

PROYECTO **CONTROL DE INVERNADERO**

Ana Orozco Reyes
Sebastian Grillo Gonzalez
Cristian Hoffman Martin Mondragon
Juan Jose Cifuentes Rojas

TABLA DE **CONTENIDO**

- Planteamiento del problema
- Entendimiento e identificación de la planta
- Definición de la planta
- Diseño del controlador
- Implementación del controlador

PLANTEAMIENTO

OBJETIVO

Mantener la temperatura de un transistor 2N2222 que simula un invernadero ubicado en un ambiente de clima cálido, diseñando el control de temperatura para el cuidado de cultivos de melón, soya y tomate.

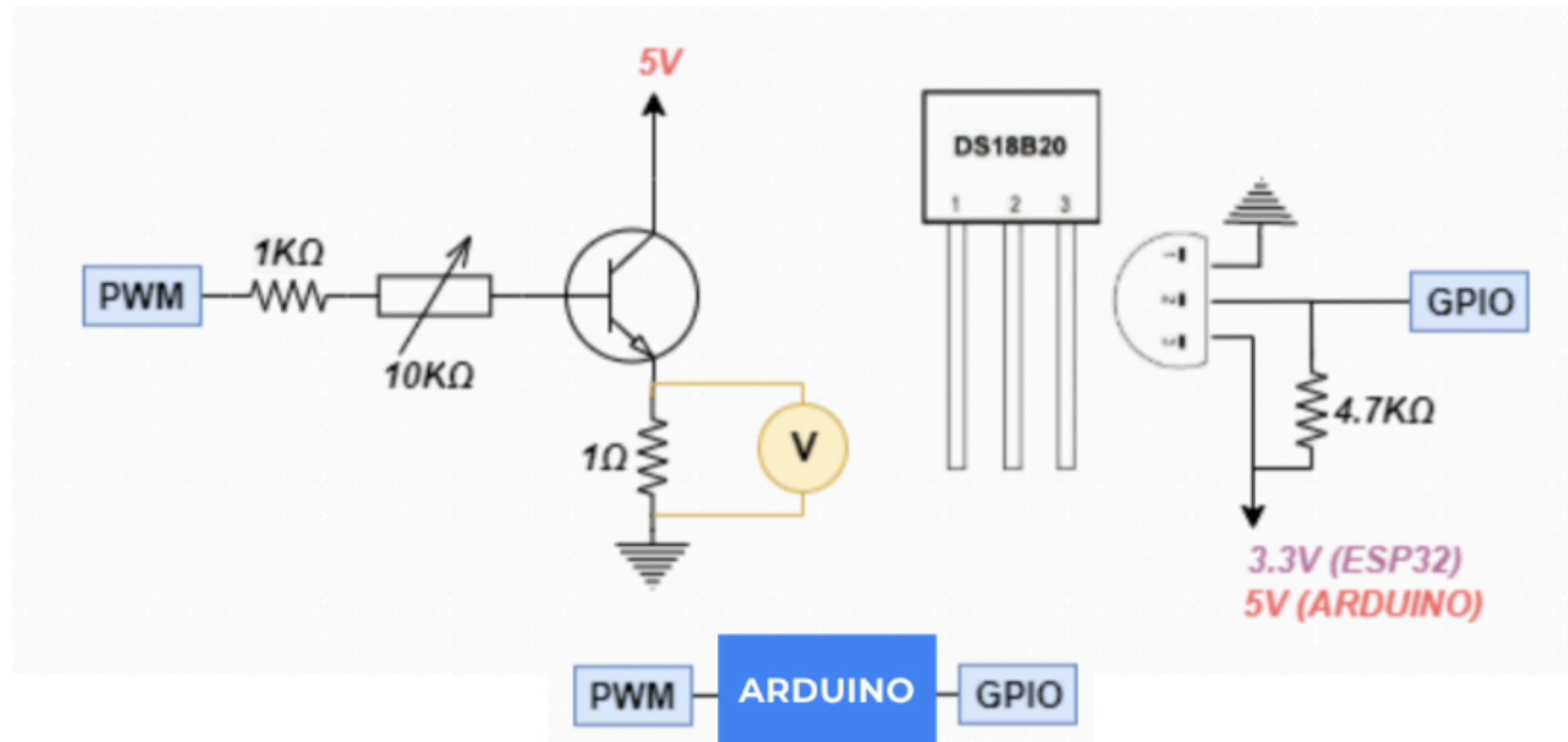


Fig 1. Esquemático del circuito

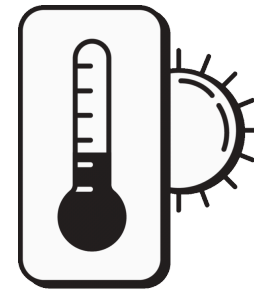
PLANTEAMIENTO

La temperatura del piso cálido en Colombia, en el cual estará la planta, oscila entre 22°C a 30°C [4].



Investigación

Melón: 20°C - 30 °C [1]
Soya: 20°C - 30 °C [2]
Tomate: 18°C - 29 °C [3]



Análisis

Rango de operación:
28°C ± 3°C



Diseño

$M_p < 35,7 \% = 38^\circ\text{C}$
 $t_s < 10\text{min}$

PLANTEAMIENTO

SUB-SISTEMAS

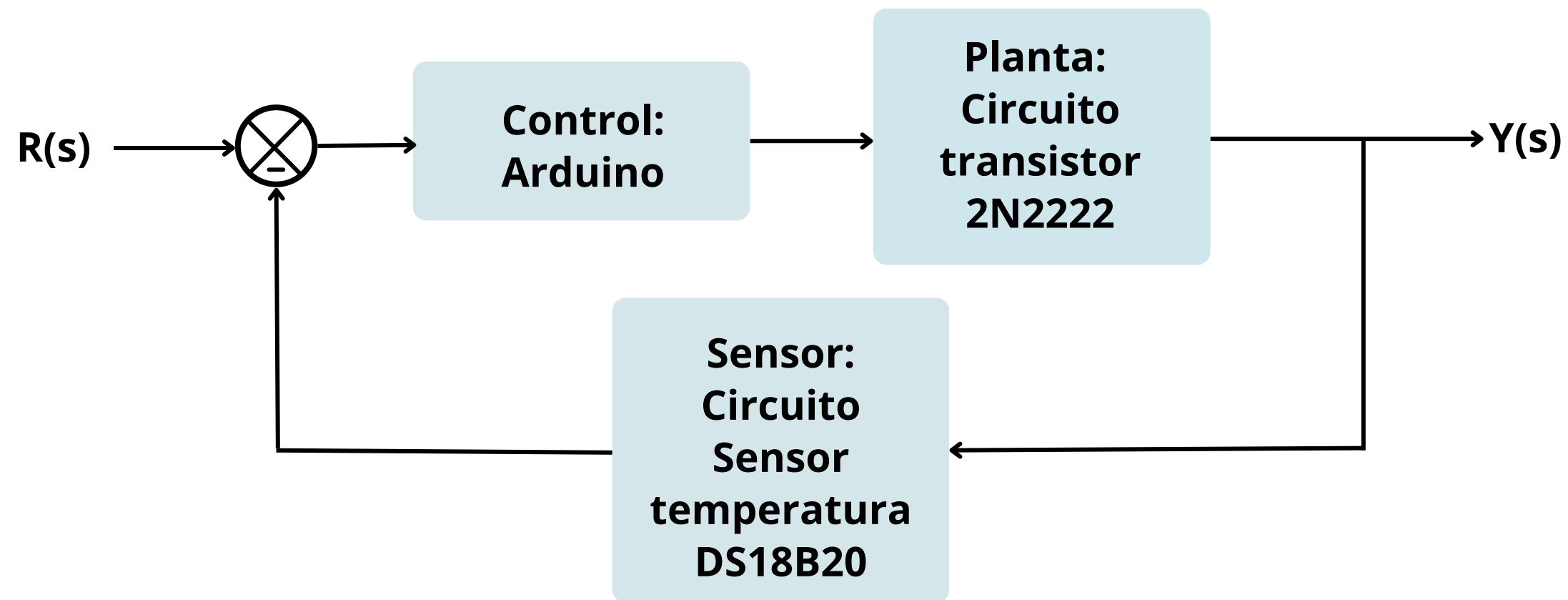


Fig 2. Diagrama de bloques del sistema

RESTRICCIONES

Dispositivo	Valor mínimo	Valor máximo
Sensor DS18B20	3 V	5.5 V
	-55° C	125° C
Transistor 2N2222	-	150° C
	-	800 mA
	-	40 V
Arduino (PWM)	0 V	5 V

PLANTEAMIENTO

SEÑALES

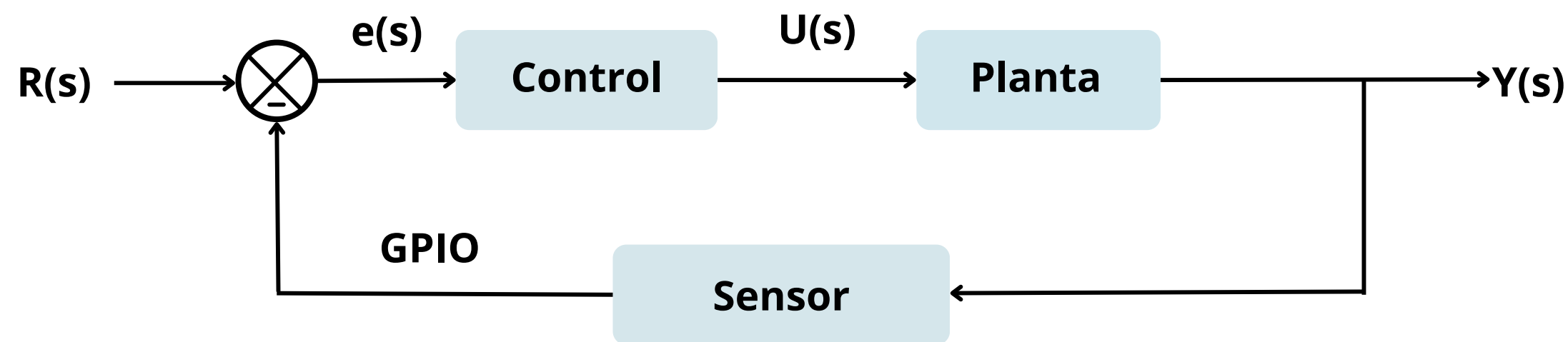


Fig 3. Diagrama de bloques ubicando señales.

