

Diseño, Ensamble y Validación Preliminar de un Microsensor Térmico ToF en Tecnología TFS20 para Aplicaciones Hidrométricas

Design, assembly, and preliminary validation of a thermal ToF microsensor in TFS20 technology for hydrometric applications

Coto-Fuentes, H.¹; González-Aroña, I. S.² ✉, Guevara-Amatón, K. V.³

Datos de Adscripción:

¹ Coto Fuentes, Hesner
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
hesnercf@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9548-7864>

² ✉ González Aroña, Itzel Sarahim
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
m.isgonzalez@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3528-3651>

³ Guevara Amatón, Karla Victoria
Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
kvguevaraa@correo.itlalaguna.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2894-4861>

Resumen - La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sensor para medir el caudal en canales a cielo abierto, evitando los arrastres hidrodinámicos generados por las hélices de los medidores de molinete convencionales. Para ello, se propone un dispositivo basado en el principio de tiempo de vuelo (ToF), concebido como una alternativa compacta, robusta y sin partes móviles. El desarrollo se realizó empleando la tecnología TFS20 (Tecnología de Película Delgada de 20 µm), desarrollada en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), a partir del diseño microelectrónico de un chip con un área preliminar de 5 × 5 mm, conforme a las reglas de manufactura establecidas para dicha tecnología. Posteriormente, se fabricó el dispositivo y se realizó su caracterización eléctrica y de funcionamiento en un banco de pruebas, bajo condiciones controladas, en un rango de microflujos de 60 a 90 µL/min, con el propósito de validar experimentalmente el diseño teórico propuesto. Los resultados obtenidos permitieron confirmar la validez del layout mediante una regresión lineal con $R^2 = 0.9556$, verificar el comportamiento eléctrico del dispositivo y de sus elementos constitutivos, así como corroborar la respuesta esperada del sensor bajo condiciones de operación, con un error absoluto máximo de 4.56 µL/min en el incremento de flujo. Asimismo, en las pruebas de repetibilidad a un caudal constante de 70 µL/min, el tiempo de vuelo se estableció en 51.13 ms tras aplicar el filtrado estadístico. Este desarrollo se plantea para su integración en la plataforma hidrométrica KFORO, orientada al monitoreo de caudal en canales a cielo abierto, lo que vincula el diseño del sensor con una aplicación tecnológica específica para la gestión eficiente del recurso hídrico.

Palabras Clave - Medición de caudal, Microelectrónica, Microfabricación, Sensor de flujo, TFS20, Tiempo de vuelo.

Abstract - This research aims to develop a sensor for measuring flow in open channels, avoiding the hydrodynamic drag generated by the propellers of conventional turbine-type meters. To achieve this goal, we propose a device based on the Time-of-Flight (ToF) principle as a compact, robust alternative with no moving parts. The development was undertaken using TFS20 Technology (20 µm Thin Film Technology) at the public research institution Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), based on the microelectronic design of a chip with a preliminary area of 5 × 5 mm, following the previously established manufacturing rules for this technology. Subsequently, the device was manufactured, and its electrical and operational characterization was carried out on a test bench under controlled microflow conditions ranging from 60 to 90 µL/min, to experimentally validate the proposed theoretical design. The results obtained confirmed the validity of the layout via a linear regression with $R^2 = 0.9556$, verified the electrical behavior of the device and its constituent elements, and corroborated the expected response of the sensor under operating conditions with a maximum absolute error of 4.56 µL/min under increasing flow. Furthermore, in repeatability tests at a constant flow rate of 70 µL/min, the flight time was established at 51.13 ms after applying statistical filtering. This development is intended for integration into the hydrometric platform KFORO, designed for flow monitoring in open channels, thus linking the sensor design to a specific technological application related to the efficient management of water resources.

Keywords - Flow measurement, flow sensor, microelectronics, microfabrication, TFS20, Time of flight.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de microsensors de flujo ha cobrado una relevancia importante en distintas aplicaciones, tanto industriales como bioquímicas y agrícolas, debido a la necesidad de medir caudales con alta precisión, un consumo energético mínimo y tamaño reducido. En el ámbito de las técnicas de medición, los sensores basados en el principio de Tiempo de Vuelo (Time of Flight, "ToF") resaltan por su capacidad de calcular la velocidad de un fluido mediante el desplazamiento temporal de una perturbación térmica a lo largo de un canal. El método ToF consiste en generar un pulso térmico mediante un calentador y detectar posteriormente el frente de calor con sensores colocados aguas abajo, utilizando la diferencia de tiempo entre la

emisión y la detección para calcular la velocidad del flujo. Esta técnica presenta ventajas frente a métodos calorimétricos tradicionales debido a su mayor linealidad y menor dependencia a las propiedades térmicas del fluido. (Huang, 2022). Asimismo, las revisiones en el campo microelectrónico validan la alta sensibilidad de las aleaciones metálicas sobre sustratos aislados (Kuo, Yu & Meng, 2012). De este modo, las múltiples aplicaciones actuales demuestran que la generación de pulsos térmicos transitorios permite obtener lecturas precisas en conductos aptos para microfluídica (Lintel et al., 2011), mientras que el modelado matemático de flujos de baja velocidad valida que la sensibilidad a la dispersión calórica disminuye con la optimización geométrica de las pistas (Panhans et al., 2010).

En el presente estudio se propone el diseño y caracterización de un microsensor térmico basado en la tecnología Tiempo de Vuelo, fabricado mediante el proceso TFS20 desarrollado en el Laboratorio Nacional de Micro y Nano Tecnologías del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). El equipo funciona generando un pulso térmico breve mediante un calefactor resistivo de níquel, cuya disipación térmica se produce por efecto Joule. La potencia que genera el calefactor se establece mediante la relación $P = I^2 R$, mientras que la corriente eléctrica suministrada al sistema se obtiene a partir de la Ley de Ohm (Alexander y Sadiku, 2013). A continuación, los sensores RTD dispuestos aguas abajo detectan el movimiento de la onda térmica arrastrada por el flujo, lo que permite determinar la velocidad media del fluido a partir del tiempo de vuelo térmico. El diseño microelectrónico toma en cuenta las limitaciones de fabricación impuestas por el proceso TFS20, que abarcan dimensiones mínimas, grosores de película delgada y parámetros eléctricos de los materiales resistivos. De igual manera, se consideraron diferentes técnicas de soldadura y encapsulado para asegurar la continuidad eléctrica y el aislamiento del dispositivo durante su operación, al estar en contacto con agua. El encapsulado en microsistemas no solo proporciona soporte mecánico, sino también protección contra la humedad y factores externos que pueden comprometer la fiabilidad del dispositivo (Tummala, 2001). Bajo este enfoque, se implementó un encapsulado con resina UV (marca Resin-T) para garantizar la integridad funcional del microsensor.

