

Validación Experimental de un Intercambiador de Calor por Serpentín para un Sistema de Calentamiento Híbrido de Agua

PC4 Prototipo final

Universidad Modelo
Escuela de Ingeniería
Ingeniería mecatrónica

1

García Ordoñez Cristian
Daniel, 15245764
Moheno Moha Iván, 15234162
Yah Nic Eli, 15246115

Mtro. Gabriel Enrique Euan Valle

Abstract— Este trabajo presenta la validación experimental del componente crítico de un sistema de calentamiento híbrido de agua, diseñado para elevar la temperatura de un tanque de 50 L mediante la combinación de energía solar térmica y un calentador auxiliar eléctrico de 4.4 kW. Para evaluar la viabilidad del concepto antes de construir el sistema completo, se desarrolló un prototipo funcional a escala del intercambiador de calor, el cual constituye el elemento central de transferencia térmica entre el circuito solar y el tanque de almacenamiento. El prototipo está conformado por dos contenedores de agua interconectados mediante un serpentín de cobre y una bomba de recirculación de alta temperatura. El circuito caliente incluye un calentador resistivo de 100 W alimentado a 20 V y 5 A, con el cual se simula el aporte energético del sistema solar real. La metodología de validación consistió en registrar la evolución temporal de la temperatura en ambos circuitos de agua, determinando la capacidad del serpentín para transferir calor de manera efectiva. Los resultados experimentales confirman que, incluso con una potencia reducida, el prototipo demuestra un incremento térmico significativo en el contenedor de intercambio, validando así la funcionalidad del diseño y su escalabilidad hacia la versión final del proyecto.

Palabras clave— Intercambiador de calor, energía solar térmica, serpentín de cobre, validación experimental, calentamiento de agua, prototipo a escala. (*Abstract*)

El calentamiento de agua para uso doméstico, agrícola o industrial representa un área de oportunidad significativa para la integración de energías renovables y sistemas híbridos de apoyo eléctrico. En proyectos de pequeña escala, la combinación de captación solar térmica con un calentador eléctrico auxiliar permite garantizar un suministro confiable de agua a temperatura controlada, incluso durante períodos sin radiación solar. Para asegurar que el sistema cumpla los requisitos de operación establecidos en el diseño técnico, resulta indispensable validar previamente el componente encargado de la transferencia térmica: el intercambiador de calor.

El diseño planteado en el PC3 utiliza un esquema de calentamiento híbrido donde diez tubos solares proporcionan un aporte energético teórico de 11,340,000 J por día, mientras que un calentador auxiliar de 4.4 kW permite recuperar rápidamente la temperatura objetivo (65 °C) cuando el aporte solar es insuficiente. Los cálculos de dimensionamiento muestran que, para calentar 50 L en 4 horas, se requiere una potencia neta de 509 W, lo cual valida la necesidad de un intercambiador eficiente que permita acoplar ambos sistemas de manera óptima.

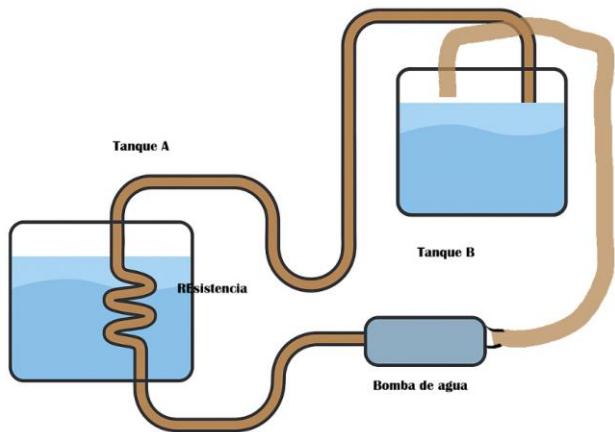
Antes de construir la versión final del sistema, es necesario comprobar experimentalmente que el método elegido para la transferencia térmica —un serpentín de cobre inmerso en el

tanque— es capaz de incrementar la temperatura del fluido en un tiempo razonable y con pérdidas aceptables. Por ello, se fabricó un prototipo a escala que replica exclusivamente el comportamiento del intercambiador, empleando un calentador resistivo de 100 W para simular el aporte solar y una bomba de recirculación para reproducir las condiciones de flujo del sistema real.

