

# AGRO-SOFC

## Control System Profile of Greenhouse

Deyviss Jesús Oroya-Villalta

Universisty of Deusto

December 17, 2021

### 1 Introduction

En este documento presentaremos las señales de control generadas a partir de un modelo de simulación creado en MATLAB-Simulink. El modelo de simulación se ha adaptado a un invernadero de referencia, mediante parámetros como pueden ser su volumen, superficie, localización geográfica entre otras.

### 2 Reference greenhouse

Parameter	Value
$V$	$300 \text{ m}^3$
$A_f$	$50 \text{ m}^2$
$h$	$6 \text{ m}$

### 3 Model

El modelo de simulación será en tiempo continuo representado por una ecuación diferencial ordinaria. Este tendrá varios estados internos del sistema como pueden ser la temperatura de distintos elementos interior de los invernaderos, la humedad en el aire o la concentración de  $CO_2$ . Además este modelo tiene en cuenta el estado de la propia cosecha, como la cantidad de carbohidatos formados en las hojas, ramas y frutos a través de la temporada. Se obtendrá el perfil de los controles siguiendo lazo de control que explicaremos en este documento.

	Name	Notation	Unit
States	Indoor Temperature	$x_T$	$K$
	Indoor Radiation	$x_R$	$W/m^2$
	Indoor Humidity	$x_H$	$\%$
Controls	Fogging	$u_f$	$kg\{H_2O\}/s$
	Heater	$u_h$	$W$
	Shade Screen	$u_s$	$\%$
	Irrigation	$u_i$	$kg\{H_2O\}/s$
	Windows	$u_w$	$\%$
	Artificial Lighting	$u_a$	$W$
Disturbance	Exterior Temperature	$d_T$	$K$
	Exterior Radiation	$d_R$	$W/m^2$
	Wind Speed	$d_w$	$m/s$
	Exterior Humidity	$d_H$	$\%$
	Hour of day	$d_h$	$hour$

Table 1: Relevant control and state variables for this control system description

## 4 Controls

### 4.1 Fogging System

Los sistemas de nebulización son utilizados para mantener el extremo inferior de la humedad relativa controlada. Este sistema se activa cuando la humedad relativa interior  $x_H$  se encuentra por debajo de un límite inferior  $H_{min}$ . Cuando el sistema está encendido, éste no se apaga hasta que la humedad relativa interior  $x_H$  alcance los valores de  $H_{max}$ . Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$u_f^t(x_H, u_f^{t-\Delta t}) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_H > H_{max} \\ u_f^0 & \text{if } x_H < H_{min} \\ u_f^{t-\Delta t} & \text{if } x_H \in [H_{min}, H_{max}] \end{cases} \quad [kg\{H_2O\}/s] \quad (1)$$

Donde  $u_f^0$  es el flujo de agua cuando el sistema de fogging esta encendido.  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en el que la decisión tomada por el sistema de fogging es re-evaluada. Por otra parte  $u_f^{t-\Delta t}$  es el valor del sistema de fogging en el instante  $t - \Delta t$ .

De esta manera podemos reconstruir la señal de control un intervalo de tiempo  $n\Delta t$  de la siguiente manera:

$$u_f^t(x_H, u_f^{t-\Delta t}) \Rightarrow u_f^{t+\Delta t}(x_H, u_f^t) \Rightarrow u_f^{t+2\Delta t}(x_H, u_f^{t+\Delta t}) \Rightarrow \dots \Rightarrow u_f^{t+n\Delta t}(x_H, u_f^{t+(n-1)\Delta t}) \quad (2)$$

Con respecto flujo  $u_f^0$  tomaremos los datos expuestos en la web [WAT, 2021] (*Ultra fog preassure water Mist*), este toma el valor de  $w_f \sim 1 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  en S.I.  $w_f \sim (1/60) \text{ kg}\{H_2O\}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ .

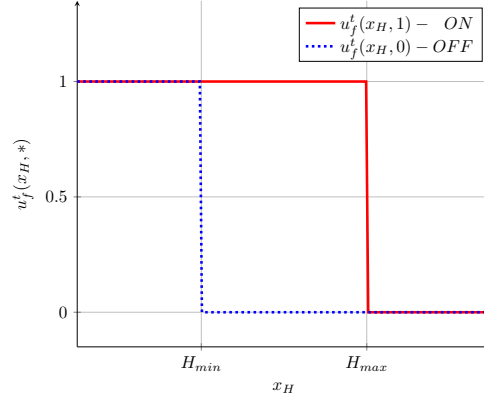


Figure 1: Fogging Hysteresis

Este es un ficha de especificaciones técnicas de un sistema comercial de fogging.

