

Optimization of hot water consumption in a vacuum tube solar water heater pilot using PID control and IoT-based monitoring

Cristhian Legua¹ ; L. Enrique Ortiz-Vidal² ; Julio Cuisano³ 

^{1,2,3}Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú, cristhian.legua@pucp.edu.pe, leortiz@pucp.edu.pe, jcuisano@pucp.edu.pe

Abstract– *The transition towards energy sustainability demands the continuous optimization of water heating systems. In this context, vacuum tube solar water heaters stand out for their high thermal collection capacity. Traditionally, temperature regulation in these systems is delegated to the user, whose operational fluctuations lead to significant energy and water losses. The objective of this study is to optimize hot water consumption in a vacuum tube solar heater through the development of a PID control system aimed at reducing water tempering time and thermal fluctuations, coupled with IoT-based real-time monitoring. To this end, an experimental test bench was implemented, integrating sensors and mixing actuators for thermal system modeling and controller design. Its performance was contrasted against manual operation, evaluating the increase in the available volume of tempered water at the user's desired set-point. Preliminary results demonstrate a reduction in stabilization time of between 50% and 66.7% compared to manual control. This improvement translates into a larger available volume of tempered water at the comfort set-point (37 °C). The proposed integration demonstrates that control design is a determining factor in enhancing both water and energy efficiency.*

Keywords-- *solar thermal energy, IoT, PID control, energy efficiency, vacuum tubes*

Optimización del consumo de agua caliente en un piloto de terma solar de tubos al vacío usando control PID y monitoreo basado en IoT

Cristhian Legua¹ ; L. Enrique Ortiz-Vidal² ; Julio Cuisano³ 

^{1,2,3}Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú, crishthian.legua@pucp.edu.pe, leortiz@pucp.pe, jcuisano@pucp.edu.pe

Resumen– La transición hacia la sostenibilidad energética exige la optimización continua de los sistemas de calentamiento de agua. En este contexto, las termas solares de tubos al vacío destacan por su capacidad de captación. Tradicionalmente, la regulación de la temperatura en estos sistemas se delega al usuario, cuya fluctuación operativa genera pérdidas energéticas y de agua. El objetivo del presente estudio es optimizar el consumo de agua caliente generado en una terma de tubos al vacío mediante el desarrollo de un sistema de control PID para reducir el tiempo y fluctuaciones del atemperamiento de agua, con un monitoreo en tiempo real basado en IoT. Para ello, se implementó un banco de pruebas experimental integrando sensores y actuadores de mezcla para el modelado del sistema térmico y diseño del controlador, contrastando su desempeño frente a la operación manual y el incremento del volumen disponible de agua temperada al valor que el usuario desea (set-point). Los resultados preliminares demuestran una reducción del tiempo de estabilización entre un 50% y un 66.7% en comparación con el control manual. Lo anterior se traduce en un mayor volumen de agua temperada disponible al set-point de confort (37 °C). La integración propuesta demuestra que el diseño del control es determinante para mejorar la eficiencia hídrica y energética.

Palabras claves-- terma solar, IoT, control PID, eficiencia energética, tubos al vacío

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica es una solución plausible para el calentamiento de agua y almacenamiento de energía desde que se mejore el rendimiento de los colectores solares y la eficiencia en el consumo [1]. En el caso de colectores solares, los del tipo de tubos al vacío han emergido como equipos de alta eficiencia gracias a su configuración geométrica y al aislamiento por vacío, que minimiza las pérdidas por convección y conducción hacia el ambiente [2,3]. Estos equipos permiten alcanzar temperaturas significativamente superiores a los de placa plana, optimizando la captación de energía térmica. Para aprovechar de manera óptima su alta capacidad de generación térmica es necesaria una gestión adecuada de uso del agua almacenada incorporado un sistema de regulación automatizado [3].

Diversas investigaciones han propuesto la integración de Internet de las Cosas (IoT) para la gestión térmica. La mayoría de estas soluciones se centran en el monitoreo pasivo de la temperatura o emplean algoritmos de control alojados

enteramente en la nube (*Cloud Computing*) para el diagnóstico y análisis de rendimiento, como el propuesto recientemente por Alcántara et al. (2026) [4]. Sin embargo, estas arquitecturas presentan limitaciones críticas de latencia y dependencia de red; ante fallos de conectividad o congestión de datos, el tiempo de respuesta del sistema se ve comprometido, lo que en aplicaciones de atemperamiento de agua incrementa el riesgo de sobreimpulsos térmicos y posibles quemaduras para el usuario.

Se presenta el diseño y validación de un banco de pruebas mecatrónico que integra un control automático y monitoreo IoT para optimizar el consumo de agua caliente generada por una terma solar de tubos al vacío, donde intrínsecamente se valida la eficiencia térmica del colector solar según la normativa NTP 399.405 [5] y reduce el proceso de atemperamiento de agua caliente para maximiza el volumen útil disponible de agua caliente. Se usa una arquitectura de procesamiento local (*Edge Computing*) que delega la ejecución del algoritmo PID directamente a microcontroladores locales (Raspberry Pi y ESP32) para garantizar un lazo de control cerrado autónomo y de alta velocidad, relegando la conectividad WiFi exclusivamente a tareas de telemetría y eliminando así los riesgos de latencia en la actuación crítica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se presenta el aparato experimental de colector solar de tubos al vacío con tanque acoplado de 120 L usado en la investigación y la arquitectura de hardware y de control diseñada siguiendo los lineamientos de la metodología VDI 2221 [6].

A. Aparato experimental

La Fig. 1 presenta el aparato experimental utilizado. Consta de un colector solar de tubos al vacío SUNTASK ST12-180, inclinado 12° conforme a la latitud de Lima, para maximizar la captación solar anual. Se estructura en dos módulos funcionales. Por un lado, un módulo de medición de eficiencia térmica (zona resaltada en amarillo) donde se realiza la adquisición de datos de radiación y de energía útil del colector para la validación de la norma NTP 399.405. Por otro lado, un módulo de optimización de consumo (zona resaltada en verde) donde se implementa el lazo de control PID para la

mezcla de agua fría y agua caliente mediante electroválvulas, para maximizar el volumen útil. El sistema genera agua caliente mediante el aprovechamiento de la radiación incidente sobre el fluido de red de agua potable que circula a través del colector durante el día.