El objetivo de esta validación es demostrar experimentalmente que el serpentín diseñado es capaz de transferir suficiente calor al fluido, confirmando la viabilidad del principio térmico que sustenta el sistema completo. El alcance de esta prueba se limita a un prototipo a escala empleando un calentador de 100 W; no incluye tubos solares reales ni el tanque completo de 50 L.

Componente	Especificación	Cantidad	Notas
Serpentín de Tubo cobre	3/8", longitud 1 m	1	Sumergido en contenedor principal
Contenedor caliente	Frasco de vidrio	1	Círculo de calentamiento
Contenedor intercambio	Olla de acero esmaltado	1	Contiene el serpentín
Bomba recirculación	de 20 L/min, temp máx 120°C	1	Alimentada por fuente DC
Calentador resistivo	20 V @ 5 A (100 W)	1	Simula la energía solar
Fuente DC	20 V, 10 A	1	Alimentación del sistema
Sensores temperatura	de (DS18B20 / termómetro)	2-3	Para registrar curvas térmicas

Diagrama de bloques del prototipo



Principio de funcionamiento

El calentador resistivo eleva la temperatura del circuito cerrado de agua caliente. La bomba mantiene el flujo a través del serpentín de cobre, que transfiere el calor al contenedor principal por convección forzada en el interior del serpentín y por conducción-convección hacia el agua externa.

B. Diseño experimental

I. Variables

Independientes:

Potencia aplicada (100 W)

Tiempo

Caudal de la bomba

Dependientes:

Temperatura del agua en el contenedor caliente

Temperatura del agua en el contenedor de intercambio

Equipos de medición

Equipo	Precisión	Uso
Termómetro digital	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	Medición de temperaturas
Multímetro	$\pm 0.01\text{ V} / \pm 0.01\text{ A}$	Validar potencia aplicada
Timer	16MHz	Tiempos

Procedimiento experimental (paso a paso)

Llenar ambos contenedores con agua a temperatura ambiente.

Colocar el serpentín completamente sumergido en el contenedor azul.

Activar la bomba para iniciar la circulación.

Encender el calentador resistivo (20 V / 5 A).

Registrar temperaturas cada **1 minuto** durante **15–20 minutos**.

Documentar visualmente el comportamiento del prototipo.

Apagar el calentador y continuar registrando temperaturas 3 minutos adicionales.

Organizar los datos en tablas y gráficas para su análisis.

Especificaciones objetivo (PC02)

Demostrar transferencia térmica suficiente en un prototipo a escala.

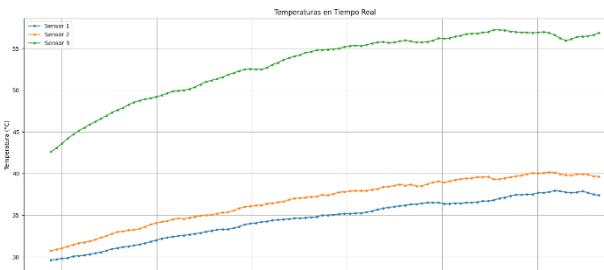
Validar que el principio de intercambio por serpentín es viable.

Confirmar incremento sostenido de temperatura en el contenedor de intercambio.

RESULTADOS



RESULTADOS EXPERIMENTALES:



ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales permiten evaluar el comportamiento térmico del intercambiador a escala y analizar tanto sus fortalezas como las limitaciones encontradas durante su implementación física. En términos generales, la prueba puede considerarse exitosa, dado que se logró transferir calor desde el circuito caliente hacia el contenedor de intercambio de manera clara, medible y sostenida. El incremento de temperatura observado en el depósito principal confirma que el serpentín funciona como medio efectivo de intercambio térmico y que el principio físico detrás del sistema híbrido es técnicamente sólido.

No obstante, durante la construcción y operación del prototipo surgieron diversos retos técnicos que revelan aspectos críticos que deben abordarse antes de escalar el sistema hacia su versión final. Estos retos no comprometen la validez del concepto, pero sí evidencian que el desempeño del sistema completo depende fuertemente de una correcta selección de materiales, un aislamiento térmico adecuado y un control confiable del calentador.

