

# **Controller Evaluation for Mash System Based on Cross Flow Heat Exchanger**



**29 Congreso AADECA  
Agosto 2025**

**Jorge Quelas**

# Índice

---

## 1. Proceso a controlar

Descripción del proceso de maceración escalonada y modelo de la planta.

## 2. Diseño de los controladores

Detalle del diseño de los controladores a comparar.

## 3. Analisis comparativo

Generación de simulaciones para determinar qué controlador cumple mejor con los requerimientos, y cómo se comportan en base a las incertidumbres del modelo.

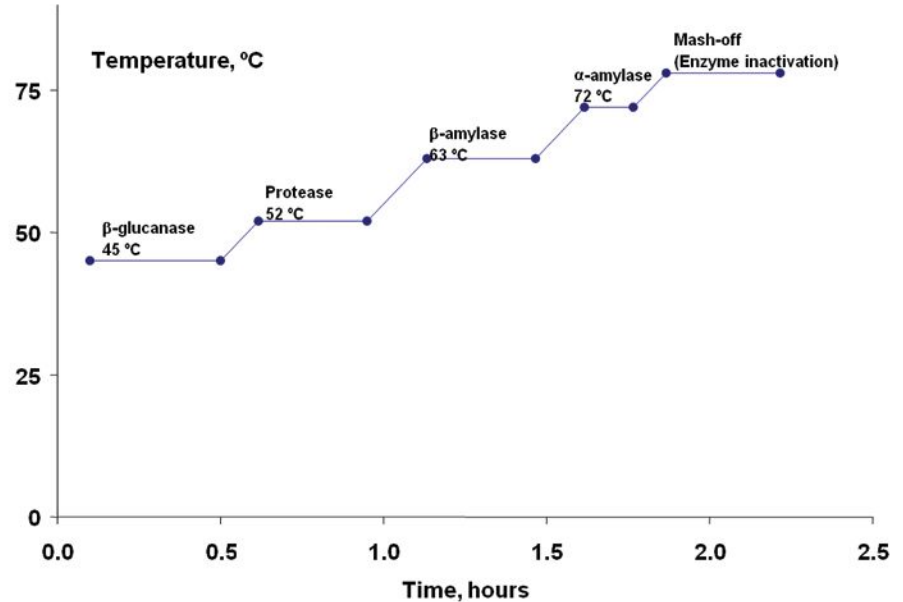
1.

# Proceso a Controlar

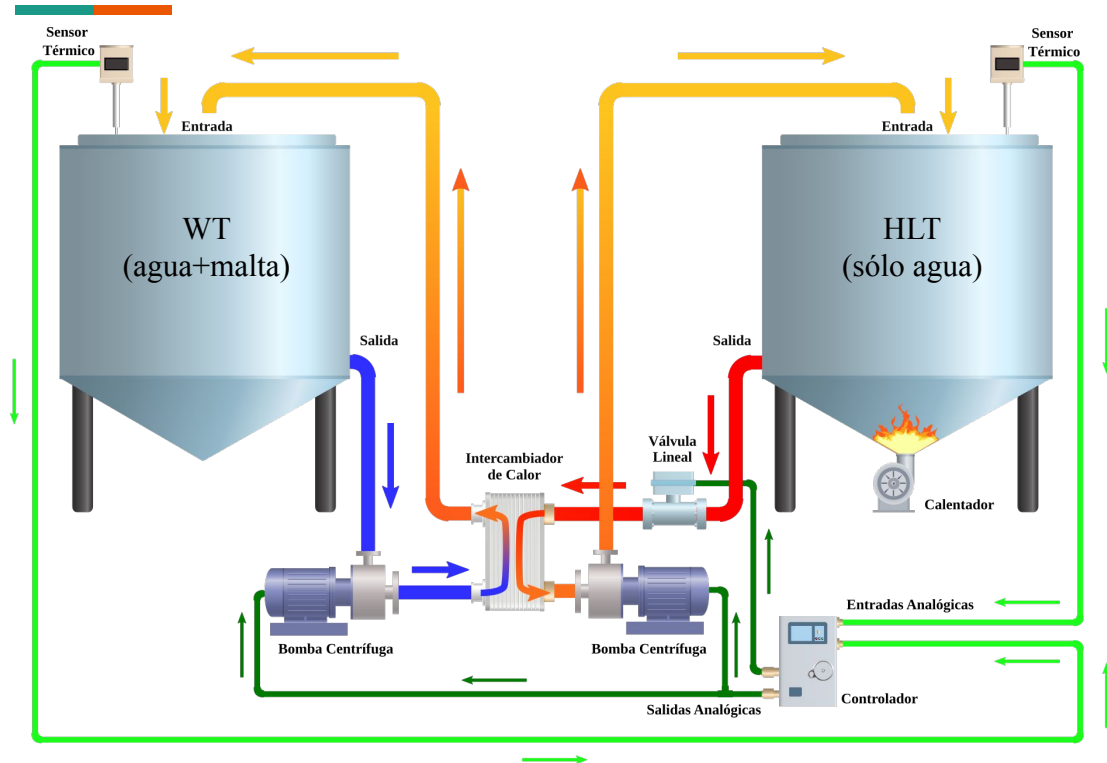
# Maceración escalonada

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:  $1015 \text{ a } 1060 \text{ kg/m}^3$

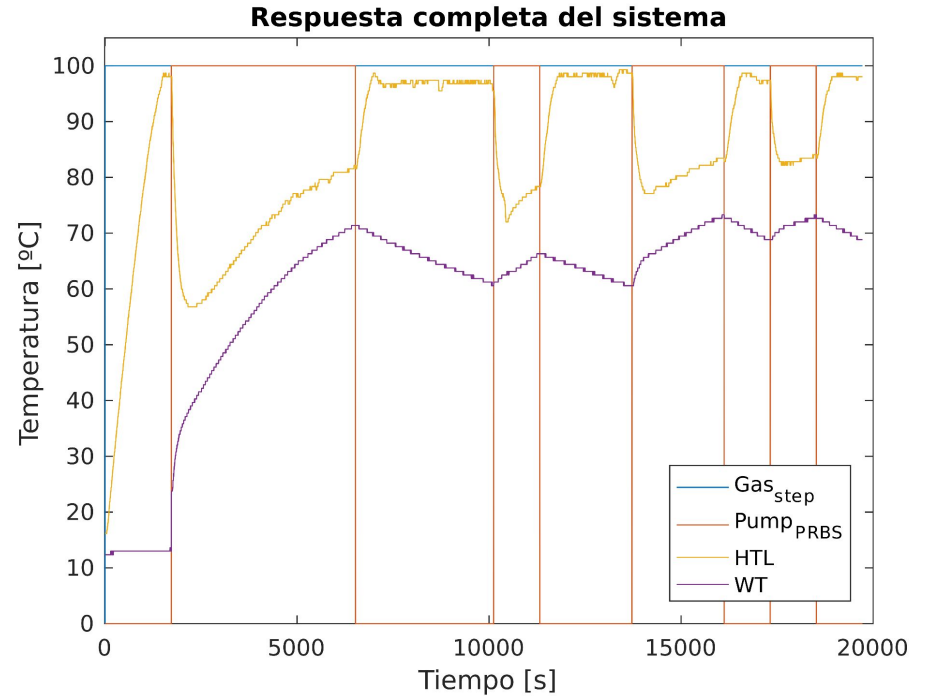
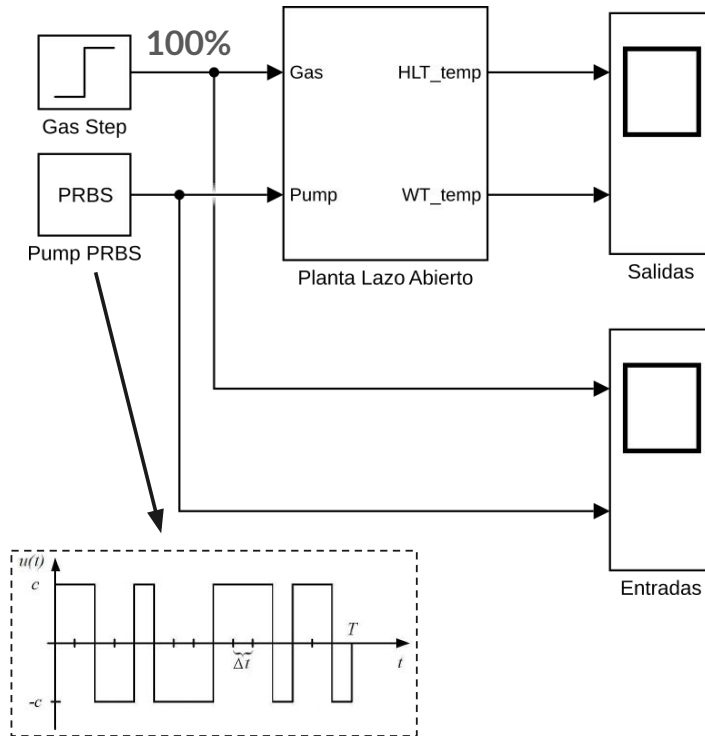
Calor Específico:

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

# Respuesta a un señal PRBS



# Modelo 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 sistema WT

## Modelo Seleccionado

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

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

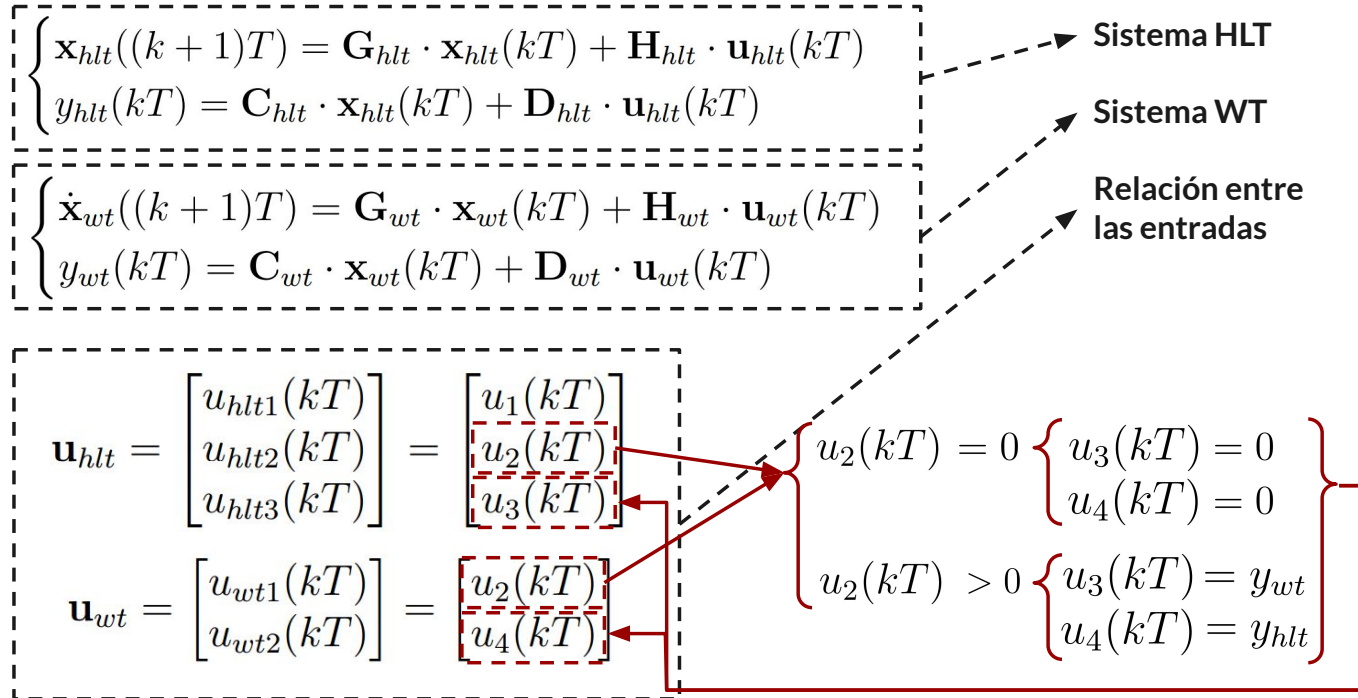
## Modelo WT

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

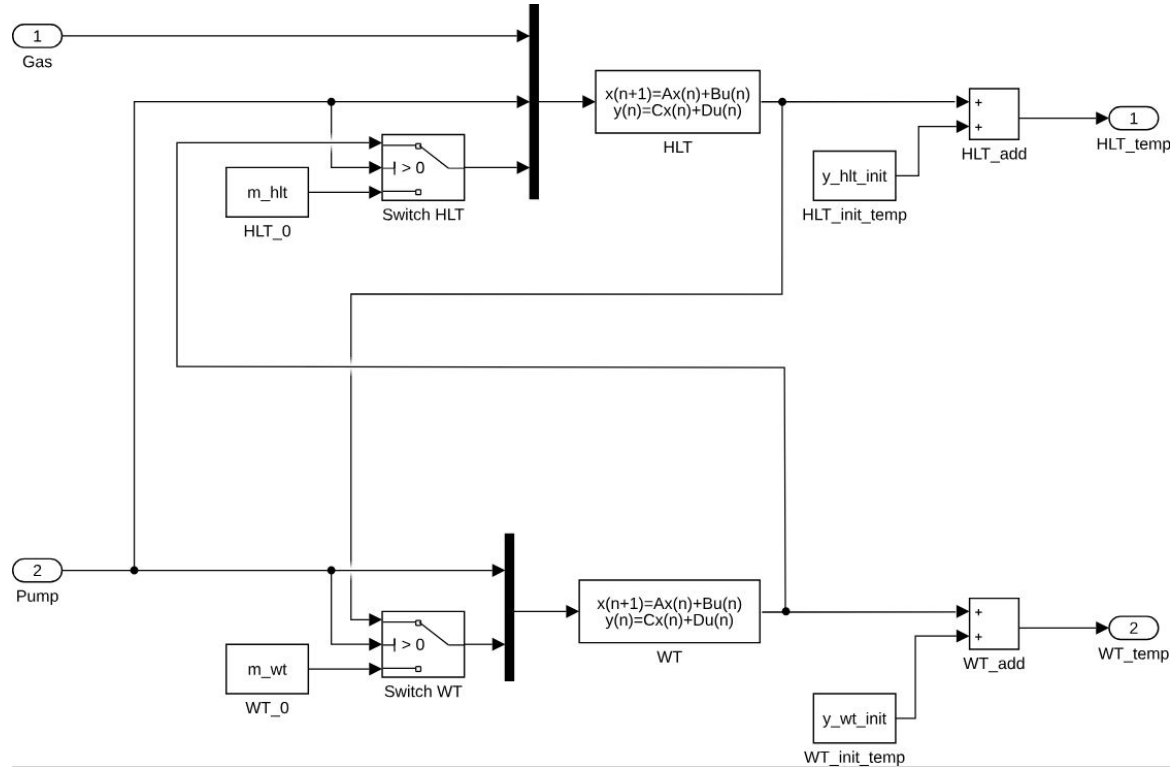
$$y_{wt}(kT) = \begin{bmatrix} c_{wt1} & c_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{wt1}(kT) \\ x_{wt2}(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{wt1} & d_{wt2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_2(kT) \\ u_4(kT) \end{bmatrix}$$



