

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



# **Diseño de Control y Optimización Energética para Sistema de Enfriamiento de Paneles Fotovoltaicosgit**

**Grupo 17:**  
Joshua S. Oliva Parra

## **Informe 1**

Profesor: Juan Pablo Segovia Vera

Concepción, 1 de diciembre de 2025

## Resumen

El presente proyecto aborda la problemática de la degradación térmica y pérdida de eficiencia en paneles fotovoltaicos, diseñando y validando una estrategia de enfriamiento activo por agua en circuito cerrado. El objetivo principal fue implementar un sistema de control en lazo cerrado capaz de mantener la temperatura operativa del panel bajo el límite de seguridad de 55 °C, optimizando simultáneamente el consumo energético de los actuadores.

La metodología consistió en la implementación de un algoritmo de control Proporcional ( $P$ ) con compensación de punto de operación, gestionando de forma híbrida una bomba hidráulica y un ventilador mediante saturación de voltaje. A través de simulaciones dinámicas en MATLAB bajo escenarios de perturbación realistas (días despejados, nublados e intermitentes), se sintonizó una ganancia de  $K_c = -0,25$ , priorizando la estabilidad y la suavidad de actuación.

Los resultados validaron la robustez del diseño, logrando mantener la temperatura máxima del panel en 54,04 °C bajo condiciones de carga extrema, con un sobrepaso marginal de 0,13 °C. El hallazgo más significativo fue la eficiencia energética del sistema: la estrategia propuesta redujo el consumo eléctrico diario en un 94,86 % respecto a la operación convencional en lazo abierto, disminuyendo la demanda de 0,720 kWh a solo 0,037 kWh. Esto confirma la viabilidad técnica y económica de la modulación activa de potencia para la gestión térmica de sistemas fotovoltaicos.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Metodología</b>	<b>6</b>
2.1	Descripción del Sistema y Modelo Conceptual . . . . .	6
2.2	Diseño de la Estrategia de Control en Lazo Cerrado . . . . .	8
2.2.1	Algoritmo de Control Proporcional . . . . .	8
2.2.2	Gestión de Actuadores . . . . .	9
2.3	Métricas de Evaluación . . . . .	10
2.3.1	Temporales . . . . .	10
2.3.2	Energéticas (Consumo de Energía) . . . . .	12
2.4	Simulación . . . . .	13
2.4.1	Escenarios de Simulación . . . . .	13
2.4.2	Pruebas/Simulaciones a Realizar . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>19</b>
3.1	Caracterización de la Respuesta en Lazo Abierto . . . . .	19
3.2	Análisis de Estabilidad y Sintonización del Controlador . . . . .	21
3.3	Evaluación de Desempeño Transitorio . . . . .	23
3.4	Validación ante Escenarios de Perturbación Dinámica . . . . .	25
3.4.1	Escenario 1: Carga Máxima (Día Despejado) . . . . .	25
3.4.2	Escenario 2: Carga Reducida (Día Nublado) . . . . .	26
3.4.3	Escenario 3: Día Parcialmente Nublado (Día Intermitente) . . . . .	27
3.5	Análisis de Eficiencia Energética . . . . .	28
3.5.1	Comparación: Lazo Abierto vs. Lazo Cerrado . . . . .	29
3.5.2	Desglose por Escenarios Climáticos . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>A</b>	<b>Modelado Matemático de Perturbaciones Intermitentes</b>	<b>33</b>
A.1	Función de Irradiancia Solar . . . . .	33
A.2	Función de Temperatura Ambiente con Inercia . . . . .	34
<b>B</b>	<b>Códigos Fuente MATLAB</b>	<b>36</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>

# Índice de figuras

2.1	Diagrama esquemático del proceso en lazo abierto con generador de señal tipo escalón.	7
2.2	Diagrama esquemático del proceso en lazo cerrado . . . . .	8
2.3	(a) Temperatura Ambiente ( $T_{amb}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ ) . . . . .	15
2.4	(a) Temperatura Ambiente ( $T_{amb}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ ) . . . . .	16
2.5	(a) Temperatura Ambiente ( $T_{amb}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ ) . . . . .	17
3.1	Respuesta dinámica del sistema en Lazo Abierto ante una entrada tipo escalón en horas de mayor carga térmica con perturbaciones de día despejado. . . . .	20
3.2	(a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel solar. (b) Tensión (V) aplicada en cada actuador. . . .	22
3.3	Respuesta transitoria del sistema controlado ante un escalón de referencia de $45^{\circ}\text{C}$ a $55^{\circ}\text{C}$ . . . . .	24
3.4	(a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores. . . . .	26
3.5	(a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores. . . . .	27
3.6	(a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores. . . . .	28
3.7	Energía Consumida por el sistema de refrigeración en Lazo Abierto. . . . .	29
3.8	Energía Consumida por el sistema de refrigeración en Lazo Cerrado. . . . .	29

# Índice de cuadros

2.1	Valores usados para la generación de $T_{amb}$ y $G$ para el día soleado . . . . .	15
2.2	Valores usados para la generación de $T_{amb}$ y $G$ para el día nublado . . . . .	16
3.1	Resumen de métricas de desempeño temporal para $K_c = -0,25$ . . . . .	24
3.2	Cuantificación del ahorro energético diario. . . . .	30
3.3	Consumo energético (kWh) desagregado por actuador y condición climática. . . . .	30
A.1	Parámetros de modulación para la irradiancia intermitente. . . . .	34

# Capítulo 1

## Introducción

En la etapa anterior de este trabajo [1], se completó el desarrollo del modelado matemático que describe la dinámica térmica de un sistema de enfriamiento por agua en circuito cerrado, acoplado a un panel solar fotovoltaico. El sistema físico modelado consta de dos elementos activos manipulables: una bomba hidráulica encargada de la circulación del fluido refrigerante y un ventilador integrado a un intercambiador de calor, diseñado para disipar la energía térmica hacia el ambiente.

El resultado de dicha etapa fue un sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) validado, que relaciona las entradas de tensión ( $V_{\text{bomb}}$ ,  $V_{\text{vent}}$ ) y las perturbaciones ambientales con la evolución temporal de la temperatura de operación del panel ( $T_p$ ).

## Planteamiento del Problema

La eficiencia de conversión eléctrica de los paneles fotovoltaicos es sensible a la temperatura, cada grado sobre su temperatura de operación (25 °C) disminuye su rendimiento ligeramente. Sin un mecanismo de regulación activo, el panel queda expuesto a las variaciones estocásticas de la irradiancia solar y la temperatura ambiente.

El análisis preliminar del sistema (simulaciones en lazo abierto sin refrigeración) revela que, bajo condiciones de alta carga térmica, el panel tiende a alcanzar temperaturas de equilibrio cercanas a los 71 °C. Este comportamiento supera ampliamente su estándar de operación, conllevando dos riesgos:

1. Degradación acelerada de los materiales por estrés térmico.
2. Pérdida de potencia útil generada.

El desafío que aborda el presente proyecto es que la operación manual o fija del sistema de refrigeración es insuficiente. Operar los actuadores a máxima potencia de forma constante garantiza el enfriamiento, pero resulta **energéticamente ineficiente**, consumiendo gran parte de la energía que el propio panel genera. Por consiguiente, se hace indispensable diseñar un sistema de control en **lazo cerrado** que gestione este compromiso de forma autónoma.

## Variables del Sistema de Control

Para el diseño del esquema de control, se definen las siguientes variables sobre el modelo dinámico:

- **Variable Controlada (Salida):** Temperatura superficial del panel solar ( $T_p$ ).
- **Variables Manipuladas (Entradas):** Tensión aplicada a la bomba ( $V_{\text{bomb}}$ ) y al ventilador ( $V_{\text{vent}}$ ).
- **Perturbaciones:** Irradiancia solar ( $G$ ), Temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) y Velocidad del viento ( $v_{\text{vent}}$ ).

## Objetivos del Proyecto

### Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control realimentado (Controlador Proporcional) sobre el modelo dinámico del panel solar, capaz de satisfacer las especificaciones de respuesta transitoria y estacionaria definidas para la preservación del equipo y la eficiencia energética.

### Especificaciones de Respuesta

De acuerdo con los criterios de diseño postulados en la etapa de modelado, el controlador debe cumplir estrictamente con las siguientes especificaciones de desempeño:

1. **Límite de Seguridad Térmica:** Mantener la temperatura superficial del panel por debajo de  $55^{\circ}\text{C}$  durante las horas de máxima irradiancia, con el fin de minimizar la degradación de los materiales.

2. **Estabilidad del Régimen:** Garantizar un régimen térmico estable, evitando oscilaciones superiores a  $2^{\circ}\text{C}$  en la superficie del panel para prevenir fatiga por ciclo térmico.
3. **Eficiencia Energética:** Optimizar el compromiso entre rendimiento térmico y consumo energético, mediante estrategias de refrigeración dinámica que ajusten su intensidad estrictamente de acuerdo con las condiciones ambientales.

## Objetivos Específicos

Para dar cumplimiento a las especificaciones anteriores, se plantean las siguientes tareas:

- Analizar el comportamiento dinámico en **lazo abierto** (ante entradas tipo escalón) para establecer la línea base de temperatura sin intervención.
- Programar un algoritmo de control Proporcional (P) a aplicar a las entradas manipulables.
- Sintonizar la ganancia ( $K_c$ ) y el punto de operación (Offset) mediante variaciones de esta misma con el objetivo de reducir oscilaciones y asegurar el límite térmico.
- Evaluar cuantitativamente el desempeño del controlador mediante métricas de respuesta al escalón de referencia (sobrepaso, tiempo de estabilización y error de estado estacionario).
- Verificar la robustez del sistema simulando su comportamiento ante perfiles de perturbaciones realistas (días nublados e intermitentes).

Todos estos objetivos descritos cumplen con lo solicitado en cada punto en la guía del Proyecto

2.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Descripción del Sistema y Modelo Conceptual

El sistema bajo estudio corresponde al modelo matemático desarrollado y validado en el proyecto pasado. Físicamente, se trata de una sistema térmico compuesta por un panel fotovoltaico acoplado a un circuito de refrigeración activa por agua, el cual incluye una bomba de circulación y un intercambiador de calor (radiador) con ventilación forzada.

Para efectos del diseño de la estrategia de control, la física detallada del intercambio de calor se abstrae en un bloque dinámico o “planta”. De acuerdo con la teoría de control clásica [2], el sistema se define por la relación causal entre sus variables:

- **Entradas de Control ( $u$ ):** Corresponden a las tensiones eléctricas aplicadas a los actuadores, específicamente la tensión de la bomba ( $V_{bomba}$ ) y la del ventilador ( $V_{vent}$ ). Estas son las variables que el controlador modificará para influir en el sistema.
- **Entradas de Perturbación ( $d$ ):** Son variables exógenas que afectan la dinámica térmica pero no son manipulables, principalmente la irradiancia solar ( $G$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).
- **Variable de Salida ( $y$ ):** Es la variable de interés a regular, en este caso, la temperatura superficial del panel ( $T_p$ ).

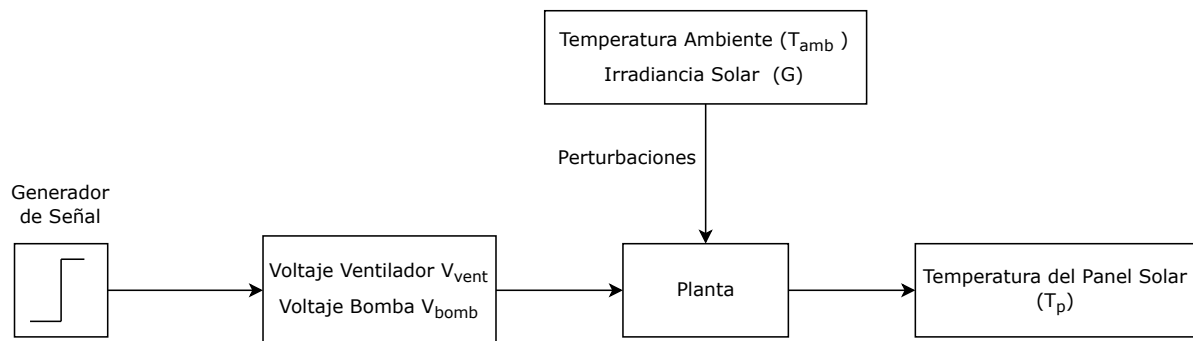
La dinámica temporal del proceso está regida por el sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) derivado de los balances de energía, cuya solución numérica se realiza en el entorno MATLAB.



## Diagrama Esquemático en Lazo Abierto

Con el fin de caracterizar la respuesta natural del sistema y cuantificar su inercia térmica antes de la implementación del controlador, se plantea un esquema de operación en **Lazo Abierto**. En esta configuración, no existe retroalimentación; la señal de control se genera de forma independiente al estado actual de la planta.

La Figura 2.1 ilustra el modelo conceptual utilizado para esta etapa de diagnóstico:



**Figura 2.1:** Diagrama esquemático del proceso en lazo abierto con generador de señal tipo escalón.

Como se observa en el diagrama, un **Generador de Señal** aplica un estímulo predefinido (tipo escalón) a los actuadores. Esta señal excita la planta térmica, la cual evoluciona bajo la influencia conjunta de la acción de control y las perturbaciones ambientales, resultando en la trayectoria de temperatura de salida.

## Suposiciones y Limitaciones del Modelo

Para el diseño y validación del controlador, se establecieron las siguientes simplificaciones sobre la física del sistema.