Señal	Valor mínimo	Valor máximo
$R(s)$ (Código)	25 °C	31 °C
$e(s)$ (Código)	-5 °C	9 °C
GPIO (Física)	22 °C	30 °C
$Y(s)$ (Código)	25 °C	31 °C
$U(s)$ (Física)	0 V	5 V

PLANTEAMIENTO

MONTAJE

HARDWARE

- Sensor de temperatura digital DS18B20
- Transistor NPN 2N2222
- Trimmer 10K Ω
- Resistencias 1K Ω y 4.7K Ω
- Tarjeta de desarrollo Arduino UNO

SOFTWARE

- Arduino IDE
- MATLAB y Simulink

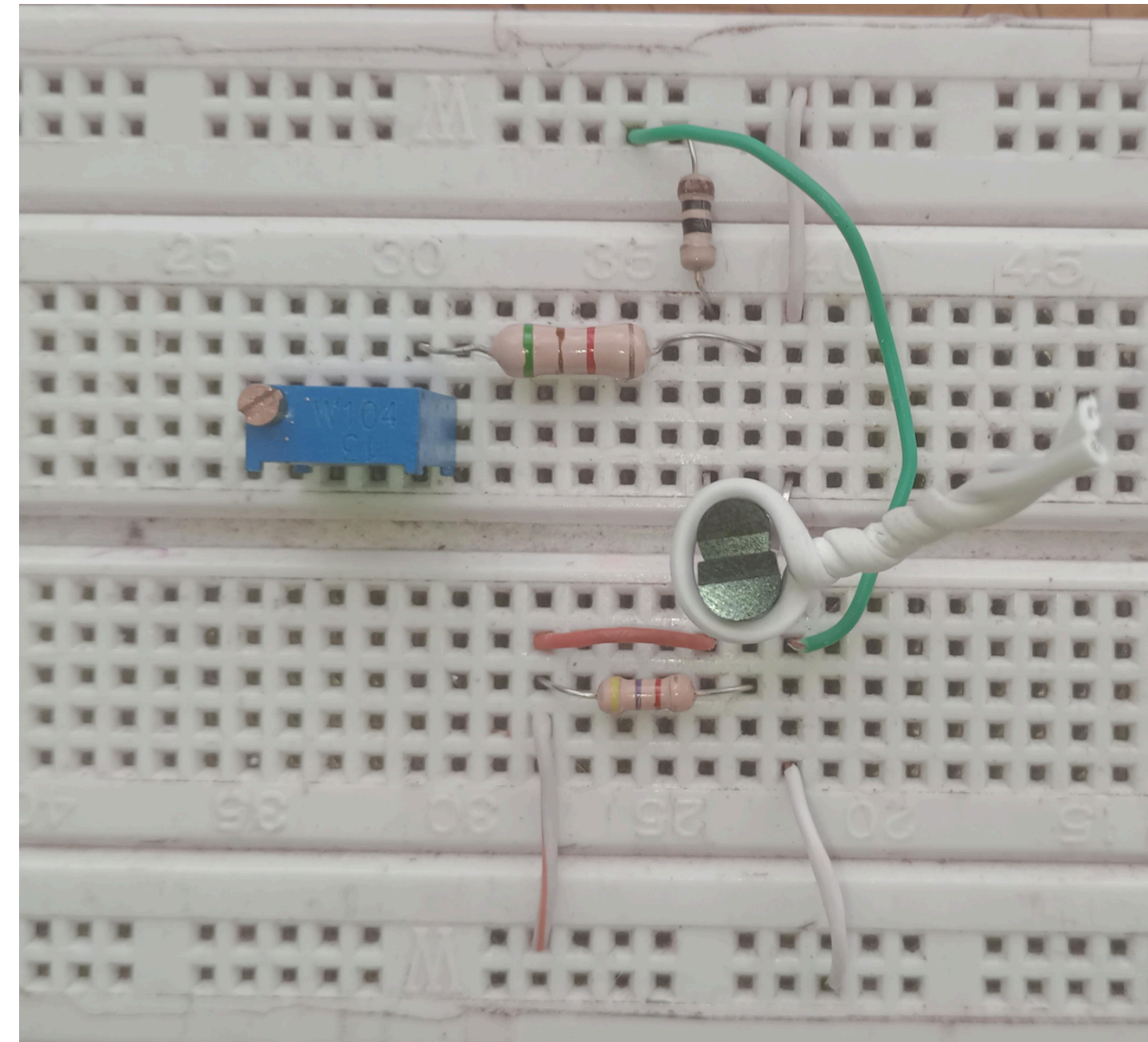


Fig 4. Montaje del circuito

ENTENDIMIENTO DE LA PLANTA

Voltaje del Arduino: $1V = 20\% * 5V$

Temperatura deseada: $28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Perturbación: Disminución de la temperatura ambiente a causa del exterior del invernadero y el encendido de aspersores.



ENTENDIMIENTO DE LA PLANTA

EL CÓDIGO

```
void calibracion(void){
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis >= Ts) {
    previousMillis = currentMillis;
    TempSensor.requestTemperatures(); tempF = TempSensor.getTempCByIndex(0);
    float U_t = U_op;
    float U_tl = min(max(U_t, 0), Uunits); // Saturated Control Output
    pwmDuty = int((U_tl/Uunits)*pwmMax);
    analogWriteADJ(OutputPWM_GPIO, pwmDuty);

    Serial.print("U:");
    Serial.print(U_t);
    Serial.print(",");

    Serial.print("tempF:");
    Serial.println(tempF);
  }

  // Control System Variables
  float Ref = 28.0;
  float U_op = 20.0;
  float U_t = 0.0;
  unsigned int pwmDuty = 0;
}
```

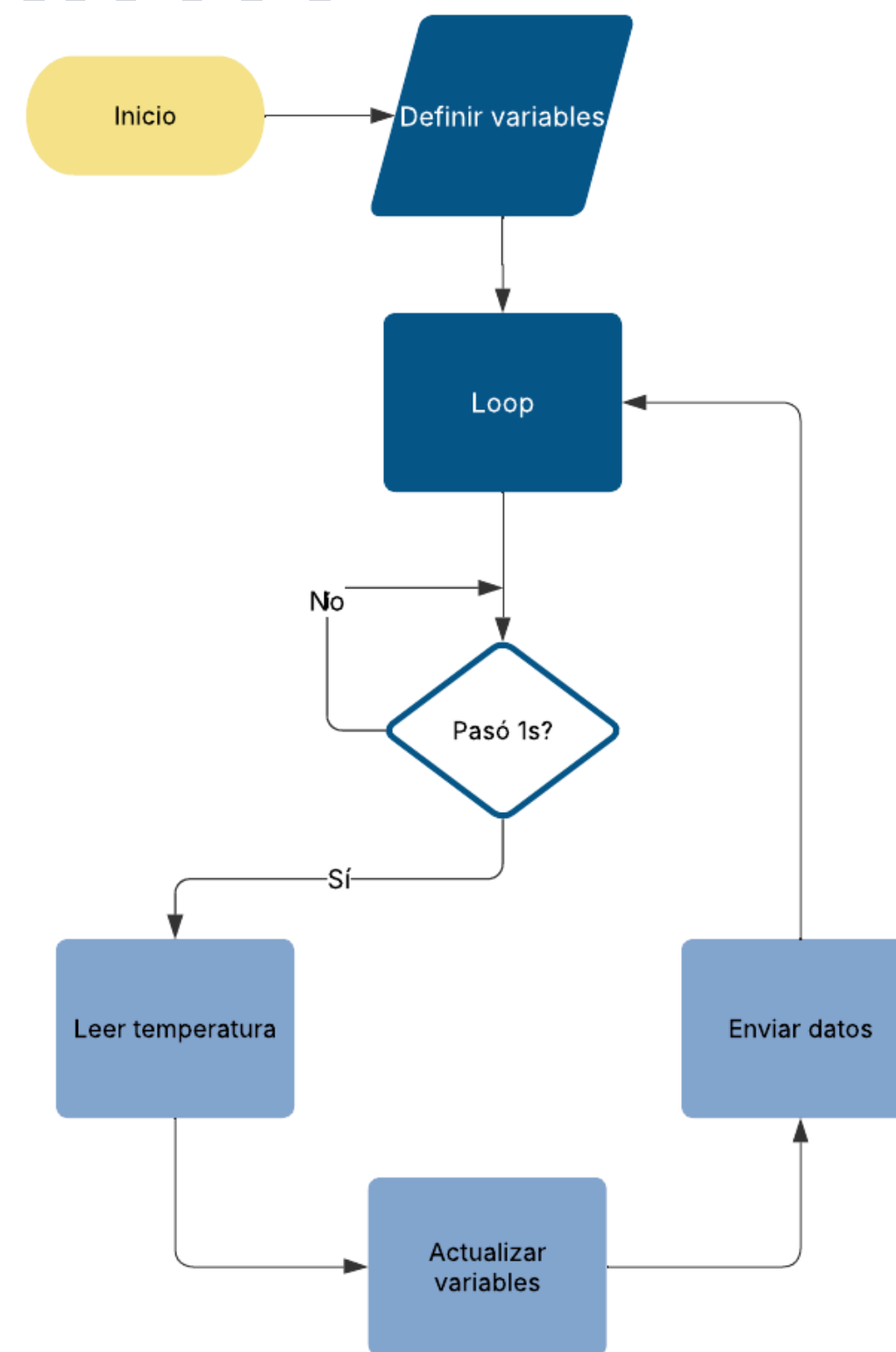


Fig 5. Parámetros de modificación, lectura y recolección de datos.

FUNCIÓN DE TRASFERENCIA

MATEMÁTICA

El modelo matemático que describe el sistema térmico

Analogías presentes: cambio de temperatura \rightarrow tensión flujo térmico \rightarrow Ley de Ohm

$$\dot{\theta} = \frac{1}{C} [q_{in}(t) - q_{out}(t)] \quad (1)$$

$$q(t) = \frac{1}{R} [\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (2)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Donde :

θ : Cambio de temperatura

q_i, q_{out} : Flujos térmicos

R : Resistencia térmica

C : Capacitancia térmica

V : voltaje

I : corriente

R : resistencia

FUNCIÓN DE TRASFERENCIA

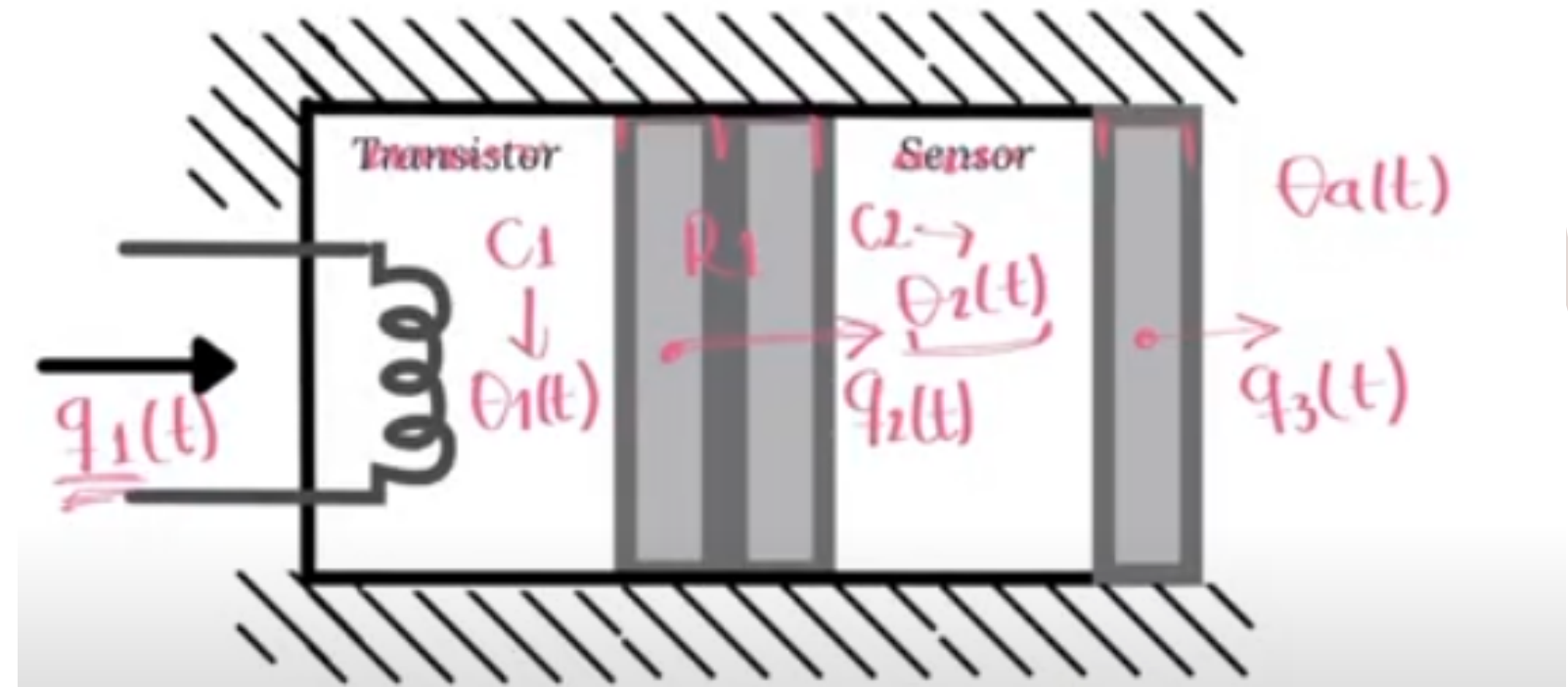
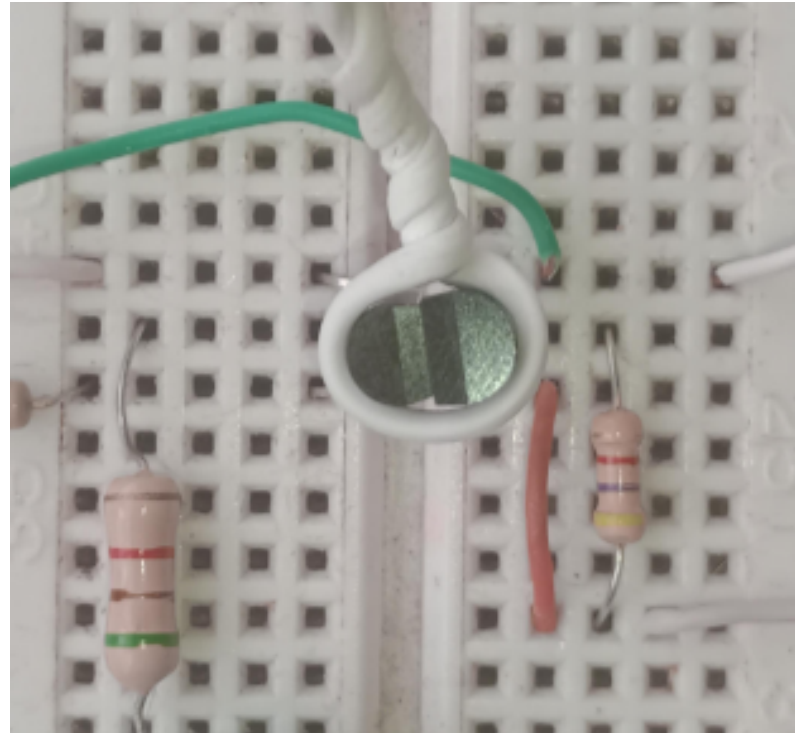


