

Implementación de gemelo digital para determinar el perfil de temperatura de una aleta de Cobre.

Laboratorio de Propiedades Termodinámicas y de Transporte

Karen Julieth Castillo Hernández¹, Gabriel Alejandro García Palacios², Juan David Figueroa Vargas³,
kcastilloh@unal.edu.co¹, ggarciapa@unal.edu.co², and jfigueroav@unal.edu.co³

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Docente: Gustavo Adolfo Orozco Alvarado
22 de Julio de 2025

1 Justificación:

La caracterización térmica de aletas metálicas es fundamental en el estudio de sistemas de transferencia de calor, ya que permite comprender cómo se distribuye la temperatura a lo largo de un sólido sometido a un gradiente térmico. Si bien existen modelos analíticos que describen este comportamiento bajo ciertas suposiciones, su aplicación práctica requiere validación experimental y un montaje cuidadoso que asegure condiciones reproducibles.[1]

Este proyecto surge como una continuación del trabajo previo de caracterización térmica de una aleta, proponiendo mejoras significativas en el montaje experimental y en el sistema de adquisición de datos.[2] En particular, se implementó un sistema automatizado que permite la captura y transmisión en tiempo real de temperaturas mediante los sensores distribuidos y conectividad Wi-Fi, lo que facilita el procesamiento digital y el registro continuo de las mediciones.

El eje central de este trabajo es el desarrollo de un gemelo digital, entendido como un modelo computacional capaz de reproducir y predecir el comportamiento térmico de la aleta de cobre bajo distintas condiciones. Este enfoque no solo mejora la precisión del análisis térmico, sino que permite realizar simulaciones sin necesidad de repetir el ensayo físico, optimizando tiempo y recursos en entornos académicos e industriales.

2 Objetivo general:

Implementar un gemelo digital predictivo del comportamiento térmico en una aleta de cobre, mediante datos experimentales capturados con sensores distribuidos y adquisición en tiempo real, para análisis y simulación bajo distintas condiciones.

2.1 Objetivos específicos:

- Implementar mejoras en el montaje experimental que garantice la correcta instalación de sensores DS18B20 a lo largo de una aleta de cobre, asegurando el contacto térmico adecuado y la integridad de las conexiones eléctricas.
- Automatizar la adquisición y registro de datos mediante una placa ESP32 con conexión Wi-Fi y transmisión a una hoja de cálculo en la nube.
- Desarrollar e integrar un gemelo digital del sistema que permita predecir el comportamiento térmico de la aleta ante variaciones en las condiciones de contorno.

3 Introducción:

En el contexto de este trabajo, el **gemelo digital** se define como una réplica computacional del sistema físico real —una aleta de cobre sometida a gradientes térmicos— que permite predecir su comportamiento térmico bajo diversas condiciones. Esta herramienta resulta útil no solo para fines de análisis y visualización, sino también para simulaciones rápidas sin necesidad de realizar mediciones físicas repetidas.

Para modelar el perfil de temperaturas en la aleta se optó por implementar una **red neuronal artificial (RNA)** como núcleo predictivo del gemelo digital. Las RNAs son modelos computacionales inspirados en la estructura del

cerebro humano, capaces de aprender patrones complejos a partir de datos experimentales. Su principal ventaja radica en su habilidad para aproximar funciones no lineales sin necesidad de conocer explícitamente las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema físico.

En este caso, se emplearon los datos experimentales de temperatura obtenidos en distintos puntos de la aleta como conjunto de entrenamiento. La red neuronal fue entrenada para aprender la relación entre la posición a lo largo de la aleta (entrada) y la temperatura correspondiente (salida). Una vez entrenada, la RNA es capaz de **predecir el perfil térmico completo** de la aleta ante nuevas condiciones, funcionando como un modelo digital sustituto.

Para lograr un correcto envío, almacenamiento y análisis de datos, se aplicarán conocimientos de las IOT para facilitar dicho trabajo. Las IOT (Internet of Things) es una tendencia con alta relevancia gracias al avance del desarrollo de nuevos metodos de conexión inalámbricos, tecnologías de nubes, dispositivos móviles y redes de sensores, que busca como objetivo facilitar la aplicación inteligente de la logística, el control y la energía mediante conexiones de internet variadas.