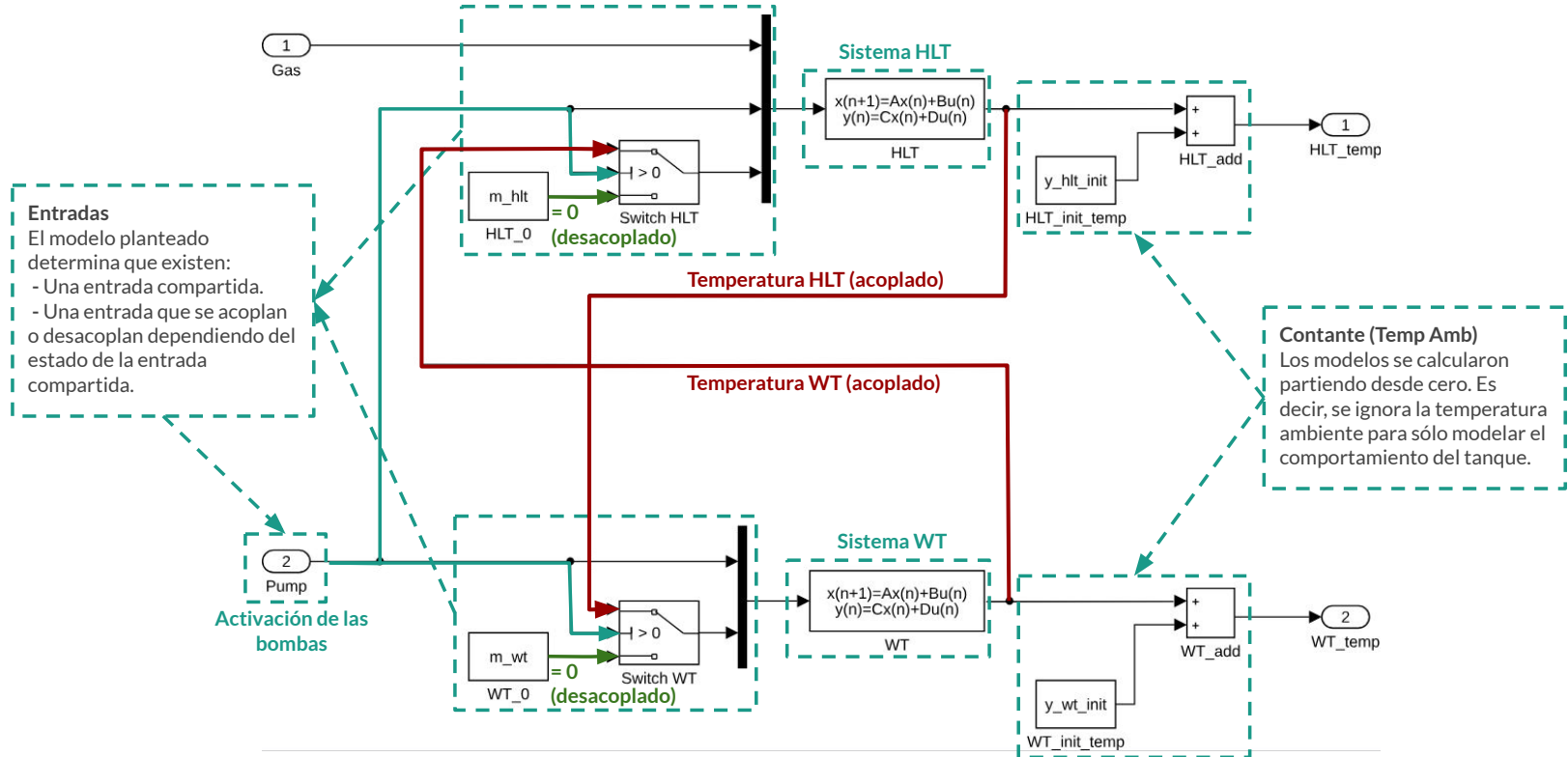
# Modelo del sistema completo



# Modelo de la planta



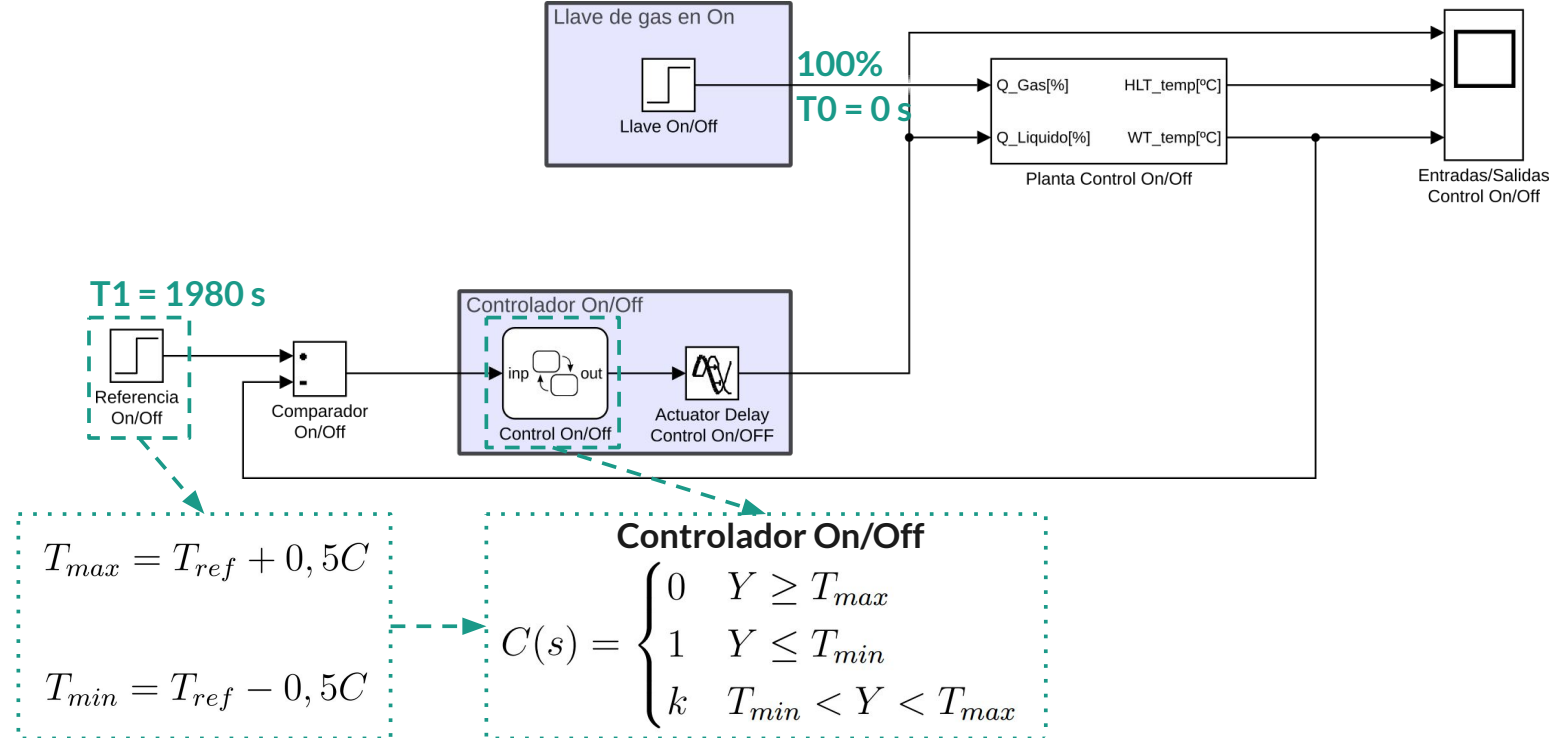
# Modelo de la planta



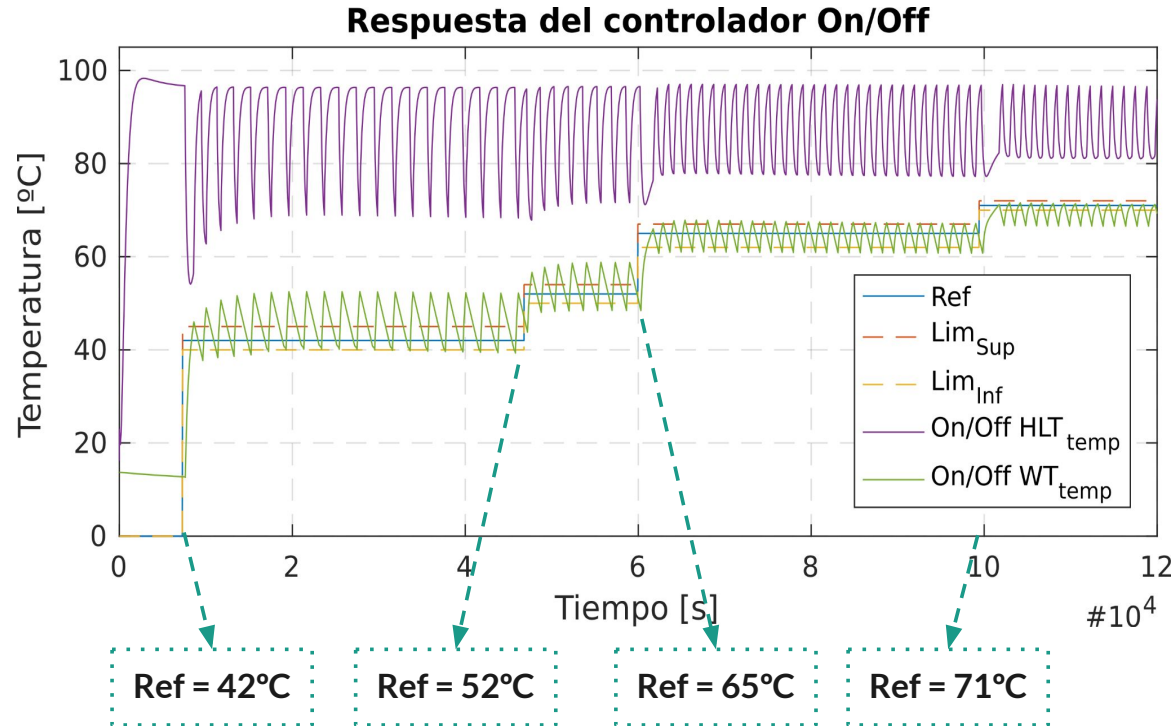
2.