Adicionalmente, para el funcionamiento óptimo de los microsensores térmicos, se requieren sistemas de acondicionamiento de señal capaces de captar variaciones eléctricas de baja magnitud con alta estabilidad y precisión. Para esto, se hizo uso de un dispositivo PSoC 5LP (Cypress Semiconductor, CY8C58LP), que integra bloques analógicos programables y módulos digitales apropiados para aplicaciones de adquisición de datos compactas de alta resolución (Infineon Technologies, 2023). El sistema diseñado permite monitorear las variaciones de resistencia de los sensores RTD a partir del desplazamiento del pulso térmico en el fluido.

De igual manera, se introdujo una fuente de corriente constante para reducir los errores asociados al sobrecalentamiento del sensor y optimizar la estabilidad de la lectura eléctrica. La digitalización de la señal se realizó mediante un convertidor analógico-digital de 16 bits con muestreo continuo, lo que permitió detectar pequeñas variaciones de voltaje asociadas al frente. Finalmente, la detección del tiempo de vuelo se realizó

mediante un monitoreo en tiempo real basado en un umbral diferencial respecto a una línea base previamente definida, una estrategia que se utiliza comúnmente en sistemas de detección térmica para reducir las falsas detecciones y optimizar la fiabilidad en la recolección de datos (Infineon Technologies, 2023).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Fundamentos teóricos y modelado matemático

El diseño del microsensor se basa en el principio de operación ToF (Time-of-Flight), en el que se genera un pulso eléctrico que provoca un aumento de temperatura en el calefactor, el cual, a su vez, es detectado por un sensor de temperatura tipo RTD en la parte inferior. La diferencia de tiempo entre la emisión de la onda de calor y su detección por el sensor resistivo puede utilizarse para medir el caudal (Rodrigues & Furlan, 2009). El sensor funciona cuando un breve pulso térmico es generado por un calefactor resistivo elaborado a partir de níquel. Mediante la ley de calentamiento de Joule (Alexander & Sadiku, 2013), se determina la potencia de disipación térmica (P) generada por dicho pulso, expresada en (1).

$$P = I^2 R \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de corriente suministrada al elemento y R corresponde a la resistencia eléctrica. Haciendo uso de la Ley de Ohm (Alexander & Sadiku, 2013) en (2) se obtiene la intensidad de corriente en el dispositivo.

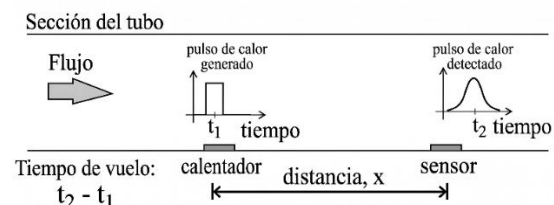
$$V = R * I \quad (2)$$

Con una fuente de alimentación a 3.3 volts y una resistencia aproximada de 300 Ω , el valor correspondiente a la corriente eléctrica es de 11 mA, logrando una disipación máxima de 36.3 mW en el diseño propuesto, para las pruebas experimentales se utilizó una potencia real de 7.5 mW con el fin de garantizar la estabilidad del dispositivo.

El impulso es arrastrado por el flujo hacia los sensores de temperatura de tipo RTD, situados aguas abajo. Estos miden la diferencia de tiempo existente entre la generación del pulso térmico (t_1) y la detección del frente térmico de calor en el sensor receptor (t_2) (Panhans et al., s.f.). Esa diferencia de tiempo, mostrada en (3), se denomina tiempo de vuelo (Rodrigues & Furlan, 2009).

$$\Delta = t_2 - t_1 \quad (3)$$

Figura 1
Medición de caudal mediante principio de Tiempo de Vuelo.



Luego de obtener el dato del tiempo de vuelo térmico (Δt) y con el conocimiento de la distancia de separación física (L) entre el calentador y el sensor situado aguas abajo, la velocidad media del fluido se calcula a partir de (4):

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (4)$$

Al determinar el área de sección transversal (A) correspondiente al canal de riego o la manguera acoplada al sensor por donde circula el fluido, en (4) se calcula el caudal (Q) mediante la ecuación de continuidad (Cengel & Cimbala, 2018).

$$Q = v * A = \frac{L}{\Delta t} * A \quad (5)$$

El uso de ecuaciones matemáticas para obtener el flujo en determinados medios, garantizan que los datos proporcionados por los sensores de tiempo de vuelo faciliten el procesamiento de la señal del flujo al tratarse de dispositivos con menor dependencia respecto a variaciones moderadas de las propiedades térmicas del fluido, en comparación con configuraciones calorimétricas convencionales (Huang, 2022).

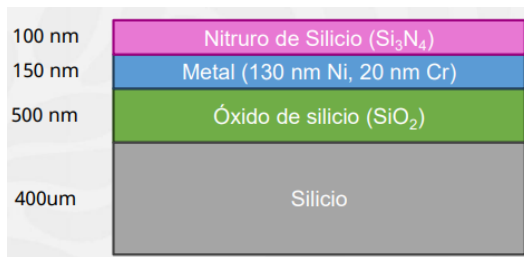
2.2. Diseño microelectrónico y especificaciones de manufactura

El proceso TFS20 (Tecnología de película delgada de 20 μm), desarrollado en el Laboratorio Nacional de Micro y Nano Tecnologías (LNunT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI, consiste en la elaboración de dispositivos del tipo resistivos y estructuras pasivas sobre sustratos de silicio sometidos a un tratamiento de oxidación (Sánchez & Chávez, 2025).