Uno de los problemas más relevantes es la electrólisis generada cuando la resistencia eléctrica entra en contacto directo con el agua. Este fenómeno, observado incluso en corrientes relativamente bajas, provoca la disociación del agua, liberación de gases y una acidificación progresiva del medio. Esto no solo compromete la seguridad operativa del sistema, sino que además puede dañar componentes metálicos, reducir la vida útil del serpentín y generar

depósitos o corrosión en las conexiones hidráulicas. Para el sistema final —especialmente considerando que operará a mayor potencia y por períodos prolongados— resulta indispensable aislar completamente la resistencia del contacto directo con el agua, ya sea mediante encapsulados cerámicos, cartuchos calefactores comerciales o una interfaz térmica indirecta.

Otro punto crítico identificado es la pérdida térmica. En el prototipo se observó que una parte considerable del calor suministrado por la resistencia no se transfiere al serpentín, sino que se pierde hacia el ambiente a través de las paredes metálicas del contenedor y por el propio serpentín expuesto. Aunque esto es esperable en un prototipo sin aislamiento, al escalar el sistema estas pérdidas impactarían directamente en la eficiencia energética, aumentando el tiempo necesario para alcanzar la temperatura objetivo y sobrecargando el calentador auxiliar. El aislamiento térmico externo en el sistema final, así como el aislamiento del tanque de 50 L, será fundamental para garantizar un rendimiento adecuado.

Asimismo, el caudal proporcionado por la bomba de recirculación juega un papel esencial en la eficiencia de la transferencia térmica. Aunque en las pruebas se mantuvo un flujo continuo, el comportamiento del sistema ante distintos caudales y temperaturas deberá evaluarse en etapas posteriores. Un caudal demasiado bajo reduce la transferencia por convección interna, mientras que un caudal excesivo puede generar inestabilidades hidráulicas o pérdidas por fricción.

Decisiones de diseño

A partir de lo observado, se confirmaron varias decisiones de diseño que deberán implementarse en la versión final del sistema:

Confirmación del serpentín como intercambiador principal. El prototipo validó que el serpentín de cobre es una solución viable y eficiente para la transferencia de calor. Su conductividad térmica, facilidad de manufactura y

compatibilidad con sistemas solares lo hacen adecuado para el proyecto.

Aumento de longitud del serpentín.

Para el tanque real de 50 L, se requerirá una longitud mayor de tubería con el fin de incrementar el área superficial de intercambio y acelerar la transferencia térmica. Esto permitirá alcanzar la temperatura objetivo en menor tiempo y con menor carga para el calentador auxiliar.

Aislamiento térmico del sistema.

Tanto el tanque principal como las líneas hidráulicas deberán contar con aislamiento de espuma elastomérica o lana mineral para reducir pérdidas térmicas al ambiente y mejorar la eficiencia global del sistema.

Control térmico integrado.

Se deberá integrar un sistema de control con sensores de temperatura, protección contra sobrecalentamiento y regulación automática del calentador auxiliar. Esto garantiza operación segura, evita sobrecargas y optimiza el uso energético.

Uso de materiales con mayor capacidad térmica y resistencia.

En el diseño final se requerirán tuberías de mayor espesor, conexiones estandarizadas, soportes resistentes a altas temperaturas y una bomba certificada para operación continua en agua caliente.

V. CONCLUSIONES

A. Viabilidad del concepto

La prueba de concepto realizada demuestra de manera contundente que el intercambiador basado en un serpentín de cobre es técnicamente viable, incluso bajo condiciones de baja potencia y sin aislamiento térmico. El experimento comprobó la transferencia real de calor entre dos depósitos independientes, validando el fundamento físico del sistema híbrido de calentamiento y confirmando que el serpentín puede cumplir su función en el diseño final.

C. Contribución del trabajo

El prototipo construido permitió:

Verificar el funcionamiento del subsistema más crítico del proyecto.

Identificar limitaciones técnicas que serían difíciles de detectar sin una prueba de laboratorio.

Obtener evidencia experimental que respalda las decisiones técnicas tomadas en el PC03.

Establecer criterios claros para el diseño final del sistema en Proyectos 4.

Este avance proporciona una base sólida para continuar el desarrollo del sistema completo, asegurando que el diseño final será más eficiente, seguro y confiable.

Referencias

Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía, 10.

González-Mendizabal, D. (2002). Intercambiadores de Calor.

Álvarez, J. G., Armero, J. M., & Urrutia, C. A. (2020). Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la literatura. *Revista de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, 14*(27), 41-49.

Marín, J. G. A., & ZULUAGA, D. A. H. (2012). Intercambiadores de calor en espiral. *Revista UIS Ingenierías, 11*(2), 203-213.