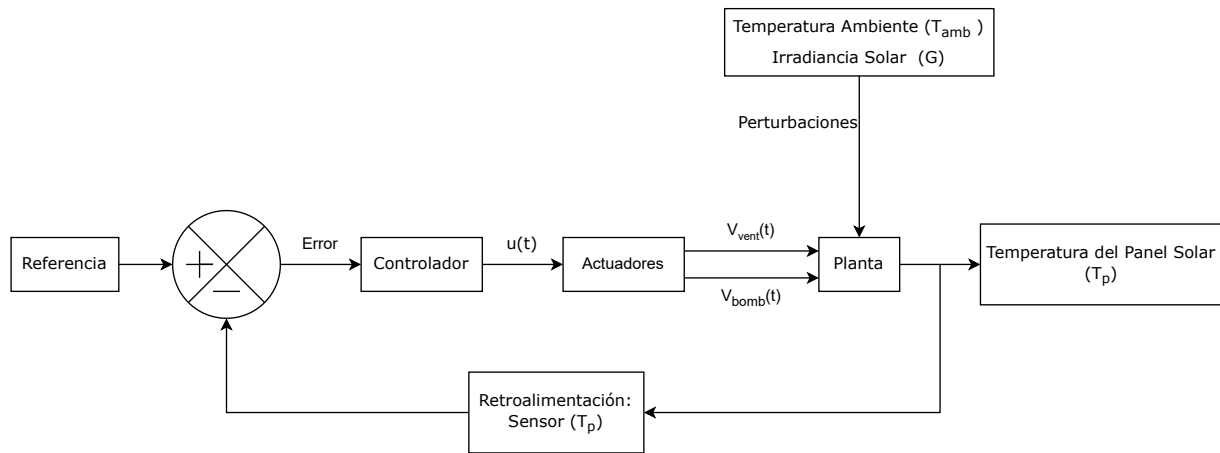
1. **Dinámica de Actuadores Despreciable:** Se asume que la respuesta mecánica de los actuadores (tiempo que tarda el ventilador en alcanzar sus RPM o la bomba en establecer el flujo) es instantánea en comparación con la dinámica térmica del sistema. *Justificación:* La constante de tiempo térmica del panel y el agua es del orden de minutos u horas, mientras que la constante de tiempo electromecánica de los motores suele trabajar en rangos desde milisegundos a segundos. Por tanto, se modela la relación  $\text{Voltaje} \rightarrow \text{Flujo}$  como una ganancia estática pura.

2. **Medición Ideal (Sensores sin Ruido):** El esquema de control asume que la variable realimentada ( $T_p$ ) se obtiene de forma instantánea y libre de ruido estocástico o errores de cuantización. *Justificación:* El objetivo principal es validar la lógica de control y la estabilidad térmica ante los escenarios de perturbación trabajados. En una implementación física futura, se requeriría una etapa de filtrado que no se contempla en esta etapa de diseño numérico.

## 2.2. Diseño de la Estrategia de Control en Lazo Cerrado

Para cumplir con los objetivos de estabilización y seguridad térmica, pasa a un esquema de **Lazo Cerrado**. En esta configuración, el sistema mide continuamente la variable de salida ( $T_p$ ) y la compara con una referencia deseada ( $Ref$ ), generando una acción correctiva proporcional al error detectado [2].

El siguiente diagrama representa el esquema conceptual del sistema en lazo cerrado que será implementado:



**Figura 2.2:** Diagrama esquemático del proceso en lazo cerrado

### 2.2.1. Algoritmo de Control Proporcional

Se usó la estrategia de control clásica de tipo Proporcional (P) con compensación de punto de operación (Offset). Estrategias de control más complejas no fueron usadas en el proyecto, sin embargo se deja abierta la posibilidad de implementarlos en un desarrollo futuro, considerado como mejoras de diseño.

La ley de control implementada en el simulador dinámico responde a la ecuación:

$$u(t) = K_c \cdot (Ref - T_p(t)) + \text{Offset} \quad (2.1)$$

Donde:

- $u(t)$ : Señal de control abstracta calculada por el algoritmo.
- $Ref$ : Temperatura de referencia o Set-Point (Ej. 55 °C).
- $T_p(t)$ : Temperatura actual del panel (variable realimentada).
- $K_c$ : Ganancia proporcional (Sensibilidad).
- Offset: Valor constante añadido para mantener el sistema en un punto de operación intermedio cuando el error es cero, evitando el apagado total de los actuadores.

Consideraciones:

- **Signo de la Ganancia  $K_c$** : Dado que el sistema busca generar refrigeración (generar tensión positiva) cuando la temperatura del panel excede la referencia (error negativo), la ganancia  $K_c$  debe ser negativa para asegurar una respuesta adecuada del controlador.
- **Valor del Offset** Se fijó un valor para el Offset de 5 V, fijado experimentalmente con el objetivo de evitar activaciones bruscas en momentos tempranos del día. Este valor puede ser ajustado en función de las condiciones ambientales y los objetivos de eficiencia energética.

## 2.2.2. Gestión de Actuadores

El sistema físico cuenta con dos entradas manipulables ( $V_{bomb}$ ,  $V_{vent}$ ) pero el proyecto se estructuró de forma que se genera una única señal de mando  $u(t)$  la cual será aplicada en cada actuador de igual manera.

De forma experimental se obtuvo que la bomba de agua tiene relativamente los mismos efectos cuando esta funciona a su voltaje nominal (24 V) que a un voltaje reducido de 3 V. Por lo tanto, se decidió que la tensión aplicada a la bomba será limitada a 3 V.

Posteriormente, para evitar irregularidades, la señal  $u(t)$  se limita al rango operativo de los actuadores, es decir, entre 0 V y 12 V para el ventilador y entre 0 V y 3 V para la bomba de agua. De esta forma, valores negativos de  $u$ , que concluirían en un intento de "calentar" el panel aplicando

tensión negativa, se ajusta a 0 V (apagado), mientras que valores superiores a 12 V (asociados a un error que el sistema no es capaz corregir) se limitan a 12 V para el ventilador, y 3 V para la bomba (máximo escogido para mantener eficiencia energética).

Esta estrategia híbrida permite mantener el circuito de agua activo con un consumo mucho más reducido, delegando la carga fuerte de disipación al ventilador solo cuando es necesario.

Dadas estas consideraciones se señalan las entradas que finalmente son aplicadas en los actuadores:

$$\begin{cases} V_{bomb}(t) = \text{mín}(\text{máx}(u(t), 0), 3) \\ V_{vent}(t) = \text{mín}(\text{máx}(u(t), 0), 12) \end{cases}$$

con  $u(t) = K_c \cdot (Ref - T_p(t)) + \text{Offset}$

## 2.3. Métricas de Evaluación

A continuación se definen las métricas utilizadas para cuantificar el desempeño del sistema. Estas se calculan numéricamente a partir de los vectores de tiempo ( $t$ ) y temperatura ( $T_p$ ) obtenidos en la simulación.

### 2.3.1. Temporales

Para aplicar correctamente estas métricas, se efectúan los cálculos y mediciones sobre un entorno de simulación controlada, dicho entorno se caracteriza en la sección 2.4.1.4.

En dicho entorno se aplica un escalón en la referencia de temperatura ( $Ref$ ) en la salida del controlador y se observa la respuesta del sistema.

#### 2.3.1.1. Determinación de la Temperatura de Régimen Permanente ( $T_{\text{final}}$ )

Para un sistema con oscilación residual sostenida, el valor de régimen permanente no se define por un punto de convergencia, sino como el **centro aritmético de la oscilación** en el estado estacionario.

La Temperatura de Régimen Permanente ( $T_{\text{final}}$ ) se calcula mediante el siguiente procedimiento

numérico aplicado al segmento final de la simulación:

1. **Aislamiento de la Cola:** Se identifica el segmento final de los datos de temperatura del sistema ( $T_p$ ) para asegurar que se está en régimen permanente. (En MATLAB, esto corresponde al último 30 % del vector de datos de la respuesta al escalón).
2. **Determinación de Extremos:** Se obtienen el valor máximo ( $T_{max,osc}$ ) y mínimo ( $T_{min,osc}$ ) de la temperatura dentro de dicho segmento final.
3. **Cálculo del Centro Geométrico:** Se promedian los valores extremos, estableciendo el centro de oscilación ( $T_{final}$ ).

Este procedimiento se formaliza con la siguiente expresión, la cual establece que  $T_{final}$  es el punto medio entre los valores extremos de la oscilación:

$$T_{final} = \frac{T_{max,osc} + T_{min,osc}}{2} \quad (2.2)$$

Este valor de  $T_{final}$  es crucial, ya que sirve como referencia para el cálculo del Tiempo de Subida, el Tiempo de Estabilización y el Sobrepaso Máximo.

#### 2.3.1.2. Tiempo de subida ( $T_r$ )

#### 2.3.1.3. Tiempo de subida ( $T_r$ )

Se define como el intervalo de tiempo necesario para que la respuesta del sistema transite del 10 % al 90 % de su variación total real ( $\Delta T_{total}$ ).

$$T_r = t \Big|_{T_p = T_{inicial} + 0,9 \cdot \Delta T_{total}} - t \Big|_{T_p = T_{inicial} + 0,1 \cdot \Delta T_{total}} \quad (2.3)$$

Donde  $\Delta T_{total} = T_{final} - T_{inicial}$ , y  $T_{inicial}$  es la temperatura del panel al inicio de la prueba de escalón. Esta métrica caracteriza la inercia térmica del sistema durante la fase transitoria de aproximación.

#### 2.3.1.4. Tiempo de estabilización ( $T_s$ )

Corresponde al tiempo de asentamiento o llegada. Se definió como el instante en que la temperatura entra por primera vez en una banda de tolerancia del 5 % respecto al valor final alcanzado ( $T_{final}$ ).

$$T_s = \text{mín}\{t \mid |T_p(t) - T_{final}| \leq 0,05 \cdot \Delta T_{total}\} \quad (2.4)$$

#### 2.3.1.5. Sobrepasso ( $M_p$ )

Es la diferencia máxima entre el valor pico de la respuesta y el valor final estabilizado. En sistemas de control de temperatura, se busca que este valor sea nulo o despreciable para evitar estrés térmico en los materiales.

$$M_p = \text{máx}(T_p) - T_{final} \quad (2.5)$$

#### 2.3.1.6. Error de estado estacionario ( $e_{ss}$ )

Es la diferencia permanente entre la referencia deseada ( $Ref$ ) y el valor real obtenido una vez que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico ( $t \rightarrow \infty$ ).

$$e_{ss} = Ref - T_{final} \quad (2.6)$$

### 2.3.2. Energéticas (Consumo de Energía)

Para evaluar el desempeño energético del sistema con controlador implementado, es necesario cuantificar el consumo total de energía eléctrica por parte de los actuadores durante un ciclo operativo completo (un día simulado).

En el Proyecto 1 se tomó un modelo específico de bomba de agua, mientras que para el ventilador se tomaron valores arbitrarios, en este proyecto se tomará una aproximación para la potencia consumida por cada actuador en función de la tensión aplicada a estos asumiendo que la corriente consumida es proporcional a la tensión aplicada (modelo lineal simplificado), en consecuencia, la potencia instantánea será proporcional al cuadrado de la tensión. La energía total acumulada ( $E_{total}$ ) se calcula integrando numéricamente estas potencias en el tiempo:

$$E_{total}(t) = \int_0^t \left( \frac{V_{bomb}(\tau)^2}{R_{bomb}} + \frac{V_{vent}(\tau)^2}{R_{vent}} \right) d\tau \quad [\text{J}] \quad (2.7)$$

Donde  $R_{bomb}$  y  $R_{vent}$  son las resistencias equivalentes estimadas de los actuadores. Esta métrica penaliza el uso de voltajes altos, reflejando fielmente el costo operativo real.

- $R_{vent}$ : Los ventiladores trabajan comúnmente potencias entre 5 W y 15 W, para el ventilador se tomó una aproximación de 12 W de potencia nominal, de esta forma podemos realizar aproximaciones de la resistencia equivalente:

$$P_{\max, vent} = \frac{(V_{nom})^2}{R_{vent}} \implies 12 \text{ W} = \frac{(12 \text{ V})^2}{R_{vent}} \implies \boxed{R_{vent} = 12 \Omega}$$

- $R_{bomb}$ : La bomba de agua utilizada corresponde a la bomba **Iwaki RD-20** [3], la cual funciona a 60 W a su tensión nominal de 24 V, con estos datos se obtiene su resistencia equivalente:

$$P_{\max, bomb} = \frac{(V_{nom})^2}{R_{bomb}} \implies 60 \text{ W} = \frac{(24 \text{ V})^2}{R_{bomb}} \implies \boxed{R_{bomb} = \frac{48}{5} \Omega}$$

con estos valores será posible cuantificar la energía consumida por cada actuador sobre el sistema tanto en lazo abierto como cerrado.

## 2.4. Simulación

Para la resolución computacional de este sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, se mantuvo el uso del solucionador ode45 de MATLAB, el cual implementa un método de Runge-Kutta de orden 4(5) con paso adaptativo [4], la versión de MATLAB utilizada fue la *R2025b*.

### 2.4.1. Escenarios de Simulación

Para evaluar el desempeño del sistema de control propuesto, se diseñaron diversos escenarios de simulación que replican condiciones operativas típicas y extremas. Estos escenarios corresponden a variaciones en la irradiancia solar y en la temperatura ambiente los cuales constituirán diferentes perfiles de carga térmica en el panel fotovoltaico.

Todos los escenarios a continuación parten del mismo escenario de temperatura ambiente, irradiancia solar y velocidad del viento definidos en el Proyecto 1, el cual simula un día típico soleado y despejado.

## Escenario Base

Esta configuración de perturbaciones fue desarrollado en el proyecto anterior resultando en las siguientes expresiones matemáticas asociadas a la temperatura ambiente, irradiancia solar y velocidad del viento:

$$T_{\text{amb}} \left( t_h = \frac{t}{3600} \right) = \begin{cases} T_N + (T_s - T_N) \exp \left( -\frac{b((t_h + 24) - t_{\text{set}})}{24 - (t_{\text{set}} - t_{\text{min}})} \right), & 0 \leq t_h < t_{\text{min}} \\ (T_x - T_N) \sin \left( \frac{\pi(t_h - t_{\text{min}})}{(t_{\text{set}} - t_{\text{min}}) + 2\alpha} \right) + T_N, & t_{\text{min}} \leq t_h \leq t_{\text{set}} \\ T_N + (T_s - T_N) \exp \left( -\frac{b(t_h - t_{\text{set}})}{24 - (t_{\text{set}} - t_{\text{min}})} \right), & t_{\text{set}} < t_h \leq 24 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$G \left( t_h = \frac{t}{3600} \right) = \begin{cases} 0, & t_h \leq t_{\text{amanecer}} \\ G_{\text{max}} \sin \left( \frac{\pi(t_h - t_{\text{rise}})}{t_{\text{set}} - t_{\text{rise}}} \right), & t_{\text{rise}} \leq t_h \leq t_{\text{set}} \\ 0, & t_{\text{set}} \leq t_h \end{cases} \quad (2.9)$$

$$v_{\text{vien}} \left( t_h = \frac{t}{3600} \right) = 5 + 3 \sin \left( \frac{2\pi}{24} t_h \right), \quad \text{con } t_h \text{ en h} \quad (2.10)$$

Respecto al uso de la velocidad del viento, esta se mantuvo igual para todos los escenarios de simulación, dado que su impacto en la dinámica térmica del sistema es relativamente menor en comparación con la irradiancia solar y la temperatura ambiente.