La Figura 2 muestra la arquitectura multicapa principal del dispositivo. La base está elaborada a partir de un sustrato de silicio (Si) de 400 μm de espesor sobre el cual se coloca una capa de dióxido de silicio (SiO_2) de 500 nm, esta actúa como aislante térmico y eléctrico. Posterior a ello, los elementos resistivos, las pistas de conexión interna y los pads de contacto se elaboran a partir de una aleación de 130 nm de níquel y 20 nm de cromo. Finalmente, el dispositivo es protegido con una fina capa de pasivación de 100 nm elaborada a partir de nitruro de silicio (Si_3N_4), la cual cuenta con aperturas específicas para permitir el acceso eléctrico a los pads de conexión (CIDESI, 2025).

Figura 2

Proceso de una capa metálica micrograbada.



La Tabla 1 muestra las especificaciones eléctricas y constantes que emplea la tecnología de película delgada, incluyendo parámetros como la resistencia por cuadro y las constantes

dieléctricas. Estas constantes son de suma importancia para validar el modelo matemático del sensor y la predicción de las respuestas térmicas ante variaciones en el flujo

Tabla 1

Especificaciones técnicas proceso CIDESI TFS20

	Valor	Unidad
Resistencia por cuadro de metal	0.64	$\Omega/\square$
Capacitancia entre pistas de metal sin nitruro	0.89	aF
Capacitancia entre pistas de metal con nitruro	7.5	aF
Coefficiente de temperatura de metal	0.00587	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Constante dieléctrica de nitruro de silicio	8.5	Adimensional
Constante dieléctrica de óxido de silicio	3.9	Adimensional

Nota: $\Omega/\square$ representa ohms por cuadro. Las capacitancias reportadas corresponden a valores de referencia del proceso TFS20; su interpretación depende de la geometría específica de las pistas y de la configuración física del dispositivo.

El diseño geométrico (layout) del circuito se diseñó para conformar un chip con dimensiones finales de 5 x 5 mm. Para salvaguardar la integridad física del dispositivo y minimizar errores de fabricación, el diseño se apegó a las reglas de manufactura del proceso TFS20 (Sánchez & Chávez, 2025).

Entre las restricciones más importantes destaca que los elementos (ancho de pistas, espaciado y muescas) cumplieran con una dimensión mínima de 20 μm , además de evitar la colocación de componentes en el área delimitada como "región reservada" y se evitaban superposiciones innecesarias en los polígonos. Asimismo, se implementó un etiquetado riguroso a las estructuras como método para garantizar la identificación de las terminales eléctricas post procesado.

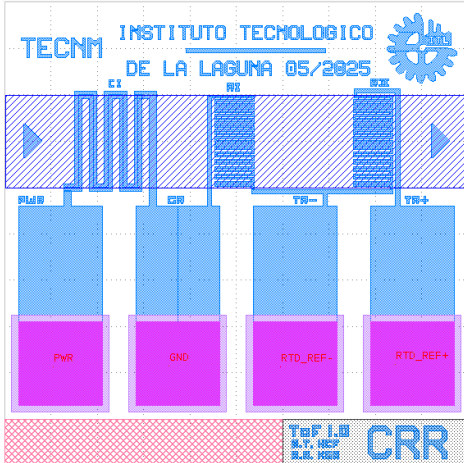
Tomando como base los requerimientos mencionados, se procedió al trazado de la distribución del microsensor empleando la herramienta de diseño KLayout. El sensor opera mediante la generación de un pulso térmico breve producido por un calefactor resistivo de níquel. El diseño contempla una potencia máxima estimada de 36.3 mW; sin embargo, durante las pruebas experimentales se utilizó una potencia real aproximada de 7.5 mW, con el propósito de reducir el estrés térmico y preservar la integridad física del dispositivo. Este pulso es arrastrado por el flujo a través del conducto, donde los elementos RTD posicionados aguas abajo permiten detectar la perturbación térmica y estimar la velocidad del fluido a partir del tiempo de vuelo.

El calefactor presenta una resistencia aproximada de 300 Ω y fue diseñado para operar con un voltaje máximo de 3.3 V. De acuerdo con la Ley de Ohm, esta condición corresponde a una corriente máxima cercana a 11 mA. Los RTD, fabricados en níquel, presentan una resistencia eléctrica aproximada de 2.3 Ω . En la arquitectura original, ambos sensores se encuentran conectados en serie y alimentados mediante una fuente de corriente constante, utilizando el punto de unión como referencia o tap central. Esta configuración permite realizar mediciones diferenciales entre los extremos del conjunto, como se observa

en la Figura 3. No obstante, en la validación experimental reportada en este trabajo se utilizó un único receptor funcional, R1, debido a las limitaciones derivadas del proceso de encapsulado.

Figura 3

Diseño de la arquitectura del dispositivo en Klayout.



2.3. Integración física y ensamble del dispositivo

La instrumentación del diseño microelectrónico a un dispositivo funcional requiere una fase de integración física que se centra en la interconexión de los pads del chip hacia una placa de circuito impreso (PCB).

En la etapa inicial se evaluó el uso de una estación de aire caliente para realizar el proceso de soldadura. Sin embargo, este método presenta limitaciones técnicas: El flujo de aire proyectado provoca el desprendimiento de los cables de conexión antes de la solidificación. Asimismo, la exposición del dispositivo a un flujo constante de temperatura elevada provoca daños irreversibles sobre la capa de pasivación de nitruro de silicio, además de provocar la oxidación prematura de las terminales de contacto. Debido a los problemas que presenta esta técnica, se propuso como una mejor alternativa el uso de una cama caliente para el proceso de soldadura. CIDESI recomienda una temperatura máxima de trabajo de 200 °C.

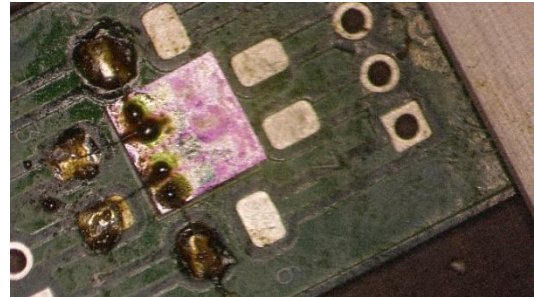
Si bien el estándar propuesto por CIDESI para este proceso es la pasta para soldar Multicore Loctite LF318, que resalta por su excelente adherencia y una mínima generación de residuos (Henkel Adhesive Technologies, 2023), presenta una notable dificultad de adquisición local. Se recurrió a experimentar con otras alternativas comerciales de más fácil acceso, y con aquellas disponibles en el laboratorio de trabajo.