Teniendo en cuenta que el area del invernadero es  $A_f = 50 \text{ m}^2$ , obtenemos un flujo de agua hacia la humedad interior de:

$$u_f^0 = A_f \cdot w_f = 8.3 \times 10^{-1} \text{ kg}\{H_2O\}/s \quad (3)$$

Por otra parte, es necesario pulverizar el vapor en intervalos de  $\sim 30s$  ya que de otra manera las gotas de agua en el ambiente no son absorbidos y estos caen al suelo. De manera que el sistema de nebulización funciona durante  $\sim 15s$  y permanece apagado durante otros  $\sim 45s$ . Dado que el objetivo de la simulación es obtener un perfil anual de funcionamiento y la dinámica del sistema de fogging tiene escala de segundos remplazaremos este funcionamiento por su comportamiento medio en un minuto. Entonces en un funcionamiento normal del sistema de fogging el caudal debe ser reducido a un tercio ( $15s/45s \rightarrow 1/3$ ) con el objetivo de promediar el tiempo que apagado y encendido.

$$u_f^0 = \frac{1}{3} A_f \cdot w_f = 2.77 \times 10^{-1} \text{ kg}\{H_2O\}/s \quad (4)$$

Con respecto a los limite de funcionamiento de apagado y encendido son tal que la humedad relativa interior no sea inferior de  $H_{min} = 40\%$  ni superior de  $H_{max} = 80\%$ .

En resumen los parámetros de este sistema están recogidos en la Tabla 2.

De manera que podemos ver que en un funcionamiento de  $15s + 45s = 60s$  se descarga una masa de agua de  $16 \text{ kg}\{H_2O\}/min$  en una capacidad aproximada de  $(40 \sim 90) \text{ kg}\{H_2O\}$  teniendo en cuenta esta capacidad de agua en el aire interior depende de la temperatura en el rango de temperatura  $(15 \sim 30)^\circ C$ .

$$(40 \sim 90) \text{ kg}\{H_2O\} \rightleftharpoons (15 \sim 30)^\circ C \quad (5)$$

Parameter	Value
$\Delta t$	1 minute
$u_f^0$	$2.77 \times 10^{-1} \text{ kg}\{H_2O\}/s$
$H_{min}$	40%
$H_{max}$	60%

Table 2: Parámetros de Fogging

## 4.2 Irrigation System

El sistema de Irrigación tiene carácter periódico de periodo un día. Este se activará en intervalos de 5 minutos con paradas de 60 minutos. El tiempo de irrigación dependerá de la radiación acumulada el día anterior. De esta manera, se tiene en cuenta el efecto de la transpiración de las plantas.

De manera que definiremos la duracion de irrigación  $\Delta t_i$  como:

$$\Delta t_i = 3 + \lfloor \alpha_{n_i} \cdot x_{AR} \rfloor \quad [hours] \quad (6)$$

Donde  $\lfloor * \rfloor$  es el operador que toma la aproximación entera más cercana por debajo.

Durante el tiempo de funcionamiento  $\Delta t_i$  la irrigación esta en funcionamiento durante 5 minutos con un caudal de  $i_{flow} = 3L\{H_2O\}/(h \cdot \text{gotero})$ , o expresado en S.I.  $i_{flow} = 8.33 \times 10^{-4} \text{ kg}\{H_2O\}/(s \cdot \text{gotero})$ . Teniendo en cuenta que un invernadero tiene aproximadamente una densidad de goteros<sup>1</sup> de  $\rho_g = 1.5 \text{ goteros}/m^2$ , y que el area de nuestro invernadero es de  $A_f = 50 \text{ m}^2$ ; podemos obtener el flujo de agua total de todo el invernadero como:

$$I_{flow} = A_f \cdot \rho_g \cdot i_{flow} = 6.25 \times 10^{-2} \text{ kg}\{H_2O\}/s \quad (7)$$

La ley de irrigación es una función de la hora del día  $h$ , y minuto de la hora  $m$ , además del tiempo adicional de irrigación  $\Delta t_i$  y este a su vez es función de la radiación acumulada  $x_{AR}$ .

$$I(\Delta t_i, h, m) = \begin{cases} \text{if } (m < m_0) \ \& \ (h \in [9, 9 + \Delta t_i]) & \Rightarrow I_{flow} \\ \text{else} & \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (8)$$

A continuación resumimos los parámetros de funcionamiento en la Tabla 4.2.