Fig 6. Esquema térmico

$$\dot{\theta}_1 = \frac{1}{C_1} [q_i(t) - \frac{1}{R_1} (\theta_1 - \theta_2)] \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{1}{C_2} \left[\frac{1}{R_1} (\theta_1 - \theta_2) - \frac{1}{R_2} (\theta_2 - \theta_a) \right] \quad (4)$$

FUNCIÓN DE TRASFERENCIA

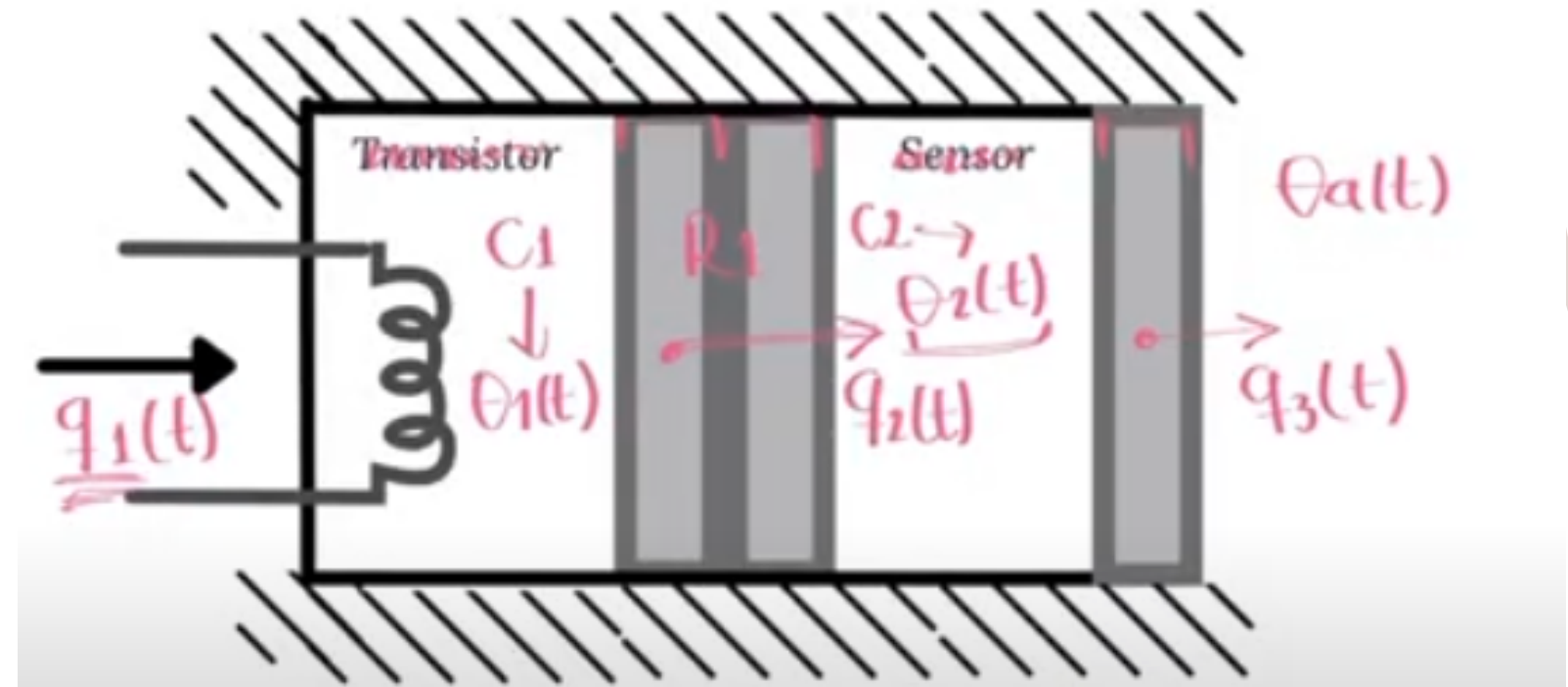
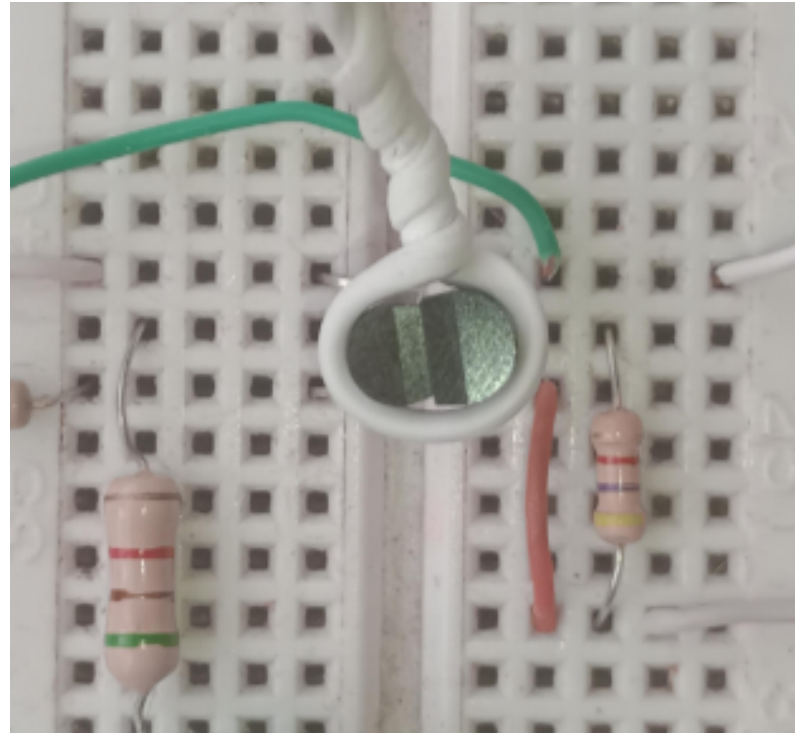


Fig 6. Esquema térmico

$$\frac{\theta_2(s)}{q_1(s)} = \frac{R_2}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s (R_2 C_2 + R_2 C_1 + R_1 C_1) + 1}$$

LINEALIDAD, ESTABILIDAD Y ORDEN

Se observa una función de transferencia lineal, dada su forma característica de una ecuación diferencial de segundo orden, se añade que no contiene términos no lineales como por ejemplo trigonométricas.

Por otro lado, por criterio de Routh, se llega a la conclusión de que R_1 , R_2 , C_1 y C_2 tienen que ser mayores a cero para que el sistema sea estable.

$$\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} > 0 \quad \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} > 0$$

PROCESO DE CALIBRACIÓN

Inicialmente se busco llegar al P.op mediante un trimmer en el circuito del transistor, esto con el objetivo de llegar a los parámetros ingresados en el código, una referencia de 28°C y que este fuera estable con un PWM de 20%. Se obtuvo que el tiempo de asentamiento de la planta fue de aproximadamente 6 minutos.

```
// Control System Variables  
float Ref = 28.0; // System Reference - Temperature [°C]  
float U_op = 20.0; // Direct Control Output - FOR OPENLOOP or FEEDFORWARD - Transistor Collector Current [mA]
```

DEFINICIÓN DE LA PLANTA

SEÑAL DE IDENTIFICACIÓN

Se diseñó una señal de identificación de cuatro pasos, con variaciones de $\pm 5\%$ y 10% , y una duración de diez minutos cada uno, con el fin de permitir el asentamiento de la temperatura y obtener una mejor aproximación de la función de transferencia de la planta.

tf1: 86.36

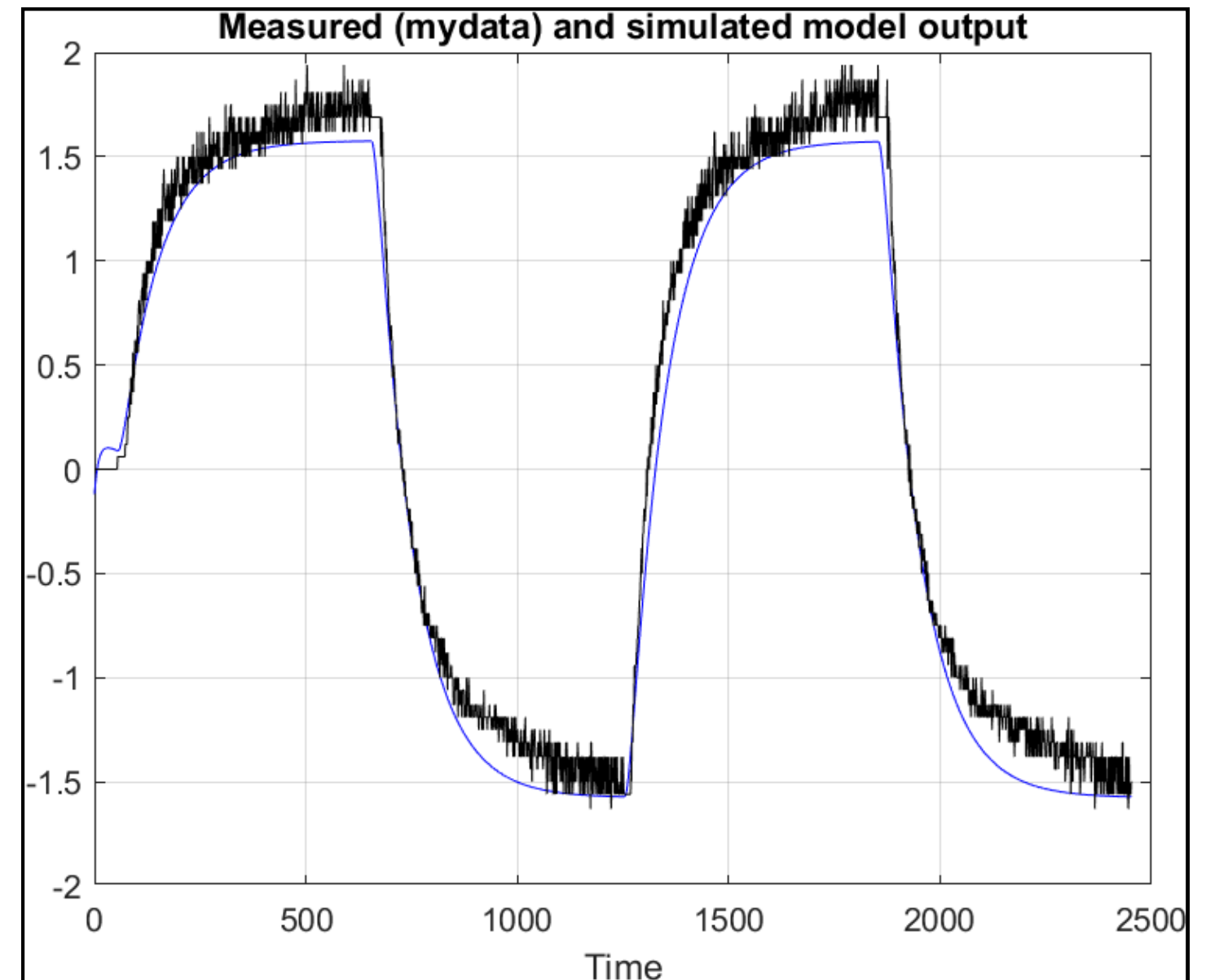


Fig 7. Señal de caracterización.