Dispositivos como sensores, actuadores y microcontroladores se conectan mediante protocolos como Wi-Fi, MQTT o Bluetooth, permitiendo una integración fluida con plataformas en la nube o sistemas locales. Las aplicaciones del IoT abarcan desde el hogar inteligente y la agricultura de precisión, hasta la automatización industrial y la salud digital [3].

4 Metodología experimental:

4.1 Materiales:

Para el desarrollo experimental se utilizó una aleta cilíndrica de cobre con 50 cm de longitud y 6 mm de diámetro, sobre la cual se instalaron sensores digitales DS18B20 encapsulados en acero inoxidable. En total se emplearon diez sensores: ocho distribuidos en puntos estratégicos para la visualización del perfil de temperatura a lo largo de la aleta, uno adicional para medir la temperatura ambiente y una termocupla tipo K como referencia externa. Los sensores DS18B20 cuentan con tres terminales: VCC (alimentación), GND (tierra) y DQ (datos).

Para asegurar una adquisición de datos eficiente y en tiempo real, se empleó una placa microcontroladora ESP32 DEVKit V1 con conectividad Wi-Fi. Otros materiales utilizados incluyeron una protoboard modelo ZY-W203, borneras de tres terminales, abrazaderas plásticas de un solo uso, una resistencia pull-up de 4.7 k Ω , pasta térmica, cinta de aluminio, dos beakers, una placa de calentamiento eléctrica, un soporte universal y computador.

4.2 Equipamiento y montaje experimental:

4.2.1 Aleta de cobre:

La barra metálica de cobre se fijó verticalmente mediante un gancho conectado a un soporte universal. En su superficie se instalaron ocho sensores de temperatura DS18B20 distribuidos en posiciones estratégicamente definidas, con el fin de capturar el perfil de temperatura a lo largo de la aleta. Cada sensor se montó aplicando primero una fina capa de pasta térmica para mejorar la conductividad entre la superficie metálica y el sensor. Posteriormente, se recubrió con cinta de aluminio para minimizar las interferencias del ambiente y finalmente se aseguró con una abrazadera plástica de un solo uso, garantizando su fijación mecánica.

Desde el sensor parte un cable que se conecta a una primera bornera. Esta bornera permite empalmar dicho cable con otro conductor que va hacia una segunda bornera con pines tipo macho, la cual se conecta a la protoboard. Se utilizó un código de colores específico para facilitar la conexión: rojo o naranja (VCC), blanco (GND) y azul o verde (DQ). Se verificó que los cables estuvieran completamente insertados en las borneras y que los tornillos estuvieran firmemente ajustados, sin filamentos sueltos ni contacto entre canales.



Figura 1: Configuración experimental completa mostrando el sistema de la aleta de cobre con el montaje térmico de enfriamiento (izquierda). Vista en detalle de los componentes de medición térmica. (derecha)

Desde la protoboard, las conexiones se dirigen a la placa ESP32, la cual se alimenta mediante una fuente USB de 5 V. Esta placa se ubicó a una distancia segura del beaker que contiene el fluido térmico, evitando riesgos por salpicaduras o humedad. La ESP32 fue programada para conectarse automáticamente a una red Wi-Fi local y transmitir los datos de temperatura en tiempo real a una hoja de cálculo de Google Sheets para su almacenamiento y análisis posterior.

4.2.2 Protoboard y arduino:

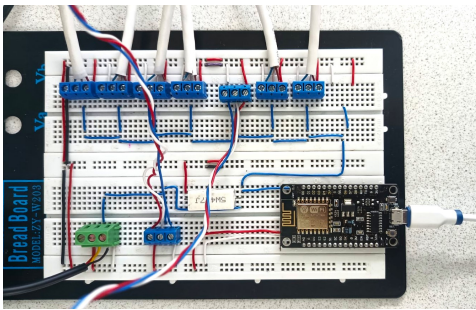


Figura 2: Conexión en paralelo de sensores DS18B20 sobre protoboard.

Para asegurar un funcionamiento estable y simultáneo de los sensores de temperatura, se implementó como mejora una conexión en serie sobre la protoboard. Esta configuración permite que los ocho sensores DS18B20 compartan las mismas líneas de alimentación (VCC), tierra (GND) y datos (DQ), conforme al protocolo One-Wire, lo que simplifica el cableado y permite lecturas sincronizadas sin interferencias.