### 4.2.1 Cantidades de Referencia

A grandes rasgos durante un día el número de irrigaciones es de  $\sim 5$  veces dando lugar a un consumo diario de agua aproximado (D.W.C) de:

$$D.W.C \approx 5 \cdot I_{flow} \cdot m_0 \cdot \frac{60s}{1min} = 9.3 \times 10^1 \text{ kg}\{H_2O\} \quad (9)$$

---

<sup>1</sup>Este valor se ha tomado de un invernadero localizado en Meñaka con una superficie de  $(80 \times 40)m^2$  con un total de 1150 goteros. Podemos estimar que el invernadero de referencia tendrá aproximadamente 72 goteros.

Parameter	Description	Value
$\rho_g$	Densidad de goteros	$1.5 \text{ goteros}/m^2$
$A_f$	Area del invernadero de referencia	$50 \text{ m}^2$
$i_{flow}$	Flujo de agua por gotero	$8.33 \times 10^{-4} kg\{H_2O\}/(s \cdot \text{goteros})$
$\alpha_{n_i}$	Coefficiente propocional de horas extra de irrigación por 1MW	$10^{-6} h/(W/m^2)$
$m_0$	Minutos de irrigación en una hora	$5 \text{ mins}$
$I_{flow}$	Flujo total de agua en todo el invernadero	$6.25 \times 10^{-2} kg\{H_2O\}/s$

### 4.3 Shading Screens

Sistema horario de funcionamiento, por las noches cerrada para aumentar la inercia térmica del invernadero, mientras que por el día solo se abre si el nivel de radiación supera un cierto límite.

$$u_{scr}^{target}(R_i^{sm}) = \begin{cases} 0 & \text{if } R_i^{sm} > 50 \text{ W}/m^2 \\ 100 & \text{if } R_i^{sm} < 50 \text{ W}/m^2 \end{cases} \quad (10)$$

Donde es  $R_i^{sm}$  de la radiación suavizada de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \frac{dR_i^{sm}}{d\tau} &= R_i(\tau) \quad \tau \in [0, 24] \text{ hours} \\ R_i^{sm}(0) &= 0 \end{cases} \quad (11)$$

Por otra parte, con el fin de que la velocidad de las pantallas de sombreo sea limitada a  $v_{src} = 100\%/0.5h$  (el sistema tardara media hora en cerrar o abrir completamente desde el estado opuesto).

$$\begin{cases} \frac{du_{scr}}{d\tau} &= v_{src} \tanh(u_{scr}^{target}(R_i) - u_{scr}) \\ du_{scr}(0) &= 0 \end{cases} \quad (12)$$

### 4.4 Heating System

El sistema de calefacción actua de la misma manera que el fogging pero teniendo en cuenta el valor de la temperatura. Este es un controlador para el el limite inferior de tempeartura como extremo inferior. Matemáticamente se puede expresar como:

$$u_{heat}^t(x_H, u_{heat}^{t-\Delta t}) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_i > T_{max} \\ u_{heat}^0 & \text{if } T_i < T_{min} \\ u_{heat}^{t-\Delta t} & \text{if } x_T \in [T_{min}, T_{max}] \end{cases} \quad (13)$$

A contiución presentamos una representación gráfica de la ecuación (13) en la Figura 3.

Parameter	Value
$\Delta t$	5 mins
$u_{heat}^0$	$10^7 W$
$T_{min}$	$12^\circ C$
$T_{max}$	$20^\circ C$

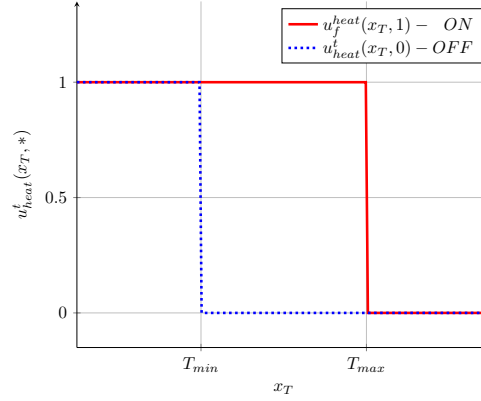


Figure 2: Fogging Hysteresis

## 4.5 Sistema de Ventilación

El sistema de ventilación tiene dos modos de funcionamiento dependiendo si estamos de día o de noche. De día el sistema de ventilación tiene como objetivo el mantener la temperatura en el interior por debajo de la “Temperatura de Calefacción”, usualmente con un valor de  $18^\circ C$ . Este actúa de manera proporcional empezando desde la temperatura de calefacción y terminando con la apertura máxima de la ventana.

$$u_{win}^{day}(T_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_i < T_{ven} \\ 100 \cdot (T_i - T_{ven}^{min}) / (T_{ven}^{max} - T_{ven}^{min}) & \text{if } T_i \in [T_{ven}^{min}, T_{ven}^{max}] \end{cases} \quad (14)$$

Con el fin de evitar ruido en el funcionamiento de las ventanas no se utiliza la señal de la temperatura interior directamente sino una media móvil.