A continuación se presentarán los ajustes aplicados a estas expresiones base para generar los diferentes escenarios de simulación.

### 2.4.1.1. Día Despejado

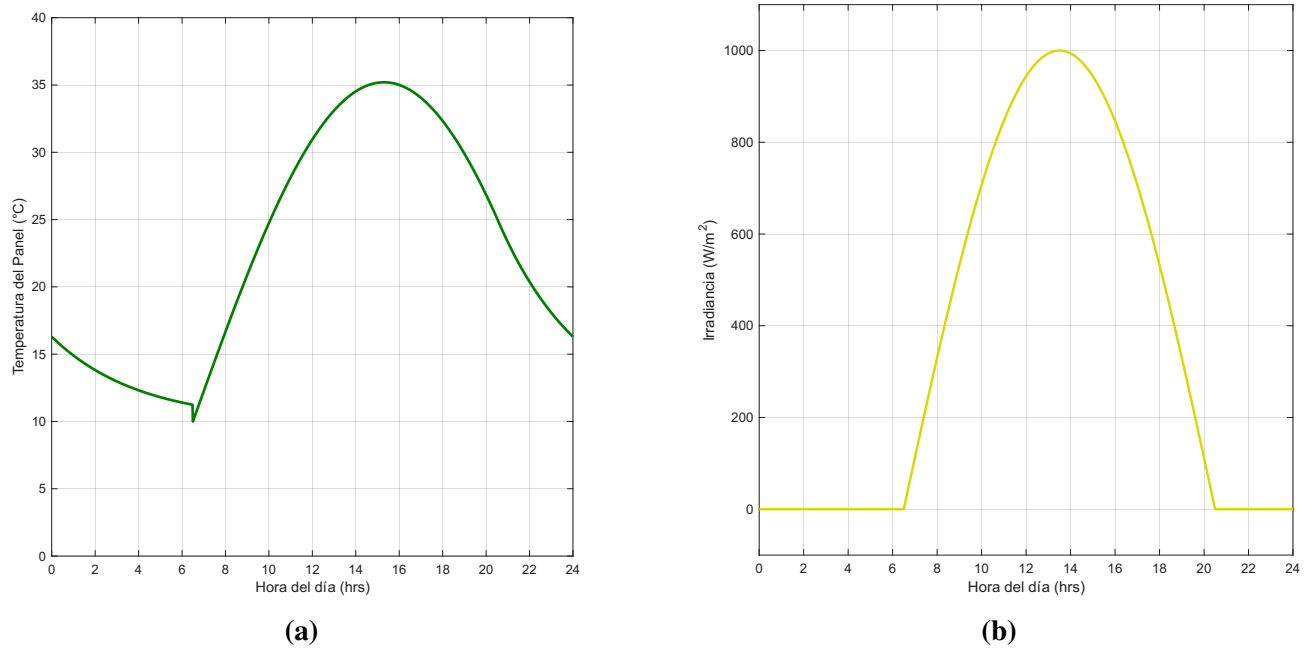
Este escenario corresponde directamente al caso base original usado en el proyecto anterior, los parámetros usados en las ecuaciones 2.8, 2.9 y son los siguientes:



Parámetro	Valor
$T_N$	10 °C
$T_x$	35,2 °C
$T_s$	25,1018 °C
$t_{\min}$	6,5 h
$t_{\text{set}}$	20,5 h
$b$	2,5
$\alpha$	1,8
$G_{\max}$	1000 W/m <sup>2</sup>
$t_{\text{rise}}$	6,5 h

**Cuadro 2.1:** Valores usados para la generación de  $T_{\text{amb}}$  y  $G$  para el día soleado

Toda esta configuración de temperatura ambiente e irradiancia solar se refleja en la Figura 2.3.



**Figura 2.3:** (a) Temperatura Ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ )

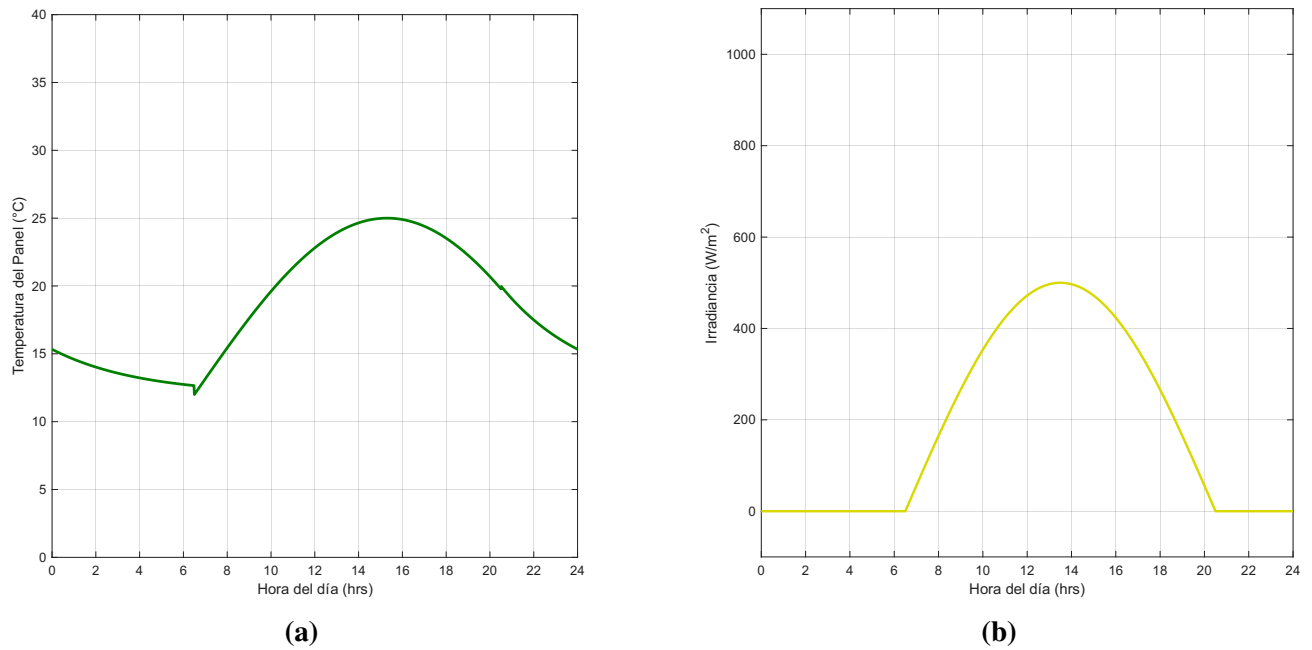
#### 2.4.1.2. Día Nublado

En este escenario, para simular condiciones de nubosidad, se reduce significativamente la irradiancia solar incidente sobre el panel fotovoltaico. Para ello, se ajusta el valor máximo de irradiancia  $G_{\max}$  en la ecuación 2.9 a un valor reducido de 500 W/m<sup>2</sup>, además se modifican algunos valores en la tabla 2.1 para reflejar un día más frío y con menor temperatura máxima:

Parámetro	Valor
$T_N$	12 °C
$T_x$	25 °C
$T_s$	20 °C
$t_{\min}$	6,5 h
$t_{\text{set}}$	20,5 h
$b$	2,5
$\alpha$	1,8
$G_{\max}$	500 W/m <sup>2</sup>
$t_{\text{rise}}$	6,5 h

**Cuadro 2.2:** Valores usados para la generación de  $T_{\text{amb}}$  y  $G$  para el día nublado

Toda esta configuración de temperatura ambiente e irradiancia solar se refleja en la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** (a) Temperatura Ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ )

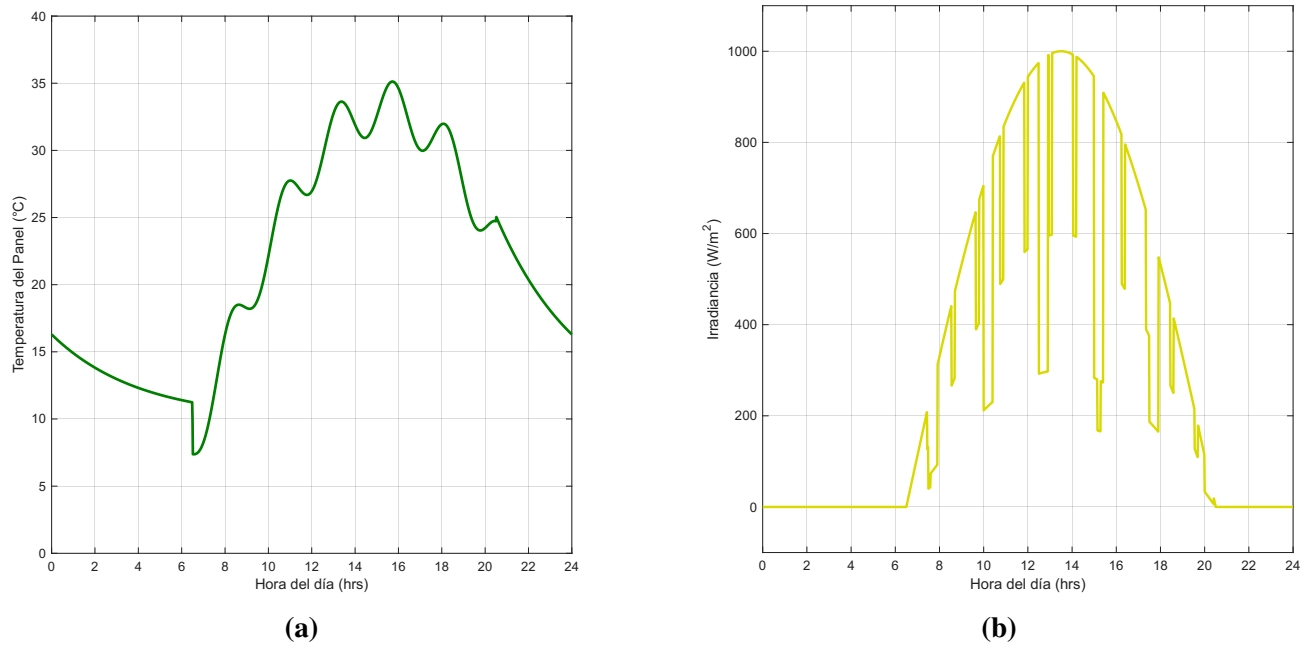
#### 2.4.1.3. Día Parcialmente Nublado (Intermitente)

A diferencia de los escenarios anteriores que presentan variaciones lentas y continuas, el perfil intermitente (o parcialmente nublado) se construye para someter al controlador a perturbaciones de alta frecuencia. Este escenario se deriva del modelo base de día despejado aplicando dos mecanismos de transformación distintos, según la naturaleza física de la variable:

1. **Bloqueo de Irradiancia (Instantáneo):** Se modeló el paso de formaciones nubosas que atenúan la radiación solar de forma abrupta (ondas cuadradas). El modelo considera la superposición de nubes densas y nubes pasajeras rápidas.
2. **Enfriamiento Ambiental (Inercial):** Se modeló la caída de temperatura del aire asociada al oscurecimiento, aplicando un desfase temporal y una suavización de la curva para representar la inercia térmica atmosférica.

La formulación matemática detallada de estas funciones de perturbación, así como los parámetros temporales de periodicidad y factores de atenuación utilizados, se encuentran descritos en el Apéndice A.

Toda esta configuración de temperatura ambiente e irradiancia solar se refleja en la Figura 2.5.



**Figura 2.5: (a) Temperatura Ambiente ( $T_{amb}$ ). (b) Irradiancia Solar ( $G$ )**

#### 2.4.1.4. Entorno Controlado para Análisis de Métricas

Para aplicar correctamente las métricas de desempeño temporal definidas en la sección anterior, se efectúan los cálculos y mediciones sobre un entorno de simulación controlada. Este entorno se caracteriza por mantener condiciones ambientales constantes durante el periodo de análisis, eliminando las variaciones diurnas y perturbaciones externas.

A continuación se detallan las condiciones específicas del entorno controlado:

- **Irradiancia Solar:** Se fija un valor de irradiancia solar constante de  $800 \text{ W/m}^2$ .
- **Temperatura Ambiente:** Se fija un valor de  $30^\circ\text{C}$
- **Velocidad del Viento:** Se fija una velocidad constante de  $5 \text{ m/s}$ .

En lo referente al escalón de referencia de temperatura (*Ref*), el sistema se inicia con condiciones iniciales de  $30^\circ\text{C}$  con una referencia de  $45^\circ\text{C}$  la cual se espera una hora hasta que los valores se estabilizan, posteriormente se produce un escalón de referencia establecido en  $55^\circ\text{C}$ , generando una variación de  $15^\circ\text{C}$  que permite observar la respuesta transitoria del sistema bajo condiciones controladas, aplicando las métricas definidas previamente.

### 2.4.2. Pruebas/Simulaciones a Realizar

Con el fin de evaluar exhaustivamente el desempeño del sistema de control propuesto cubriendo todas las indicaciones dadas en la guía del Proyecto 2, se planifican las siguientes simulaciones y pruebas:

- **Simulación en Lazo Abierto:** Se ejecutará una simulación del sistema sin la implementación del controlador, aplicando únicamente las condiciones del día despejado. El objetivo es caracterizar la respuesta natural del sistema y establecer una línea base para comparación.
- **Ajuste de Ganancia Proporcional ( $K_c$ ):** Se realizarán múltiples simulaciones iterativas variando el valor de la ganancia proporcional  $K_c$  sobre el mismo escenario base (El día soleado y despejado). El objetivo es identificar el valor óptimo que más se adapte a las especificación de respuesta definidas previamente.
- **Simulación en Entorno Controlado:** Se llevará a cabo una simulación específica en el entorno controlado descrito en la Sección 2.4.1. Esta prueba se centrará en la evaluación de las métricas temporales de desempeño del sistema, permitiendo un análisis sin la presencia de perturbaciones.
- **Simulación en Lazo Cerrado:** Se ejecutará una simulación con el controlador implementado, evaluando su desempeño bajo las condiciones ambientales de los tres escenarios de perturbaciones definidos en la Sección 2.4.1. Esto permitirá analizar la efectividad del controlador en la regulación de la temperatura y la cuantificación del rendimiento energético, utilizando la métrica definida para este propósito (Sección 2.3.2).