Cada sensor se conecta a una bornera azul de tres terminales, desde la cual los conductores se dirigen a líneas comunes distribuidas horizontalmente, unificadas mediante puentes en los rieles de la protoboard. Se incorporó una resistencia de pull-up de $4.7\text{ k}\Omega$ para estabilizar la señal, que es procesada por una placa ESP8266 NodeMCU ubicada en el extremo inferior derecho, alimentada vía USB. Con este esquema, las conexiones se mantienen organizadas y seguras, facilitando el diagnóstico en caso de presentarse fallos de conexión, y permitiendo escalar el sistema con confiabilidad.

Con respecto a la informática del montaje. Uno de los retos del montaje es establecer un orden a los sensores con el fin de tener claridad de a qué sensor se encuentra correlacionada cada temperatura (fundamental para reconocer la distancia de cada sensor a la barra, junto con su temperatura asociada. Para ello se hizo provecho de una propiedad interesante de los sensores, estos poseen una dirección HEX única para cada sensor. Logrando identificar cada HEX en cada sensor, se puede asociar un nombre a cada sensor, y de esa manera la ESP logre identificar la señal y asociar la medición adecuada de temperatura correspondiente a cada sensor.

Adicionalmente, se optó por integrar la conexión mediante wifi de la ESP8266, con el fin de facilitar el almacenamiento de los datos y análisis en tiempo real de estos. La propuesta inicial fue de utilizar protocolos de HTTP para enviar el paquetes de temperaturas a paginas web. Más específicamente a hojas de calculo de google, con el fin de facilitar la visualización e interpretación de los datos mediante gráficas en tiempo real de forma remota. Cabe destacar que los intervalos de tiempo para cada toma de datos antes y después de integrar la opción de conexión wifi aumentó drásticamente. Desde un tiempo en promedio de 2 segundos, hasta actualmente intervalos de 20 segundos o más. La problemática se encuentra en precisamente los protocolos de conexión, pese a ser la opción más segura para el

4.2.3 Montaje térmico:

Para el montaje en **condiciones frías**, se utilizó un beaker pequeño con agua destilada donde se sumergió el extremo inferior de la aleta. Este beaker fue sostenido mediante una pinza sobre un soporte universal e introducido dentro de un segundo beaker más grande que contenía una mezcla de hielo y agua. Esta configuración permitió mantener la temperatura del agua interna cerca de 0°C sin contacto directo entre el hielo y la aleta, evitando así gradientes bruscos o interferencias por choque térmico. Además, se colocó un termómetro en el baño exterior para monitorear la temperatura del sistema de refrigeración, mientras que la medición directa en la aleta se obtuvo con la termocupla sumergible.



Figura 3: Montaje en condición de enfriamiento.

4.3 Protocolo de medición:

1. Antes de iniciar cada ensayo, se debe verificar el estado general del montaje. En primer lugar, se inspecciona la correcta instalación de los sensores DS18B20 sobre la aleta de cobre, asegurando su fijación mecánica y el contacto térmico adecuado. A continuación, se revisa la integridad de las conexiones eléctricas: la coincidencia del código de colores por canal (VCC, GND, DQ), la correcta inserción de los cables en las borneras, y el ajuste firme de los tornillos, evitando filamentos sueltos o contactos cruzados. También se confirma el funcionamiento de la placa ESP32, su conexión a la red Wi-Fi previamente configurada y la correcta transmisión automática de datos hacia la hoja de cálculo de Google Sheets.
2. El montaje se desarrolló exclusivamente en condiciones de enfriamiento. Para ello, el extremo inferior de la aleta se sumergió entre 2 y 3 mm en un beaker con agua destilada, el cual se colocó dentro de un segundo beaker con hielo. Esta configuración detalladamente anteriormente evitó el contacto directo entre el sólido refrigerante y la superficie metálica de la aleta, reduciendo gradientes térmicos abruptos y mejorando la estabilidad térmica en la base, permitiendo así mantener una temperatura constante y uniforme durante cada ensayo.
3. Una vez que el sistema alcanzó el estado estacionario, identificado cuando las lecturas de los sensores mostraron una variación menor a $0,250^{\circ}\text{C}$ se dio inicio al registro continuo de temperaturas por un periodo cercano a 30 minutos. Durante ese tiempo, el sistema de adquisición guardó automáticamente las mediciones en la hoja de cálculo, con una frecuencia aproximada de 1 cada 45 segundos. Estos datos experimentales sirvieron posteriormente como base para el entrenamiento y la validación del gemelo digital desarrollado.