DEFINICIÓN DE LA PLANTA

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

$$G(s) = \frac{0.0003381}{s^2 + 0.1072s + 0.001066}$$

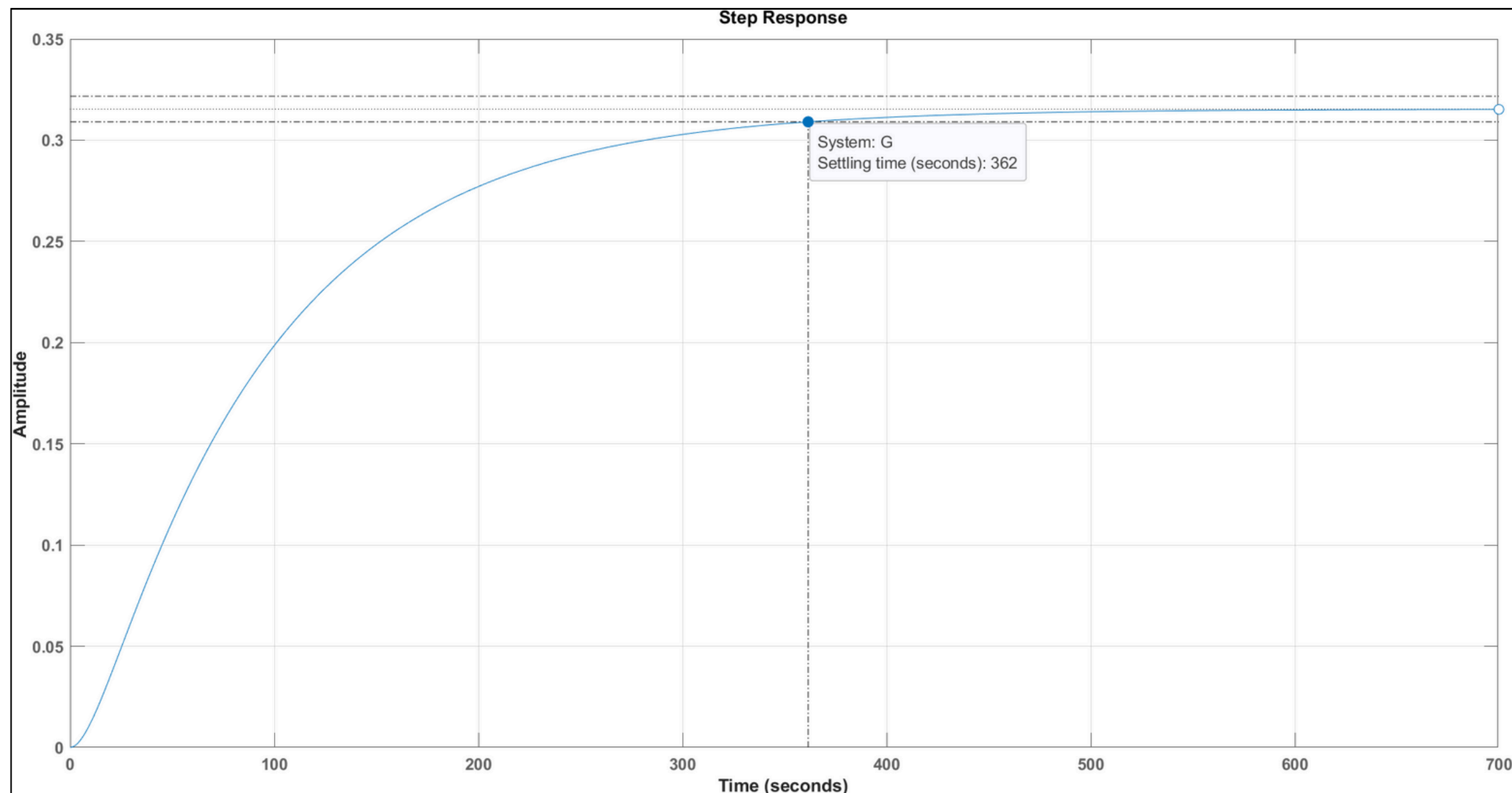


Fig 8. Respuesta al paso de la FT de la planta.

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Con el fin de lograr los planteamientos iniciales de sobrepico (M_p), tiempo de asentamiento (t_s), error de posición (e_r) idealmente de 0 y alto rechazo de perturbaciones; se decidió diseñar un controlador PI.

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

K_p constante y K_i variable

$$\left| \frac{0.0003381}{s(s^2 + 0.1072s + 0.001066 + 0.0003381K_p)} \right| = \left| \frac{-1}{K_i} \right|$$

K_i constante y K_p variable

$$\left| \frac{0.0003381s}{s^3 + 0.1072s^2 + 0.001066s + 0.0003381K_i} \right| = \left| \frac{-1}{K_p} \right|$$