Inicialmente se empleó soldadura de estaño en pasta **BAKU BK-5051**, la cual mantiene una temperatura de fusión de 183 °C elaborada a base de la aleación Sn₆₃/Pb₃₇, ideal para reparaciones de microchips de diferentes aparatos electrónicos, además de contar con características como secado rápido, limpieza con facilidad, leve detección de aroma y compatibilidad con otros tipos de soldadura (Ofiteck, s.f.).

Al ser material disponible en el laboratorio de instrumentación electrónica, se desconoce si previamente se le incorporó algún tipo de flux, como se puede observar en la Figura 4, se generaron residuos que imposibilitaron el contacto entre terminales.

Figura 4

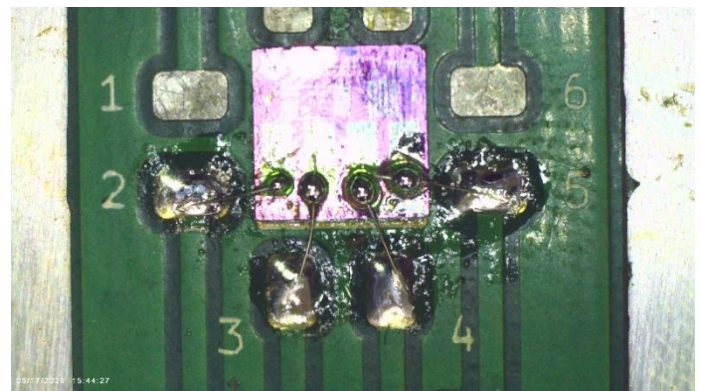
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando estaño en pasta BAKU BK-5051.



En la segunda etapa se utilizó una soldadura en pasta de precisión en formato de mini jeringa, elaborada conforme el estándar IPC J-STD-006, su diseño permitió una dosificación controlada sobre los pads del microchip compartiendo con la soldadura en pasta BAKU BK-5051 los mismos estándares de aleación y temperatura de fusión (IPC, 2018a). Para esta prueba, la soldadura se fusionó con el flux *Mechanic UV 559 No-clean*, adecuada para evitar fugas eléctricas y cortocircuitos tras el residuo (IPC, 2008b). El uso de estos materiales en conjunto repercutió directamente en el acabado final con un enfoque negativo, el flux al calentarse creó una fina capa aislante de polímero que se fusionó con el níquel de los pads de conexión, como se observa en la figura 5, imposibilitando la comunicación además de provocar un daño permanente en las terminales.

Figura 5

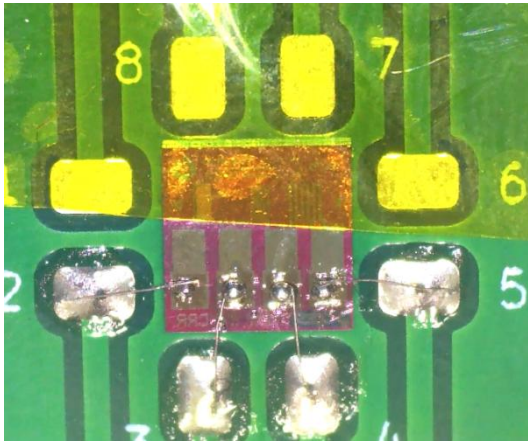
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando soldadura en pasta elaborada conforme el estándar IPC J-STD-006 en aleación con flux Mechanic UV 559.



Con el fin de evitar complicaciones en el proceso de soldadura, se optó por evadir el uso de flux y utilizar la soldadura en pasta *Mechanic XGSP50* de uso industrial, esta destaca por poseer un tamaño de partícula de 3µm, valor adecuado para trabajar sobre dispositivos de tamaños microscópicos (Mechanic Precision Tools, 2024). Su composición y temperatura de fusión no difiere de pastas para soldar utilizadas en las pruebas anteriores, la diferencia radica en el uso de flux para preparar la superficie del chip.

Como se puede observar en la Figura 6, a diferencia de los otros procesos, priorizar el uso de soldadura sin algún aditamento extra garantizó la unión adecuada entre los contactos de níquel y el cable de conexión, el cual consistió en un filamento delgado de cobre y estaño extraído del laboratorio con un diámetro aproximado de 0.1 mm, además de tener un acabado estético más profesional

Figura 6
Proceso de soldadura en cama caliente utilizando soldadura en pasta Mechanic XGSP50 sin flux.



La Tabla 2 resume la comparativa entre los materiales evaluados durante la fase de caracterización del sensor. Se destaca que, ante la dificultad de adquirir el estándar sugerido por el fabricante, la opción preliminar para llevar a cabo el proceso es una soldadura en pasta cuyo tamaño de partícula se encuentre en un aproximado de 3 µm y la omisión de flux.

Tabla 2
Comparativa de soldaduras en pasta para la caracterización de microchips fabricados en tecnología TFS20

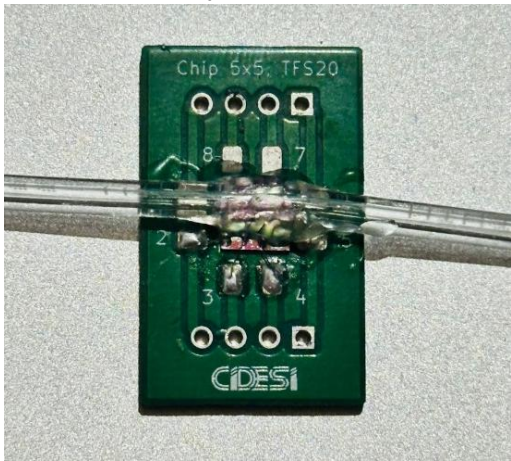
Material	Temperatura de fusión	Características	Resultado experimental
Loctite LF318	217 °C	Aleación SAC305; libre de halógenos; alta estabilidad	No utilizada
BAKU BK-5051	183 °C	Aleación Sn ₆₃ /Pb ₃₇ ; partículas de 25~45 µm	No satisfactorio
Soldadura IPC J-STD-006	183 °C	Estándar IPC J-STD-006; aplicación manual	No satisfactorio
Mechanic XGSP50	183 °C	Tamaño de partícula de 3 µm; alta viscosidad	Exitoso