4.4 Calibración de los sensores:

La tendencia lineal del cambio de la temperatura es el comportamiento esperado en los sensores, sin embargo, debido a circunstancias en el proceso de producción, selección y control; los sensores sufren de ciertos rangos de incertidumbre en la lectura de la incertidumbre con respecto al valor real. Para ello es necesario reacondicionar los sensores para cumplir con el grado de precisión requerida en el ensayo experimental.

La calibración de los sensores DS18B20 se realizó sumergiéndolos individualmente en un baño termostático con temperatura controlada y estable en un intervalo de 10 a 50°C . Las lecturas de cada sensor se compararon con el valor nominal del baño para verificar su precisión antes de realizar el montaje definitivo.



Figura 4: Calibración de los sensores DS18B20 en baño termostatado en el rango de temperaturas de (10-50)°C.

Teniendo en cuenta que los sensores deben de seguir un comportamiento lineal (el esperado del cambio de temperatura), se debe de poder representar el comportamiento de los sensores con una ecuación lineal simple; idealmente, coincidiendo con los valores nominales del baño. Para ello, se desarrollaron las ecuaciones lineales de dos parámetros para cada sensor con el objetivo de que el valor de lectura de cada sensor sea corregido a un valor igual o cercano al nominal del baño. De tal manera que:

$$T_{\text{corregido}} = m \cdot T_{\text{sensor}} + b \quad (1)$$

Ajustando los parámetros para cada sensor bajo el supuesto de que el valor del baño, es el valor real a comparar con las lecturas de los sensores. Obteniendo así el siguiente conjunto de resultados ajustados para los sensores:

SENSOR	m	b
1	1,1379	-4,1554
2	1,1363	-4,1271
3	1,1480	-4,5104
4	1,1370	-5,3411
5	1,1335	-4,1282
6	1,1467	-4,4341
7	1,2093	-6,1421
8	1,1163	-3,2532
9	1,0929	-2,8182
10	1,0099	0,0065

Tabla 1: Parámetros ajustados tras la calibración de los sensores para los ensayos

4.5 Entrenamiento de la red neuronal:

Para entrenar la red neuronal artificial, se utilizó un conjunto de datos experimentales recolectados en distintas condiciones térmicas, incluyendo variaciones tanto en la temperatura del entorno como en la del baño térmico. Las variables de entrada consideradas fueron: temperatura ambiente y del baño, temperatura sobre la aleta, posición sobre la aleta y tiempo transcurrido. La variable objetivo fue la temperatura registrada en un punto específico de la aleta.

La arquitectura empleada fue una red neuronal densa tipo *feedforward*, compuesta por una capa de entrada con cuatro nodos (una por cada variable de entrada), seguida de dos capas ocultas densas con funciones de activación ReLU (Rectified Linear Unit) que es muy usada porque ayuda a capturar relaciones no lineales, y una capa de salida lineal que predice la temperatura. El modelo fue construido usando la biblioteca Keras con TensorFlow como backend.

El entrenamiento se llevó a cabo mediante el método de descenso del gradiente estocástico (SGD) con el optimizador *adam* que es una versión inteligente de SGD, que adapta la velocidad de aprendizaje automáticamente. Se utilizó la función de pérdida de error cuadrático medio (MSE) para evaluar el ajuste durante el proceso de entrenamiento.

Se entrenó la red durante 200 épocas, con un tamaño de lote (*batch size*) de 32. Para evitar el sobreajuste, se aplicó validación cruzada con un subconjunto del 20% de los datos y monitoreo del error en el conjunto de validación.

El modelo final mostró una buena capacidad predictiva, con errores bajos tanto en entrenamiento como en validación, lo cual respalda su utilidad como núcleo del gemelo digital.