# Diseño de los Controladores

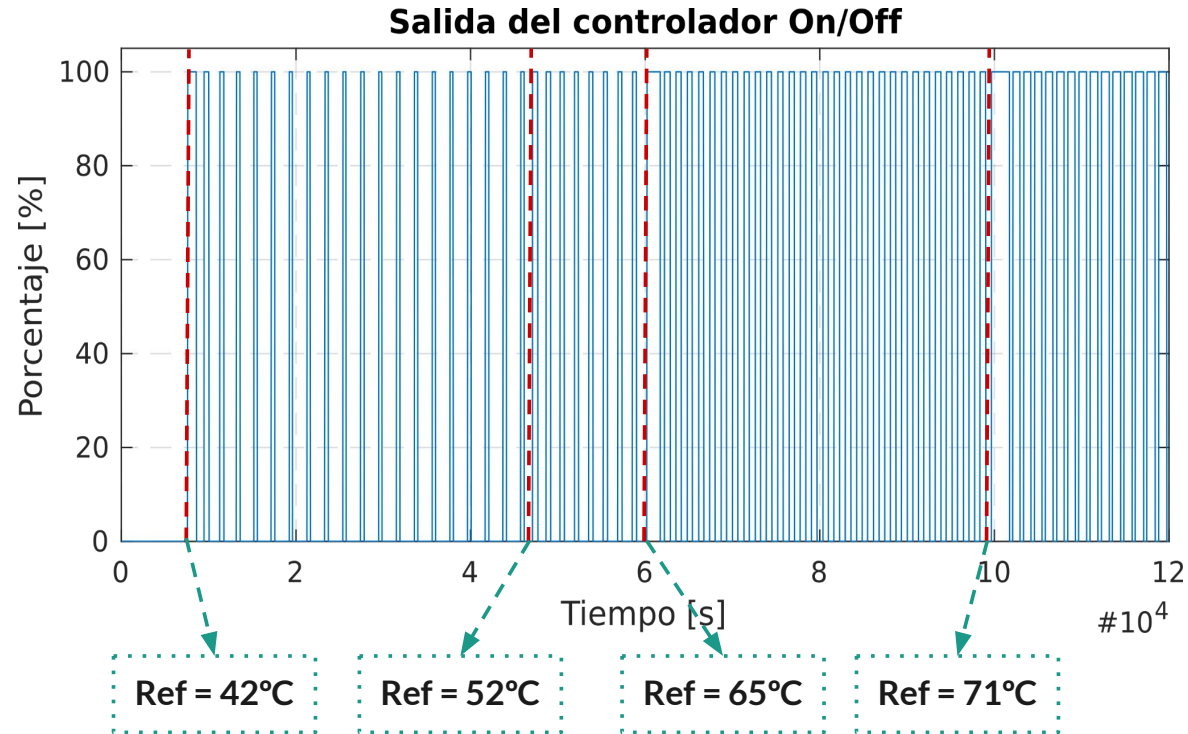
# Controlador On/Off



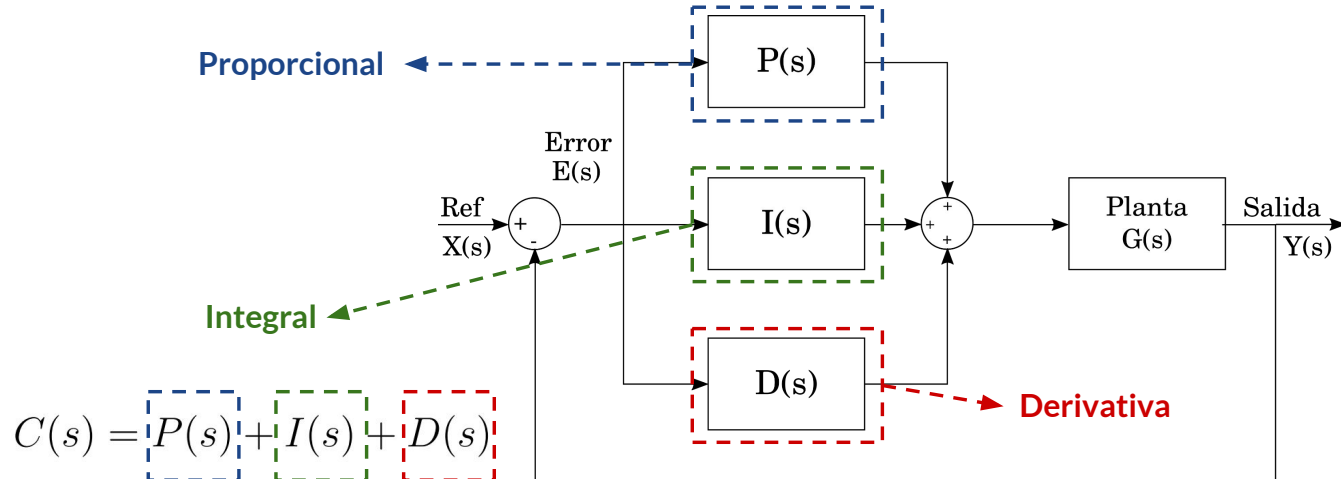
# Controlador On/Off



# Controlador On/Off



# Controlador PID



$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

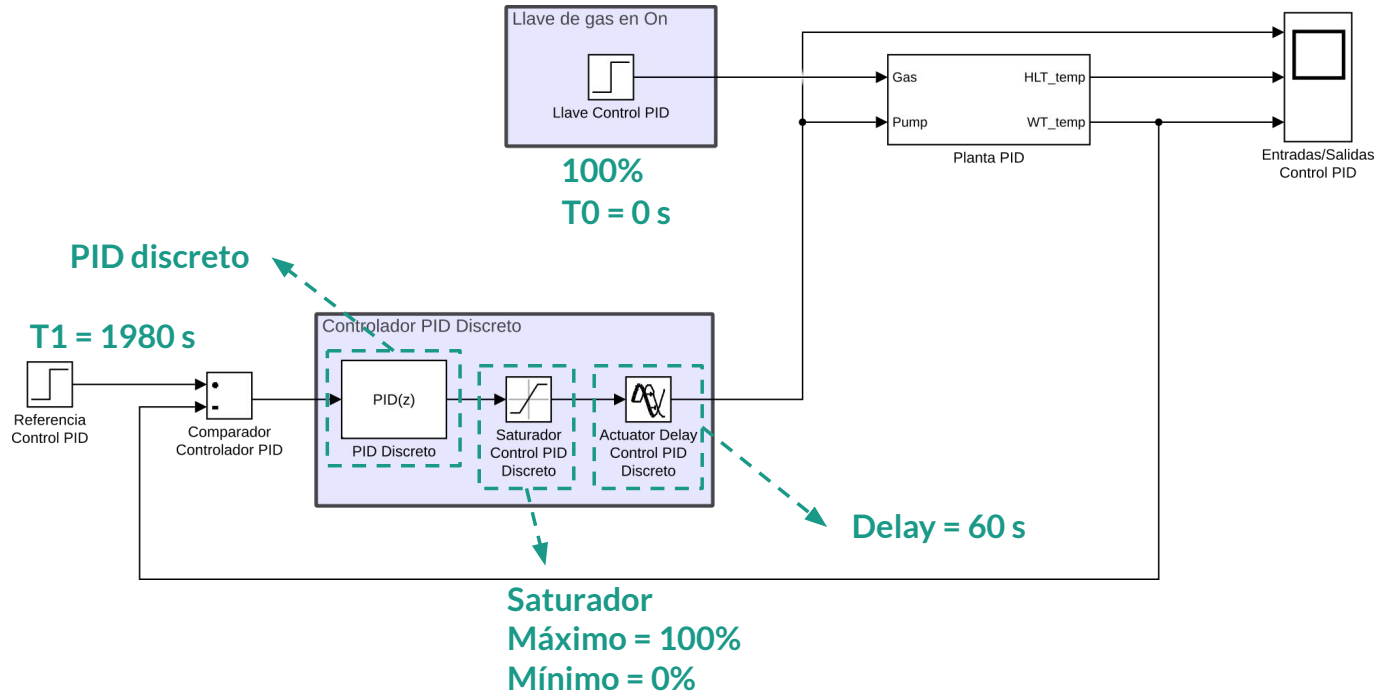
Ecuación en tiempo continuo

$$C(s) = K_p + K_i \cdot \frac{T}{z-1} + K_d \cdot \frac{1}{T} \frac{z-1}{z}$$

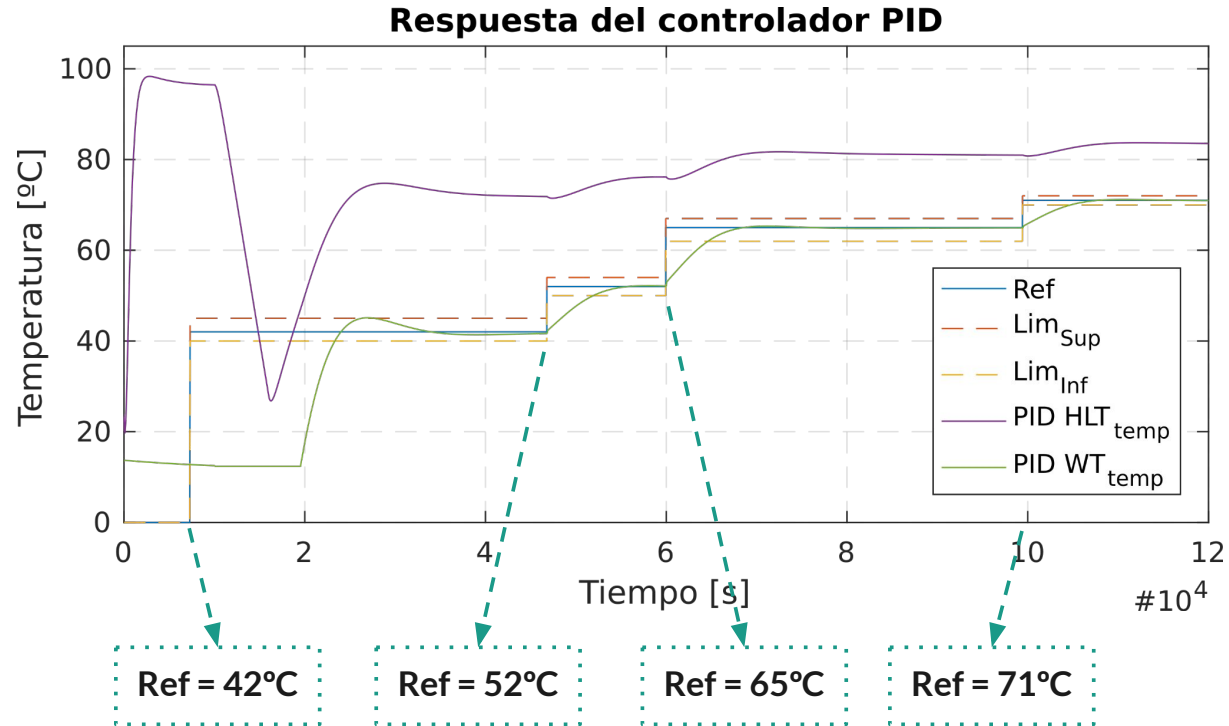
Ecuación en tiempo discreto



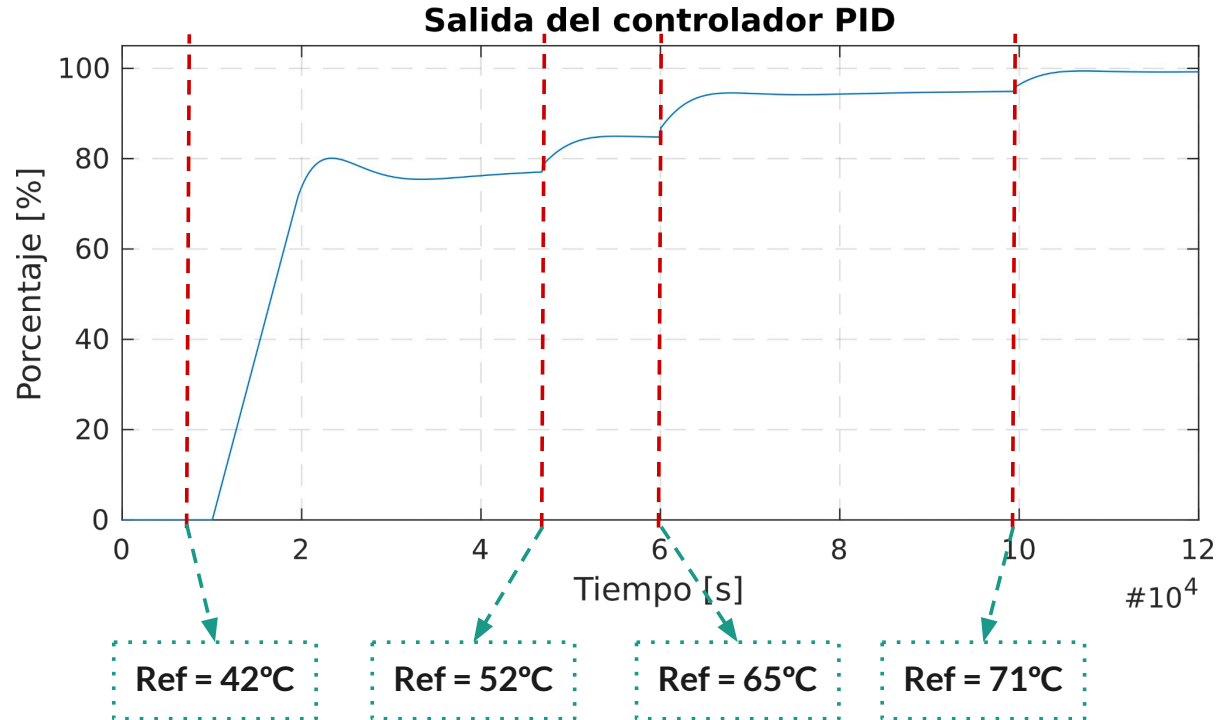