DISEÑO DEL CONTROLADOR

ROOT LOCUS DE KP CONSTANTE Y KI VARIABLE

$$K_p = 10$$

$$-a = \frac{-4.5}{t_s} = -0.0075$$

$$M_p = 0.357 \rightarrow \zeta = 0.31155 \rightarrow \theta = 71.85$$

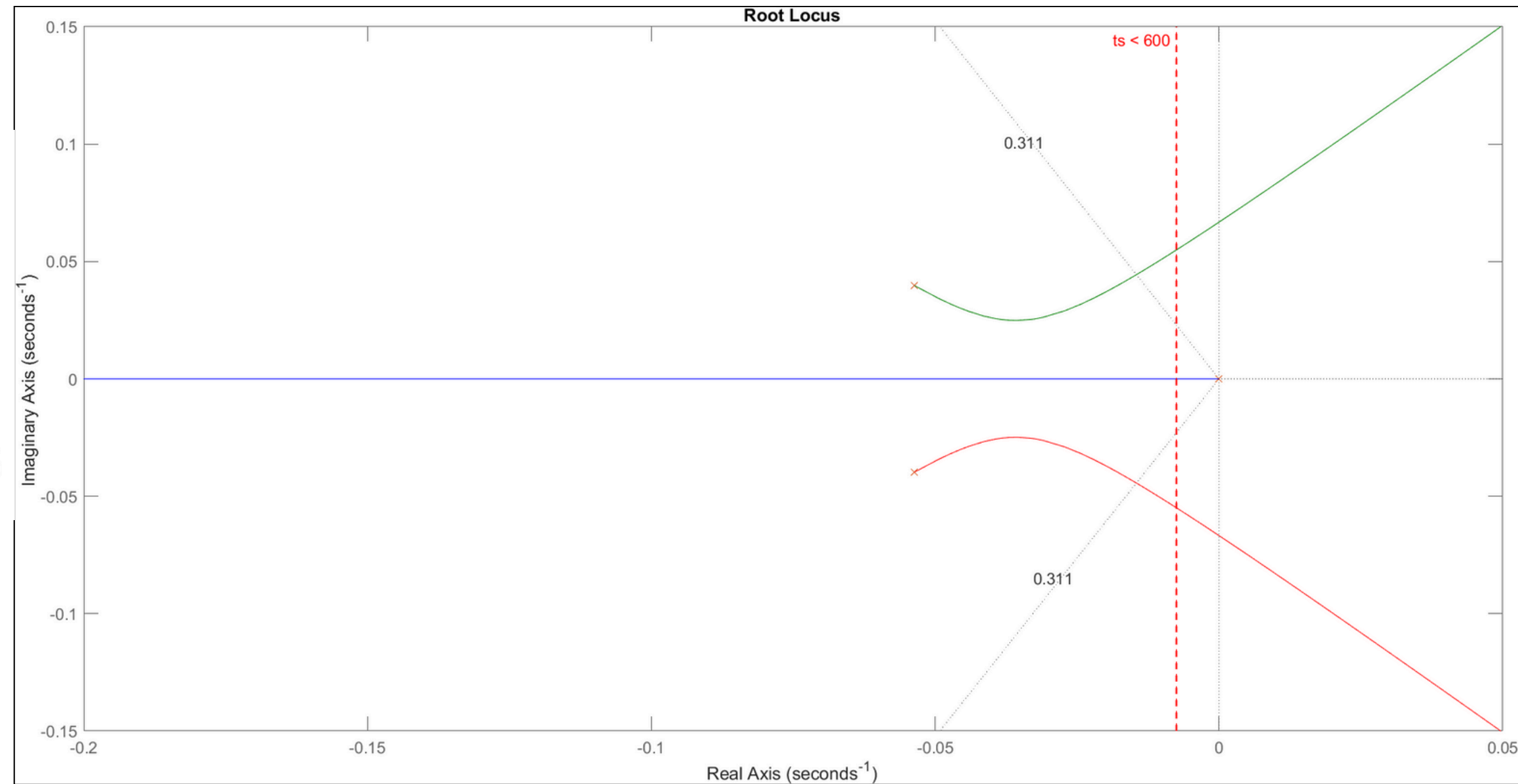
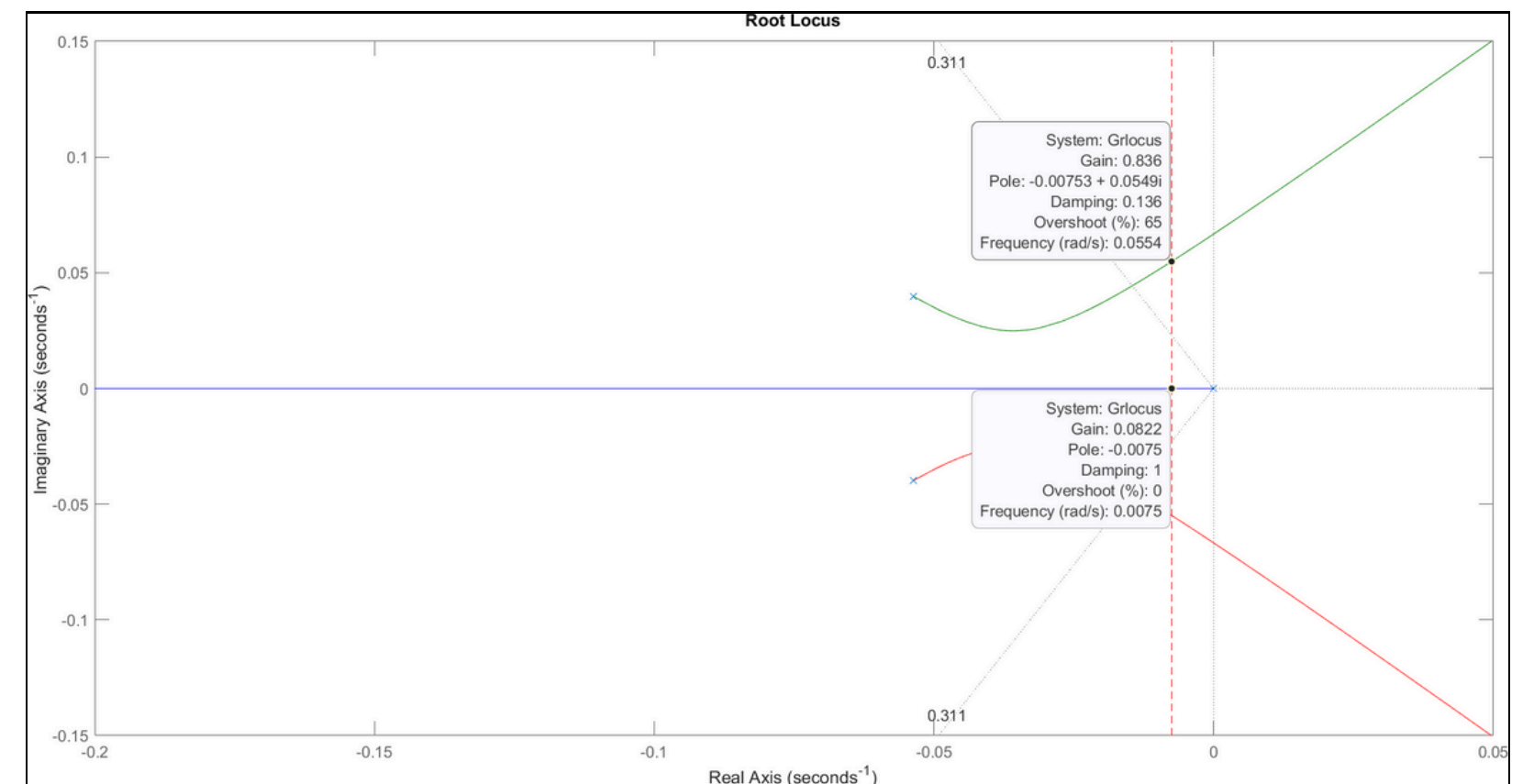
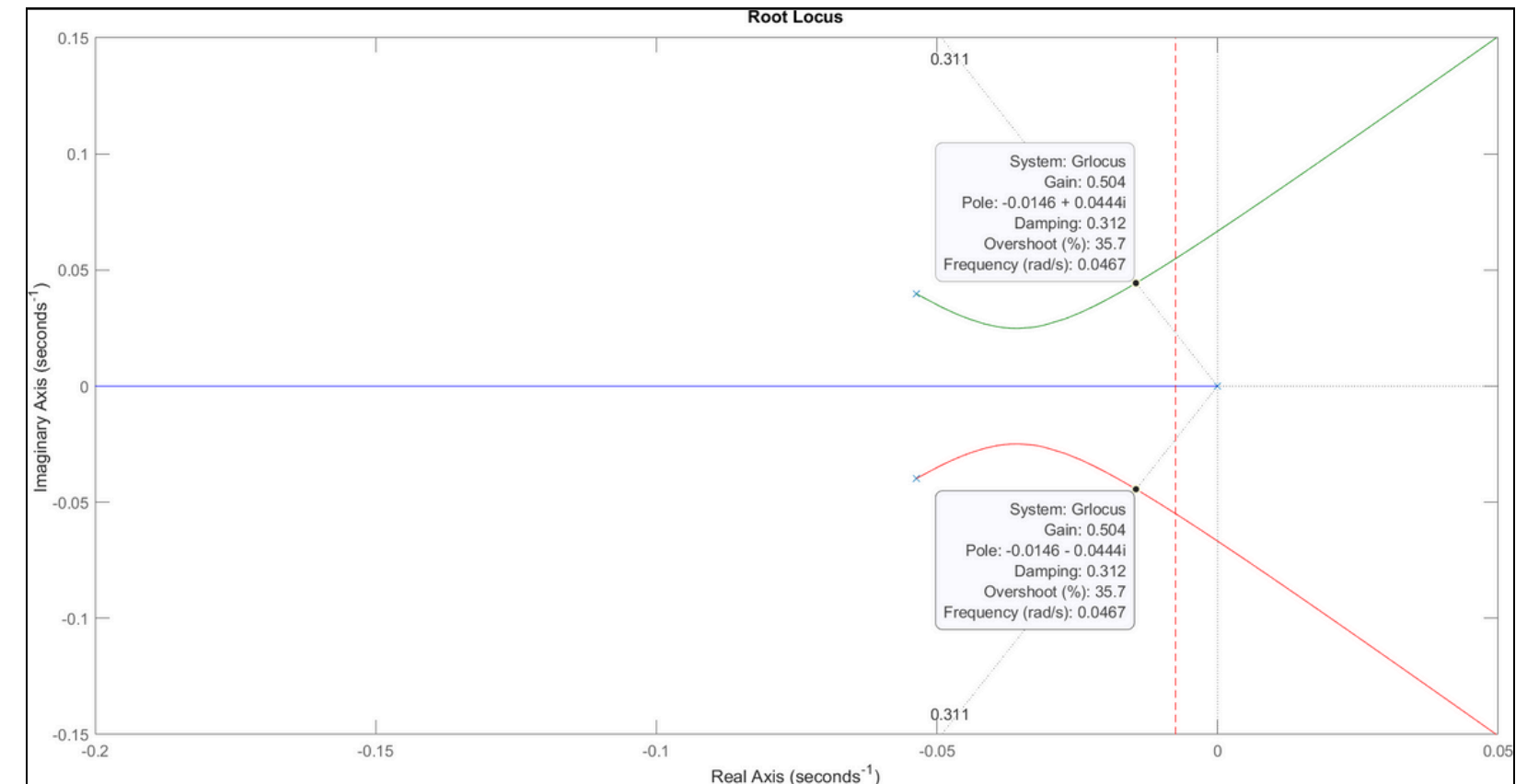


Fig 10. Diagrama de Root Locus.

DISEÑO DEL CONTROLADOR

LÍMITES DE LAS GANANCIAS DE KI

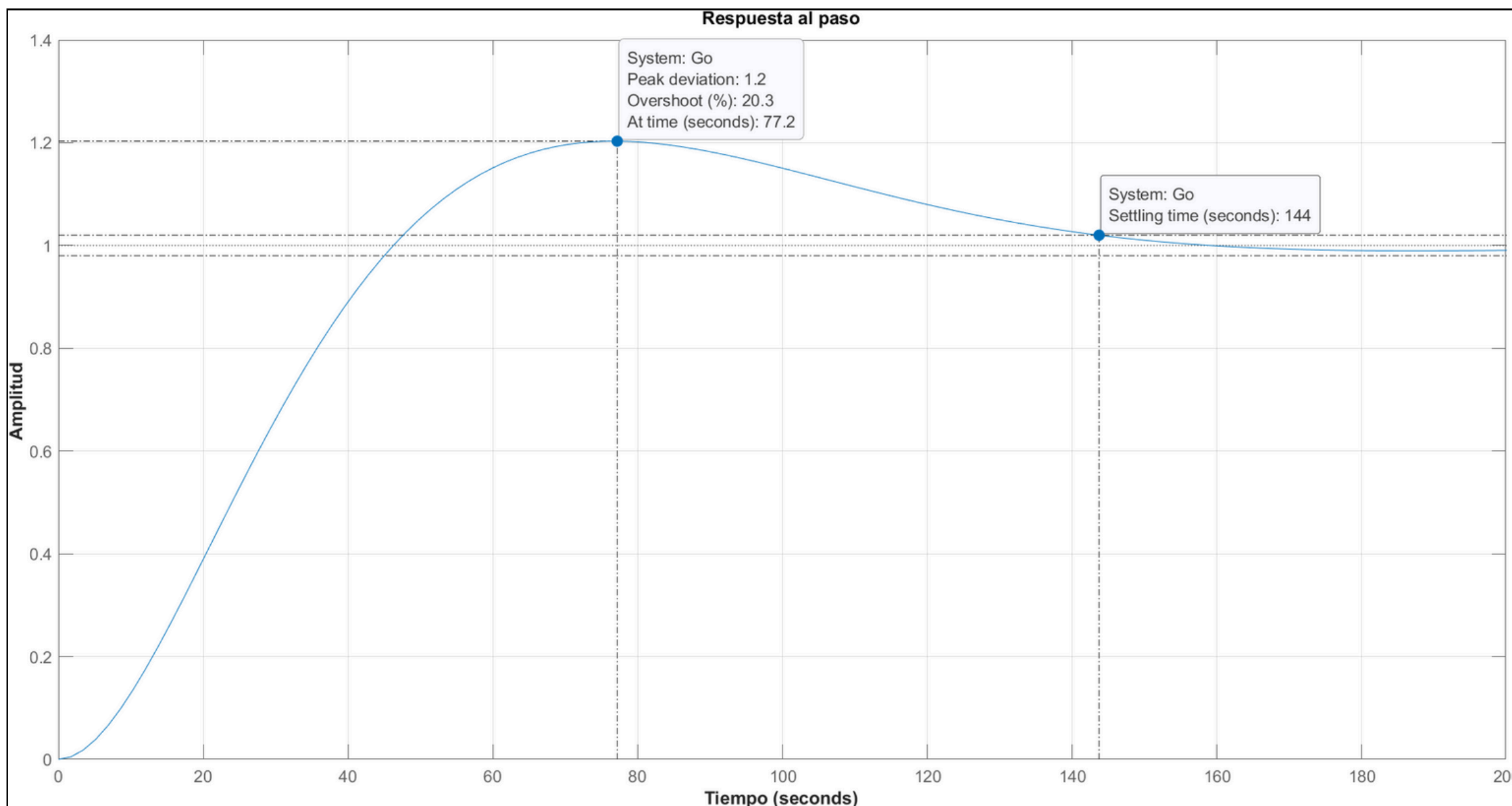
- Para estabilidad:
 $K_i > 0$
- Para $M_p < 35.7\%$:
 $0 < K_i < 0.504$
- Para $t_s < 10$ minutos:
 $0.0822 < k_i < 0.836$
- Intervalo final para K_i :
 $0.0822 < k_i < 0.504$



DISEÑO DEL CONTROLADOR

SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Finalmente, se escogió $K_i = 0.25$, teniendo en cuenta un punto medio del rango hallado anteriormente.



$$\text{Go} = \frac{0.003384 s + 8.46e-05}{s^3 + 0.1073 s^2 + 0.004457 s + 8.46e-05}$$

Observando la función de transferencia de lazo cerrado del sistema completo, se identifica que los coeficientes independientes del numerador y denominador son iguales, demostrando error de posición igual a 0.

Fig 11. Respuesta al paso implementando el controlador PI.

DISEÑO DEL CONTROLADOR

SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR

Al perturbar el sistema con la temperatura máxima y mínima (22°C - 30°C) se observa que la señal de control no excede los límites (-20% - 80%), concluyendo en que el sistema no se satura con las perturbaciones diseñadas.