Por la noche el sistema de ventilación entiende que el set-point superior de  $18^\circ C$  está controlado ya que la temperatura exterior está muy lejos de este valor. Es por ello que el sistema de ventilación no actúa para controlar la temperatura, sino para controlar los niveles de humedad. Cuando la temperatura baja, la concentración de vapor de agua en el aire también disminuye. Esto hace que sea más fácil alcanzar niveles de humedad relativa alto, es por ello que para evitar la condensación en las paredes del invernadero se utiliza la ventilación para que la humedad interior y exterior se homogenizen.

De noche la ley de control se puede escribir como:

$$u_{win}^{night}(H_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } H_i < H_{ven} \\ 10 \cdot (H_i - H_{ven}^{min}) / (H_{ven}^{max} - H_{ven}^{min}) & \text{if } H_i \in [H_{ven}^{min}, H_{ven}^{max}] \end{cases} \quad (15)$$

Con el fin de tener en cuenta el cambio de la salida y puesta de sol provocado por los cambios de estaciones, utilizaremos la radiación como método de cambio de control. De manera que:

$$u_{win}(R_i, T_i, H_i) = \begin{cases} u_{win}^{night}(H_i) & R_i \leq 50W/m^2 \\ u_{win}^{day}(T_i) & R_i > 50W/m^2 \end{cases} \quad (16)$$

#### 4.6 Sistema de Radiación Artificial

El sistema de radiación artificial se activa si la radiación acumulada interior  $AR_i$  es inferior a un threshold  $AR_i^{min}$ . Este se activa a partir de las 22 : 00 horas y además la duración de funcionamiento es proporcional al gap de radiación acumulada. Esta ley se cumple hasta un máximo de duración de  $d_{max} = 4$  horas.

De esta manera si llamamos  $\mathcal{R}$  a la radiación acumulada hasta las 22 : 00

$$\mathcal{R} = \frac{1}{(3600 * 24)s} \int_t^{t-3600} R_i(\tau) d\tau \quad (17)$$

Entonces la duración se puede calcular como:

$$\Delta t_r(\mathcal{R}) = \begin{cases} 0 & \mathcal{R} > \mathcal{R}^{min} \\ \beta(\mathcal{R} - \mathcal{R}^{min}) & \mathcal{R} \in [\mathcal{R}^{min}, \mathcal{R}^{max}] \\ d_{max} & \mathcal{R} > \mathcal{R}^{max} \end{cases} \quad (18)$$

Este valor se calcula cada día a las 22 : 00.

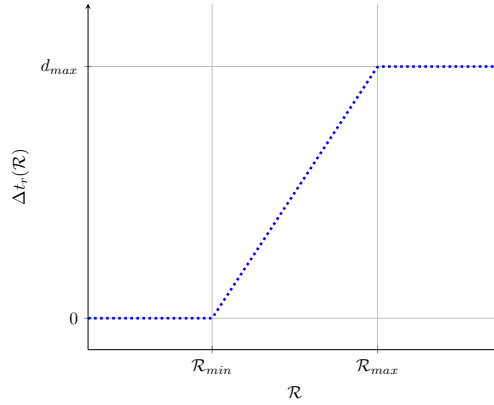


Figure 3: Duration of Lighting System

Donde la radiación acumulada máxima  $\mathcal{R}^{max}$  donde el valor de la duración se satura es  $\mathcal{R} = d_{max}/\beta + \mathcal{R}^{min}$ .

$$u_{ar}(\Delta t_r, h, m) = \begin{cases} \text{if } (m < m_0) \ \& \ (h \in [22, 22 + \Delta t_r]) & \Rightarrow u_{ar}^0 \\ \text{else} & \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (19)$$

## 5 Datos de Entrada

Esta simulación se a realizado con mezcla de datos climáticos tomados de la estación meteorológica (Radiación, Temperatura y Velocidad del viento) y una señal de humedad relativa de la estación meteorológica cercana. Estos datos tienen un tiempo de muestro de diez minutos empezando el 01/01/2019 00:00:00 y terminando en 31/12/2019 00:00:00

## References

[WAT, 2021] (2021). Water mist — ultrafog. <http://www.ultrafog.com/water-mist>. (Accessed on 12/16/2021).