La instrumentación del aparato experimental integra sensores y actuadores de respuesta lineal. Para la medición de temperatura se utilizan sensores de RTD PT1000 con acondicionamiento MAX31865, garantizando una resolución de 0.03 °C. El monitoreo del flujo volumétrico se realiza mediante sensores de efecto Hall YF-B7 y su control por medio de una válvula proporcional (A20-M15-B2-C) para la línea de agua fría y una válvula on-off (CWX-15N) para la línea de agua caliente. Una placa de desarrollo Raspberry Pi 5 (controlador primario) ejecuta el lazo de control PID que se comunica con un ESP32 (controlador secundario) mediante una interfaz cableada UART. El ESP32 actúa como nodo de adquisición y ejecución de comandos de actuación. Finalmente, la Raspberry Pi actúa como *gateway* IoT, enviando los datos a la nube a través del protocolo MQTT vía WiFi. Esta configuración asegura la integridad del lazo de control frente a interferencias de red y la repetibilidad de los ensayos [4]. La Tabla 1 presenta la instrumentación del aparato experimental.

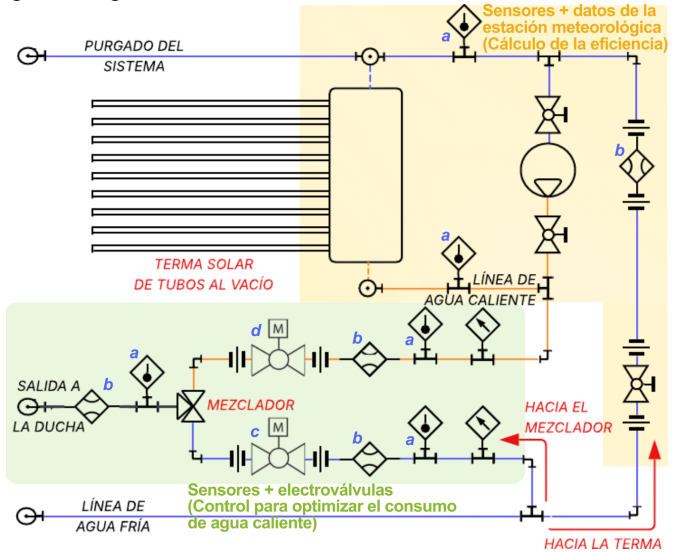


Fig. 1 Esquema hidráulico y las secciones del banco de pruebas

TABLA 1
INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Componente	Tipo	Función técnica	Señal
Sensor de temperatura (a, Fig. 1)	RTD PT1000	Medición de la temperatura del flujo de agua (Entrada de la terma/Salida de la terma/Línea de agua fría/Línea de agua caliente/Línea de mezcla)	Analógica (vía MAX31865)
Sensor de flujo volumétrico (b, Fig. 2)	YF-B7	Monitoreo de flujo (Línea de agua fría/Línea de agua caliente/Línea de mezcla)	Digital (Frecuencia)
Válvula proporcional (c, Fig. 1)	A20-M15-B2-C	Regulación controlada de flujo de agua fría	Analógica (0-5 VDC)
Válvula on-off (d, Fig. 1)	CWX-15N	Apertura y cierre del flujo de agua caliente	Digital vía Driver L298N
Parada de emergencia	Pulsador	Interrupción física de seguridad	Digital (Pull-up)
Pantalla de control	Pantalla LCD 7"	Visualización detallada de telemetría	Comunicación UART con la Raspberry Pi 5
Indicadores visuales	LEDs	Estado del sistema y alarmas	Digital (Comunicación I2C) usando el módulo PCF8574
Controlador Primario	Raspberry Pi 5	Procesamiento PID y gestión IoT	UART / WiFi
Controlador Secundario	ESP32	Adquisición de datos y ejecución de comandos	UART / PWM / I2C

B. Arquitectura de hardware y control

La Fig. 2 presenta la arquitectura de control del sistema dividido en controlador primario y controlador secundario. El control primario se opera con una *Raspberry Pi 5*. Constituye el núcleo inteligente del sistema. Ejecuta el algoritmo de control PID a una frecuencia de muestreo constante, procesando el error de temperatura, definido como la diferencia entre el valor de referencia deseado por el usuario (*set-point*) y la temperatura real de la mezcla, para calcular la acción de control necesaria. Además, gestiona de forma paralela la supervisión del sistema, el almacenamiento en bases de datos y la comunicación IoT vía WiFi mediante el protocolo MQTT, actuando como puente (*gateway*) hacia la nube para el monitoreo remoto. El control secundario se opera con una *ESP32*. Funciona como un nodo periférico de adquisición y ejecución (I/O distribuido). Su rol es doble. Primero, digitaliza las señales provenientes de los sensores (PT1000 y YF-B7) para enviarlas al nivel del controlador primario. Segundo, recibe las instrucciones de actuación vía UART y las traduce en señales eléctricas (PWM o niveles lógicos) para comandar la válvula proporcional y la válvula on-off. Esta división de tareas descarga al procesador principal del controlador primario de las interrupciones de *hardware*, permitiendo un control más estable.

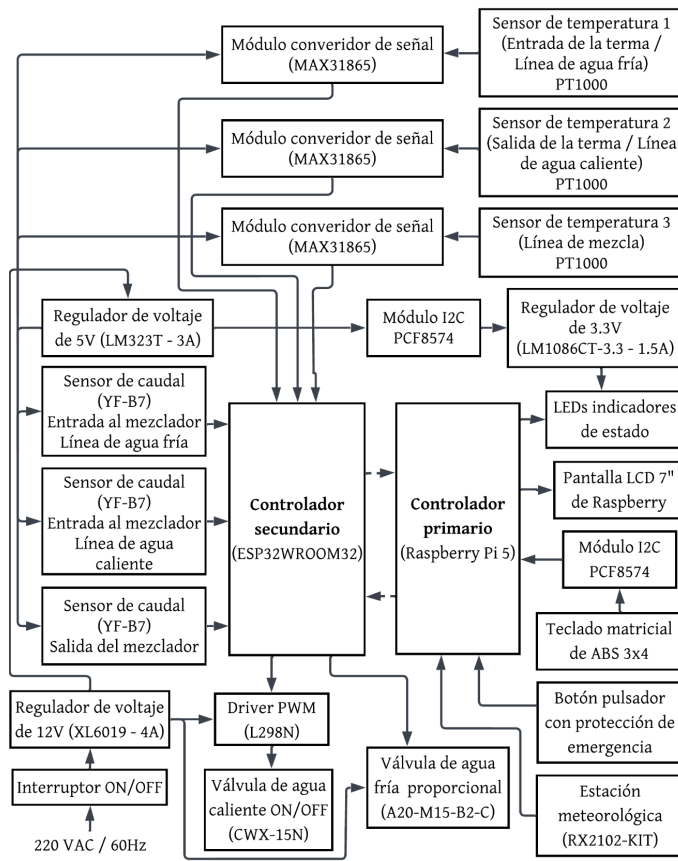


Fig. 2 Diagrama de bloques electrónicos del sistema de control implementado.

III. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL PID

El modelo matemático del sistema de control PID está compuesto por tres subsistemas fundamentales: la planta de mezcla térmica (mezclador), la instrumentación de medida (sensado) y el elemento final de control (actuador). La dinámica de cada componente se aproxima mediante Funciones de Transferencia $G(s)$ lineales e invariantes en el tiempo [7], obtenidas a partir de pruebas de respuesta al escalón en lazo abierto.

A. Modelado y caracterización de la planta: Proceso de mezcla

1) *Modelado estacionario (Balance energético)*: El comportamiento en estado estacionario de la temperatura de mezcla se describe mediante la ley de conservación de la energía. Asumiendo un sistema adiabático, el balance térmico se expresa como [2]:

$$\dot{m}_{out} \cdot T_{out} = \dot{m}_{hot} \cdot T_{hot} + \dot{m}_{cold} \cdot T_{cold} \quad (1)$$

donde:

$\dot{m}$: es el flujo másico del fluido ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) y
 T : es la temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$).

Los subíndices *out*, *hot*, *cold* indican salida de la mezcla, entrada caliente y entrada fría, respectivamente. La ecuación (1) permite determinar la ganancia estacionaria del proceso (K_p), que mide la sensibilidad del cambio de temperatura de salida ante variaciones en la proporción de flujo de entrada.

2) *Caracterización dinámica ($G_p(s)$)*: Debido a la inercia térmica del fluido y al tiempo que este tarda en recorrer la tubería desde el mezclador hasta el sensor de temperatura, el sistema presenta un comportamiento dinámico con retardo. Este se modela mediante una función de transferencia de Primer Orden con Retardo de Transporte (FOPDT, de sus siglas en inglés *First Order Plus Dead Time*) [7]:

$$G_p(s) = \frac{T_{out}(s)}{Q(s)} = \frac{K_p \cdot e^{-Ls}}{\tau_p s + 1} \quad (2)$$

donde:

K_p : es la ganancia en estado estacionario del proceso ($^{\circ}\text{C}/\%$ apertura),

L : es el retardo de transporte (s), derivado de la longitud de la tubería y la velocidad del flujo, y

τ_p : es la constante de tiempo de la planta (s), que representa la inercia térmica.

Los parámetros K_p y τ_p representan la sensibilidad térmica del sistema, es decir, cuántos grados centígrados aumenta la temperatura de mezcla por cada punto porcentual de apertura de la válvula en el punto de operación analizado y el tiempo necesario para que la variable temperatura alcance el 63.2% del cambio total esperado, respectivamente. Para determinar los parámetros dinámicos de la planta, se realizó una prueba experimental de respuesta al escalón en lazo abierto, siguiendo el método de curva de reacción de Ziegler-Nichols [8]. Esta técnica permite aproximar el comportamiento térmico del fluido mediante un modelo de primer orden con tiempo muerto, identificando la velocidad de reacción y la inercia del sistema ante cambios súbitos en el actuador. La prueba inicia con un punto de operación base con una señal de control $U_1 = 20\%$, que representa el porcentaje de apertura inicial de la válvula proporcional de agua fría. Este valor asegura un flujo mínimo constante que evita el estancamiento térmico y permite una transición lineal dentro del rango de operación segura de la válvula, evitando las zonas de saturación en los extremos de 0% y 100%. Partiendo de una temperatura de estabilización de $T_1 = 25^{\circ}\text{C}$, se aplicó un escalón del $\Delta U = 30\%$, llevando la apertura a un valor final de $U_2 = 50\%$. La temperatura final de estabilización alcanzó los $T_2 = 64.6^{\circ}\text{C}$. De acuerdo con el registro de datos, $\tau_p = 14.0$ s es el tiempo de proceso para alcanzar el 63.2% del cambio total esperado, es decir 50.1°C . En el caso de la ganancia estacionaria K_p se determinó usando:

$$K_p = \frac{\Delta T}{\Delta U} = \frac{64.6^{\circ}\text{C} - 25.1^{\circ}\text{C}}{50\% - 20\%} = 1.316^{\circ}\text{C}/\% \quad (3)$$

Asimismo, del análisis de resultados experimentales se observó que la reacción reveló un retardo de transporte (L) mínimo de 1.0 s. Sustituyendo los valores obtenidos de experimentos, la función de transferencia de la planta resultante es:

$$G_p(s) = \frac{1.316 \cdot e^{-s}}{14s+1} \quad (4)$$

B. Modelado y caracterización del sensado: Proceso de retroalimentación

1) *Modelado estacionario (Linealización del sensor):* El comportamiento resistivo del sensor de temperatura RTD PT1000 en el rango de trabajo del sistema propuesto (0 °C - 100 °C) se rige por la Ecuación de Callendar-Van Dusen [9]:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (5)$$

donde:

R_T : es la resistencia a la temperatura T ,

R_0 : es la resistencia a 0 °C (Para un PT1000, es 1000 Ω),

T : es la temperatura en °C, y

Los coeficientes estándar DIN/IEC 60751 son [9]:

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Para sistemas de control de agua donde no se superan los 100 °C, el término cuadrático ($B T^2$) es despreciable según los lineamientos de la norma IEC 60751 [9]. Esto permite aplicar una aproximación lineal para reducir la carga computacional en el controlador embebido ESP32. Para esta simplificación, se adopta el coeficiente de temperatura estándar del platino $A = \alpha$, el cual representa la pendiente media de la resistencia entre 0 °C y 100 °C [9]:

$$T = \frac{R_t - 1000}{1000 \cdot \alpha} \quad (6)$$

donde

α = es el coeficiente de temperatura estándar para el platino según DIN/IEC 60751. Se usa un valor igual a 0.00385 °C⁻¹ [9].

2) *Caracterización dinámica ($G_s(s)$):* El sensor no responde instantáneamente a los cambios de temperatura debido a la masa térmica de su encapsulado protector. Para el análisis de control, esta dinámica se modela como un sistema de primer orden cuya ecuación de la función de transferencia se define como:

$$G_s(s) = \frac{T_{med}(s)}{T_{real}(s)} = \frac{K_s}{\tau_s s + 1} \quad (7)$$

donde:

K_s = es la ganancia en estado estacionario del sensor (Ω °C) y

τ_s = es la constante de tiempo térmica del sensor.