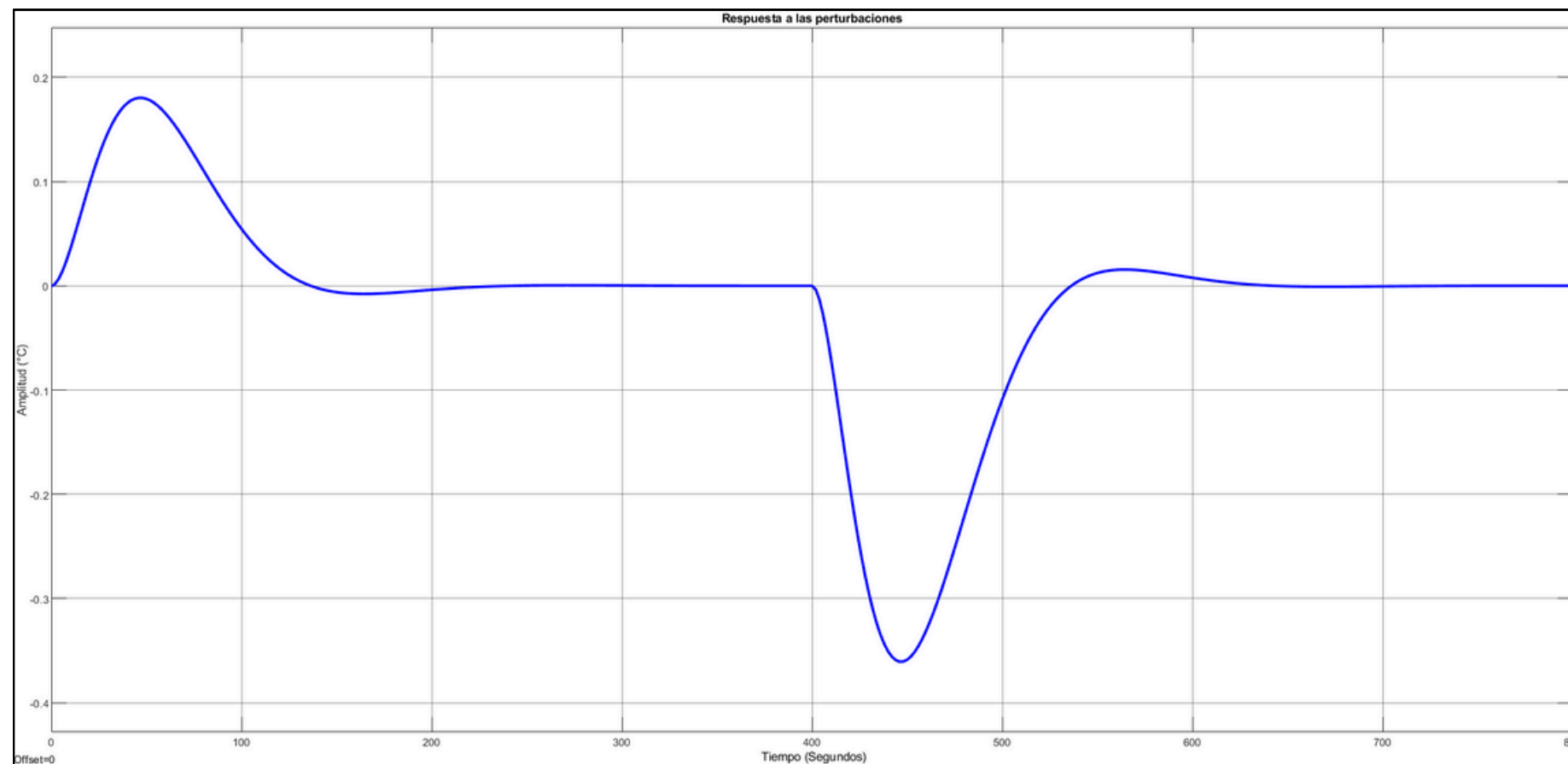


Fig 12. Respuesta del sistema ante perturbaciones (Temperatura vs tiempo).

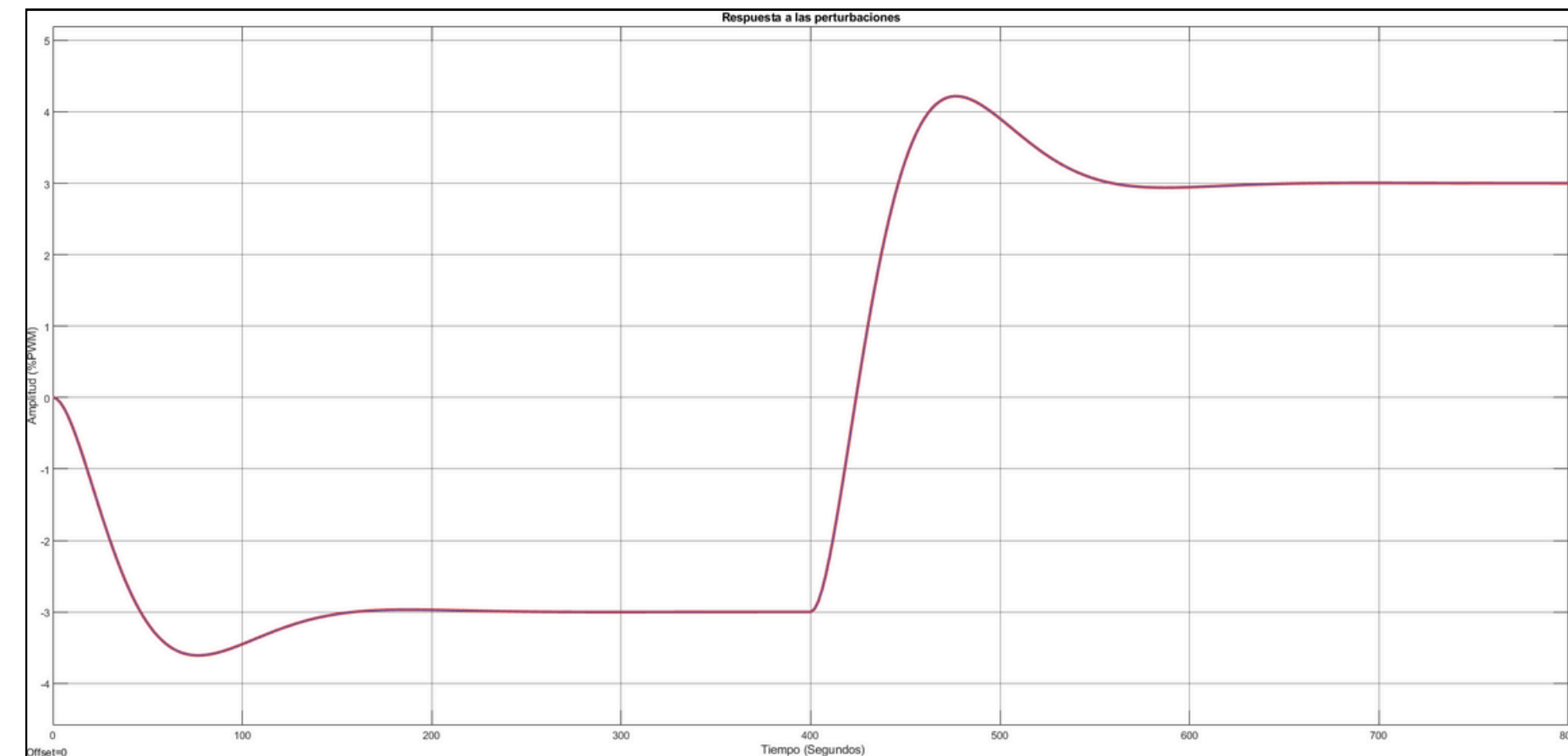


Fig 13. Respuesta del sistema ante perturbaciones (%PWM vs tiempo).

IMPLEMENTACIÓN

DISCRETIZACIÓN Y ECUACIONES DE DIFERENCIAS

Para discretizar el controlador se usó el método de Tustin, donde: $s = \frac{2}{T} \times \frac{z - 1}{z + 1}$

Reemplazando en: $\frac{U(z)}{E(z)} = k_p + \frac{k_i}{s}$

Se obtuvo:

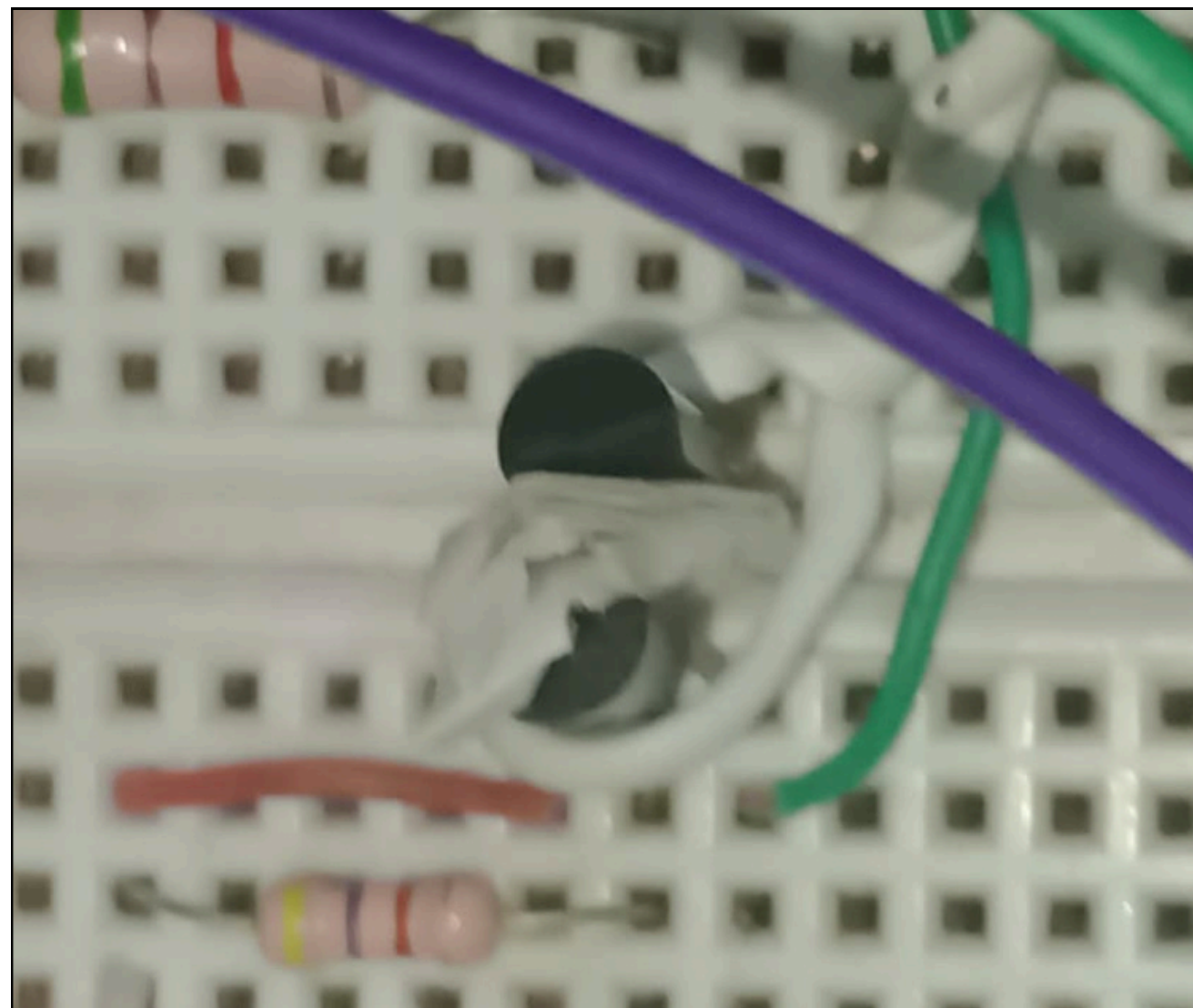
$$u(k) = \frac{1}{2} [2k_p \times e(k) - 2k_p \times e(k-1) + k_i \times T \times e(k) + k_i \times T \times e(k-1) + 2u(k-1)]$$

Finalmente, se define la variable Uc dentro del código, utilizando la ecuación previamente establecida. Además, de reemplazarse los valores de Kp=10 y Ki=0,25.