Finalmente, después de asegurar la conductividad eléctrica entre las terminales del dispositivo, se procedió con la etapa de aislamiento mediante un proceso de encapsulado. Los principios del empaquetado en microsistemas establecen que el encapsulado no solo aporta soporte mecánico, sino que actúa como una barrera que protege a los dispositivos de agentes externos que comprometen la fiabilidad de este, como lo es la humedad (Tummala, 2001). Debido a su operación, el sensor está en contacto con agua constantemente, por lo que es de vital

importancia garantizar un sellado hermético que no comprometa su capacidad de funcionamiento.

Con este fin, se utilizó una resina ultravioleta (UV) de tipo rígido de la marca Resin-T. Se trata de un producto de naturaleza genérica, por lo que su selección se basó en el análisis de propiedades estándar para resinas de polimerización acrílica. Este material presenta una viscosidad de 150-300 cps y una dureza final de 80 Shore D, garantizando durabilidad mecánica contra la erosión del flujo (Resin-T, 2024). El proceso consistió en colocar una fina capa de resina sobre los pads de níquel con el objetivo de aislar la zona en caso de posibles fugas de agua, posteriormente se crearon dos paredes horizontales en la parte superior e inferior de los elementos resistivos para posicionar una manguera de precisión para microfluídica de la marca Ismatec (IDEX Health & Science) con formulación Tygon LMT-55. El material se seleccionó debido a su estructura interna, contar con paredes lisas reduce las perturbaciones mecánicas y favorece un flujo laminar estable (IDEX Health & Science, 2024). Las dimensiones del conducto corresponden a un diámetro interno de 1.02 mm y un espesor de pared de 0.85 mm, a esta se le realizó una incisión preliminar de 5 mm x 2 mm. Posteriormente se añadió resina en pequeños bloques para cuidar que esta no fluyera al interior del chip, ocasionando contaminación en los elementos sensores. Para comprobar el aislamiento, con el uso de una jeringa se inyectó un flujo de agua que delató las irregularidades en el recubrimiento. Como se puede apreciar en la Figura 7, el encapsulado cubre toda la parte activa del chip, lo cual es crítico para evitar fugas de corriente y mantener la integridad del dispositivo.

Figura 7
Caracterización del sensor de flujo.



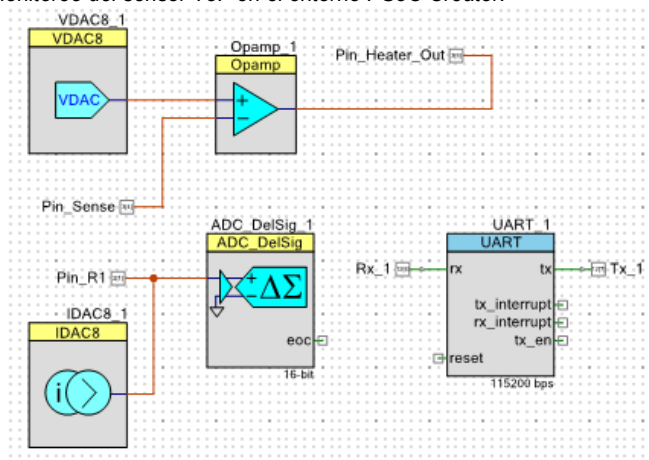
2.4. Acondicionamiento de señal y adquisición de datos

De acuerdo con las especificaciones de Infineon Technologies (2023), el dispositivo PSoC 5LP (Programmable System-on-Chip) integra bloques analógicos con la capacidad de procesar datos con una alta precisión y lógica digital programable, características ideales para trabajar con sistemas de adquisición de datos compactos, precisos y estables. El sistema está diseñado para detectar variaciones de resistencia en los RTD. La arquitectura del dispositivo permite realizar mediciones en diferentes configuraciones; sin embargo, en este

estudio se validó la detección básica de Tiempo de Vuelo utilizando un único receptor funcional, identificado como R1. Para instrumentar el dispositivo, la estructura del sistema de adquisición de datos se divide en tres subsistemas de operación, los cuales se gestionan a través de los microcomponentes del dispositivo, como se observa en el esquema de la Figura 8:

Figura 8

Diagrama de conexión de bloques analógicos y digitales para el control y monitoreo del sensor ToF en el entorno PSoC Creator.



A. Excitación térmica

Para activar la resistencia calefactora, se empleó un convertidor digital-analógico de voltaje con rango de salida de 0 a 4.080 V. La señal fue transferida a un amplificador operacional interno configurado como seguidor de voltaje, con el propósito de aplicar una excitación controlada al calefactor. Durante las pruebas experimentales, la corriente de activación se ajustó a 5 mA, correspondiente a una potencia aproximada de 7.5 mW para una resistencia de 300 Ω .

B. Digitalización y monitoreo de datos

Mediante el uso de una fuente de corriente constante, se suministran 50 μ A para alimentar el sensor resistivo, dicha magnitud fue seleccionada para obtener una lectura estable, minimizando el error por sobrecalentamiento. La señal es procesada por un convertidor de 16 bits cuya tasa de muestreo es de 2000 muestras por segundo. Las variaciones sutiles en el voltaje son detectadas debido a la configuración de conversión continua, primordiales para identificar de manera precisa el pulso térmico en el fluido.

C. Detección del tiempo de vuelo

El proceso de detección del frente térmico comienza estableciendo un valor base obtenido mediante el promedio de 10 muestras iniciales. Se establece un intervalo de espera de 25 ms después del pulso de calor para filtrar señales eléctricas inestables, el sistema está configurado para monitorear en tiempo real. El tiempo de vuelo es registrado en cuanto la lectura tiene un valor de 200 μ V superior a la línea base. Con la finalidad de asegurar la validez del sistema, el proceso de detección se detiene 8000 ms después de iniciar la entrada de datos ante la ausencia de una señal válida.