Cabe destacar que el modelo dinámico de retroalimentación $G_s(s)$ corresponde exclusivamente al instrumento ubicado a la salida del mezclador (ver Fig. 1). Los sensores dispuestos en las líneas de suministro (T_{hot} , T_{cold}) actúan como instrumentación de frontera, es decir, registran las perturbaciones térmicas y proveen los datos requeridos para el balance energético estacionario expresado en (1), pero no intervienen en el cálculo de la señal de error instantánea del lazo de control PID principal.

La constante de tiempo térmica (τ_s) del sensor RTD PT1000 se determina con un ensayo de respuesta al escalón térmico. El instrumento, previamente estabilizado a una temperatura base de equilibrio del agua en ambiente de 24.8 °C, se expuso a un salto abrupto sumergiéndolo en agua caliente a 64.6 °C. Analizando la curva de reacción transitoria mediante la adquisición de datos del ESP32, se determinó $\tau_s = 0.37$ s como el tiempo necesario para que la variable medida alcance el 63.2% del diferencial térmico total. Asumiendo una ganancia estática unitaria ($k_s \approx 1$) producto del acondicionamiento y linealización previos de la señal donde el algoritmo compensa la conversión resistiva para que la variable medida sea equivalente al *set-point*, es decir que 1 °C real equivalga exactamente a 1 °C medido [10]. La función de transferencia del instrumento de medición queda en:

$$G_s(s) = \frac{1}{0.37s+1} \quad (8)$$

Los resultados experimentales demuestran que la dinámica del sensor ($\tau_s = 0.37$ s) es significativamente más rápida que la inercia térmica estimada para la planta de mezclado ($\tau_p = 14$ s). Al cumplirse la condición ($\tau_s \ll \tau_p$), el retardo introducido por el instrumento resulta matemáticamente despreciable respecto al proceso principal, justificando su exclusión como una dinámica limitante en el diseño del lazo cerrado. En el contexto del banco de pruebas, aunque el calentamiento del agua en los colectores de tubos al vacío es un proceso termodinámico gradual, la acción de las válvulas durante la mezcla activa genera transitorios de flujo que requieren una lectura inmediata. Esta respuesta casi instantánea del PT1000 es crítica para el desempeño del sistema, garantizando que el algoritmo de control PID reciba información del estado térmico real de la mezcla sin introducir retrasos de fase que desestabilicen al actuador. En consecuencia, la selección del PT1000 permite que el sistema rechace rápidamente las perturbaciones de temperatura de entrada, previniendo sobreimpulsos por enviar agua excesivamente caliente a la línea de consumo.

C. Modelado y caracterización del actuador: Proceso de actuación

El elemento final de control está constituido por una red de válvulas coordinadas. La línea de agua caliente proveniente del colector solar es gobernada por una válvula motorizada en configuración discreta on-off (CWX-15N), permitiendo un flujo base continuo a alta temperatura. Por consiguiente, la

acción de control se ejerce exclusivamente sobre la línea de agua fría mediante una válvula proporcional (A20-M15-B2-C), modulando la inyección de fluido a temperatura ambiente para atemperar la mezcla hasta el *set-point* establecido.

1) *Modelado estático (Ecuación de transducción de tensión-caudal)*: La ganancia estática del actuador (K_a) se define mediante la pendiente de la curva característica de la válvula en su zona lineal de operación. Para el rango de control de 0 a 3.3 voltios del ESP32, la relación se expresa como:

$$Q = K_a \cdot V_{ctrl} + b \quad (9)$$

donde:

Q : es el caudal de salida regulado ($L \cdot \min^{-1}$),

K_a : es la ganancia en estado estacionario de la válvula ($L \cdot \min^{-1} \cdot V^{-1}$),

V_{ctrl} : es el voltaje de control aplicado (V) y

b : es el caudal mínimo o el umbral de apertura de la válvula proporcional.

2) *Caracterización dinámica ($G_a(s)$)*: El comportamiento dinámico del actuador, que representa el tiempo necesario para que el vástago alcance la posición solicitada, se aproxima mediante una función de transferencia de primer orden:

$$G_a(s) = \frac{Q(s)}{V_{ctrl}(s)} = \frac{K_a}{\tau_a s + 1} \quad (10)$$

donde:

K_a : es la ganancia en estado estacionario del actuador y

τ_a : es la constante de tiempo electromecánica del actuador

Este modelo asume que la dinámica de la válvula proporcional es significativamente más rápida que la constante de tiempo térmica de la planta ($\tau_a \ll \tau_p$). Este supuesto es válido debido a la separación natural de las escalas de tiempo entre los dominios físicos involucrados: la actuación es un proceso electromecánico rápido dictado por un motor DC, mientras que la planta obedece a un proceso termodinámico de transferencia de calor, el cual posee una inercia significativamente mayor.

Mediante pruebas cronometradas de actuación en vacío, se determinó que la válvula proporcional requiere un tiempo de apertura de 4.8 s para transitar desde su estado completamente cerrado (0%) hasta su apertura total (100%). Para su integración en el modelo lineal continuo, este comportamiento integrador acotado se aproximó a una respuesta de primer orden. Se emplea este modelo matemático porque la velocidad de la válvula está dominada por la inercia del motor y la fricción de sus engranajes, respondiendo de manera análoga a un filtro pasa-bajos [7]. Considerando la definición teórica de los sistemas de primer orden, el tiempo de establecimiento transitorio (t_s) para alcanzar el 95% de la

respuesta final ocurre en $t_s \approx 3 \tau_a$. Así, al emplear $t_s = 4.8$ s, se establece $\tau_a \approx 1.6$ s para la constante de tiempo electromecánica. Sustituyendo estos valores empíricos en (10), la función de transferencia del actuador queda definida como:

$$G_a(s) = \frac{1}{1.6s + 1} \quad (11)$$

D. Diseño y sintonización del controlador PID

Para consolidar el diseño analítico del controlador, se formula la función de transferencia de lazo abierto $G_{LA}(s)$, calculada mediante el producto en cascada de las dinámicas lineales del actuador (válvula proporcional), la planta térmica (proceso de mezcla) y el sensor principal (RTD PT1000):

$$G_{LA}(s) = G_p(s) \cdot G_s(s) \cdot G_a(s) \quad (12)$$

$$G_{LA}(s) = \left(\frac{1.316 \cdot e^{-s}}{14s + 1} \right) \cdot \left(\frac{1}{0.37s + 1} \right) \cdot \left(\frac{1}{1.6s + 1} \right) \quad (13)$$

$$G_{LA}(s) = \left(\frac{1.316 \cdot e^{-s}}{8.288s^3 + 28.172s^2 + 15.97s + 1} \right) \quad (14)$$