IMPLEMENTACIÓN

EXPERIMENTO DE ROBUSTEZ

Se incorporó una capa de papel entre el transistor y el sensor para modificar la resistencia térmica. Además, se encerró el circuito en una caja pequeña para alterar la capacitancia térmica y observar su efecto en la transferencia de calor entre el transistor y el sensor.



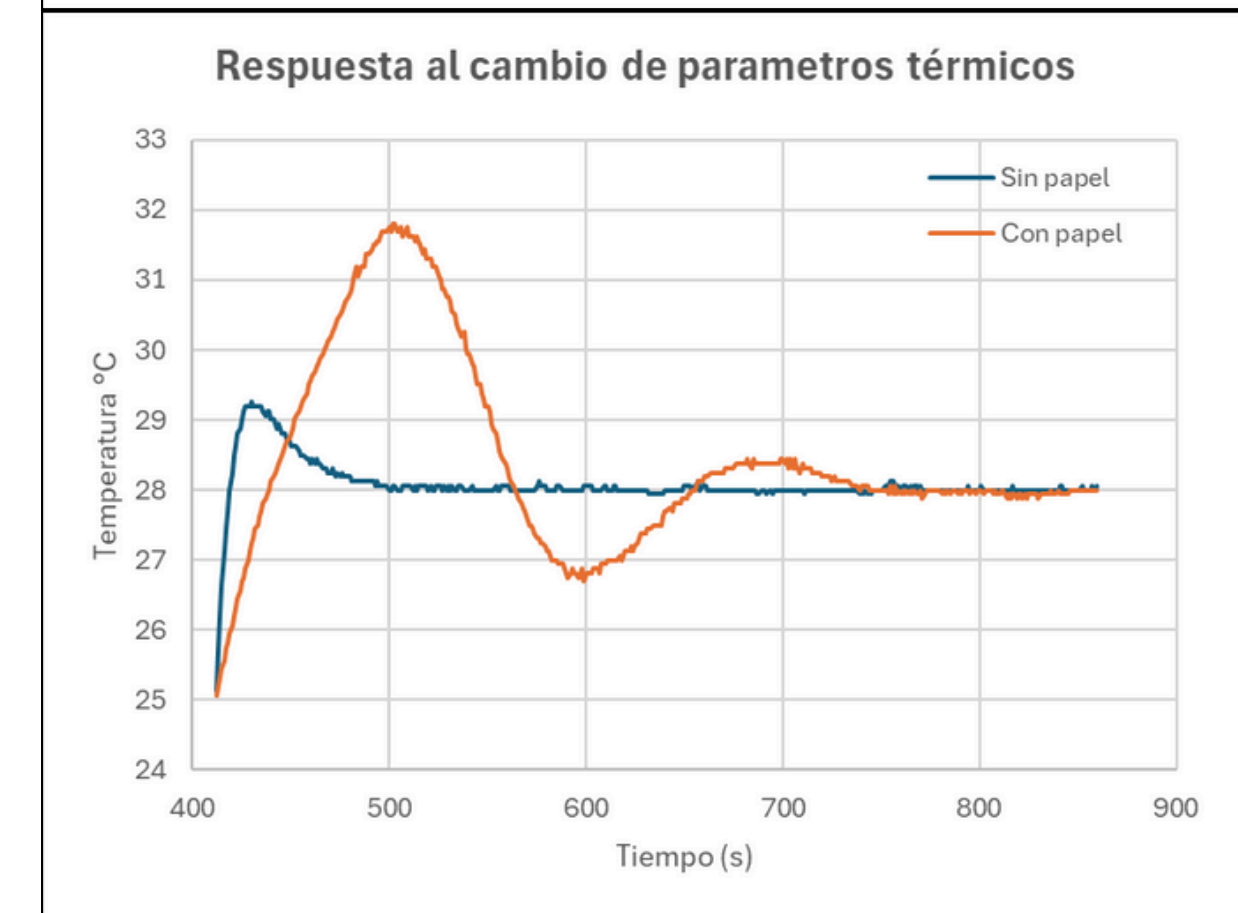
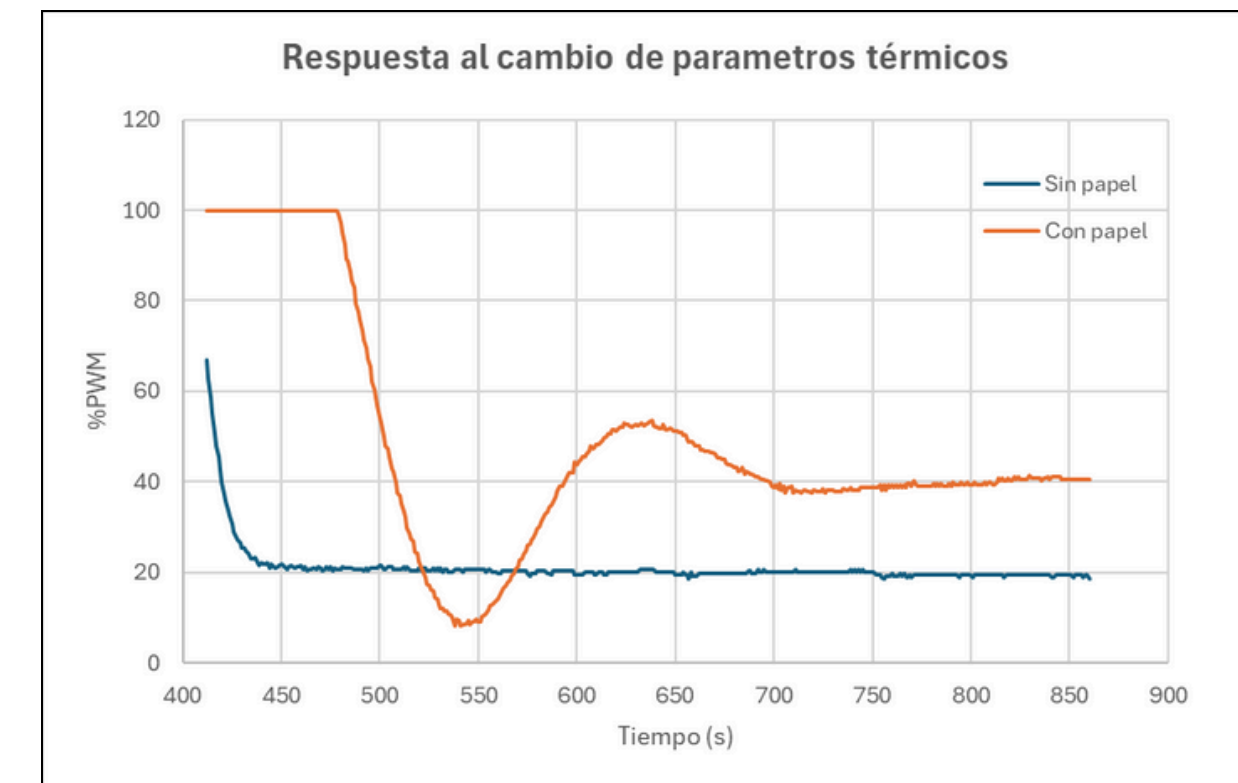
IMPLEMENTACIÓN

RESULTADOS DE ROBUSTEZ

Se observa que el sistema se comporta de manera diferente al modificar los parámetros térmicos del circuito. Los cambios más importantes fueron los siguientes:

SIN PAPEL	CON PAPEL
Sobrepico de 4.46%	Sobrepico de 13.1%
Sin saturación	Con saturación
Ts = 88 segundos	Ts = 315 segundos

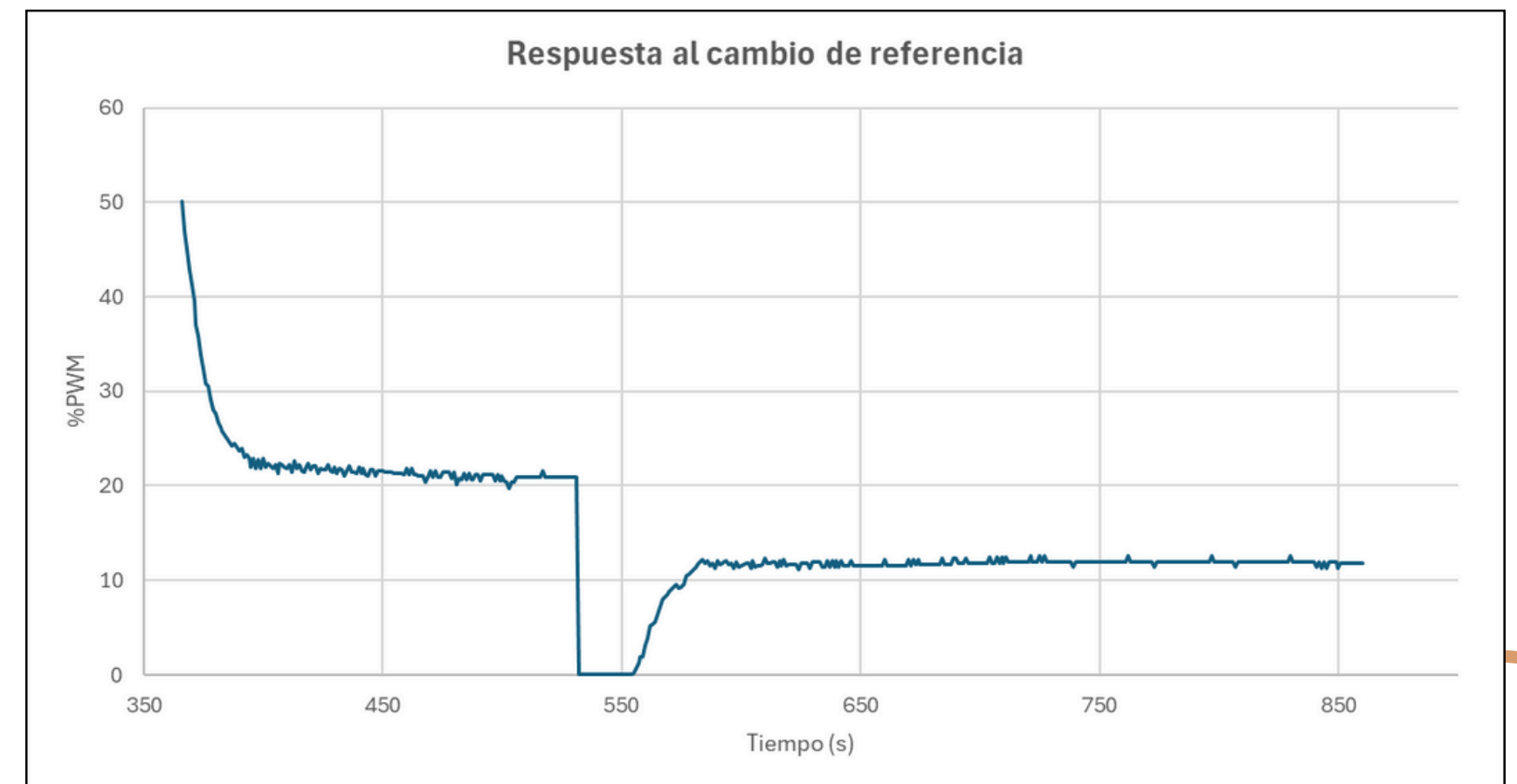
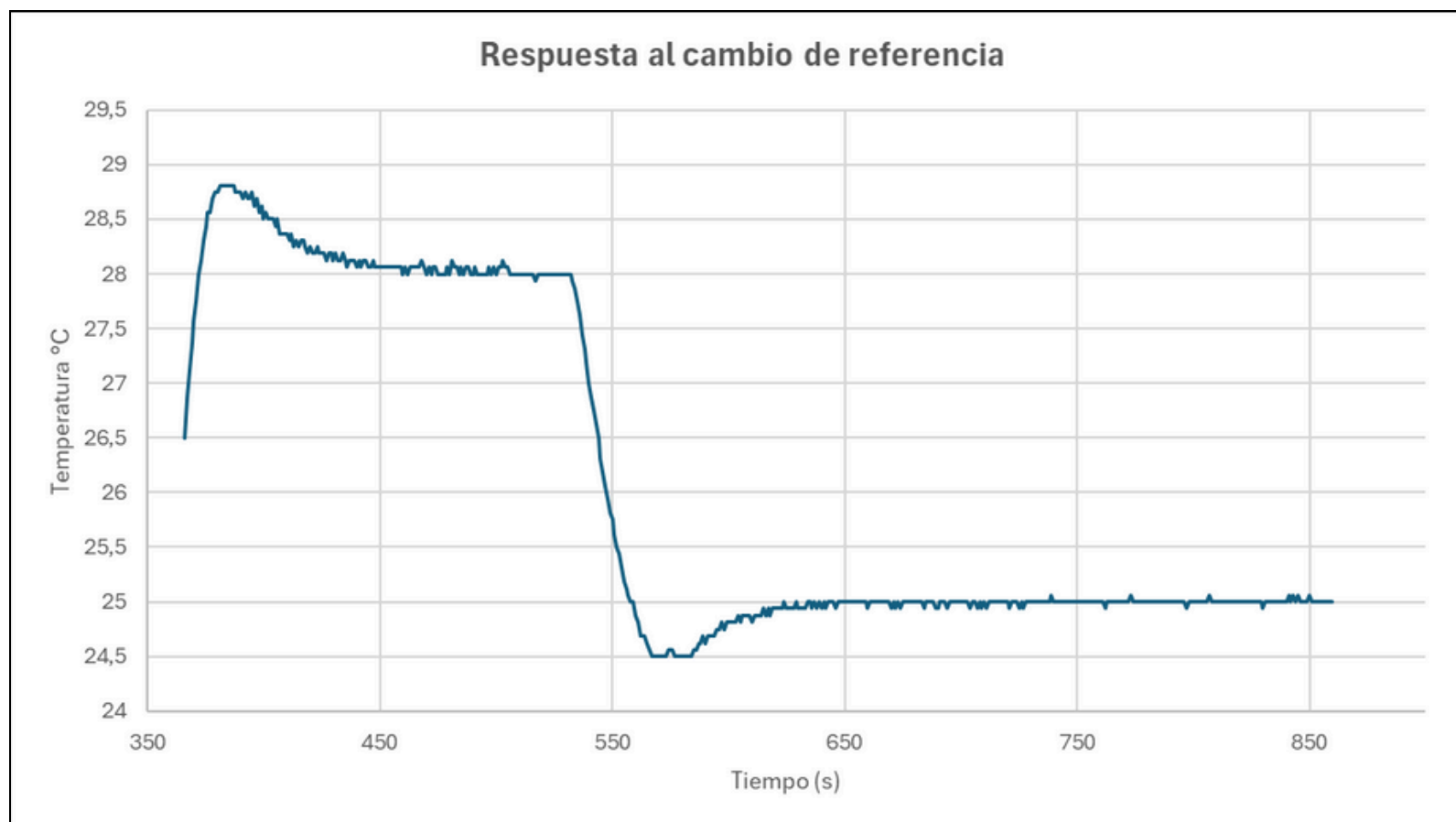
Se concluye que el sistema presenta baja robustez frente a variaciones en los parámetros térmicos de la planta, dado que su comportamiento cambia significativamente ante dichos cambios.