# Controlador PID



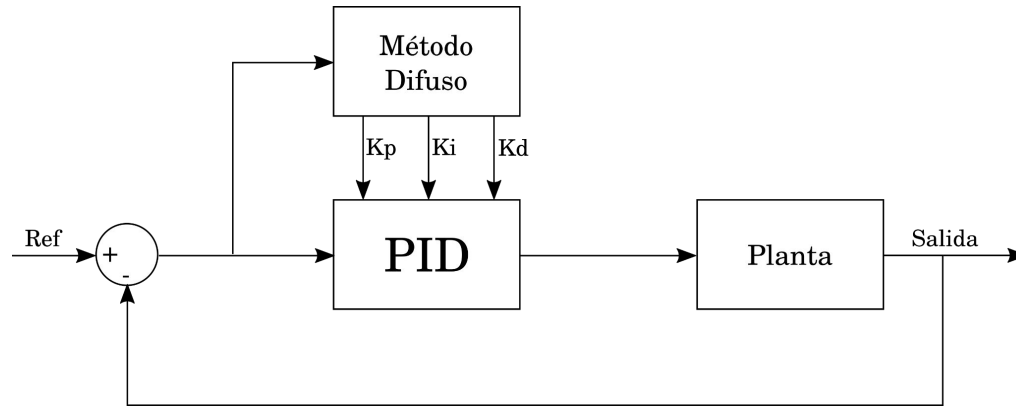
# Controlador PID



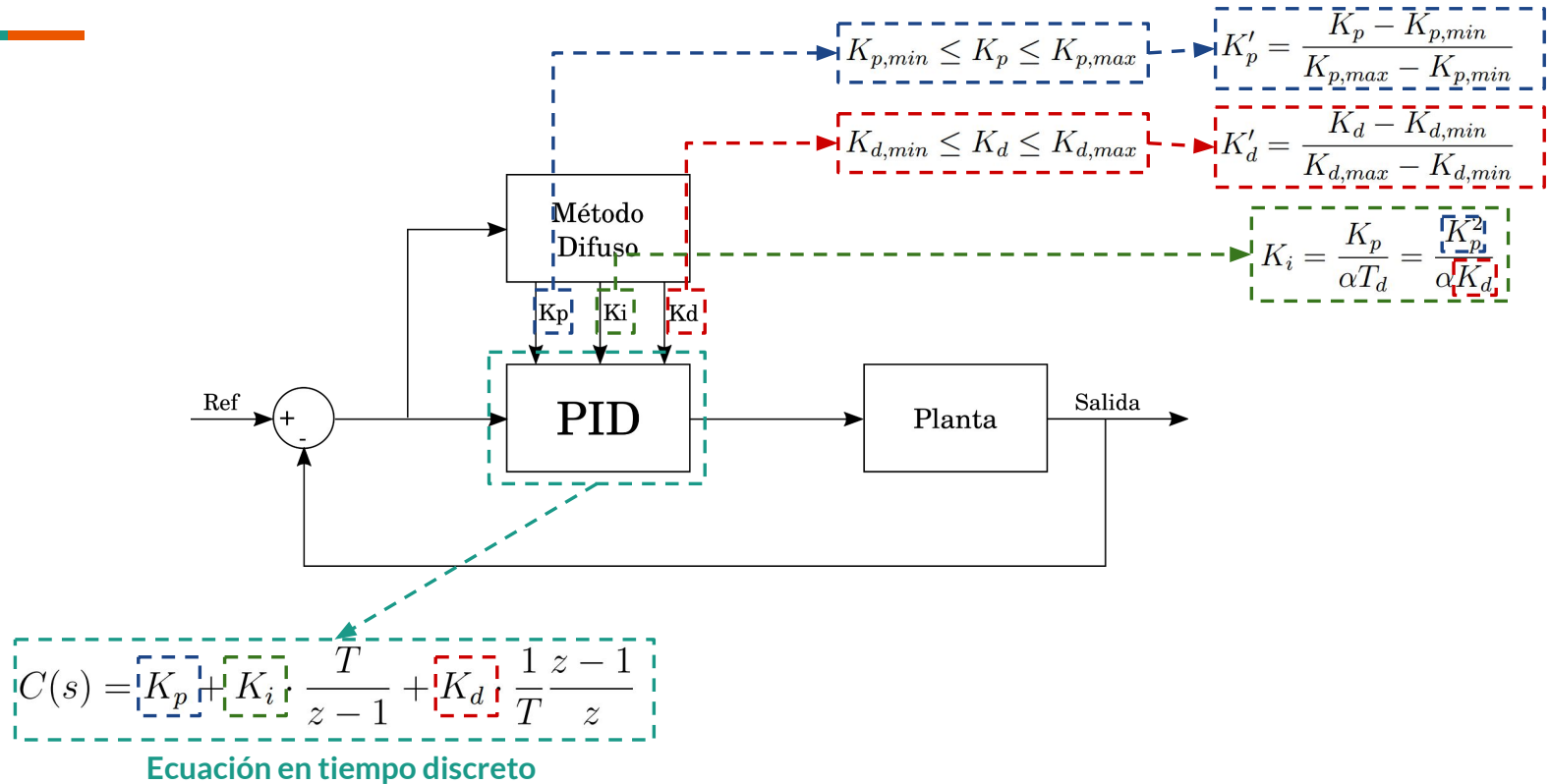
# Controlador PID



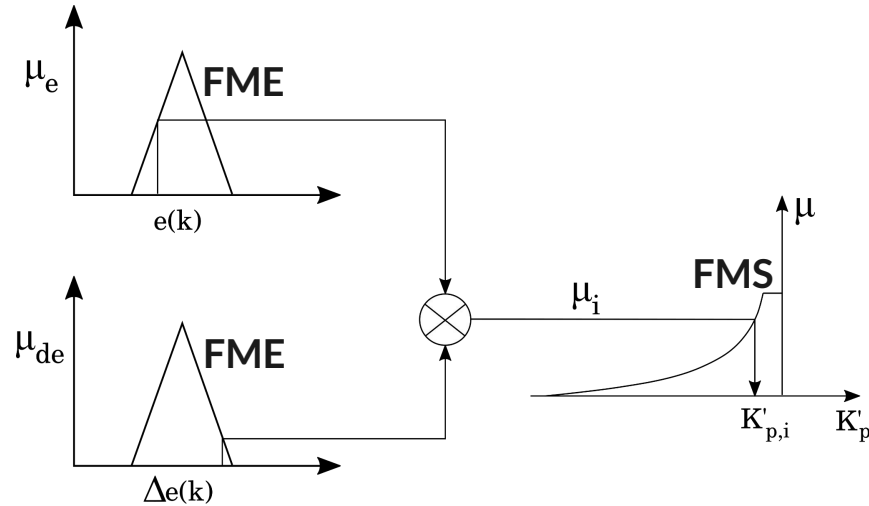
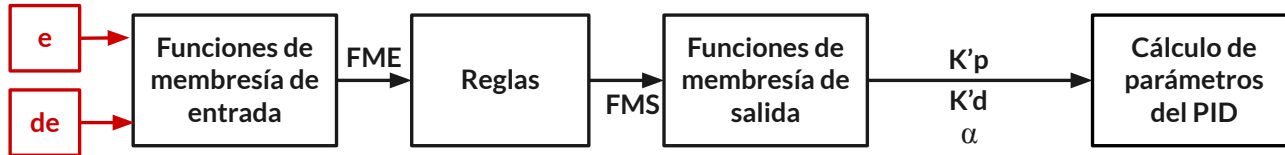
# Controlador Fuzzy



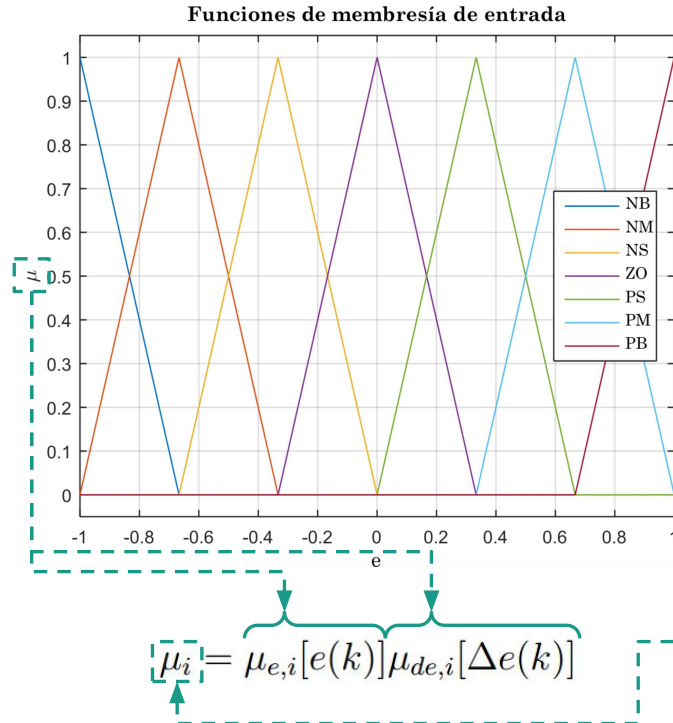
# Controlador Fuzzy



# Controlador Fuzzy



# Controlador Fuzzy



Normalización del error en el rango [-1,1]

$$x' = a + \frac{(x - \min(x))(b - a)}{\max(x) - \min(x)}$$

Cálculo de funciones de membresía de entrada

- NB: Negativa y de valor grande.
- NM: Negativa y de valor medio.