# Capítulo 3

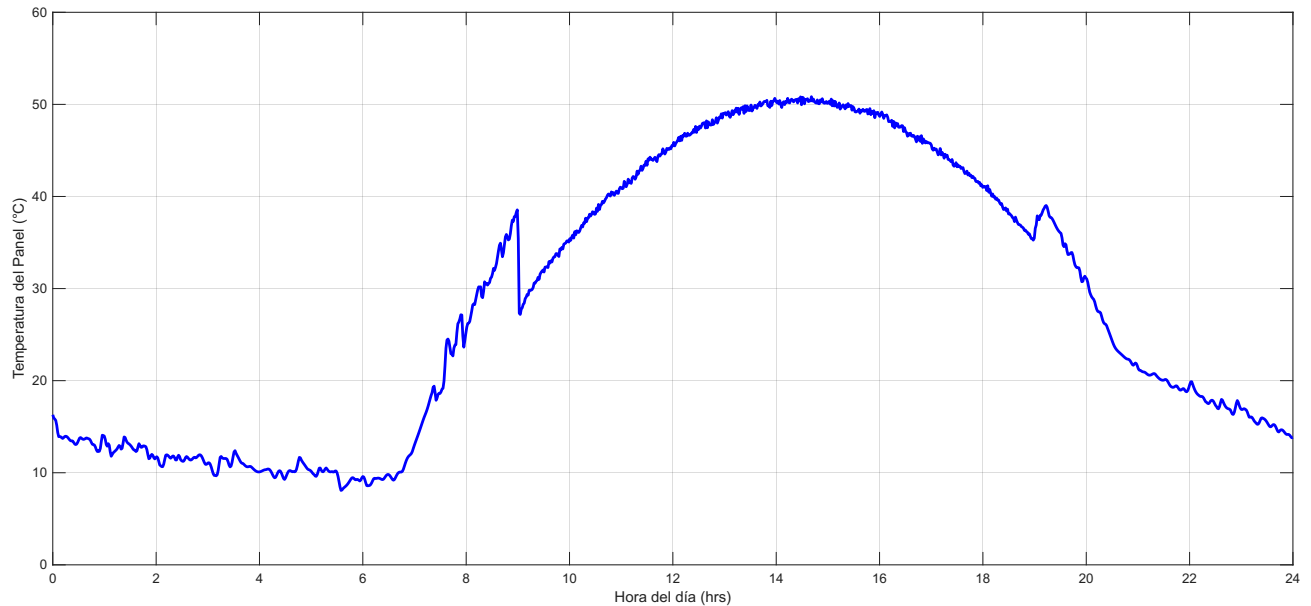
## Resultados y Análisis

### 3.1. Caracterización de la Respuesta en Lazo Abierto

Para dar cumplimiento al objetivo de visualizar la dinámica natural del proceso, se implementó un esquema de **Lazo Abierto** incorporando un generador de señal tipo escalón aplicado a las variables manipulables ( $V_{bomb}$ ,  $V_{vent}$ ).

En esta prueba, el sistema es sometido a las perturbaciones estandarizadas del “Día Soleado” (irradiancia y temperatura ambiente variables descritas en la Sección 2.4.1), mientras que los actuadores son activados mediante una señal fija (escalón de tensión) durante las horas de operación, sin recibir retroalimentación de la temperatura real del panel. Esta simulación fue la más efectiva en reducción de la temperatura del panel respecto a las entradas utilizadas en el Proyecto 1 [1].

La Figura 3.1 muestra la respuesta temporal obtenida bajo estas condiciones.



**Figura 3.1:** Respuesta dinámica del sistema en Lazo Abierto ante una entrada tipo escalón en horas de mayor carga térmica con perturbaciones de día despejado.

## Análisis de la Respuesta Dinámica

Del comportamiento observado en la gráfica, se desprenden las siguientes conclusiones sobre la planta:

1. **Capacidad de Enfriamiento Suficiente:** Se observa que, al aplicar la señal de control fija (máxima capacidad), la temperatura máxima alcanzada es de aproximadamente 51 °C. Este valor se encuentra por debajo del límite crítico de seguridad (55 °C) definido en las especificaciones de respuesta, lo que indica que los actuadores dimensionados tienen la capacidad física suficiente para disipar la carga térmica máxima del sistema si operan a plena potencia.
2. **Dependencia de las Perturbaciones:** A pesar de que la temperatura se mantiene en rangos seguros, la curva de salida sigue parcialmente la forma de la irradiancia solar (sube al mediodía y baja al atardecer). Esto evidencia que, en lazo abierto, el sistema es incapaz de rechazar perturbaciones completamente debido a la magnitud de la inercia térmica del ambiente, por lo cual la temperatura flota libremente en función del clima, sin mantener un punto de operación constante (Set-Point) debido al escalón.
3. **Descenso Drástico de Temperatura en Activación:** Al momento de la activación del sistema el panel sufre un descenso de temperatura cercano a 10 °C, esto en el día a día conlleva un estrés térmico constante a los materiales del panel reduciendo su vida útil.

4. **Ineficiencia Energética (el desafío de consumo):** La señal escalón implica que los actuadores están operando a un nivel de tensión constante incluso en momentos donde la carga térmica es baja (mañana y tarde). Esto representa un desperdicio de energía significativo, ya que se está aplicando un esfuerzo de enfriamiento máximo cuando no es estrictamente necesario.

**Conclusión** Si bien la operación en lazo abierto puede satisfacer el requisito de seguridad térmica bajo estas condiciones ( $\approx 51^\circ\text{C}$ ), carece de capacidad de regulación y eficiencia. Esto justifica la implementación de una estrategia de control en **Lazo Cerrado** que module el esfuerzo de los actuadores para mantener la temperatura estable y minimizar el consumo.

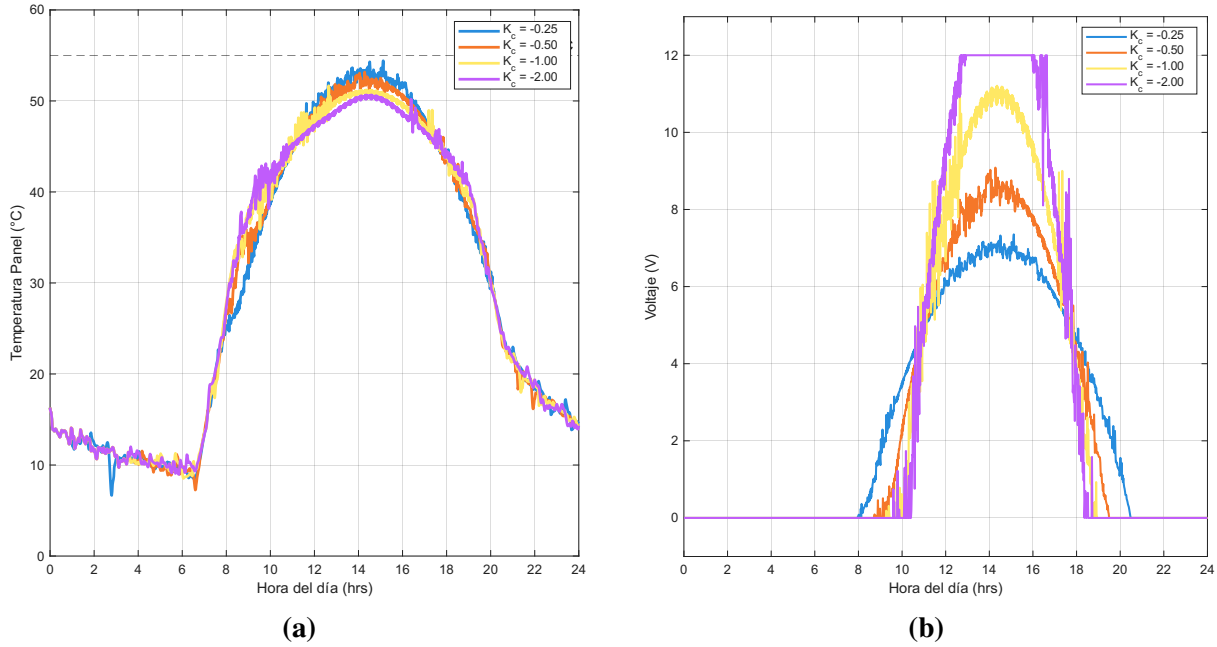
### 3.2. Análisis de Estabilidad y Sintonización del Controlador

Una vez caracterizada la planta, se procedió al diseño del controlador en lazo cerrado. Para determinar la ganancia proporcional ( $K_c$ ) adecuada, se realizó un análisis de sensibilidad sometiendo al sistema al escenario de carga máxima (Día Soleado) variando la magnitud de la ganancia en el conjunto de valores  $\{-0,25, -0,5, -1,0, -2,0\}$ , junto con un valor de referencia para el controlador de  $Ref = 45^\circ\text{C}$  y un valor de Offset de 5 V.

El objetivo de esta comparativa es encontrar el compromiso óptimo entre la velocidad de reducción de temperatura y la estabilidad de la señal de control enviada a los actuadores.

La Figura 3.2 presenta la superposición de las respuestas temporales y el esfuerzo de control resultante para los distintos valores de ganancia probados.

**Figura 3.2:** (a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel solar. (b) Tensión (V) aplicada en cada actuador.



A partir de la visualización del comportamiento dinámico, se observan dos fenómenos contrapuestos:

1. **Comportamiento con Altas Ganancias ( $K_c = -1, 0, -2, 0$ ):** Si bien las ganancias de mayor magnitud logran acercar la temperatura a la referencia más rápidamente, se observa en el gráfico inferior de la Figura 3.2b que la señal de voltaje entra en una zona de **saturación oscilatoria** o comportamiento agresivo. Este fenómeno provoca cambios bruscos en la velocidad del ventilador, lo cual es indeseable mecánicamente y no se traduce en una mejora térmica significativa debido a la lenta inercia térmica del agua.
2. **Comportamiento con Bajas Ganancias ( $K_c = -0,25$ ):** Con una ganancia conservadora de  $-0,25$ , la respuesta de temperatura es más suave con oscilaciones constantes pero menores. Aunque presenta temperatura máxima ligeramente mayor a los demás, logra mantener la temperatura por debajo del límite de seguridad de  $55^{\circ}\text{C}$ . Lo más relevante es que la señal de control (Voltaje) evoluciona suavemente, siguiendo la curva de irradiancia sin saltos abruptos, lo que maximiza la vida útil de los actuadores y de los materiales del panel solar.

**Selección de Parámetros** Basado en este análisis, se selecciona  $K_c = -0,25$  como la ganancia definitiva para el controlador. Esta sintonía prioriza la robustez y la suavidad de la actuación por sobre



la velocidad de respuesta, dado que el sistema térmico es inherentemente lento y el criterio principal es la seguridad operativa ( $T < 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) junto a la eficiencia energética más que la precisión de seguimiento al Offset fijado.

### 3.3. Evaluación de Desempeño Transitorio

Habiendo seleccionado la ganancia definitiva ( $K_c = -0,25$ ), se procede a cuantificar el desempeño dinámico del sistema mediante las métricas definidas en la Sección 2.3. Cabe aclarar que este análisis no fue posible realizarlo en la etapa de sintonización debido a la presencia de perturbaciones variables (irradiancia y temperatura ambiente) que distorsionan la respuesta natural del sistema.

La evaluación se realiza bajo el **Entorno Controlado** descrito en la Sección 2.4.1.4, el cual aísla el sistema de perturbaciones variables manteniendo condiciones constantes: irradiancia solar de  $800\text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y velocidad del viento de  $5\text{ m/s}$ .

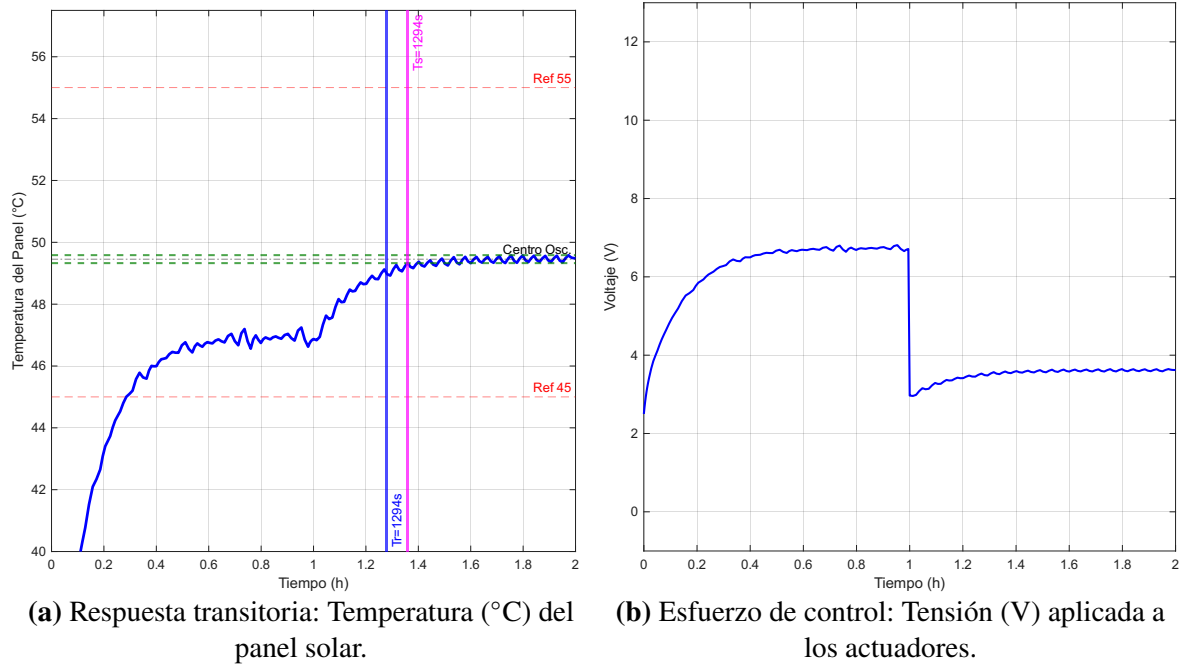
El protocolo de prueba consiste en una secuencia de dos etapas:

1. **Pre-estabilización:** Se inicia la simulación con el panel a temperatura ambiente ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y el controlador operando con una referencia inicial de  $Ref = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se permite que el sistema evolucione durante una hora ( $t = 0$  a  $t = 3600\text{ s}$ ) hasta alcanzar el equilibrio.
2. **Prueba de Escalón (Step Test):** En el instante  $t = 1\text{ h}$ , se aplica un cambio tipo escalón en la referencia, aumentando su valor a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El análisis de métricas temporales ( $T_r, T_s, M_p, e_{ss}$ ) se aplica específicamente sobre la respuesta del sistema durante esta segunda etapa (transición de  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

La Figura 3.3 ilustra la respuesta temporal del sistema durante la prueba. Se observa la evolución de la temperatura (línea azul) intentando alcanzar la nueva referencia (línea roja discontinua) a partir del segundo cambio de escalón.