El análisis de las raíces del denominador de (14) permite determinar la ubicación de los polos en lazo abierto. Los polos introducidos por el actuador ($s_1 = -0.625$) y el sensor ($s_2 = -2.700$) se ubican alejados en el semiplano izquierdo respecto al polo dominante de la planta ($s_3 = -0.071$), como se presenta en la Fig. 4. Según la teoría de sistemas de control, los polos cuya distancia escalar al eje imaginario es al menos cinco veces mayor que la del polo dominante tienen un efecto insignificante en la respuesta transitoria global del sistema [7]. En este caso, la magnitud de los polos s_1 y s_2 es casi diez y cuarenta veces mayor que la del polo dominante s_3 , respectivamente. Esta separación sustancial demuestra matemáticamente que la lenta inercia termodinámica del fluido en el tanque de mezcla es la que rige de manera casi exclusiva la dinámica del sistema. Esta dominancia justifica y valida empíricamente la simplificación del modelo completo (que teóricamente sería de tercer orden) a un modelo reducido de *Primer Orden con Tiempo Muerto* (FOPDT), facilitando un cálculo analítico eficiente de los parámetros de sintonización del algoritmo PID para su implementación en el microcontrolador.

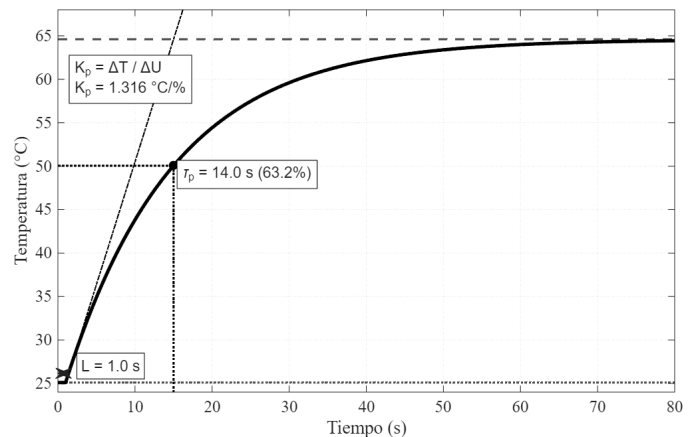


Fig. 3 Respuesta al escalón en Lazo Abierto

En la Fig. 3 se presenta la respuesta al escalón del sistema en lazo abierto, obtenida a partir de la identificación experimental de la planta. Se observa un comportamiento característico de un sistema de primer orden con tiempo muerto (FOPDT), donde la variable de salida (temperatura de mezcla) comienza a reaccionar tras un retardo aproximado $L = 1$ s, atribuido a la distancia entre el mezclador y el sensor. La curva alcanza su estabilidad siguiendo una constante de tiempo $\tau_p = 14$ s. Esta magnitud evidencia una dinámica dominada por la capacidad calorífica del volumen de agua retenido en el mezclador, un comportamiento transitorio característico en sistemas térmicos de pequeña escala, cuyas constantes de tiempo suelen oscilar en el orden de las decenas de segundos según la literatura de control de procesos industriales [10].

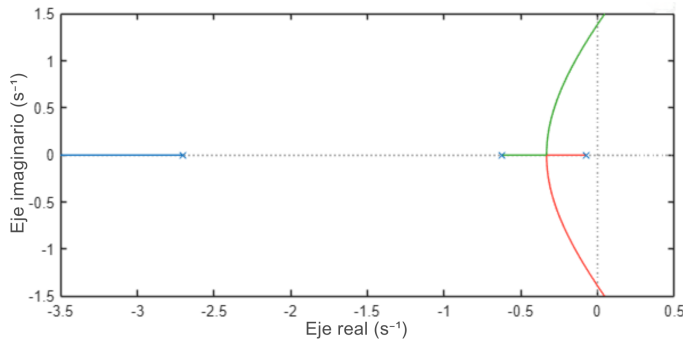


Fig. 4 Lugar geométrico de las raíces en Lazo Abierto

La Fig. 4 presenta el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) del sistema en lazo abierto. Esta representación corrobora gráficamente el análisis matemático previo, mostrando la distribución de las singularidades dinámicas en el plano complejo. El hecho de que todos los polos se ubiquen estrictamente en el semiplano izquierdo asegura que el proceso físico posee una estabilidad intrínseca o absoluta, un requisito fundamental en la teoría de control antes de proceder con el diseño de un compensador [7]. De igual manera, el LGR evidencia visualmente la lejanía de las dinámicas de instrumentación y actuación frente al polo de la planta térmica y justifica la reducción del modelo para los cálculos de sintonización [7].

La Fig. 5 presenta el diseño del algoritmo de control en lazo cerrado $G_{LC}(s)$. Se detalla la arquitectura del lazo de control implementada, donde el controlador secundario (ESP32) procesa la señal de error entre el *set-point* (T_{ref}) y la temperatura real medida para modular la apertura de la válvula proporcional.

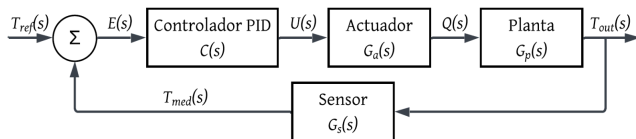


Fig. 5 Diagrama de bloques del control PID

Se opta por una estrategia de controlador PID en su forma paralela porque permite desacoplar los efectos de las ganancias, facilitando el ajuste independiente de cada acción de control y su traducción directa a código embebido dentro del controlador secundario ESP32. La ley de control PID que rige este controlador se define en el dominio de Laplace como [7]:

$$C(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s) \quad (15)$$

Una estrategia común para determinar los valores de los parámetros del controlador (15) consiste en emplear el método analítico de la curva de reacción de Ziegler-Nichols [7]. Sin embargo, debido a su formulación inherentemente agresiva, diseñada para lograr un rechazo rápido a perturbaciones a expensas de tolerar un sobreimpulso transitorio (*overshoot*) de aproximadamente 25%, su aplicación directa resulta inviable para el atemperamiento de agua de consumo. Un sobreimpulso térmico de tal magnitud expondría al usuario a un pico de temperatura superior al umbral de seguridad (riesgo de quemaduras). Además, desperdiciaría una fracción significativa del volumen útil de agua caliente acumulada en la termo solar (al forzar purgas por sobrecalentamiento). Para sintonizar el control PID se usó una estrategia de desintonización robusta (*robust detuning*) enfocada en alcanzar un comportamiento críticamente amortiguado. Se obtuvieron respectivamente los valores $K_p = 2.0$ y $K_i = 0.15$ para las ganancias proporcional e integral, para asegurar transiciones suaves, y $K_d = 0.5$ para la ganancia derivativa para eliminar oscilaciones residuales, que substituyéndolos en (15) queda definida como:

$$C(s) = \frac{0.5s^2 + 2.0s + 0.15}{s} \quad (16)$$

La ley de control PID discreto $C(s)$ se programó en el microcontrolador estableciendo un tiempo de muestreo de $T_s = 200$ ms. Los parámetros finales integran un mecanismo de *anti-windup* para prevenir la saturación integral del actuador ante variaciones abruptas en el caudal de la red de agua potable. La reducción estratégica de la fuerza proporcional y la ganancia integral asegura que la acumulación del error se mantenga acotada, respetando la saturación física impuesta por el tiempo de apertura del actuador (4.8 s). Como resultado, el lazo de control es capaz de rechazar perturbaciones en la línea de suministro frío y estabilizar la mezcla térmica a la temperatura seteada por el usuario (por ejemplo 37 °C) de manera segura y sin oscilaciones (*overshoot*).

La función de transferencia en lazo cerrado $G_{LC}(s)$, que relaciona la temperatura de mezcla real con el *set-point* deseado, incorpora el algoritmo del controlador PID, denotado como:

$$G_{LC}(s) = \frac{C(s) \cdot G_p(s) \cdot G_a(s)}{1 + C(s) \cdot G_{LA}(s)} \quad (17)$$

$$G_{LC}(s) = \frac{C(s) \cdot G_p(s) \cdot G_a(s)}{1 + C(s) \cdot G_p(s) \cdot G_s(s) \cdot G_a(s)} \quad (18)$$

Operando algebraicamente el controlador con la dinámica de lazo abierto del sistema, se obtiene la función de transferencia de lazo cerrado $G_{LC}(s)$ completamente explícita. El polinomio característico resultante (denominador del sistema) define la estabilidad global y se expresa como:

$$G_{LC}(s) = \frac{(0.243s^3 + 1.632s^2 + 2.705s + 0.197)e^{-s}}{8.288s^4 + 28.172s^3 + 15.97s^2 + s + (0.658s^2 + 2.632s + 0.197)e^{-s}} \quad (19)$$

La Fig. 6 se muestra la trayectoria de los polos en lazo cerrado para el sistema sintonizado. Se observa cómo la acción del controlador PID introduce ceros en el plano complejo que atraen las raíces del sistema, forzando a los polos a posicionarse sobre el eje real negativo (específicamente en la región cercana a $s = -0.1$ y $s = -0.5$).

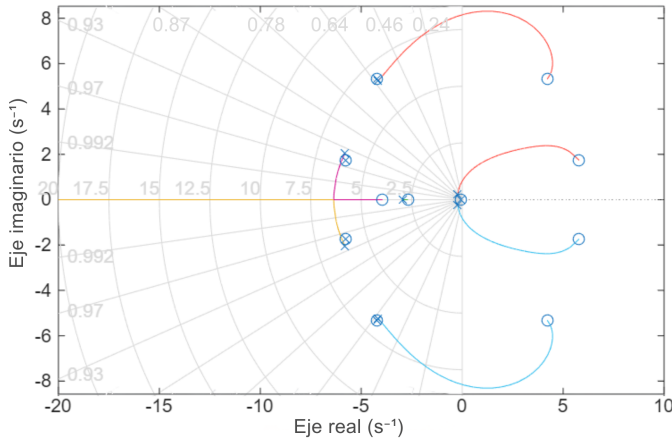


Fig. 6 Diagrama de bloques del control PID

Este modelado es crítico para el análisis del estudio, ya que al eliminar las componentes imaginarias de las raíces dominantes, se garantiza matemáticamente una respuesta críticamente amortiguada en el mezclador. Como resultado, el sistema mantiene un margen de estabilidad robusto frente a perturbaciones en la red de agua fría, asegurando una convergencia suave hacia el *set-point* de 37 °C sin las oscilaciones que pondrían en riesgo la seguridad térmica del usuario o la eficiencia del volumen acumulado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La evaluación experimental se llevó a cabo durante cuatro días consecutivos en noviembre de 2025, bajo condiciones de primavera en la ciudad de Lima.

A. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica instantánea (η_E) se determinó bajo los lineamientos de la norma NTP 399.405. Este cálculo cuantifica la capacidad del sistema para transformar la radiación solar en energía térmica útil (Q_u),

$$\eta_E = \frac{Q_u}{I_c \cdot A_c} 100\% \quad (20)$$

$$Q_u = m_a C_p \Delta T \quad (21)$$

donde:

Q_u : es la energía térmica útil ganada por el agua acumulada en el tanque de 120 L,

I_c : es la irradiancia global medida por el piranómetro de la estación meteorológica,

A_c : Área de los tubos al vacío (1.488 m²),

m_a : es la masa de agua en la terma solar,

c_p : es el calor específico del agua, y

ΔT : es el diferencial térmico alcanzado en el tanque de 120 L.

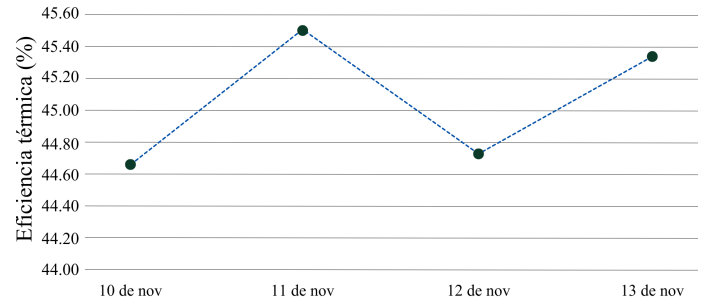


Fig. 7 Eficiencia térmica diaria registrada

La Fig. 7 presenta los resultados experimentales de eficiencia térmica. Con una estabilidad operativa de radiación en promedio de 45.1% permitió elevar la temperatura del tanque desde los 25 °C hasta superar los 60 °C en el periodo de captación. Estos valores confirman que, a pesar de la radiación variable de Lima, el aislamiento por vacío minimiza las pérdidas por convección, manteniendo un rendimiento robusto para la etapa de consumo posterior y valida la capacidad de captación del sistema SUNTASK ST12-180 en condiciones de radiación variable en la ciudad de Lima.