- NS: Negativa y de valor pequeño.
- ZO: Cero.
- PS: Positiva y de valor pequeño.
- PM: Positivo y de valor medio.
- PB: Positivo y de valor grande.

Cálculo de parámetro difuso del error y derivada del error

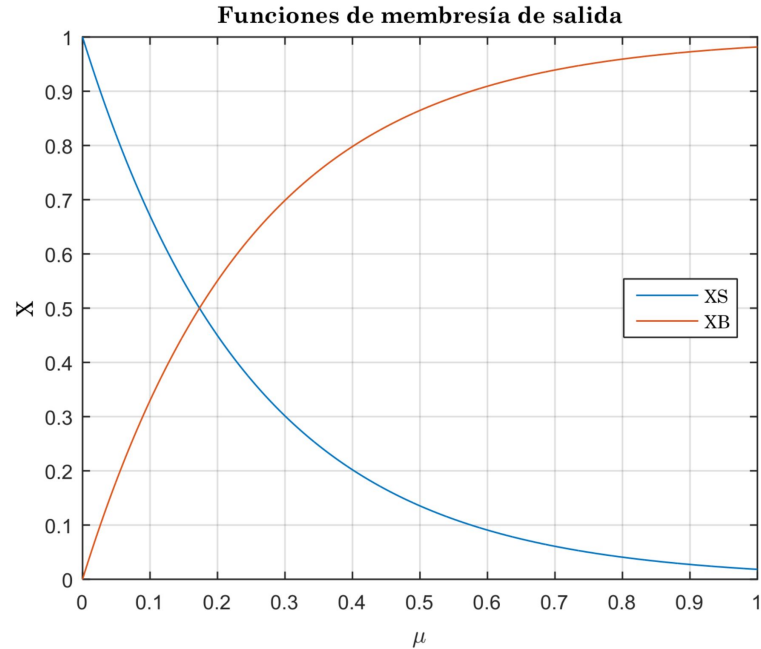
# Controlador Fuzzy

## Cálculo de la función de membresía de salida

- Nomenclatura genérica:  $X = K_p$  o  $K_d$
- **XS**: Se define como la función de membresía de valores pequeños, por su sigla en inglés.
- **XB**: Se define como la función de membresía de valores grandes, por su sigla en inglés.