**Figura 3.3:** Respuesta transitoria del sistema controlado ante un escalón de referencia de 45 °C a 55 °C.



A partir de esta respuesta, se calcularon las métricas de desempeño definidas en la metodología. Los resultados se presentan en la Tabla 3.1.

Métrica	Símbolo	Valor Obtenido
Tiempo de Subida	$T_r$	16,81 min
Tiempo de Estabilización (5 %)	$T_s$	21,56 min
Sobrepaso Máximo	$M_p$	0,13 °C
Error de Estado Estacionario	$e_{ss}$	5,54 °C

**Cuadro 3.1:** Resumen de métricas de desempeño temporal para  $K_c = -0,25$ .

## Análisis de Desempeño

A partir de los datos obtenidos en la Tabla 3.1, se desprenden las siguientes conclusiones técnicas sobre la calidad del control implementado:

1. **Respuesta Subamortiguada con Oscilación Residual:** Se registra un sobrepaso máximo de 0,13 °C y una oscilación sostenida de baja amplitud en torno al valor final. Esto clasifica el comportamiento como **subamortiguado**. Si bien existe oscilación perpetua (ciclo límite), su

amplitud es marginal ( $< 0,3\%$  de la referencia). En términos prácticos, esta magnitud es despreciable frente a la inercia térmica del panel y no representa un riesgo de fatiga mecánica para los actuadores ni estrés térmico para el material.

2. **Dinámica Temporal ( $T_r, T_s$ ):** Los tiempos de respuesta (subida en  $\approx 17$  min y estabilización en  $\approx 22$  min) confirman la alta inercia térmica de la masa de agua. El controlador respeta la dinámica natural de la planta sin forzar una actuación agresiva que podría saturar innecesariamente la bomba, logrando un compromiso adecuado entre velocidad de enfriamiento y suavidad operativa.
3. **Margen de Seguridad Pasivo ( $e_{ss}$ ):** Se observa un Error de Estado Estacionario de  $5,54^\circ\text{C}$ . Al utilizar un controlador Proporcional sin acción integral, este error es matemáticamente esperado. Es fundamental notar la dirección del error: la temperatura se estabiliza en  $\approx 49,5^\circ\text{C}$  para una referencia de  $55^\circ\text{C}$ . Esto actúa como un **margen de seguridad** de casi  $6^\circ\text{C}$  a favor del sistema, garantizando que la temperatura operativa se mantenga lejos del límite crítico de degradación. El error determinado está directamente asociado a la elección de un valor de Offset.

### 3.4. Validación ante Escenarios de Perturbación Dinámica

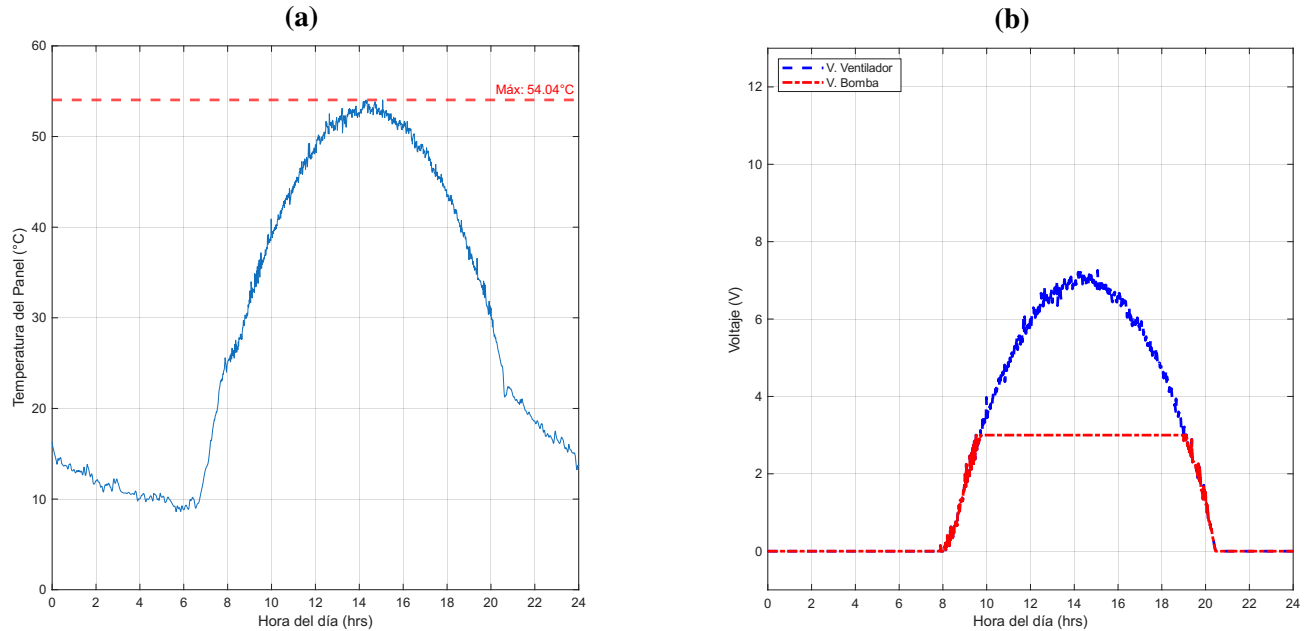
Una vez verificado el desempeño transitorio en condiciones ideales, se sometió el sistema de control a los perfiles de perturbación de 24 horas definidos en la Sección 2.4.1. El objetivo de esta sección es validar la capacidad del controlador para mantener la temperatura del panel dentro de los límites de seguridad ( $T_p < 55^\circ\text{C}$ ) bajo distintas condiciones operativas.

A continuación, se analiza la respuesta del sistema controlado ( $K_c = -0,25$ ) frente a los tres escenarios climáticos planteados.

#### 3.4.1. Escenario 1: Carga Máxima (Día Despejado)

Se simuló el comportamiento bajo el perfil de “Día Soleado”, el cual representa la condición más exigente para los actuadores (irradiancia pico de  $1000\text{ W/m}^2$ ).

La Figura 3.4 muestra la evolución de la temperatura del panel y la tensión aplicada a los actuadores durante las 24 horas.



**Figura 3.4:** (a) Temperatura (°C) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores.

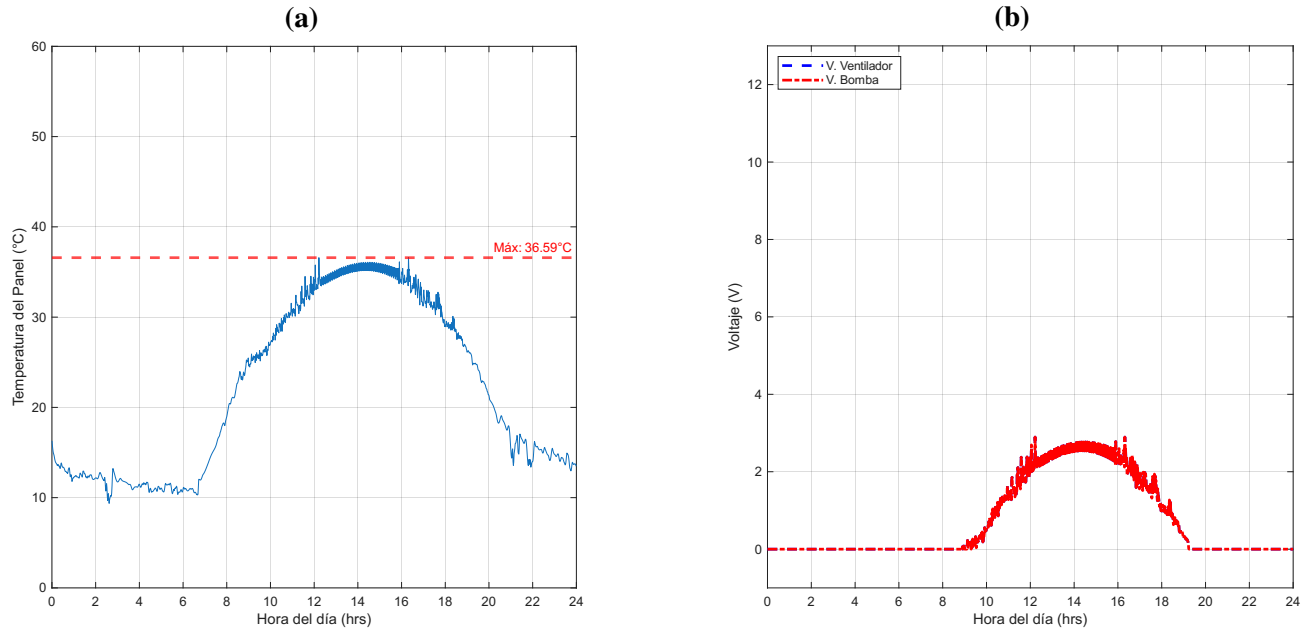
## Análisis

- **Seguridad Térmica:** Durante las horas de máxima radiación, la temperatura se estabiliza por debajo de los 50 °C, cumpliendo holgadamente el requisito de seguridad (< 55 °C) en el peor caso posible.
- **Actuación Progresiva:** La señal de control evoluciona suavemente siguiendo la curva solar, sin presentar saturaciones bruscas que dañen los motores.
- **Bajo Consumo Energético:** El bajo consumo del ventilador confirma la elección de la ganancia a pesar del ligero aumento en la temperatura máxima, ya que la modulación suave del voltaje eficiencia energética destacable.

### 3.4.2. Escenario 2: Carga Reducida (Día Nublado)

Este escenario simula un día con baja irradiancia ( $G_{max} = 500 \text{ W/m}^2$ ), útil para verificar que el sistema no desperdicie energía sobre-enfriando el panel cuando no es necesario.

La Figura 3.5 presenta los resultados obtenidos.



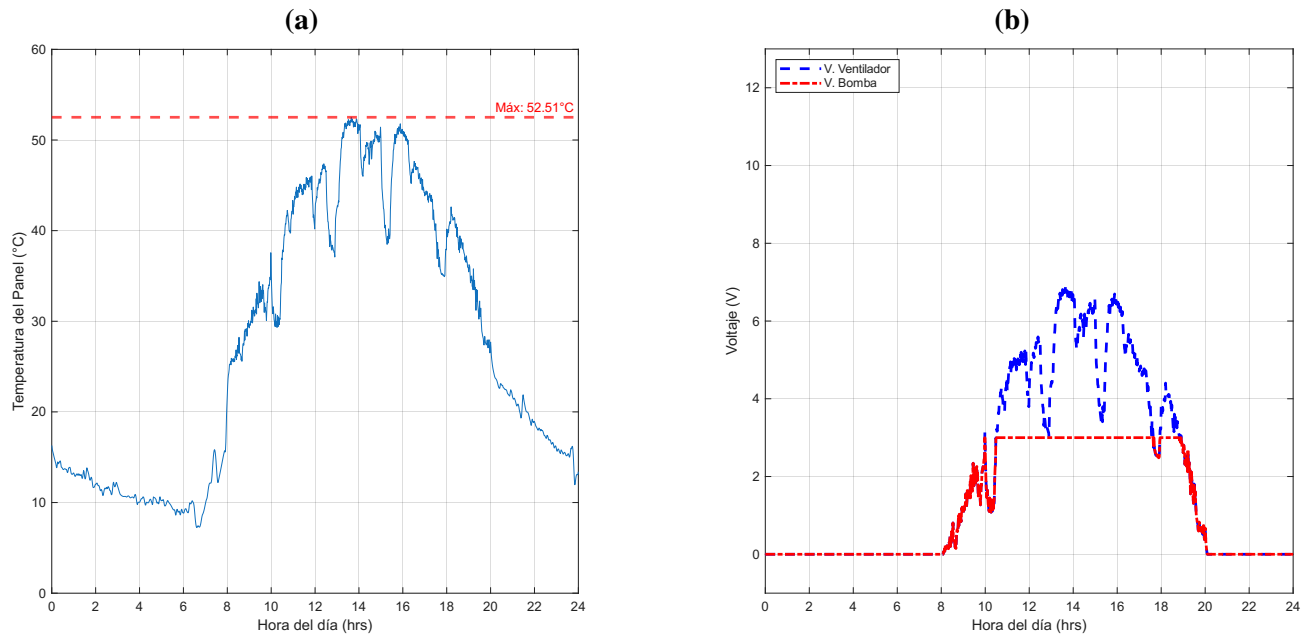
**Figura 3.5:** (a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores.

## Análisis

- **Adaptabilidad Energética:** Se observa que, debido a la menor carga térmica, el esfuerzo de control (voltaje) es significativamente menor que en el día despejado.
- **Prevención de Sobre-enfriamiento:** El sistema mantiene la temperatura cercana a la referencia sin forzar los actuadores al máximo, validando que el algoritmo proporcional ajusta su intensidad según la demanda real.
- **Oscilaciones Dentro del Rango Permitido:** Si bien la temperatura del panel presenta pequeñas oscilaciones residuales de alta frecuencia en las horas de mayor carga, la amplitud de estas variaciones se mantiene significativamente por debajo del umbral de tolerancia de  $2^{\circ}\text{C}$  establecido en las especificaciones de respuesta, garantizando la estabilidad y previniendo la fatiga por ciclo térmico.

### 3.4.3. Escenario 3: Día Parcialmente Nublado (Día Intermitente)

Finalmente, se evaluó la respuesta ante cambios abruptos de nubosidad para probar la velocidad de reacción del lazo cerrado.



**Figura 3.6:** (a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del panel. (b) Tensión (V) aplicada a los actuadores.