2.5. Configuración experimental y protocolo de pruebas

Después de validar el proceso de adquisición de datos y el sistema de control, se estableció un entorno controlado y reproducible con el objetivo de caracterizar la respuesta del microsensor bajo condiciones de flujo variable.

Para la simulación del flujo se integró un sistema compuesto por una bomba de jeringa programable mononivel modelo NE-501 (New Era Pump Systems, Inc.). Dada su estructura de alta precisión electromecánica, es posible eliminar las inestabilidades mecánicas asociadas a la inyección manual, garantizando un flujo continuo (New Era Pump Systems, Inc., 2024). Las especificaciones de operación de este montaje se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3

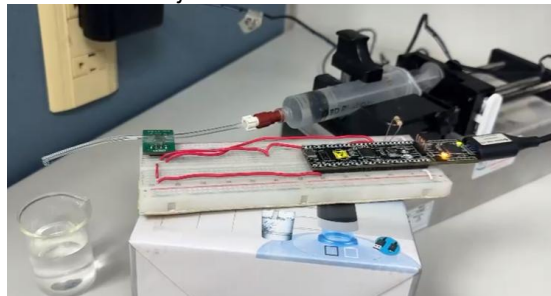
Configuración de operación del sistema de inyección.

Parámetro	Valor usado
Bomba	NE-501 New Era Pump Systems
Jeringa	20 mL
Diámetro interno configurado	19.3 mm
Caudales crecientes	60, 70, 80 y 90 μ L/min
Caudal de repetibilidad	70 μ L/min
Caudales decrecientes	85, 75 y 65 μ L/min
Tiempo de estabilización	1 minuto
Pulso térmico	20 ms
Corriente del calefactor	5 mA
Corriente del RTD	50 μ A
Frecuencia de muestreo	2000 muestras/s

Al bloque de sujeción de la bomba se acopló una jeringa de grado médico con capacidad de 20 ml y un diámetro interno estándar de 19.3 mm. El software de la bomba NE-501 utiliza este diámetro como parámetro base para calcular el flujo, la salida de la jeringa se ensambló directamente al extremo de la micromanguera a través de un adaptador. Controlar el caudal mediante este sistema permite conocer analíticamente la velocidad lineal del fluido sobre el chip para correlacionarla con el ToF. En la Figura 9 se presenta el montaje experimental utilizado, donde se puede observar la conexión de la micromanguera con la bomba de jeringa, alineadas horizontalmente para favorecer la estabilidad del flujo.

Figura 9

Integración de la bomba de jeringa NE-501 con la micromanguera acoplada al sensor de flujo.



El procedimiento inició manteniendo un flujo constante durante al menos 1 minuto, con el objetivo de desalojar burbujas de aire presentes en el conducto y favorecer la estabilidad de la lectura. Posteriormente, una vez estabilizado el caudal programado en la bomba, se envió el comando de activación mediante el monitor serial de Arduino, utilizando comunicación UART a una velocidad de 115200 bps. El disparo del pulso térmico de 20 ms activó una digitalización continua a 2000 muestras/s. Aunque el diseño contempla una potencia máxima de 36.3 mW, las pruebas se realizaron con una potencia real aproximada de 7.5 mW, con el fin de salvaguardar la integridad física del sensor. Este proceso permitió detectar el instante en que la señal del RTD R1 superó el umbral dinámico de 200 μ V respecto a la línea base. Este valor se determinó a partir de un criterio de diseño que situara el valor por encima de la resolución teórica de medición del ADC de 16 bits del PSoC 5, además de alejarse significativamente de las derivas térmicas observadas en las pruebas base durante la fase de estabilización del flujo; con ello se asegura un disparo robusto ante la detección del impulso térmico sin el riesgo de activaciones falsas por factores externos. Debido al enfoque de validación de este estudio, la magnitud del umbral se fijó de manera analítica como recurso de seguridad ante la aparición de ruido eléctrico en el sistema, por lo que no se realizaron comparaciones experimentales con otros valores de umbral. La evaluación y optimización de este parámetro se contempla como parte del trabajo futuro.

Finalmente, el tiempo de vuelo (ToF) calculado y los voltajes pico se almacenaron mediante la interfaz serial de Arduino.

2.6. Integración con plataforma hidrométrica

Se contempla la integración del microsensor ToF a la plataforma hidrométrica KFORO con el objetivo de crear un dispositivo capaz de monitorear en tiempo real el caudal en canales de riego a cielo abierto. Cabe destacar que el principio de operación del sensor cuantifica la velocidad local del flujo en contacto directo con la superficie activa del chip. Al entrar en contacto el dispositivo con el canal, la velocidad del fluido (v_{canal}) y las interacciones de presión sobre el área activa del sensor se modelan mediante la ecuación de Bernoulli (6) para flujo hidrodinámico unidimensional (White, 2019).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 \tag{6}$$

Se considera una línea de corriente que va desde el flujo libre del canal (P_1) hasta la zona de contacto con la superficie del microsensor (P_2), la diferencia de altura se asume como despreciable debido al posicionamiento del dispositivo ($Z_1 \approx Z_2$), la velocidad del flujo que mueve el frente térmico se relaciona directamente con la energía cinética del canal (Chow, 2004). El principio de Tiempo de Vuelo (ToF) mide la velocidad del flujo a partir de una distancia L conocida entre el calefactor y el RTD receptor (Huang, 2022). El sensor proporcionará una estimación local de velocidad. Para estimar el caudal del canal será necesario correlacionar dicha velocidad local con la velocidad media de la sección hidráulica mediante calibración experimental en canal abierto. El caudal macroscópico del canal de riego se calcula a través de la detección de la velocidad media y el área de la sección transversal del mismo mediante (7) la ecuación de

continuidad para canales abiertos (Mott & Untener, 2015).

$$Q_{canal} = v * A = \left(\frac{L}{\Delta t}\right) * b * y \tag{7}$$

Donde b representa la base de la sección transversal del canal y y corresponde al nivel de agua medido en tiempo real por KFORO.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas físicas del microsensor de flujo. Los datos se dividen en tres fases esenciales: análisis dinámico entre caudales variables, evaluación de repetibilidad bajo flujo controlado y análisis final de posibles efectos de memoria térmica del sistema.