$$XS(\mu) = e^{-4\mu}$$

$$XB(\mu) = 1 - e^{-4\mu}$$





# Controlador Fuzzy

K'p		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

K'd		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

$\alpha$		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	3	3	3	2	3	3	3
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	3	3	3	2	3	3	3
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{p,i} = 1$$

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min}$$

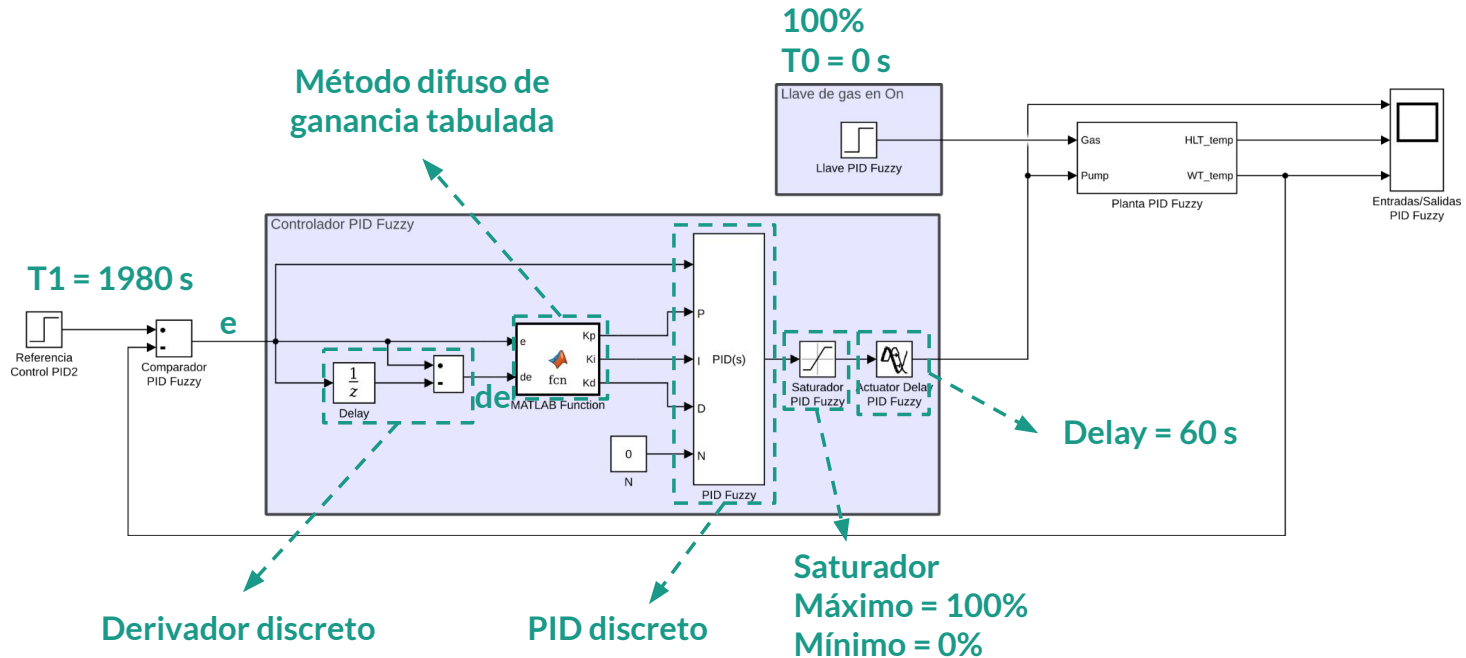
$$K'_d = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{d,i} = 1$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K'_d + K_{d,min}$$

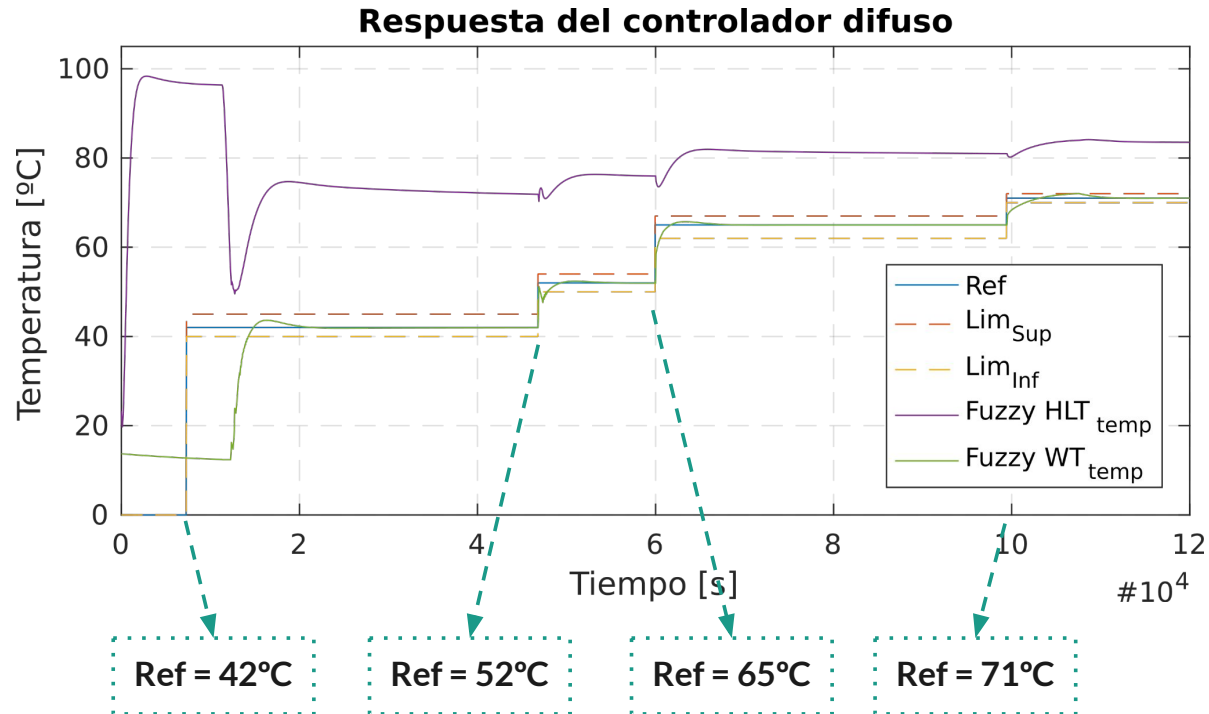
$$\alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i = 1$$