## Análisis

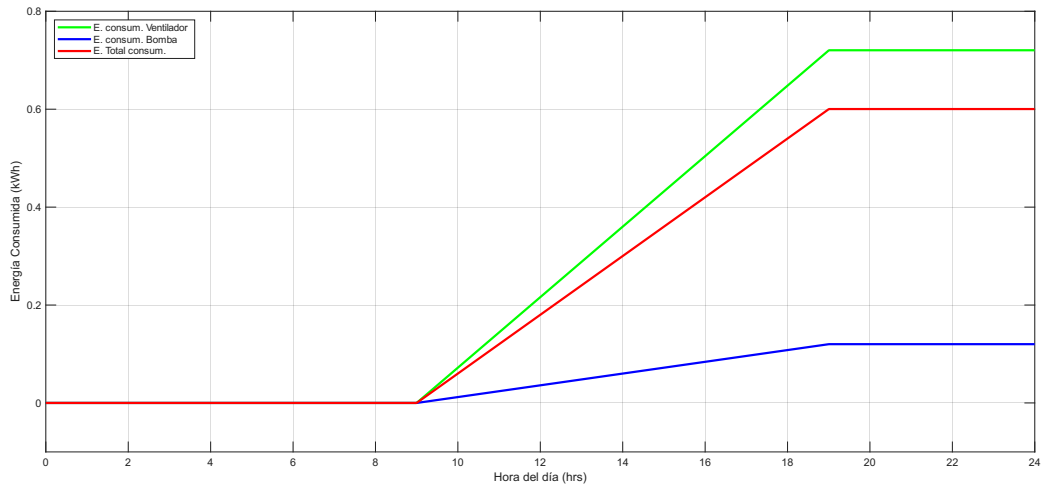
- **Rechazo a Perturbaciones:** Al producirse una caída abrupta de irradiancia (paso de nube), el controlador reduce rápidamente el voltaje de los actuadores, evitando el gasto innecesario de energía.
- **Estabilidad:** A pesar de la naturaleza cuadrada de la perturbación solar, la temperatura del panel varía suavemente gracias a la inercia térmica, manteniéndose siempre en rangos seguros y estables.

## 3.5. Análisis de Eficiencia Energética

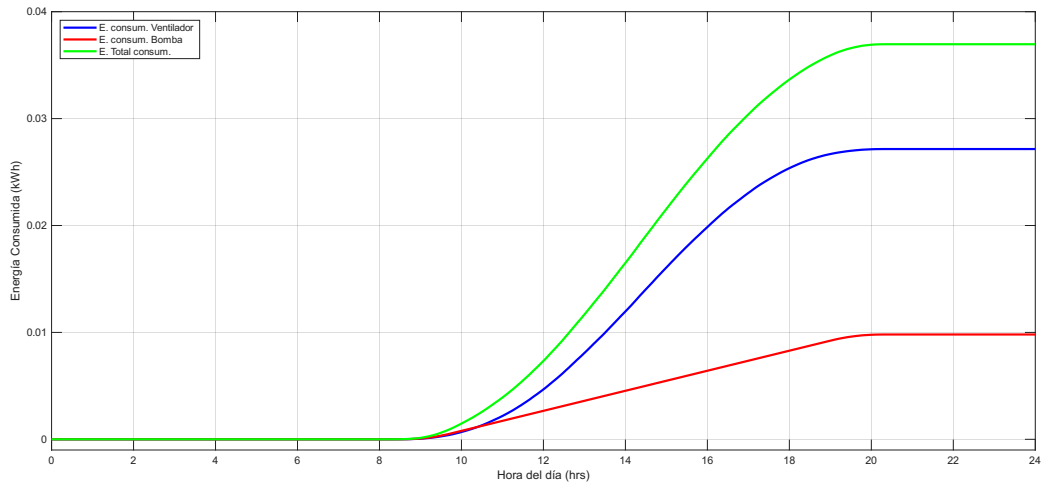
Finalmente, se evaluó la viabilidad económica del diseño cuantificando el costo energético. Para ello, se calculó el **Esfuerzo de Control Acumulado** (en kWh) comparando el desempeño de la estrategia propuesta frente a la operación convencional y analizando su adaptabilidad ante distintos climas.

### 3.5.1. Comparación: Lazo Abierto vs. Lazo Cerrado

Se contrastó el consumo del controlador propuesto ( $K_c = -0,25$ ) frente a la operación en Lazo Abierto con señal fija ( $V_{vent} = 12 \text{ V}$ ,  $V_{bomb} = 3 \text{ V}$ ) bajo el escenario de mayor demanda (Día Soleado), los resultados de estas entradas en el panel solar fueron mostrados en la Figura 2.1. En las Figuras 3.7 y 3.8 se observa la energía acumulada a lo largo del día mencionado.



**Figura 3.7:** Energía Consumida por el sistema de refrigeración en Lazo Abierto.



**Figura 3.8:** Energía Consumida por el sistema de refrigeración en Lazo Cerrado.

La Tabla 3.2 resume el impacto del control en el ahorro total.

Estrategia	Energía Total	Ahorro Absoluto	% Ahorro
Lazo Abierto (Base)	0,720 kWh	-	-
Lazo Cerrado (Propuesto)	0,037 kWh	0,063 kWh	94,86 %

**Cuadro 3.2:** Cuantificación del ahorro energético diario.

### 3.5.2. Desglose por Escenarios Climáticos

Además del ahorro base, se verificó la capacidad del controlador para reducir el consumo en días de menor carga térmica. La Tabla 3.3 detalla el aporte de cada actuador según el clima.

Escenario	E. Ventilador (kWh)	E. Bomba (kWh)	Total Diario (kWh)
Día Soleado (Máx)	0.027	0.010	0.037
Día Nublado (Mín)	0.003	0.004	0.007
Día Intermitente	0.019	0.009	0.027

**Cuadro 3.3:** Consumo energético (kWh) desagregado por actuador y condición climática.

## Discusión de Resultados

- **Ahorro Significativo:** La implementación del lazo cerrado genera un ahorro del 94,76 % respecto a la operación fija. Esto valida que modular la potencia es económicamente superior a mantener el sistema encendido al máximo, incluso en el día más caluroso.
- **Adaptabilidad Automática:** Los datos de la Tabla 3.3 demuestran que el consumo disminuye considerablemente en los días Nublado e Intermitente. El controlador "siente" la menor carga térmica y reduce el esfuerzo del ventilador automáticamente, sin intervención humana.
- **Validación Estrategia SIDO:** En todos los escenarios, el consumo de la bomba se mantiene bajo y estable, validando que limitar su tensión a 3 V fue una decisión de diseño correcta para minimizar el costo base operativo.



# Capítulo 4

## Conclusiones

El presente proyecto logró diseñar, simular y validar exitosamente una estrategia de control para la gestión térmica eficiente de un panel fotovoltaico. A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones principales:

1. **Cumplimiento de Seguridad Térmica:** Se verificó que el controlador Proporcional implementado ( $K_c = -0,25$ ) es capaz de mantener la temperatura del panel consistentemente por debajo del límite crítico de  $55^\circ\text{C}$ . En el escenario más exigente (Día Soleado), la temperatura máxima registrada fue inferior a  $50^\circ\text{C}$ , garantizando la integridad física del equipo y evitando la degradación prematura de los materiales.
2. **Eficiencia Energética Superior:** La evaluación comparativa demostró que la estrategia de control propuesta reduce el consumo energético en un 94,8 % respecto a una operación convencional de lazo abierto (potencia fija). El sistema demostró capacidad para adaptar el esfuerzo de control a la demanda real, reduciendo el consumo diario de 0,720 kWh a apenas 0,037 kWh, validando la viabilidad económica de la solución.
3. **Validación de la Estrategia:** La decisión de diseño de saturar la bomba hidráulica a un voltaje de mantenimiento (3 V) y delegar la modulación dinámica al ventilador resultó exitosa. El análisis desagregado reveló que esta configuración minimiza el consumo base del sistema sin comprometer la capacidad de enfriamiento, confirmando que operar la bomba a su tensión nominal (24 V) habría sido energéticamente ineficiente e innecesario.
4. **Robustez ante Perturbaciones:** Las simulaciones bajo condiciones intermitentes confirmaron que el lazo de control posee la velocidad de reacción suficiente para adaptarse a cambios bruscos de nubosidad. El sistema ajusta rápidamente el voltaje de los actuadores ante caídas de irradiancia, evitando el sobre-enfriamiento y optimizando el uso de recursos.

5. **Estabilidad Dinámica:** A pesar de utilizar un controlador puramente proporcional, el sistema exhibe un comportamiento estable. El error de estado estacionario resultante actúa favorablemente como un margen de seguridad operativo.

Como trabajo futuro, se sugiere la implementación de estrategias de control más avanzadas, específicamente la incorporación de una **Acción Derivativa (Control PD o PID)**. La adición del término derivativo permitiría anticipar la tasa de cambio de la temperatura, mejorando la amortiguación de las oscilaciones residuales observadas, mientras que el término integral habilitaría una acción de control más enérgica para alcanzar el Set-Point con mayor rapidez y precisión, sin comprometer la estabilidad del sistema.

**Modificación en Parámetros de Diseño** Debido a la suficiencia de 3 V de la bomba de agua para mantener la temperatura bajo control, es posible obtener el caudal que esta genera a dicha tensión y ajustar los parámetros y modelo de la bomba usada en consecuencia, ya que por lo general estos dispositivos no son capaces de trabajar a fracciones tan bajas de su tensión nominal sin perder eficiencia. Esto permitiría optimizar aún más el consumo energético del sistema.

# Apéndice A

## Modelado Matemático de Perturbaciones Intermitentes

En este apéndice se detalla la formulación analítica utilizada para construir las señales de perturbación correspondientes al escenario de "Día Parcialmente Nublado" descrito en la Metodología.

### A.1. Función de Irradiancia Solar

El perfil de irradiancia intermitente se modela como una modulación de la irradiancia base de cielo despejado ( $G_{base}$ ), afectada por un coeficiente de transmitancia variable  $\beta(t)$  que representa el bloqueo óptico de las nubes:

$$G_{int}(t) = G_{base}(t) \cdot \beta(t) \quad (A.1)$$

El coeficiente  $\beta(t)$  resulta de la superposición de dos trenes de pulsos independientes,  $\beta_1(t)$  y  $\beta_2(t)$ , que simulan diferentes tipos de formaciones nubosas:

$$\beta(t) = \beta_1(t) \cdot \beta_2(t) \quad (A.2)$$

Cada función  $\beta_i(t)$  se define como una señal periódica rectangular utilizando la operación módulo para determinar los intervalos de oscurecimiento:

$$\beta_i(t) = \begin{cases} \alpha_i & \text{si } (t \text{ (mód } T_i)) < \Delta t_i \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Donde:

- $T_i$ : Periodo de recurrencia de la nube.
- $\Delta t_i$ : Duración del bloqueo solar.
- $\alpha_i$ : Factor de transmitancia (1 = transparente, 0 = opaco).

Los parámetros utilizados en la simulación para cada componente son:

Componente	Periodo ( $T$ )	Duración ( $\Delta t$ )	Transmitancia ( $\alpha$ )
Nube Densa ( $\beta_1$ )	2,5 h	25 min	0.3
Nube Pasajera ( $\beta_2$ )	1,1 h	8 min	0.6

**Cuadro A.1:** Parámetros de modulación para la irradiancia intermitente.

## A.2. Función de Temperatura Ambiente con Inercia

A diferencia de la irradiancia, la temperatura del aire no cambia instantáneamente. Se modela mediante una reducción suave sobre la temperatura base ( $T_{base}$ ), introduciendo una dinámica inercial:

$$T_{amb,int}(t) = T_{base}(t) - \Delta T_{inercial}(t) \quad (\text{A.4})$$

El término de reducción  $\Delta T_{inercial}(t)$  se activa únicamente durante las horas de sol y se calcula mediante una función cosenoidal invertida y normalizada:

$$\Delta T_{inercial}(t) = \Delta T_{max} \cdot \left( \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_l}(t - \tau)\right)}{2} \right) \quad (\text{A.5})$$

Donde los parámetros físicos son:

- $\Delta T_{max} = 4^\circ\text{C}$ : Máxima caída de temperatura del aire debido a la sombra.

- $T_1 = 2,5$  h: Frecuencia sincronizada con la nubosidad principal.
- $\tau = 45$  min: **Retardo por inercia térmica**. Representa el tiempo que tarda la masa de aire en comenzar a enfriarse tras el cambio en la radiación.

Esta formulación asegura que la reducción inicie suavemente desde cero (continuidad de clase  $C^1$ ), evitando saltos abruptos no físicos en la simulación.

# Apéndice B

## Códigos Fuente MATLAB

A continuación se presenta el código de todos los archivos utilizados para la simulación y creación de los gráficos del proyecto.

Este se divide en 4 archivos, cada uno cumpliendo una función específica la cual se detalla a continuación:

- **main.m** - Archivo principal que orquesta la simulación, llama a las funciones necesarias y genera los gráficos.
- **parametros.m** - Define todos los parámetros físicos y de diseño utilizados para las simulaciones.
- **Entradas.m** - Archivo de tipo clase que contiene todas los escenarios de perturbaciones utilizados en todas las simulaciones (Día Despejado, Nublado e Intermitente).
- **graficos.m** - Función encargada de generar y personalizar todos los gráficos resultantes de las simulaciones en los distintos escenarios de perturbaciones.
- **modelo.m** - Función que contiene el modelo de EDO's del sistema que se resuelve numerosas veces a lo largo del proyecto.