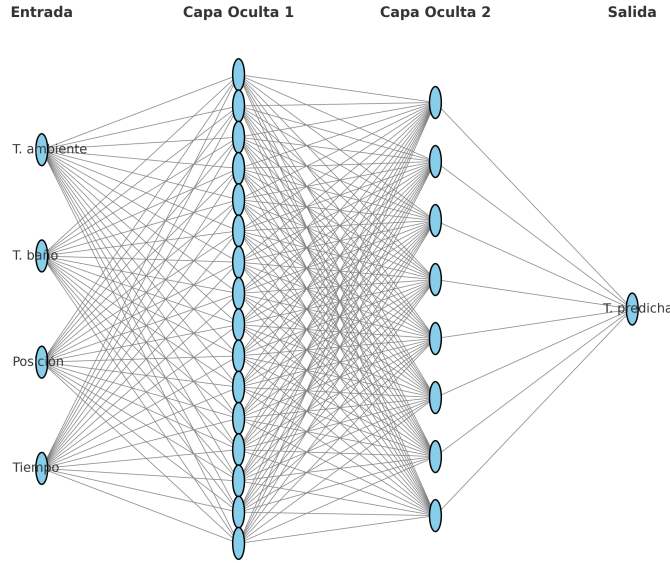


Figura 5: Esquema de la arquitectura de la red neuronal utilizada para el gemelo digital.

5 Resultados y análisis:

El entrenamiento de la red neuronal se realizó a partir de perfiles térmicos medidos experimentalmente para diferentes temperaturas del baño de agua (1.0, 1.3, 1.6 y 2.5 °C). Para cada condición se registraron datos durante al menos cinco minutos después de alcanzado el estado estacionario, asegurando la calidad y estabilidad de las observaciones utilizadas en el aprendizaje del modelo.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de los sensores en función del tiempo durante el proceso de entrenamiento. Puede observarse cómo, a pesar de las distintas condiciones de contorno, la distribución térmica tiende a estabilizarse en cada caso.

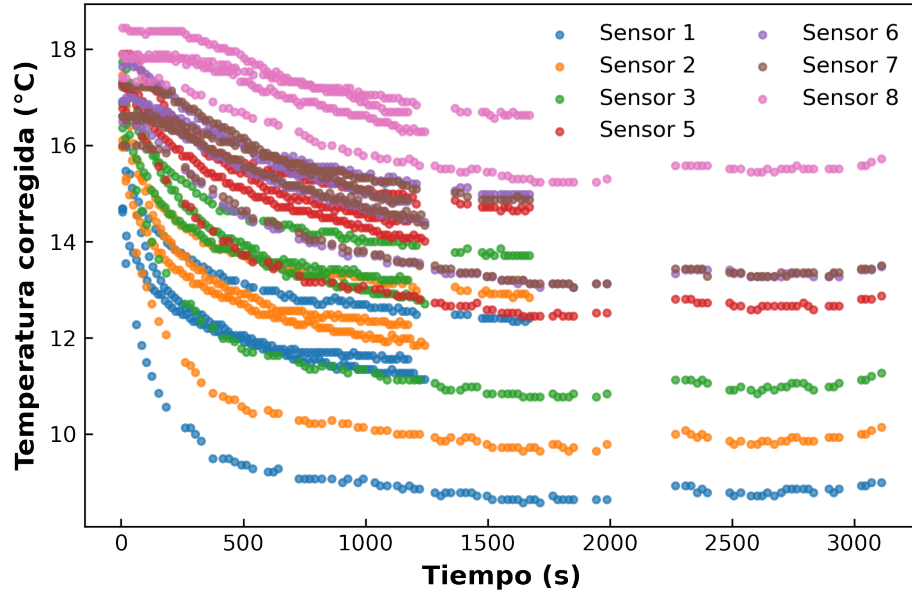


Figura 6: Perfiles de temperatura en la aleta durante los experimentos de entrenamiento, para distintas temperaturas del baño térmico.