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha K_d}$$

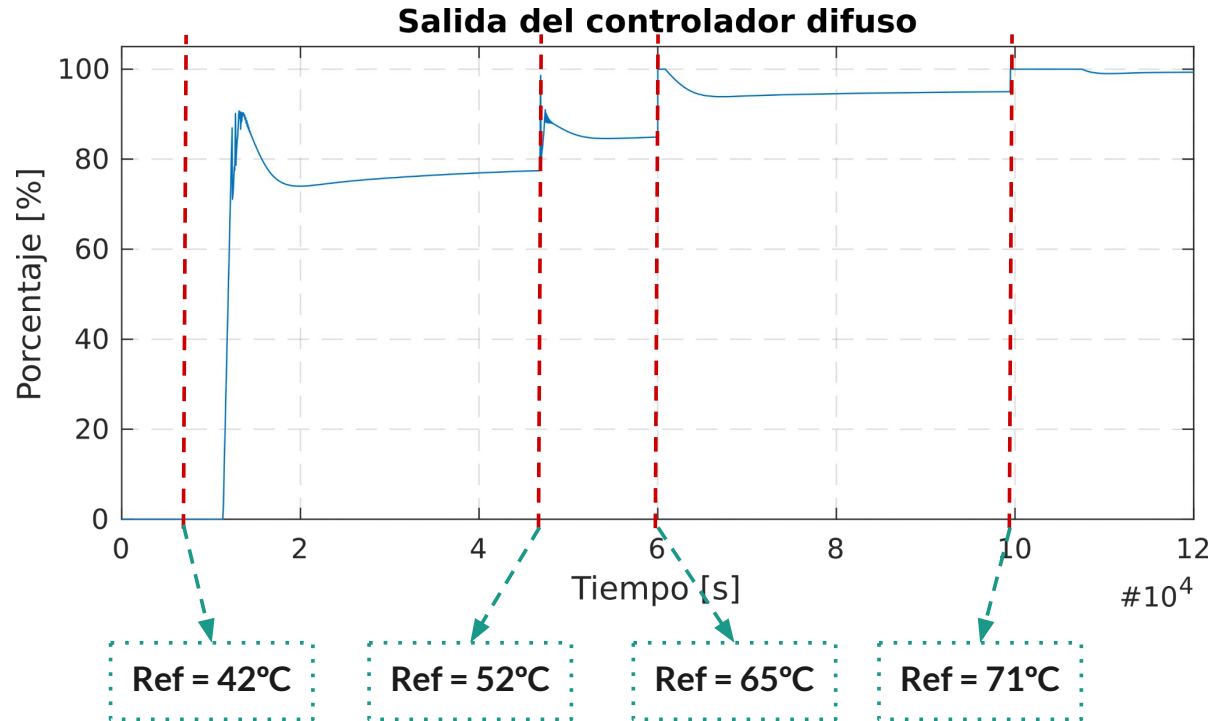
# Controlador Fuzzy



# Controlador Fuzzy



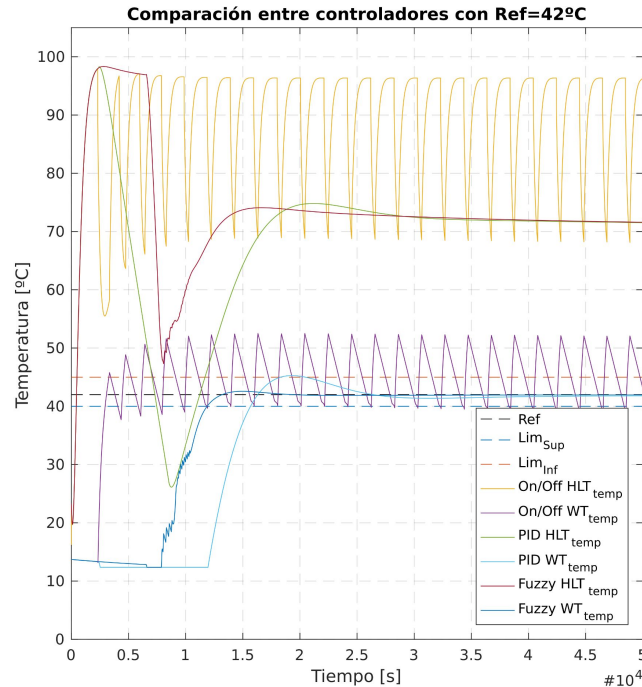
# Controlador Fuzzy



3.

# Análisis comparativo

# Comparación entre escalones unitarios



## On/Off

Ref [°C]	Min [°C]	Max [°C]	Tol [°C]	Tol <sub>objetivo</sub> [°C]
42	39,6	52,5	✗ -2,4/+10,2	-2/+3
52	48,5	59,3	✗ -3,5/+7,3	±2
65	61,0	68,4	✗ -4,0/+3,4	-3/+2
71	66,8	72,7	✗ -4,2/+0,7	±1

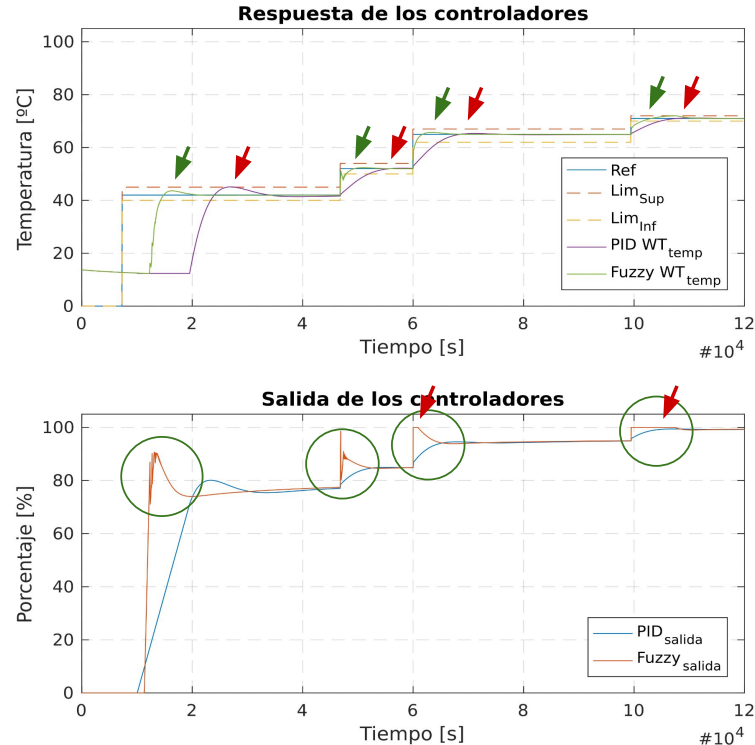
## PID

Ref [°C]	T <sub>p</sub> [°C]	Pico [%]	t <sub>p</sub> [min]	t <sub>tol</sub> [min]	Error <sub>RP</sub> [°C]	Tol <sub>objetivo</sub> [°C]
42	45,3	7,8	288	324	✓ ≈0	-2/+3
52	55,9	7,5	255	327	✓ ≈0	±2
65	69,3	6,6	234	309	✓ ≈0	-3/+2
71	75,7	6,6	235	339	✓ ≈0	±1

## Difuso

Ref [°C]	T <sub>p</sub> [°C]	Pico [%]	t <sub>p</sub> [min]	t <sub>tol</sub> [min]	Error <sub>RP</sub> [°C]	Tol <sub>objetivo</sub> [°C]
✓ 42	42,6	✓ 1,4	✓ 216	✓ 168	✓ ≈0	-2/+3
✓ 52	52,5	✓ 0,9	✓ 215	✓ 166	✓ ≈0	±2
✓ 65	65,6	✓ 0,9	✓ 216	✓ 163	✓ ≈0	-3/+2
✓ 71	71,9	✓ 1,3	✓ 143	✓ 102	✓ ≈0	±1

# Comparación entre escalones incrementales



# Robustez del controlador Fuzzy

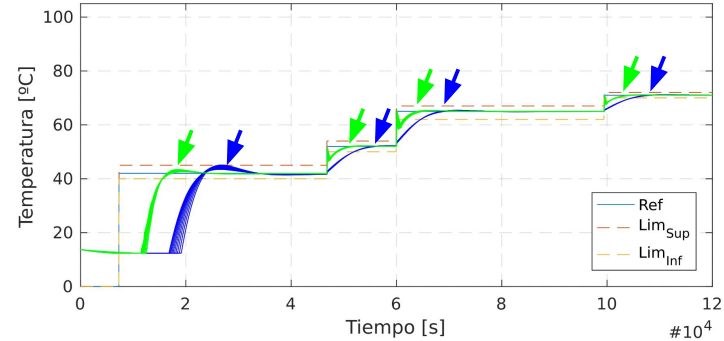
Incertidumbre multiplicativa en el modelo:

$$G(\tilde{k}T) = (1 + \Delta_m(kT))G(kT)$$

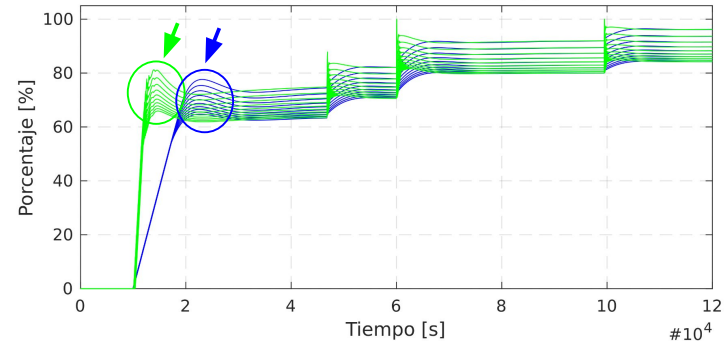
Variación de los  
parámetros de la planta

Ambos controladores son capaces de mantener su estabilidad aún cuando el modelo cambie sus parámetros **incrementalmente** desde un **10%** hasta **100%**

Respuesta del sistema a lazo cerrado



Salida de los controladores





# Muchas Gracias!

## Preguntas?