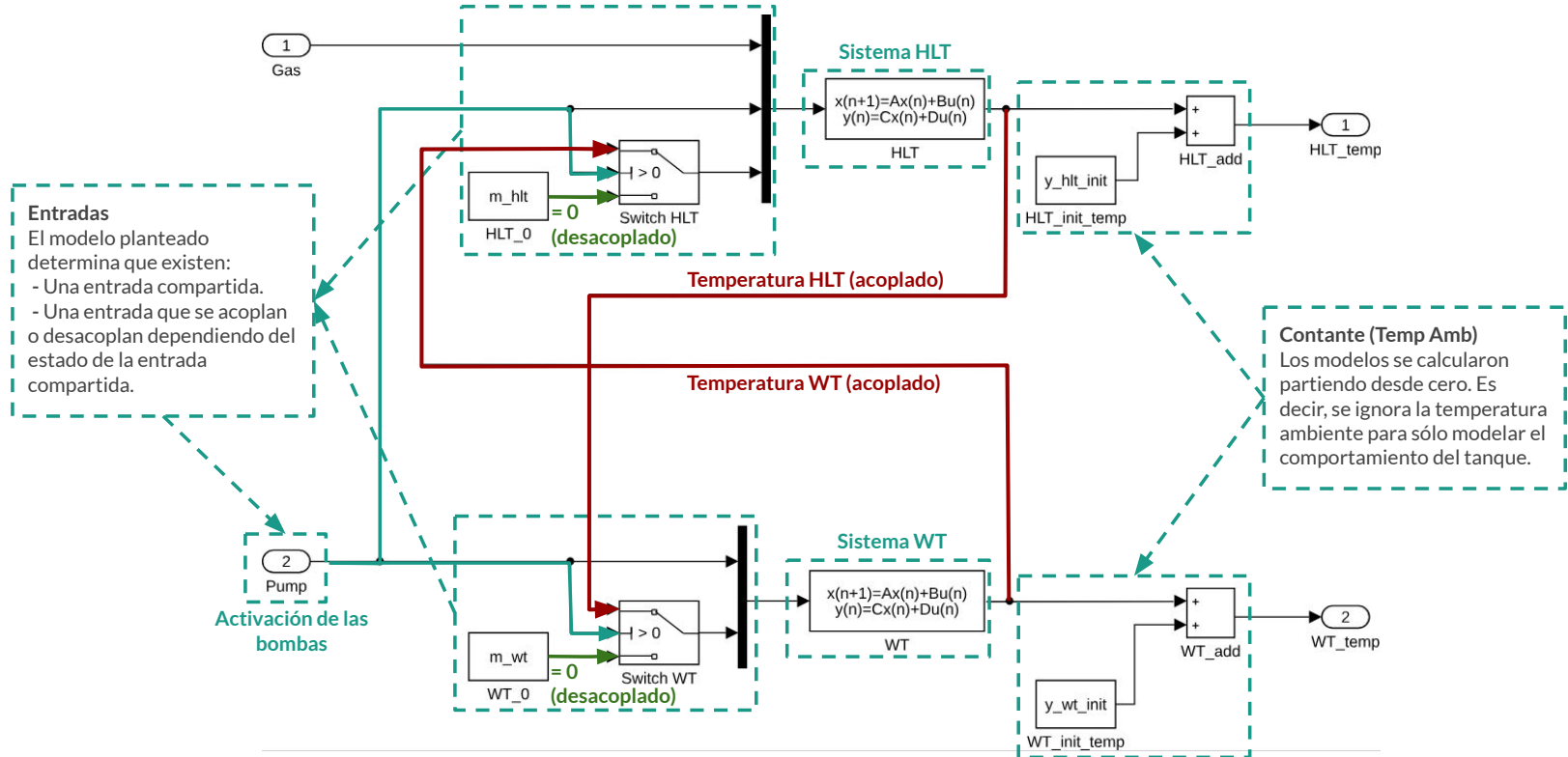
**Mínimo absoluto:**  
Temperatura ambiente

**Máximo absoluto:**  
Temperatura de ebullición de la mezcla.

# Modelo de la planta



# Modelo de la planta





# Modelo del sistema HLT

## Modelo Seleccionado

$$\mathbf{x}((k+1)T) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x}(kT) + \mathbf{H} \cdot \mathbf{u}(kT)$$

$$\mathbf{y}(kT) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(kT) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(kT)$$