El desempeño del modelo se evaluó mediante validación cruzada de 5 pliegues (*5-fold cross-validation*). En la Figura 7 se presenta la gráfica de paridad entre las temperaturas predichas por la red y las temperaturas reales medidas experimentalmente. Los indicadores obtenidos fueron:

- Coeficiente de determinación medio (R^2): **0.9925 ± 0.0010**
- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): **0.0864 ± 0.0049**

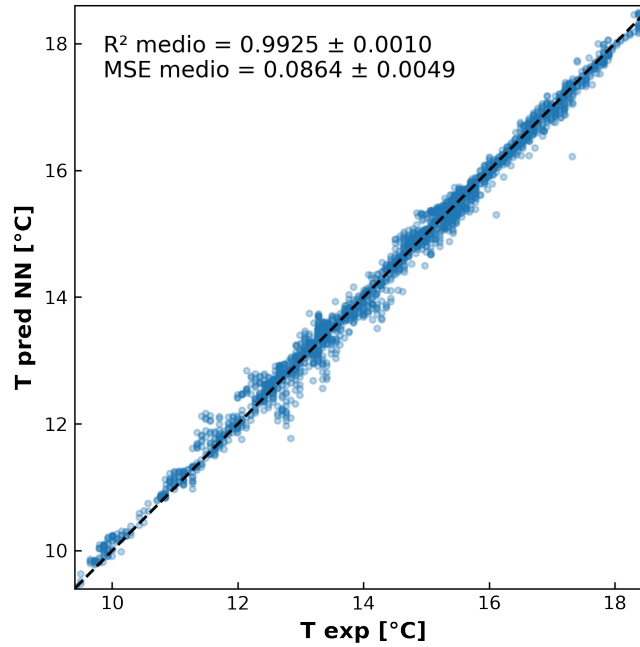


Figura 7: Gráfico de paridad entre la temperatura experimental y la predicha por la red neuronal.

Estos resultados validan que la red neuronal es capaz de capturar con precisión el comportamiento térmico del sistema, actuando como un modelo predictivo confiable para el gemelo digital.

Para probar su capacidad de generalización, se empleó una condición no incluida en el entrenamiento: un baño térmico a 2.0 °C. La Figura 8 muestra el perfil de temperaturas medido por los sensores en esta prueba.

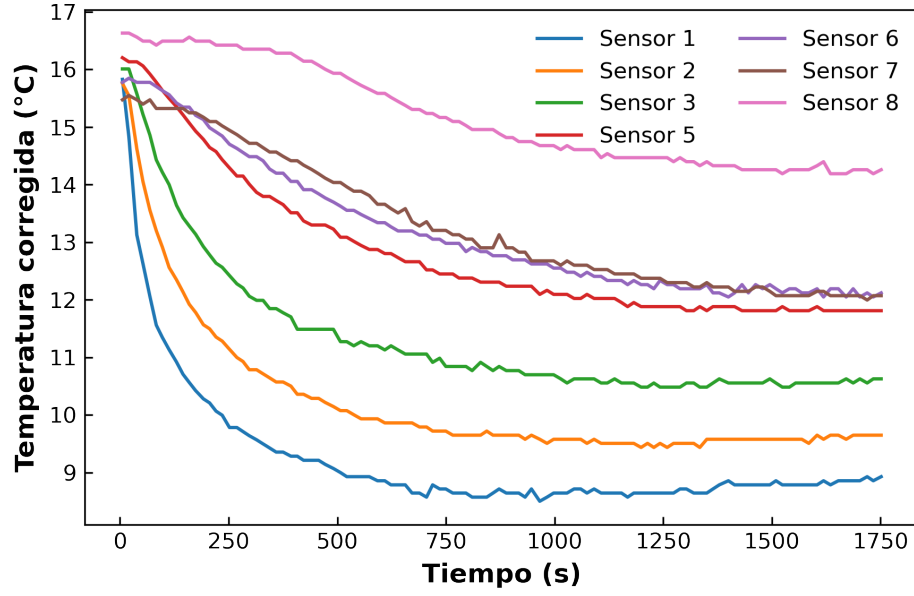


Figura 8: Comportamiento térmico de la aleta bajo una condición de validación (2.0°C en el baño térmico).

Para comparar, se utilizó el promedio de los últimos cinco minutos (estado estacionario experimental) como referencia y se contrastó con las predicciones de la red neuronal. En la Figura 9 se muestra el ajuste obtenido.