IMPLEMENTACIÓN

EXPERIMENTO DE CAMBIO DE REFERENCIA

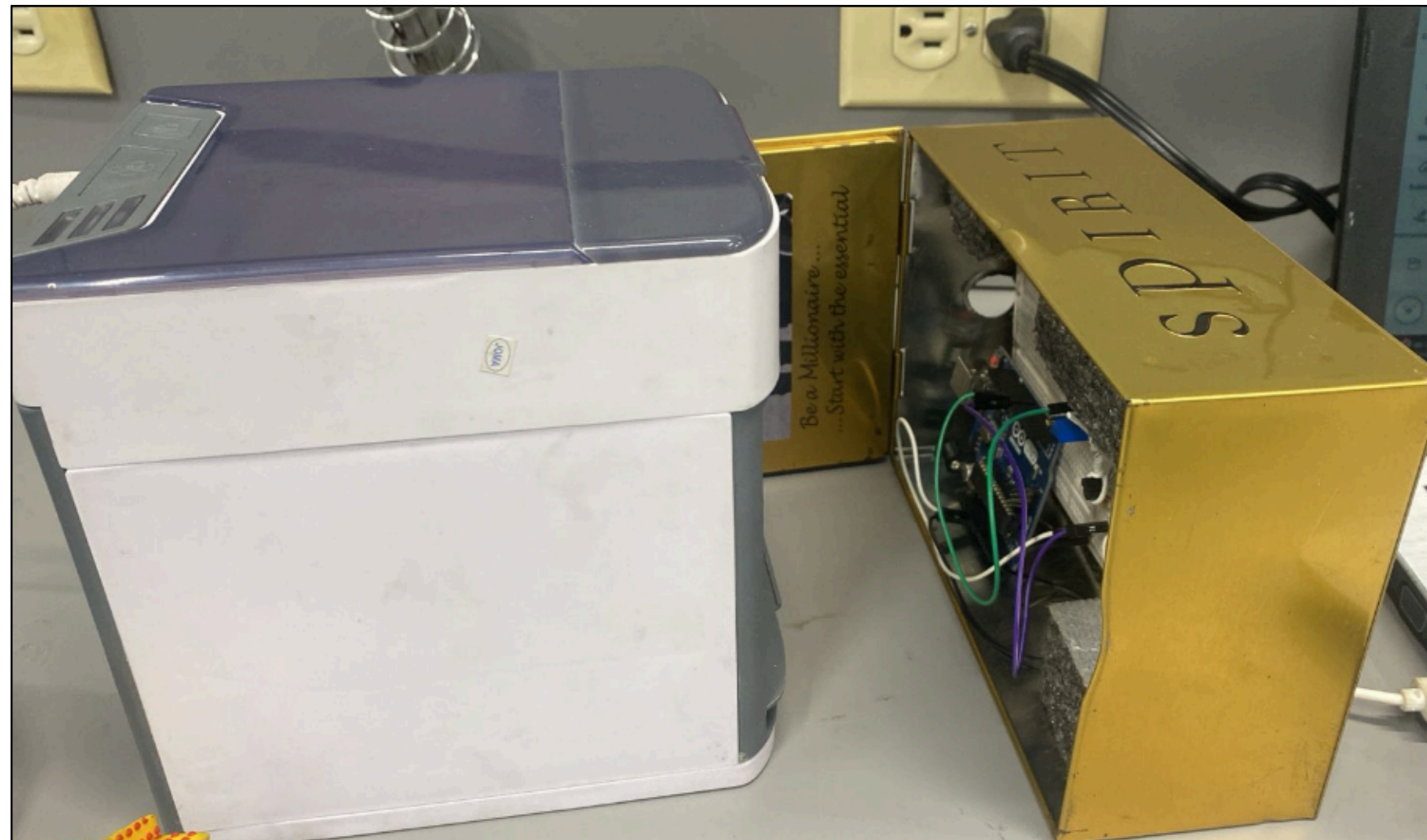
Para este caso, se cambió la referencia del sistema a 25 °C, con el fin de observar el comportamiento del controlador ante una modificación de los parámetros de calibración iniciales.



IMPLEMENTACIÓN

EXPERIMENTO DE DESEMPEÑO

Con ayuda de un ventilador que expulsaba aire a 17°C , se enfrió el sistema con el fin de evaluar la respuesta dinámica de la planta ante perturbaciones térmicas externas.



RESULTADOS

EXPERIMENTO DE DESEMPEÑO

Al introducir la perturbación se observaron dos momentos clave:

1. Al encender el ventilador, se observó una disminución en la temperatura registrada por el sensor. Simultáneamente, el valor del PWM aumentó hasta aproximadamente el 70%. En un tiempo cercano a los 110 segundos, el sistema logró esentar nuevamente en la referencia.
2. Al apagar el ventilador, la temperatura de la planta aumentó debido a la reducción del flujo de aire, y el PWM disminuyó a aproximadamente el 30%. De igual manera, el sistema se asentó en la referencia en aproximadamente 110 segundos.

Se puede concluir que el sistema presenta un alto desempeño, ya que, a pesar de los cambios significativos en la temperatura provocados por las perturbaciones, fue capaz de retornar a la referencia en un tiempo relativamente corto.



CONCLUSIONES

- La elección del punto de operación, junto con un PWM del 20%, juega un papel importante tanto en la caracterización como en el diseño del controlador y su posterior prueba. En nuestro caso específico, un PWM bajo permitió que el sistema respondiera a las perturbaciones sin llegar a saturarse.
- El uso de un tren de pulsos resultó ser un buen método para la caracterización de la planta, aunque requiere tiempo y varios intentos. La duración de cada paso, así como su amplitud, son fundamentales para obtener una buena función de transferencia.
- Para el diseño del control PI se utilizó el método de análisis Root Locus. Al incorporar los criterios de diseño, tanto en las simulaciones como en la práctica se obtuvieron los resultados esperados, aunque con algunas diferencias entre lo simulado y lo observado en la realidad.
- La implementación de herramientas como MATLAB y Simulink fue indispensable para los planteamientos matemáticos y la visualización del comportamiento esperado del sistema. Aunque no se logró replicar exactamente los resultados de la simulación, en la práctica se obtuvieron resultados incluso mejores de lo esperado.
- Las pruebas de desempeño y robustez evidenciaron un sistema con baja robustez, pero con buen desempeño. A pesar de esa baja robustez, el controlador logró mantener el sistema dentro de los parámetros establecidos inicialmente.

REFERENCIAS

- [1] BASTIDA CAÑADA, O. A. (2025, 24 ENERO). CLIMA, SUELO Y AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DEL MELÓN. BLOG AGRICULTURA. [HTTPS://BLOGAGRICULTURA.COM/CLIMA-SUELO-MELON/](https://blogagricultura.com/clima-suelo-melon/)
- [2] BASTIDA CAÑADA, O. A. (2025A, ENERO 14). CLIMA, SUELO Y AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE LA SOYA. BLOG AGRICULTURA. [HTTPS://BLOGAGRICULTURA.COM/CLIMA-SUELO-SOYA/](https://blogagricultura.com/clima-suelo-soya/)
- [3] MEIR, R. (2024, 16 OCTUBRE). ¿CUÁLES SON LAS CONDICIONES IDEALES PARA LOS TOMATES DE INVERNADERO? DRYG AIR GREENHOUSE DEHUMIDIFIERS. [HTTPS://DRYG AIR.COM/ES/BLOG-ES/CUALES-SON-LAS-CONDICIONES-IDEALES-PARA-LOS-TOMATES-DE-INVERNADERO/](https://drygair.com/es/blog-es/cuales-son-las-condiciones-ideales-para-los-tomates-de-invernadero/)
- [4] ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA APLICADA A LEVANTAMIENTO DE SUELOS | INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (S. F.). [HTTPS://WWW.IGAC.GOV.CO/TRANSPARENCIA-Y-ACCESO-A-LA-INFORMACION-PUBLICA/INFORMACION-DE-LA-ENTIDAD/LISTADO-MAESTRO-DE-DOCUMENTOS/ZONIFICACION-CLIMATICA-APLICADA-LEVANTAMIENTO-DE-SUELOS](https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/informacion-de-la-entidad/listado-maestro-de-documentos/zonificacion-climatica-aplicada-levantamiento-de-suelos)



GRACIAS!!!!