## Modelo HLT

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{hlt1}((k+1)T) \\ \dot{x}_{hlt2}((k+1)T) \\ \dot{x}_{hlt3}((k+1)T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{hlt1} & 0 & 0 \\ 0 & g_{hlt2} & 0 \\ 0 & 0 & g_{hlt3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{hlt1}(kT) \\ x_{hlt2}(kT) \\ x_{hlt3}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{hlt1} & 0 & 0 \\ 0 & h_{hlt2} & 0 \\ 0 & 0 & h_{hlt3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(kT) \\ u_2(kT) \\ u_3(kT) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$y_{hlt}(kT) = \begin{bmatrix} c_{hlt1} & c_{hlt2} & c_{hlt3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{hlt1}(kT) \\ x_{hlt2}(kT) \\ x_{hlt3}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{hlt1} & d_{hlt2} & d_{hlt3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(kT) \\ u_2(kT) \\ u_3(kT) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

# Modelo de la planta WT

## Modelo Seleccionado

$$\mathbf{x}((k+1)T) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{x}(kT) + \mathbf{H} \cdot \mathbf{u}(kT)$$

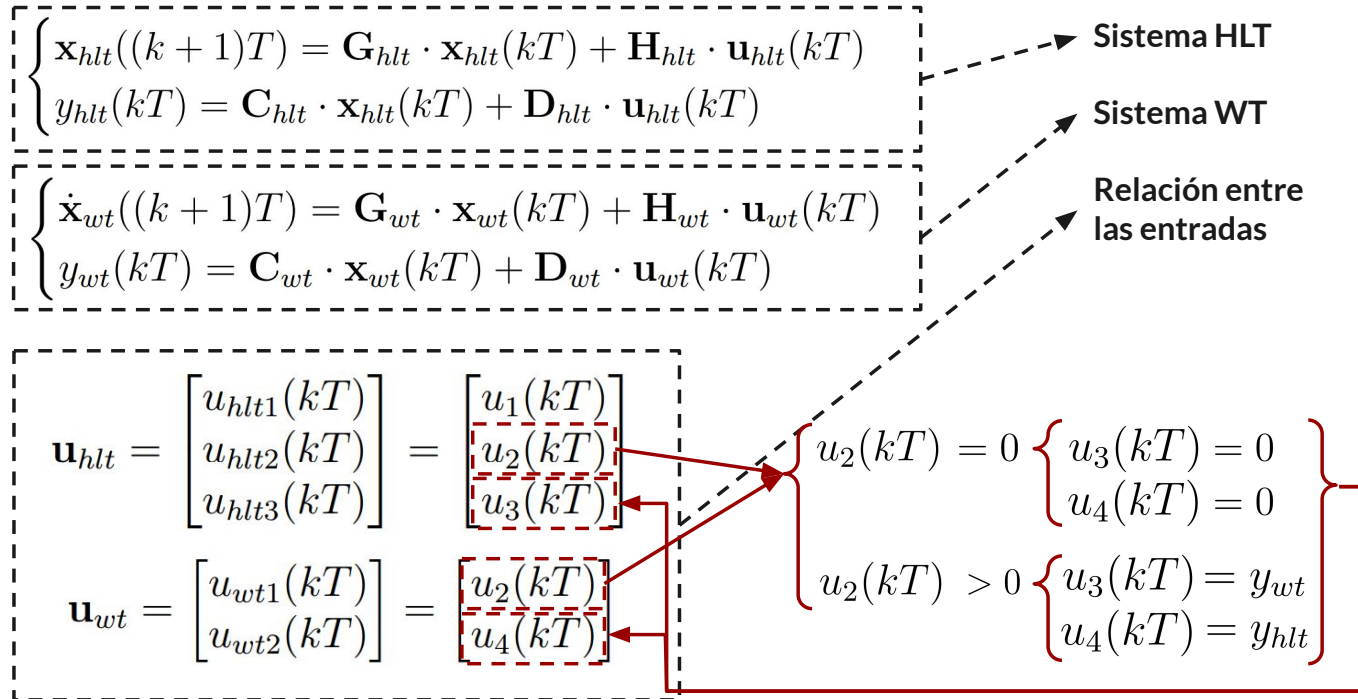
$$\mathbf{y}(kT) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(kT) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(kT)$$

## Modelo WT

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{wt1}((k+1)T) \\ \dot{x}_{wt2}((k+1)T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{wt1} & 0 \\ 0 & g_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{wt1}(kT) \\ x_{wt2}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{wt1} & 0 \\ 0 & h_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2(kT) \\ u_4(kT) \end{bmatrix}$$

$$y_{wt}(kT) = \begin{bmatrix} c_{wt1} & c_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{wt1}(kT) \\ x_{wt2}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{wt1} & d_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2(kT) \\ u_4(kT) \end{bmatrix}$$