A. Análisis dinámico y curva de calibración

Para evaluar la respuesta dinámica del sistema en un entorno de variaciones controladas, se aplicaron caudales crecientes en un rango de 60 a 90 μ L/min. Para cada flujo el sistema tuvo un valor fijo de inyección de corriente en cada componente, siendo 5 mA para el calentador en un pulso de 20 ms y 50 μ A para el sensor resistivo.

La Tabla 4 muestra los tiempos de vuelo promedio registrados para cada flujo, se observa una disminución inversamente proporcional en el tiempo de respuesta conforme el valor del flujo se mantuvo en aumento. En (8) se relaciona el inverso del caudal ($1/Q$) inyectado con el del tiempo de vuelo medido, mediante una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados.

$$y = 8043.3x - 62.118 \tag{8}$$

Donde y representa el tiempo de vuelo obtenido en ms y x corresponde al inverso del caudal teórico expresado en min/ μ L. El coeficiente de determinación obtenido fue de $R^2 = 0.9556$, los resultados muestran una correlación adecuada dentro del intervalo evaluado, aunque la repetibilidad aún se ve afectada por perturbaciones hidráulicas y burbujas en el conducto, tal como se muestra en la Figura 10.

Tabla 4
Resultados de la prueba de caracterización de sensor ToF para la medición de caudal

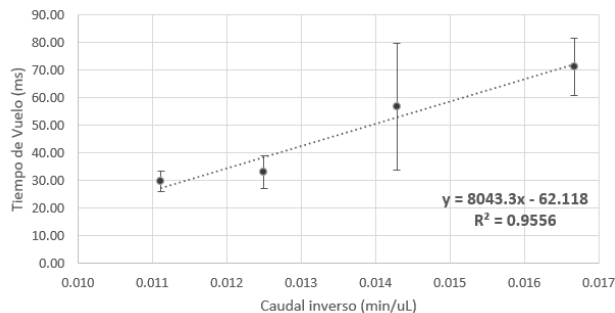
Caudal (μ L/min)	ToF medido (ms)	Promedio ToF (ms)	D. E. (σ)	C. V. (%)	EMA
60	62	71.00	10.34	14.56	7.60
	70				
	62				
	74				
	87				
70	25	56.80	22.90	40.32	19.04
	69				
	80				
	41				
	40				
80	27	33.00	5.79	17.55	4.40
	35				

	27				
	36				
	28				
	27				
90	36	29.60	3.65	12.33	2.56
	29				
	28				

Nota: D. E. corresponde a la desviación estándar muestral expresada en ms; C. V. corresponde al coeficiente de variación expresado en porcentaje; y EMA corresponde al error medio absoluto de las mediciones respecto al promedio del grupo, expresado en ms.

Aunque la tendencia es clara, existe una variabilidad en el caudal de 70 µL/min, esto se atribuye a perturbaciones hidráulicas y presencia de burbujas en el conducto.

Figura 10
Curva de calibración del microsensor ToF: relación entre el caudal aplicado y el tiempo de vuelo térmico detectado. Las barras de error representan la desviación estándar muestral (n = 5).



Con el fin de demostrar formalmente la validez de los datos obtenidos por el sensor de tiempo de vuelo, se corroboraron los caudales obtenidos en comparación a los de referencia teórica inyectados por la bomba, mediante (8) se obtiene (9) para calcular el caudal.

$$Q_{calculado} = \frac{8043.3}{ToF_{medido} + 62.118} \tag{9}$$

El error absoluto y los tiempos de vuelo promedio registrados en esta prueba se concentran en la Tabla 5.

Tabla 5
Evaluación del error absoluto en la medición del caudal con el microsensor de tiempo de vuelo.

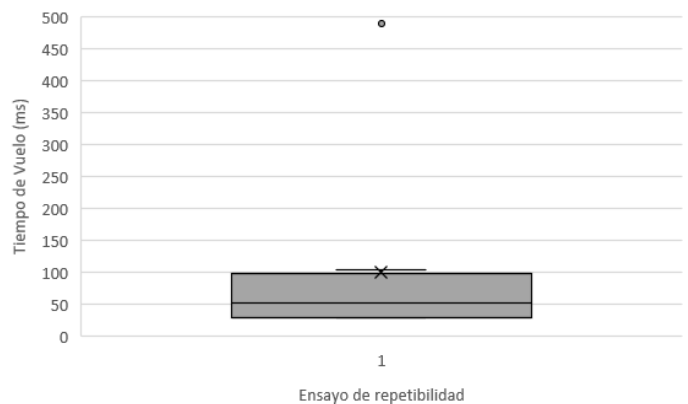
Caudal teórico (µL/min)	ToF promedio (ms)	Caudal práctico calculado (µL/min)	Error absoluto
60	71.00	60.42	+0.42
70	56.80	67.64	-2.36
80	33.00	84.56	+4.56
90	29.60	87.70	-2.30

El error absoluto máximo observado en la prueba de flujo creciente fue de 4.56 µL/min. Este resultado indica que la etapa de adquisición de datos permite estimar el caudal con una correspondencia adecuada respecto a los valores programados en la bomba de jeringa, dentro del intervalo experimental evaluado.

Posteriormente, se ejecutó un ensayo de repetibilidad empleando un caudal constante de 70 µL/min para obtener 10 muestras consecutivas del frente térmico; sin embargo, se registraron lecturas anormales que alcanzaron valores críticos de hasta 489 ms. Estas inestabilidades del sistema se atribuyen directamente a perturbaciones derivadas de la bomba de inyección y a filtraciones de burbujas de aire en el conducto.