B. Desempeño teórico del control y monitoreo IoT

El comportamiento dinámico del controlador PID desarrollado (Ec. 19) fue probado mediante ensayos de respuesta temporal al escalón para un *set-point* de 37 °C. La Fig. 8 presenta los resultados en lazo cerrado. Se observa que el controlador sintonizado logra estabilizar la temperatura de mezcla con un error de estado estable nulo (menor a 0.5 °C) y un tiempo de establecimiento aproximado de 30 s. Cabe destacar que, gracias a la sintonía robusta aplicada, el sistema presenta un sobreimpulso (*overshoot*) despreciable. Esto garantiza que el agua no exceda el umbral de confort del usuario durante el transitorio, asegura un comportamiento de transición suave y sin oscilaciones térmicas, y aprovecha el volumen útil de agua caliente almacenada. Los resultados numéricos relevantes de la Fig. 8 se presentan en la Tabla II.

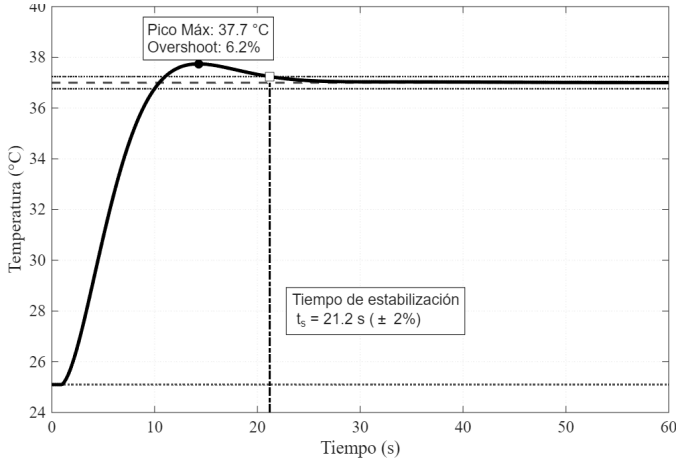


Fig. 8 Respuesta del control PID en lazo cerrado

TABLA II
PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DEL CONTROLADOR PID

Parámetro	Valor obtenido
Tiempo de establecimiento (t_s)	≈ 30 s
Sobreimpulso (M_p)	6.2%
Error de estado estable (e_{ss})	< 0.5 °C
Temperatura pico máxima	37.7 °C

La Fig. 9 muestra el *dashboard* de las variables de proceso, incluyendo el control PID desarrollado, donde se integran *widgets* analógicos y digitales para una interpretación intuitiva de los datos para su supervisión remota. La interfaz integra indicadores numéricos y gráficas de series temporales que permiten el seguimiento simultáneo de la temperatura de mezcla, el caudal de agua fría y caliente, y los datos meteorológicos. Este entorno visual facilita la validación inmediata del algoritmo PID al mostrar la convergencia de la temperatura de salida hacia el *set-point* establecido, permitiendo al usuario monitorear el aprovechamiento del volumen útil y el estado operativo del sistema IoT en tiempo real.

La plataforma IoT facilitó la supervisión remota de variables críticas como caudal, temperatura y radiación solar en tiempo real, validando la estabilidad del protocolo de mensajería MQTT en la arquitectura propuesta. Esta interfaz permite una interacción bidireccional en la que el usuario define el *set-point* térmico; posteriormente, el sistema procesa esta entrada y ajusta dinámicamente los parámetros de mezcla. Esta capacidad de control remoto garantiza que la temperatura de salida encuentre convergencia con precisión al valor requerido para el consumo final.

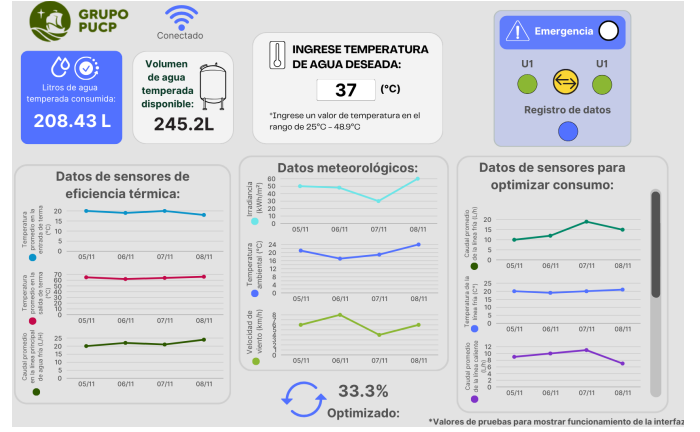


Fig. 9 Interfaz de monitoreo y control remoto basada en IoT

C. Aprovechamiento del volumen disponible de agua templada

Se cuantifica la aplicación del sistema de control PID en el volumen de agua disponible. Primero, se determina el volumen teórico máximo que puede generar el sistema de terma de tubos al vacío. Luego, se contrasta con resultados experimentales para la regulación manual y usando el control PID desarrollado.

El volumen teórico máximo de agua templada ($V_{theoric}$) corresponde a la suma del volumen de agua caliente disponible en el tanque (V_{hot}) y el volumen de agua fría inyectado por la válvula (V_{cold}),

$$V_{theoric} = V_{hot} + V_{cold} \quad (22)$$

El volumen de agua fría se determina a partir de un balance de energía del intercambio térmico entre las masas de agua caliente y de agua fría, expresadas en términos de densidad (ρ) y volumen (V), $M = \rho V$. Considerando una mezcla isobárica [3], se tiene:

$$(\rho V c_p)_{hot} (T_{hot} - T_{goal}) = (\rho V c_p)_{cold} (T_{goal} - T_{cold}) \quad (23)$$

donde:

c_p : es el calor específico,
 T_{hot} : es la temperatura de la línea de agua caliente,
 T_{cold} : es la temperatura de la línea de agua fría,
 T_{goal} : es la temperatura de *set-point*.