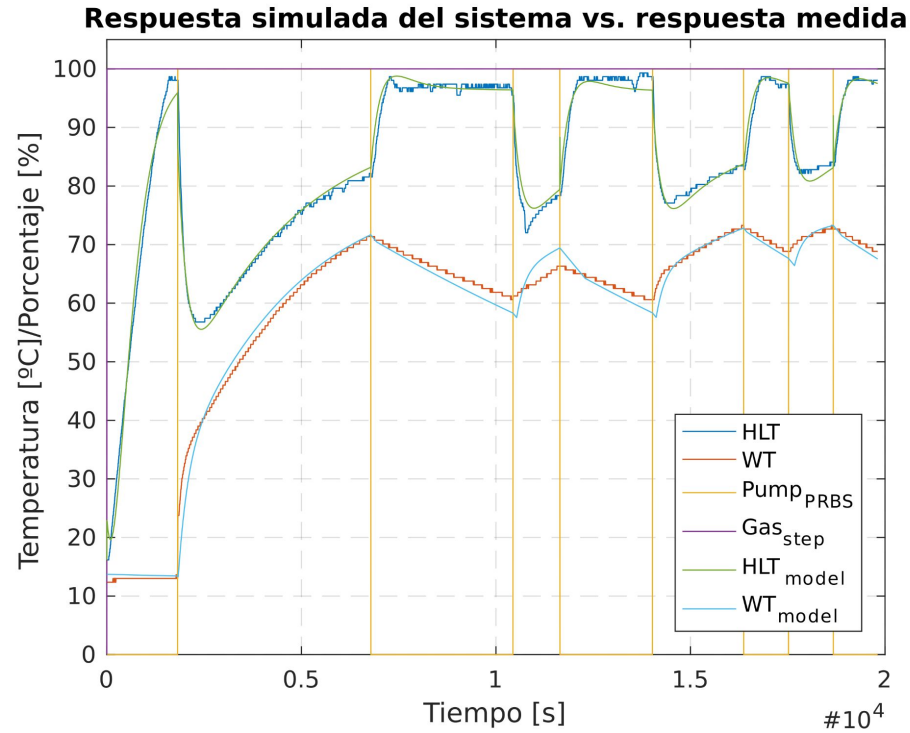
# Modelo del sistema completo



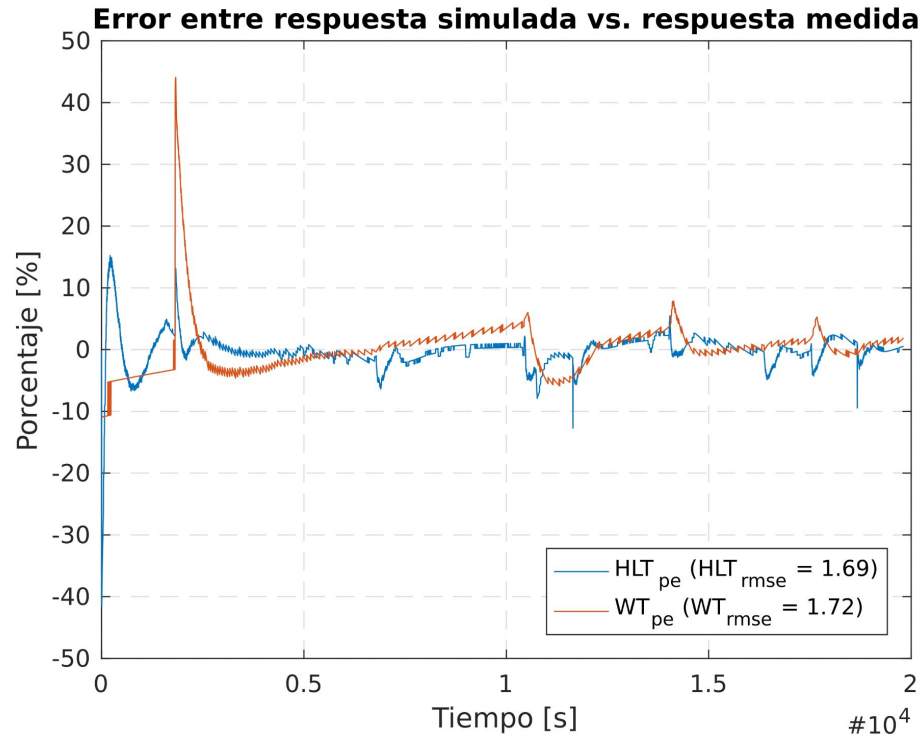
3.

# Validación del Modelo

# Validación del modelo



# Error del modelo



Error del sistema:

$$Y_{pe} = \frac{Y_m - Y_{est}}{Y_m} \cdot 100\%$$

RMSE:

$$Y_{rmse} = \sqrt{\frac{1}{f} \cdot \sum_{n=1}^{n=f} (Y_{est_n} - Y_{m_n})^2}$$

# Muchas Gracias!

## Preguntas?