A continuación se inserta todo el código utilizado.

```

1 %% ===== CÓDIGO PRINCIPAL =====
2 clear; close all; clc;
3
4 % ===== Carga de Parámetros y
   Perturbaciones =====
5 p = parametros();
6 pert = Entradas();
7
8 tspan = 0:69:24*3600;
9 T0 = pert.temperatura_ambiente_despejado(0) +
   273.15;
10 y0 = [T0, T0];
11
12 %% ===== LAZO ABIERTO (ESCALÓN)
   =====
13 % Define entradas y resuelve EDO
14 voltaje_bomba_escalon = @(t) 24 * ((9 <= t
   /3600) & (t/3600 <= 19));
15 voltaje_ventilador_escalon = @(t) 12 * ((9 <= t
   /3600) & (t/3600 <= 19));
16
17 odefun_la = @(t, y) modelo(t, y, p, ...
18     @(t) pert.temperatura_ambiente_despejado(t)
19     , ...
20     @(t) pert.irradiancia_solar_despejado(t),
21     , ...
22     @(t) pert.velocidad_viento(t), 0,
23     voltaje_bomba_escalon, ...
24     voltaje_ventilador_escalon, 0);
25
26 [t_la, y_la] = ode45(odefun_la, tspan, y0);
27 T_p_la = y_la(:, 1) - 273.15;
28 t_la_h = t_la/3600;
29
30 % Máx temperatura alcanzada.
31 max_temp = max(T_p_la);
32
33 % ----- Energía Consumida -----
34 % Calcula energía consumida acumulada para
   graficar
35 W_vent = arrayfun(voltaje_ventilador_escalon,
   t_la).^2 / p.R_vent;
36 W_bomb = arrayfun(voltaje_bomba_escalon, t_la)
   .^2 / p.R_bomb;
37 % Calcula energía consumida en kWh
38 E_vent = cumtrapz(t_la, W_vent) / 3.6e+6;
39 E_bomb = cumtrapz(t_la, W_bomb) / 3.6e+6;
40 E_total = E_vent + E_bomb;
41
42 % Imprime en la consola datos térmicos y energé
   ticos relevantes
43 fprintf("Lazo Abierto:\t Temp Máx | E_vent |
   E_bomb | E_total \n")
44 fprintf("\t\t %2f °C | %.3f kWh | %.3f kWh |
   %.3f kWh \n", max_temp, E_vent(end), E_bomb
   (end), E_total(end));
45
46 % Grafica Temperatura del Panel en Lazo Abierto
47 figure("Name", "Lazo Abierto", "NumberTitle", "
   off");
48 plot(t_la_h, T_p_la, "LineWidth", 2, "Color", "
   b");
49 xlabel("Hora del día (hrs)"); ylabel("
   Temperatura del Panel (°C)");
50 xlim([0, 24]); xticks(0:2:24);
51 ylim([0, 60]);
52 grid on;
53
54 % Grafica Energía consumida por actuadores
55 figure("Name", "E Consum. Lazo Abierto", "
   NumberTitle", "off");
56 hold on; grid on;
57
58 plot(t_la_h, E_total, "LineWidth", 2, "Color",
   "g");
59 plot(t_la_h, E_vent, "LineWidth", 2, "Color", "
   b");
60 plot(t_la_h, E_bomb, "LineWidth", 2, "Color", "
   r");
61 legend("E. consum. Ventilador", "E. consum.
   Bomba", "E. Total consum.", "Location", "
   northwest");
62 xlim([0,24]); xticks(0:2:24);
63 ylim([-0.1, 0.8]); yticks(0:0.2:0.8);
64 xlabel("Hora del día (hrs)"); ylabel("Energía
   Consumida (kWh)");
65
66 %% ===== VARIACIONES DE Kc =====
67 % Prepara gráficos
68 figure("Name", "Comparativa Kc - Día Despejado
   ", "NumberTitle", "off");
69
70 % --- Subplot 1: Temperaturas ---
71 ax1 = subplot(1, 2, 1); hold on; grid on;
72 ylabel("Temperatura Panel (°C)");
73 xlabel("Hora del día (hrs)");
74 xlim([0, 24]); xticks(0:2:24);
75 ylim([0 60]);
76
77 yline(55, 'k--', 'Límite 55°C', '
   LabelHorizontalAlignment', 'right', '
   HandleVisibility', 'off');
78
79 % --- Subplot 2: Esfuerzo de Control ---
80 ax2 = subplot(1, 2, 2); hold on; grid on;
81 ylabel("Voltaje (V)");
82 xlabel("Hora del día (hrs)");
83 xlim([0, 24]); xticks(0:2:24);
84 ylim([-1 13]);
85
86 % Definición de perturbaciones
87 f_amb = @(t) pert.
   temperatura_ambiente_despejado(t);
88 f_irr = @(t) pert.irradiancia_solar_despejado(t)
   ;
89 f_wind = @(t) pert.velocidad_viento(t);
90
91 colores = lines(length(p.K_c));
92
93 % --- BUCLE DE SIMULACIÓN ---
94 for i = 1:length(p.K_c)
95     Kc_actual = p.K_c(i);
96
97     % Resuelve EDO's
98     [t_sim, y_sim] = ode45(@(t,y) modelo(t,y,p,
   f_amb, f_irr, f_wind, 1, @(t)0, @(t)0,
   Kc_actual), tspan, y0);
99
100     % Calcula variables a graficar
101     T_panel = y_sim(:, 1) - 273.15;
102     u_calc = Kc_actual * (p.ref - y_sim(:,1)) +
   p.offset;
103     V_vent_plot = min(p.V_vent_MAX, max(u_calc,
   p.V_MIN));
104
105     % Crea leyenda
106     etiqueta_leyenda = sprintf('K_c = %2f',
   Kc_actual);
107
108     % --- Graficar Temperatura ---
109     plot(ax1, t_sim/3600, T_panel, ...
110         'LineWidth', 2, ...
111         'Color', colores(i,:), ...
112         'DisplayName', etiqueta_leyenda);
113
114     % --- Graficar Voltaje ---

```

```

111     plot(ax2, t_sim/3600, V_vent_plot, ...
112           'LineWidth', 1.5, ...
113           'Color', colores(i,:), ...
114           'DisplayName', etiqueta_leyenda);
115 end
116
117 % === ACTIVA LEYENDAS ===
118 legend(ax1, 'Location', 'best', 'Interpreter',
119        'tex');
119 legend(ax2, 'Location', 'northeast', '
120        Interpreter', 'tex');
121
122 %% ===== USO DE MÉTRICAS (STEP TEST)
123 =====
124 p_test = p;
125 Kc_val = p_test.K_c(1);
126
127 % Parametros constantes
128 in_amb = @(t) 30; in_irr = @(t) 800; in_wind =
129         @(t) 5.0;
130
131 % --- FASE 1: Pre-estabilización (1 hora a 40°C) ---
132 p_test.ref = 40 + 273.15;
133 [t1, y1] = ode45(@(t,y) modelo(t,y,p_test,
134         in_amb,in_irr,in_wind,1,@(t)0,@(t)0,Kc_val)
135         , ...
136         [0 3600], [273.15 + 30, 273.15 + 30]);
137
138 % --- FASE 2: Escalón (1 hora a 55°C) ---
139 p_test.ref = 55 + 273.15;
140 [t2, y2] = ode45(@(t,y) modelo(t,y,p_test,
141         in_amb,in_irr,in_wind,1,@(t)0,@(t)0,Kc_val)
142         , ...
143         [3600 7200], y1(end,:));
144
145 % Unir datos
146 t_total = [t1; t2];
147 T_total = [y1(:,1); y2(:,1)] - 273.15;
148 T_fase2 = y2(:,1) - 273.15;
149 t_rel = t2 - t2(1);
150
151 % --- CÁLCULO DE MÉTRICAS ---
152
153 % 1. Centro de Oscilación (Último 30% de datos)
154 idxCola = round(length(T_fase2) * 0.7) :
155         length(T_fase2);
156 datosCola = T_fase2(idxCola);
157 % Promedio de Osc_max y Osc_min
158 T_final_real = (max(datosCola) + min(
159         datosCola)) / 2;
160
161 % 2. Delta del viaje
162 Delta_V = T_final_real - T_fase2(1);
163
164 % 3. Banda de Tolerancia (5%)
165 banda = 0.05 * abs(Delta_V);
166
167 % 4. Tiempo de Estabilización (Ts) - Primer
168 Toque
169 idx_toque = find(abs(T_fase2 - T_final_real) <=
170         banda, 1, 'first');
171 if isempty(idx_toque), Ts = 0; else, Ts = t_rel
172         (idx_toque); end
173
174 % 5. Tiempo de Subida (Tr) - 10% a 90%
175 val_10 = T_fase2(1) + 0.1 * Delta_V;
176 val_90 = T_fase2(1) + 0.9 * Delta_V;
177 idx_10 = find(T_fase2 >= val_10, 1, 'first');
178 idx_90 = find(T_fase2 >= val_90, 1, 'first');
179 if ~isempty(idx_10) && ~isempty(idx_90)
180     Tr = t_rel(idx_90) - t_rel(idx_10);
181 else
182     Tr = 0;
183 end
184
185 % Error de estado estacionario
186 ESS = 55 - T_final_real;
187 % Sobrepasso
188 Sobrepasso = max(T_fase2) - T_final_real;
189
190 % --- IMPRIME RESULTADOS EN CONSOLA ---
191 fprintf('\n--- RESULTADOS ENTORNO CONTROLADO
192 ---\n');
193 fprintf('Tr: %.1f s | Ts: %.1f s | ESS: %.2f °C
194 | Sobrepasso: %.2f\n', Tr, Ts, ESS,
195         Sobrepasso);
196 fprintf('Centro Oscilación: %.4f°C\n',
197         T_final_real);
198 fprintf('Banda (5%%): +/- %.4f°C\n', banda);
199
200 % --- GRÁFICOS FINALES ---
201 figure("Name", "Ent. Controlado: Métricas", "
202         NumberTitle", "off");
203
204 % Subplot 1: Temperatura
205 subplot(1,2,1);
206 plot(t_total/3600, T_total, 'b', 'LineWidth',
207         2); grid on; hold on;
208 xlim([0 2]);
209 ylim([40 57.5]);
210 xlabel('Tiempo (h)'); ylabel('Temperatura del
211         Panel (°C)');
212
213 % Referencia y valor final
214 yline(55, 'r--', 'Ref 55'); yline(45, 'r--', '
215         Ref 45');
216 yline(T_final_real, 'k-', 'Centro Osc.');
```



```

223     @t) pert.temperatura_ambiente_nublado(t),
224     @t) pert.irradiancia_solar_nublado(t);
225     @t) pert.temperatura_ambiente_intermitente
226     (t), @t) pert.
227     irradiancia_solar_intermitente(t)
228 };
229 Kp_optimo = p.K_c(1);
230 fprintf("--- (K_c:%.3f) Max Temp | E_vent |
231 E_bomb | E_total \n", Kp_optimo);
232 for i=1:size(perfil_pert, 1)
233     temperatura_ambiente = perfil_pert{i, 1};
234     irradiancia_solar = perfil_pert{i, 2};
235     velocidad_viento = @t) pert.
236     velocidad_viento(t);
237
238     nombre_graf = nombre_perfiles(i);
239
240     % Grafica Temperatura del Panel, Entradas y
241     Perturbaciones Aplicadas
242     graficos(nombre_graf, p,
243     temperatura_ambiente, irradiancia_solar
244     , ...
245     velocidad_viento, 1, @t) 0, @t) 0,
246     Kp_optimo);
247 end

```

**Listing B.1:** Código principal de ejecución

```

1 %% ===== MODELO (EDO) =====
2 function dydt = modelo(t, y, p,
3     temperatura_ambiente, ...
4     irradiancia_solar, velocidad_viento, ...
5     flag_lazo, v_bomb_fun, v_vent_fun, ...
6     K_p)
7 % Variables de estado en [K]
8 T_p = y(1);
9 T_w_in = y(2);
10
11 % ===== Entrada =====
12
13 % ----- LAZO ABIERTO -----
14 if flag_lazo == 0
15     V_bomb = v_bomb_fun(t);
16     V_vent = v_vent_fun(t);
17
18 % ----- LAZO CERRADO -----
19 elseif flag_lazo == 1
20     error = p.ref - T_p;
21     u = K_p * error + p.offset;
22
23     V_vent = min(p.V_vent_MAX, max(u, p.V_MIN));
24     ;
25     V_bomb = min(p.V_bomb_suficiente, max(u, p.
26     V_MIN));
27 end
28
29 % Variables Externas
30 v_vient = velocidad_viento(t);
31 T_amb = temperatura_ambiente(t) + 273.15;
32 G = irradiancia_solar(t);
33
34 % Temperatura del cielo
35 T_cielo = T_amb - 8;
36

```

```

37 % Flujo másico
38 m_dot_w = p.rho_w * p.k_Qf * V_bomb;
39
40 % Convección panel solar
41 if v_vient<5
42     h_p = 5.7+3.8*v_vient;
43 else
44     h_p = 6.47+v_vient^(0.78);
45 end
46
47 if V_bomb > 0
48     % ----- BOMBA ENCENDIDA -----
49
50     T_w_out = (2*m_dot_w * p.C_p_w * T_w_in + p
51     .h_conv_pw * ...
52     p.A_c * (2*T_p - T_w_in)) / (2*m_dot_w
53     * p.C_p_w ...
54     + p.h_conv_pw * p.A_c);
55
56     % DeltaT_ml sin indeterminaciones
57     % Para evitar posibles problemas numéricos
58     if abs(T_w_out - T_w_in) > 0 && (T_w_out -
59     T_amb) > 0 && ...
60     (T_w_in - T_amb) > 0
61
62     arg_log = (T_w_out - T_amb) / (T_w_in -
63     T_amb);
64
65     if arg_log > 0 && abs(arg_log - 1) > 0
66     Delta_T_ml = (T_w_out - T_w_in) /
67     log(arg_log);
68
69     else
70     Delta_T_ml = T_w_in - T_amb;
71 end
72
73 else
74     % ----- BOMBA APAGADA -----
75     T_w_out = T_w_in; % Sin flujo, no hay
76     gradiente
77     Delta_T_ml = T_w_in - T_amb; % Para agua
78     estancada, diferencia simple
79 end
80
81 % Flujos de calor
82 Q_sol = p.A_p * G * (p.alpha_p - p.eta_ref *
83     ...
84     (1 + (p.mu_Voc/p.V_mp)*(T_p - p.T_ref)));
85
86 Q_conv_p = h_p * p.A_p * (T_p - T_amb);
87
88 Q_rad_p = p.epsilon_p * p.sigma * p.A_p * (T_p
89     ^4 - T_cielo^4);
90
91 Q_cool = m_dot_w * p.C_p_w * (T_w_out - T_w_in)
92     ;
93
94 Q_int = (p.U_base + p.k_vent * V_vent) * p.
95     A_int * Delta_T_ml;
96
97 % Ecuaciones diferenciales
98 dT_p_dt = (Q_sol - Q_conv_p - Q_rad_p - Q_cool)
99     / (p.m_p * p.C_p_p);
100 dT_w_in_dt = (Q_cool - Q_int) / (p.m_w * p.
101     C_p_w);
102
103 % Sistema
104 dydt = [dT_p_dt;