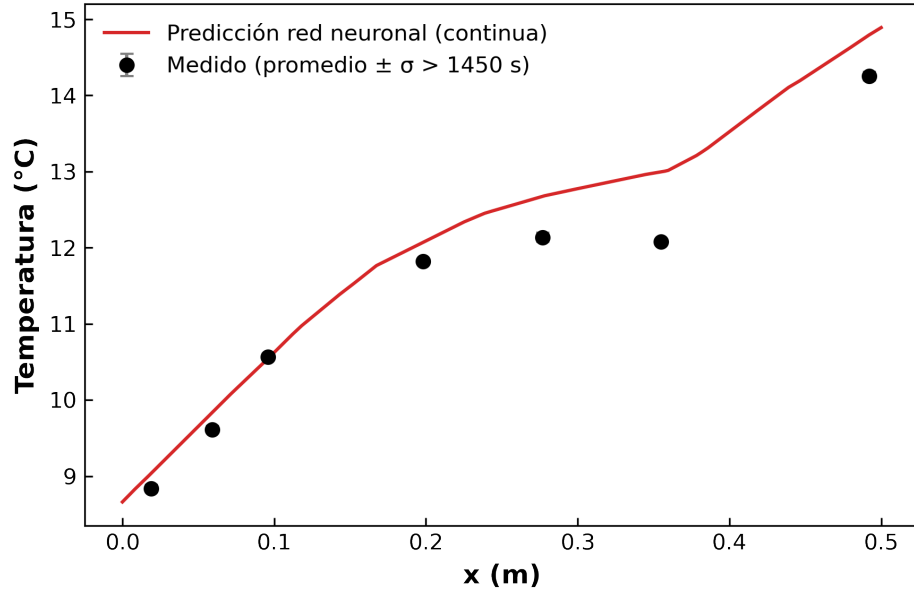


Figura 9: Comparación entre datos experimentales en estado estacionario y predicción de la red neuronal para una condición no vista, las barras de incertidumbre son mas pequeñas que las marcas de las mediciones.

Los resultados estadísticos para esta comparación fueron:

- Error cuadrático medio (MSE): **0.2517**
- Coeficiente de determinación (R^2): **0.9107**

Estos valores muestran un desempeño ligeramente inferior al del conjunto de entrenamiento, como es esperado en una validación real, pero siguen siendo altamente satisfactorios. Esto demuestra que la red neuronal implementada es capaz de predecir con precisión el perfil de temperaturas incluso bajo condiciones no incluidas en su entrenamiento, consolidando su utilidad como componente central del gemelo digital.

6 Limitaciones y mejoras propuestas:

Durante el desarrollo experimental del sistema para adquisición de datos térmicos en la aleta de cobre, se identificaron ciertas limitaciones técnicas que podrían ser abordadas en futuras implementaciones con el fin de mejorar la precisión, estabilidad y robustez del montaje. A continuación, se resumen las principales oportunidades de mejora:

- **Calibración periódica y trazabilidad metrológica:** Aunque se realizó una calibración inicial de los sensores, se recomienda establecer un protocolo de recalibración periódica para garantizar la fiabilidad a largo plazo. Adicionalmente, utilizar un patrón de referencia certificado podría mejorar la trazabilidad metrológica del sistema.
- **Soldar permanentemente la placa y conexiones críticas:** Una de las principales fuentes de inestabilidad detectadas fue la dependencia de la protoboard para las conexiones entre los sensores y la placa ESP32. Las conexiones por presión son susceptibles a falsos contactos, interferencias y desconexiones accidentales. Se recomienda, en futuras versiones, soldar permanentemente los conductores clave a una placa PCB o al menos a conectores tipo header soldados a la placa, asegurando así una mayor estabilidad eléctrica y durabilidad.
- **Homogeneización térmica del sistema de enfriamiento:** La temperatura en el beaker interno puede presentar leves fluctuaciones debido a pérdidas de calor hacia el ambiente o absorción desigual desde el hielo. Mejorar el aislamiento del baño externo o utilizar un baño termostatado controlado permitiría una condición de frontera más uniforme y precisa.
- **Optimización del cableado y ordenamiento físico:** El manejo del cableado puede dificultar el diagnóstico y aumentar el riesgo de errores en las conexiones. Se propone el uso de canaletas o fundas termocontraíbles para agrupar los cables, adicionalmente emplear cables completos desde el sensor hasta la protoboard evitando en uso de borneras innecesarias.
- **Cambios en los protocolos de envío de datos:** El protocolo HTTP, que requiere una confirmación de solicitud cada vez que se envían datos, puede considerarse un método lento en las conexiones de las IOT. Se recomienda reemplazar los protocolos y el destino del envío de los datos a un entorno MQTT que permita conexiones a una red local mediante una "suscripción" previa para no necesitar confirmaciones de solicitudes constantes. Plataformas de IOT como **thingsboard** pueden ofrecer una alternativa a entornos de tablas en paginas web como google sheets.
- **Reducir la dependencia de Arduino IDE:** La constante problematica de conflictos con drivers y paquetes que se necesitaban instalar previamente para poder manipular el programa de la ESP en el entorno Arduino-IDE puede llegar a ser problematico en un principio. Entre menos se tenga que intervenir con modificaciones del código (modificar credenciales de conexión u hoja de destino), mejor para evitar conflictos o fallos con la ESP.