Considerando despreciable la variación de densidad y calor específico para el rango operativo entre 22 °C a 60 °C, y reorganizando la ecuación (22) se obtiene,

$$V_{cold} = V_{hot} \cdot \left(\frac{T_{hot} - T_{goal}}{T_{goal} - T_{cold}} \right) \quad (24)$$

Reemplazando (24) en (22), se tiene:

$$V_{theoric} = V_{hot} \cdot \left(1 + \frac{T_{hot} - T_{goal}}{T_{goal} - T_{cold}} \right) \quad (25)$$

Aplicando la ecuación (25) para las condiciones típicas durante los experimentos indicadas en la Tabla III se obtiene un volumen teórico de ≈ 304 L. Este resultado significa que se dispone de 2.5 veces el volumen del tanque de agua temperada.

TABLA III
DATOS MEDIDOS EN EL ENSAYO

Temperatura del tanque (T_{hot})	60 °C
Temperatura de red fría (T_{cold})	22 °C
Set-point de confort (T_{goal})	37 °C
Volumen nominal del tanque (V_{hot})	120 L
Volumen teórico (Ec. (25))	304 L

El agua disponible en el tanque es aprovechada en forma de agua templada mediante una regulación entre el agua fría y el agua caliente. Pruebas experimentales preliminares mostraron que con regulación manual se tarda entre 60 y 90 segundos para estabilizar el agua a una temperatura deseada. Finalmente, el valor *set-point* de temperatura fue ≈ 42 °C. Lo anterior es esperado. El retardo entre la apertura de las válvulas de mezcla y la percepción física del flujo induce al usuario a sobrecompensar la acción de control manual. Al no percibir un incremento de temperatura inmediato, el usuario tiende a saturar la apertura de la línea caliente, provocando un sobreimpulso transitorio (*overshoot*) que excede la temperatura de confort objetivo [11]. Adicionalmente, la fisiología de la adaptación termorreceptora de la piel provoca que, tras el contacto térmico inicial, el usuario experimente una disminución en la percepción del calor que obliga a reajustar la mezcla hacia una *set-point* cada vez mayor [12]. En el caso de la regulación mediante control PID, el tiempo de estabilización de la temperatura deseada en 37 °C fue ≈ 30 s. Este menor tiempo de estabilización y precisión del valor *set-point* determinan que la regulación con control PID es superior en el uso eficiente del volumen de agua temperada.

El sistema automatizado se fundamenta en la reducción del desperdicio de agua durante la fase transitoria; al lograr una convergencia rápida y sin oscilaciones hacia el *set-point*, se reduce de 50% - 66.7% la "purga térmica" (el flujo que el usuario desecha invariablemente mientras espera la estabilización manual). Adicionalmente, el algoritmo restringe la tendencia humana a saturar la apertura de la válvula de agua caliente ante la imprecisión del ajuste físico, previniendo así pérdidas energéticas que reducen la capacidad del sistema.

D. Alcance de la implementación

Las medidas experimentales preliminares se concentraron en un periodo de 4 días de recolección de datos de irradiancia, y 30 ciclos de consumo, es decir carga y descarga del tanque

de la terma solar. La naturaleza del algoritmo PID permite extrapolar la optimización de consumo dado que su desempeño está sujeto a constantes del hardware empleado (inercia térmica del mezclador y el retardo de los actuadores), según referido por Skogestad [13]. La referencia también indica que la validación de un lazo PID se demuestra mediante su respuesta transitoria en lazo cerrado, haciendo innecesarios los ensayos estacionales prolongados. En consecuencia, podemos inferir que el sistema de control PID asegura la convergencia al *set-point*, independientemente del clima.

En el ámbito residencial unifamiliar, la implementación de este sistema presenta un costo inicial superior al de los mezcladores pasivos debido a la integración de la Raspberry Pi 5 y el ESP32. Sin embargo, esta inversión se justifica mediante la amortización generada por el ahorro directo del agua temperada evitando el desperdicio por ciclo de uso. Para aplicaciones de mayor envergadura, como hospitales o el sector hotelero, el controlador PID diseñado permite una transición hacia el uso eficiente y optimizado de colectores solares. La arquitectura utiliza la Raspberry Pi 5 como un *gateway* centralizado que orquesta múltiples nodos periféricos basado en un microcontrolador ESP32 de bajo costo a través del protocolo MQTT. Este enfoque de procesamiento local facilita una expansión modular masiva sin necesidad de duplicar la infraestructura de cómputo de alto nivel. De este modo, se permite el monitoreo y control simultáneo de múltiples puntos de consumo con una inversión mínima en hardware adicional, garantizando la sincronización de la temperatura de confort de forma rentable.

V. CONCLUSIÓN

Bajo un enfoque de sostenibilidad y eficiencia energética, este estudio optimiza el consumo de agua cliente en un piloto de terma solar de tubos al vacío usando control PID y monitoreo basado en IoT. Se integran los microcontroladores Raspberry Pi 5 y ESP32 y el monitoreo IoT para asegurar la corrección de cualquier desviación en el flujo y alcanzar las temperaturas deseadas. El ajuste del control PID y pruebas experimentales preliminares se realizaron en el aparato experimental terma solar de tubos al vacío instalado en el distrito de San Miguel, Lima. El control PID implementado permite reducir entre 50% y 66.7% el tiempo de regulación de agua temperada comparado con la regulación manual. La estabilización del proceso de mezcla demuestra que el diseño de un controlador PID es tan determinante como la propia captación térmica solar para viabilizar la eficiencia de estos sistemas, suprimiendo drásticamente las purgas térmicas inherentes a la regulación manual.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el financiamiento PI1234 entregado por el Vicerrectorado de Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, "Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2023", United Nations, 2023.
- [2] IET Research, "IoT enabled smart solar water heater system using real-time ThingSpeak IoT platform", IET Renewable Power Generation, 2020.
- [3] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Wiley, 2013.
- [4] J. A. Alcántara et al., "A Real-Time IoT and Cloud Monitoring Framework for Performance Enhancement of Solar Evacuated Tube Heaters," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 24, no. 1, pp. 13, 2026.
- [5] INACAL, "NTP 399.405:2007. Sistemas de calentamiento de agua con energía solar. Definición y pronóstico anual de su rendimiento", Lima, 2017.
- [6] Barriga, B. *Metodología normalizada VDI 2221*, 2009.
- [7] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- [8] J. G. Ziegler y N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [9] International Electrotechnical Commission, "*Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*", IEC 60751:2008, 2008.
- [10] C. A. Smith y A. B. Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [11] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2015, pp. 8-10.
- [12] J. E. Hall and M. E. Hall, *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*, 14th ed. Philadelphia, PA, USA: Elsevier, 2021, ch. 48, pp. 607-610.
- [13] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning," *J. Process Control*, vol. 13, no. 4, pp. 291–309, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0959-1524(02)00062-8.