```

```

97 dT_w_in_dt];
98 end

```

## Listing B.2: Generación de gráficos personalizados

```

1 %% ===== PARÁMETROS =====
2 function p = parametros()
3 p = struct();
4
5 % Panel Solar
6 p.m_p = 18.2; % [kg]
7 p.A_p = 1.65; % [m^2]
8 p.C_p_p = 624; % [J/kg.K]
9 p.alpha_p = 0.9; % Absortividad
10 p.epsilon_p = 0.88; % Emisividad
11
12 % Parámetros Fotovoltaicos
13 p.eta_ref = 0.1619; % Eficiencia referencia
14 p.mu_Voc = -0.0031; % [1/K]
15 p.V_mp = 30.6; % [V]
16 p.T_ref = 25 + 273.15; % [K]
17
18 % Sistema de Agua
19 p.m_w = 5; % [kg]
20 p.C_p_w = 4186; % [J/kg.K]
21 p.rho_w = 980; % [kg/m^3]
22
23 % Bomba
24 p.k_Qf = 1.35415e-5; % [m^3/s.V]
25
26 % Interfaz Panel-Agua
27 p.h_conv_pw = 200.0; % [W/m^2.K]
28 p.A_c = 1.3; % [m^2]
29
30 % Intercambiador
31 p.A_int = 0.78; % [m^2]
32 p.U_base = 15.0; % [W/m^2.K]
33 p.k_vent = 3.5; % [W/m^2K.V]
34
35 p.sigma = 5.67e-8;
36
37 % Resistencia Equivalente Ventilador/Bomba
38 p.R_vent = 12; % [Ω]
39 p.R_bomb = 48/5; % [Ω]
40
41 % ===== CONTROLADOR =====
42
43 % Ganancias a probar
44 p.K_c = [-0.25, -0.5, -1.0, -2.0];
45
46 p.ref = 45 + 273.15; % [°C]
47 p.offset = 5; % [V]
48 p.V_MIN = 0; % [V]
49 p.V_vent_MAX = 12; % [V]
50 p.V_bomb_suficiente = 3;% [V]
51
52 end

```

## Listing B.3: Definición de parámetros físicos y de diseño

```

1 %% ===== ENTRADAS DE PERTURBACIONES =====
2 classdef Entradas
3     methods
4         % Velocidad del viento (Misma para
5         % todos los perfiles)

```

```

function v_vient = velocidad_viento(~,
t)
v_vient = 5+3*sin(2*pi*t/3600*24);
end

% === DÍA DESPEJADO ===
% Irradiancia solar
function G =
    irradiancia_solar_despejado(~, t)

    G_max = 1000; % Irradiancia
    pico (W/m^2)
    t_amanecer = 6.5; % Hora del
    amanecer (horas)
    t_atardecer = 20.5; % Hora del
    ocaso (horas)
    t_h = t / 3600;

    arg = pi * (t_h-t_amanecer)/(
        t_atardecer-t_amanecer);

    G = (t_amanecer<=t_h & t_h<=
        t_atardecer).*G_max.*sin(arg);

end

% Temperatura ambiente
function T_amb =
    temperatura_ambiente_despejado(~, t
    )

    t_h = t/3600;

    t_min = 6.5;
    t_sunset = 20.5;

    Y = t_sunset-t_min;
    Z = 24-Y;

    T_x = 35.2;
    T_N = 10;
    T_s = 25.1018;

    a = 1.8;
    b = 2.5;

    if t_h>=t_min && t_h<=t_sunset

        T_amb = (T_x-T_N)*sin(pi*(t_h-
            t_min)/(Y+2*a))+T_N;

    else

        % Ajuste de continuidad y
        % periodicidad
        % para comenzar simulaciones en
        % tiempo 00:00
        if t_h<t_min
            T_amb = T_N+(T_s-T_N)*exp
                (-(b*((t_h+24)-t_sunset
                ))/(Z));

        else
            T_amb = T_N+(T_s-T_N)*exp
                (-(b*(t_h-t_sunset))/(Z
                ));

        end

    end

end

% === DÍA NUBLADO ===
% Irradiancia solar
function G = irradiancia_solar_nublado

```

```

62     (~, t)
63     G_max = 1000*0.5; %
64     Irradiancia pico (W/m^2)
65     t_amanecer = 6.5; % Hora del
66     amanecer (horas)
67     t_atardecer = 20.5; % Hora del
68     ocase (horas)
69     t_h = t / 3600;
70
71     arg = pi * (t_h-t_amanecer)/(
72         t_atardecer-t_amanecer);
73
74     G = (t_amanecer<=t_h & t_h<=
75         t_atardecer).*G_max.*sin(arg);
76
77 end
78
79 % Temperatura ambiente
80 function T_amb =
81     temperatura_ambiente_nublado(~, t)
82
83     t_h = t/3600;
84
85     t_min = 6.5;
86     t_sunset = 20.5;
87
88     Y = t_sunset-t_min;
89     Z = 24-Y;
90
91     T_x = 25;
92     T_N = 12; % <-- Mínima similar
93     o más alta
94     T_s = 20; % <-- Temp.
95     atardecer
96
97     a = 1.8;
98     b = 2.5;
99
100     if t_h>=t_min && t_h<=t_sunset
101
102         T_amb = (T_x-T_N)*sin(pi*(t_h-
103             t_min)/(Y+2*a))+T_N;
104
105     else
106
107         % Ajuste de continuidad y
108         periodicidad
109         % para comenzar simulaciones en
110         tiempo 00:00
111         if t_h<t_min
112             T_amb = T_N+(T_s-T_N)*exp
113             (-(b*((t_h+24)-t_sunset
114                 ))/(Z));
115
116         else
117             T_amb = T_N+(T_s-T_N)*exp
118             (-(b*(t_h-t_sunset))/(Z
119                 ));
120
121         end
122     end
123
124 end
125
126 % === DÍA PARCIALMENTE NUBLADO (
127 INTERMITENTE) ===
128 % Irradiancia solar
129 function G =
130     irradiancia_solar_intermitente(obj,
131         t)
132
133     % Base
134     G_despejado = obj.
135     irradiancia_solar_despejado(t);
136
137 % Parámetros de Nubes (Locales)
138 periodo_1 = 2.5 * 3600; % Nube
139 grande cada 2.5 horas
140 duracion_1 = 25 * 60; % Dura 25
141 minutos
142 atenuacion_1 = 0.3; % Pasa el
143 30%
144
145 periodo_2 = 1.1 * 3600; % Nube
146 mediana cada 1.1 horas
147 duracion_2 = 8 * 60; % Dura 8
148 minutos
149 atenuacion_2 = 0.6; % Pasa el
150 60%
151
152 % Lógica de Pulso Abrupta (rem)
153 if rem(t, periodo_1) < duracion_1
154     factor_1 = atenuacion_1;
155 else
156     factor_1 = 1.0;
157 end
158
159 desfase_2 = 15 * 60;
160 if rem(t + desfase_2, periodo_2) <
161     duracion_2
162     factor_2 = atenuacion_2;
163 else
164     factor_2 = 1.0;
165 end
166
167 factor_nube_total = factor_1 *
168     factor_2;
169
170 % Perturbación: Irradiancia Solar
171 G = G_despejado * factor_nube_total
172 ;
173
174 end
175
176 % Temperatura Ambiente
177 function T_amb =
178     temperatura_ambiente_intermitente(
179     obj, t)
180
181 % Obtiene la temperatura base (día
182 despejado)
183 T_despejado = obj.
184     temperatura_ambiente_despejado(
185     t);
186
187 % Verifica si es de día
188 G_despejado = obj.
189     irradiancia_solar_despejado(t);
190
191 if G_despejado > 0 % Es de día
192
193     periodo_clima = 2.5 * 3600;
194     max_reduccion_C = 4.0;
195
196     % Desfase por Inercia térmica
197     (45 min de retraso)
198     retraso = 0.75 * 3600;
199
200     % --- Cálculo de la Onda Suave
201     ---
202     % Onda cos() en la misma
203     frecuencia que la nube
204     grande (en irradiancia)
205     onda_clima = cos( (2 * pi /
206         periodo_clima) * (t -
207             retraso) );
208
209     % Se mapean los valores de
210     coseno de [-1, 1] -> [0, 1]

```

```

166         factor_inercial_suave = (
167             onda_clima + 1) / 2;
168
169         % Invertimos: [1 (frío), 0 (cálido)]
170         reduccion_norm = 1 -
171             factor_inercial_suave;
172
173         reduccion = reduccion_norm *
174             max_reduccion_C;
175
176     else % Es de noche
177         reduccion = 0;
178     end
179
180     % 3. Aplicamos la reducción
181     T_amb = T_despejado - reduccion;
182 end
end

```

**Listing B.4:** Definición de escenarios de perturbaciones

```

1 %% ===== GRÁFICOS =====
2 function graficos(nombre, p,
3     temperatura_ambiente, ...
4     irradiancia_solar, velocidad_viento,
5     flag_lazo, ...
6     v_vent_fun, v_bomb_fun, K_c)
7
8 % Soluciona la EDO con las entradas dadas
9 pert = Entradas();
10 tspan = 0:60:24*3600;
11 T0 = pert.temperatura_ambiente_despejado(0) +
12     273.15;
13 y0 = [T0, T0];
14
15 odefun = @(t,y) modelo(t, y, p, ...
16     temperatura_ambiente, ...
17     irradiancia_solar, ...
18     velocidad_viento,...
19     flag_lazo, ...
20     v_vent_fun, ...
21     v_bomb_fun, ...
22     K_c);
23
24 [t, y] = ode45(odefun, tspan, y0);
25 T_p = y(:, 1) - 273.15;
26 t_h = t/3600;
27
28 % Grafica entradas
29 u = K_c * (p.ref - y(:,1)) + p.offset;
30 salida_vent = min(p.V_vent_MAX, max(u, p.V_MIN));
31 salida_bomb = min(p.V_bomb_suficiente, max(u, p.V_MIN));
32
33 % Máx temperatura
34 max_temp = max(T_p);
35
36 % ----- Energía Consumida -----
37 % Calcula energía consumida acumulada para graficar
38 W_vent = salida_vent.^2 / p.R_vent;
39 W_bomb = salida_bomb.^2 / p.R_bomb;
40 % Calcula energía consumida en kWh
41 E_vent = cumtrapz(t, W_vent) / 3.6e+6;
42 E_bomb = cumtrapz(t, W_bomb) / 3.6e+6;

```

```

40 E_total = E_vent + E_bomb;
41
42 % Imprime en la consola datos térmicos y energéticos relevantes
43 fprintf("%s: \t %.2f °C | %.3f kWh | %.3f kWh |
44     %.3f kWh \n", ...
45     nombre, max_temp, E_vent(end), E_bomb(end),
46     E_total(end));
47
48 % Crea vector para graficar perturbaciones
49 temp_amb = arrayfun(@(t) temperatura_ambiente(t), t);
50 irr_sol = arrayfun(@(t) irradiancia_solar(t), t);
51
52 % ----- Temperatura Panel Solar -----
53 figure("Name", compose("Tp/Entradas: %s", nombre),
54     "NumberTitle", "off");
55 eje1 = subplot(1, 2, 1);
56 plot(t_h, T_p);
57 yline(max_temp, 'r--', compose("Máx: %.2f°C",
58     max_temp), 'Color', 'r', 'LineWidth', 2);
59 ylim([0, 60]); ylabel("Temperatura del Panel (°C)");
60 grid on;
61
62 % ----- Voltajes Ventilador/Bomba -----
63 eje2 = subplot(1, 2, 2);
64 plot(t_h, salida_vent, "LineStyle", "--", "
65     LineWidth", 2, "Color", "b");
66 hold on; grid on;
67 plot(t_h, salida_bomb, "LineStyle", "-.", "
68     LineWidth", 2, "Color", "r");
69 legend("V. Ventilador", "V. Bomba", "Location",
70     "northwest");
71 ylim([-1, 13]); ylabel("Voltaje (V)");
72 hold off;
73
74 if nombre=="Despejado"
75     % ----- Energía Consumida -----
76     figure("Name", compose("E. Consum.: %s",
77         nombre), "NumberTitle", "off");
78     eje3 = gca;
79     plot(t_h, E_vent, "LineWidth", 2, "Color",
80         "b");
81     hold on; grid on;
82     plot(t_h, E_bomb, "LineWidth", 2, "Color",
83         "r");
84     plot(t_h, E_total, "LineWidth", 2, "Color",
85         "g");
86     legend("E. consum. Ventilador", ...
87         "E. consum. Bomba", ...
88         "E. Total consum.", ...
89         "Location", "northwest");
90     ylim([-0.001, 0.04]); yticks(0:0.01:0.04);
91     ylabel("Energía Consumida (kWh)");
92 end
93
94 % ----- Temperatura Ambiente -----
95 figure("Name", compose("Pert: %s", nombre), "
96     NumberTitle", "off");
97 eje4 = subplot(1, 2, 1);
98 plot(t_h, temp_amb, "LineWidth", 2, "Color",
99     [0,0.5,0]);
100 ylim([0, 40]); ylabel("Temperatura del Panel (°C)");
101 grid on;
102
103 % ----- Irradiancia Solar -----
104 eje5 = subplot(1, 2, 2);
105 plot(t_h, irr_sol, "LineWidth", 1.75, "Color",
106     [0.85,0.85,0]);

```

<pre> 93 ylim([-100, 1100]); ylabel("Irradiancia (W/m^2)"); 94 grid on; 95 96 % === CONFIGURACIONES GENERALES DE LOS GRÁFICOS 97 % Agrupa todos los gráficos 98 ejes = [eje1, eje2, eje4, eje5]; 99 if nombre=="Despejado" 100     ejes = [ejes, eje3]; 101 end 102 </pre>	<pre> 103 % Añade datos comunes al eje X 104 set(ejes, ... 105     'xlim', [0, 24], ... 106     'xtick', 0:2:24); 107 xlabel(ejes, "Hora del día (hrs)") 108 end </pre>
--	---

**Listing B.5:** Generación de gráficos personalizados

## Bibliografía

- [1] J. S. Oliva, «Modelación de sistema de enfriamiento de agua en circuito cerrado para paneles fotovoltaicos.», Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Concepción, Chile, inf. téc. P2025-N01, 2025. dirección: [https://drive.google.com/file/d/1iJpdN8GLP\\_Q47VFWkeaOU\\_e33cPa72T/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1iJpdN8GLP_Q47VFWkeaOU_e33cPa72T/view?usp=drive_link)
- [2] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- [3] L. Iwaki Co., *IWAKI Magnetic Drive Pumps MD Series*, Documento técnico en formato PDF, Accedido: 2025-10-08, 2014. dirección: [https://iwaki-pumps.com.au/wp-content/uploads/2014/05/MD\\_A0015-16.pdf](https://iwaki-pumps.com.au/wp-content/uploads/2014/05/MD_A0015-16.pdf)
- [4] L. F. Shampine y M. W. Reichelt, «The MATLAB ODE Suite,» *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 18, n.º 1, págs. 1-22, 1997.