7 Conclusiones:

El presente trabajo logró implementar con éxito un gemelo digital predictivo del perfil de temperaturas en una aleta de cobre, sustentado en datos experimentales obtenidos a través de sensores calibrados y un sistema de adquisición automatizado. La integración de tecnologías IoT mediante una placa ESP8266 y la transmisión de datos a la nube permitieron no solo optimizar el proceso de registro, sino también garantizar una trazabilidad digital robusta del sistema térmico.

El modelo basado en red neuronal artificial demostró una alta capacidad predictiva, alcanzando un coeficiente de determinación $R = 0.9925$ en entrenamiento y $R = 0.9107$ en validación, incluso bajo escenarios no contemplados en el conjunto de entrenamiento. Estos resultados reflejan que la RNA capturó de forma efectiva las relaciones térmicas espaciales y temporales del sistema, consolidándose como una herramienta válida para la predicción del comportamiento térmico en contextos similares. Esto evidencia que el gemelo digital no solo replica el comportamiento observado, sino que también anticipa escenarios fuera del dominio original de entrenamiento, lo cual resulta clave para aplicaciones predictivas y de control.

Asimismo, la incorporación de herramientas de visualización en tiempo real, junto con la automatización en la adquisición de datos, refuerza el enfoque de monitorización remota y análisis inteligente de procesos térmicos, alineándose con las tendencias actuales en digitalización y control de sistemas físicos mediante IoT.

Desde el punto de vista experimental, el montaje desarrollado permitió la adquisición continua y confiable de datos, apoyado en una arquitectura basada en sensores DS18B20 calibrados, conexiones organizadas sobre protoboard y microcontroladores ESP con conectividad Wi-Fi. La visualización a través de una interfaz HTML y el almacenamiento en Google Sheets contribuyeron a mejorar la trazabilidad, la supervisión remota y el análisis del sistema, reforzando la noción de un entorno inteligente e interconectado.

Uno de los aportes más relevantes del trabajo fue la validación de una metodología económica, replicable y educativa para el análisis de fenómenos térmicos transitorios y estacionarios, la cual puede ser implementada en laboratorios académicos con recursos limitados. El uso de tecnologías de bajo costo y plataformas abiertas como Arduino, ESP8266 y servicios de Google demostró que es posible desarrollar sistemas complejos de monitoreo y modelado digital sin requerir equipamiento especializado.

Finalmente, si bien se identificaron algunas limitaciones técnicas —como la latencia del protocolo HTTP y la vulnerabilidad de las conexiones por presión en protoboard—, estas no comprometieron la calidad del experimento. Por el contrario, abren espacio a mejoras viables para futuras implementaciones, como la adopción del protocolo MQTT, la migración a placas PCB y la optimización de la estructura de programación y despliegue del sistema.

References

- [1] J. Brody and M. Brown, “Transient heat conduction in a heat fin,” *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 531–535, July 2017.
- [2] V. S. Vargas, L. T. L. Rocha, and A. L. H. Gonzalez, “Informe #11 – transferencia de calor en superficies extendidas.” Informe de laboratorio no publicado, June 2024.
- [3] A. Bahga and V. Madiseti, *Internet of Things: A Hands-On Approach*. United States: Universities Press, 1st ed., 2015.