Como alternativa para reducir el efecto de las lecturas atípicas, se aplicó un filtrado estadístico de datos basado en el criterio analítico del Rango Intercuartílico (RIC), este identifica formalmente como valores atípicos aquellos que exceden el límite superior de la distribución ($Q_3 + 1.5 * RIC$), de acuerdo con el método de detección de datos anómalos donde Q_3 representa el tercer cuartil de los datos ordenados de menor a mayor (Tukey, 1977). A partir de este criterio, de las 10 muestras recolectadas, la medición de 489 ms fue la única que excedió el umbral establecido, por lo que las 9 muestras restantes se mantuvieron para el análisis estadístico. Después de este procesamiento, el tiempo de vuelo promedio se consolidó en 51.13 ms, valor que permitió estimar un caudal práctico de 71.03 µL/min, es decir, 1.03 µL/min por encima del caudal programado. La dispersión de las mediciones, así como la identificación del comportamiento atípico, se muestran mediante el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 11.

Figura 11
Diagrama boxplot para la prueba de repetibilidad a 70 µL/min.



Con el fin de validar la confiabilidad del sistema de medición y garantizar su reproducibilidad, se realizó una estimación de la incertidumbre metrológica en base a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM; JCGM, 2008). Mediante las contribuciones de Tipo A y Tipo B se calculó la incertidumbre combinada (u_c) del Tiempo de Vuelo.

La incertidumbre de Tipo A (u_A) se determinó a partir de la variabilidad estadística de la respuesta en un ambiente de repetibilidad a un caudal de 70 µL/min. Haciendo uso de la desviación estándar de las 9 mediciones válidas después del filtrado ($\sigma = 30.78 \text{ ms}$), se obtuvo un valor de $u_A = 10.26 \text{ ms}$.

Para la evaluación de Tipo B (u_B) se consideró la resolución instrumental del sistema de adquisición de datos. El convertidor analógico-digital del PSoC 5LP opera a una frecuencia de 2000 muestras/s, la resolución temporal del sistema es de 0.5 ms. Al considerar la probabilidad rectangular que caracteriza a los equipos digitales, se determinó una incertidumbre instrumental de $u_B = 0.144 \text{ ms}$.

La incertidumbre combinada del sistema tomó un valor de $u_c = 10.26 \text{ ms}$. Asumiendo un nivel de confianza del 95%, se determina el factor de cobertura $k = 2$, de este modo la incertidumbre expandida (U) de la medición del Tiempo de Vuelo se estableció en $\pm 20.52 \text{ ms}$. El análisis demuestra que la mayor contribución de la incertidumbre del sistema proviene de las perturbaciones físicas del fluido (Tipo A) y no de la parte de acondicionamiento de la señal (Tipo B), lo que valida la precisión de la tarjeta PSoC 5LP para esta aplicación.

Finalmente, se llevó a cabo una tercera prueba para evaluar el comportamiento del dispositivo ante una disminución progresiva del caudal, después de haber sido sometido a las pruebas de flujo creciente y repetibilidad. Los resultados resumidos en la Tabla 6 permiten observar la respuesta del sistema bajo condiciones de flujo descendente y analizar posibles efectos de memoria térmica asociados al calentamiento acumulado del sustrato y de las pistas metálicas.

Tabla 6

Evaluación del error absoluto en la medición del caudal decreciente.

Caudal teórico ($\mu\text{L}/\text{min}$)	ToF promedio (ms)	Caudal práctico calculado ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Error absoluto
85	38.20	80.18	-4.82
75	40.17	78.64	+3.64
65	41.67	77.50	+12.50

Al disminuir el caudal a $65 \mu\text{L}/\text{min}$, se observó un incremento notable en el error absoluto, alcanzando un valor de $12.50 \mu\text{L}/\text{min}$ por encima del flujo programado. Debido a la cantidad limitada de datos experimentales, este comportamiento no se define formalmente como histéresis, sino como un indicio de memoria térmica del sustrato de silicio y de las pistas metálicas del dispositivo. Este fenómeno podría estar asociado al calentamiento acumulado durante las pruebas de flujo creciente y a la limitada remoción de calor en condiciones de bajo caudal.

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó, ensambló y validó de manera preliminar un microsensor térmico de flujo basado en el principio de Tiempo de Vuelo (ToF), fabricado mediante la tecnología de película delgada TFS20 del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). El diseño geométrico del chip demostró compatibilidad con las reglas de manufactura del proceso, permitiendo la integración de un calefactor resistivo y elementos RTD para la detección del frente térmico.

La caracterización experimental se realizó en un banco de pruebas bajo condiciones controladas de microflujo, utilizando una bomba de jeringa programable y una micromanguera acoplada al sensor. En el intervalo de 60 a $90 \mu\text{L}/\text{min}$, los resultados mostraron una correlación adecuada entre el tiempo de vuelo medido y el inverso del caudal aplicado, con un coeficiente de determinación cercano a 0.95 . El error absoluto máximo observado en la prueba de flujo creciente fue de $4.56 \mu\text{L}/\text{min}$, lo que indica una respuesta funcional del sistema de adquisición y detección dentro del intervalo evaluado.

Desde la perspectiva de ensamble en un laboratorio institucional, se observó que el uso de soldadura en pasta de alta viscosidad y tamaño de partícula micrométrico, sin la adición externa de flux, favoreció la conexión eléctrica entre los pads del chip y los conductores externos. No obstante, el proceso de encapsulado con resina UV rígida evidenció la vulnerabilidad mecánica del

dispositivo, afectando la lectura diferencial originalmente prevista con dos RTD. Por esta razón, la validación reportada en este trabajo se realizó empleando únicamente el receptor funcional R1.

Las pruebas con flujo descendente mostraron un incremento del error a bajos caudales, particularmente a $65 \mu\text{L}/\text{min}$. Debido a la cantidad limitada de datos experimentales, este comportamiento no se define formalmente como histéresis, sino como un indicio de memoria térmica asociado al calentamiento acumulado del sustrato de silicio y de las pistas metálicas. Estos resultados permiten identificar áreas de mejora relacionadas con la gestión térmica, el encapsulado y la estabilidad hidráulica del montaje experimental.

Como trabajo futuro, se contempla optimizar el encapsulado del microsensor, recuperar la operación diferencial con dos RTD y ampliar la caracterización experimental en un mayor intervalo de caudales. Asimismo, se plantea su integración progresiva con la plataforma hidrométrica KFORO para evaluar su desempeño en escenarios reales de canales de riego a cielo abierto, previa calibración entre la velocidad local medida por el chip y la velocidad media de la sección hidráulica.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Met-Mex Peñoles, al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo brindado durante el desarrollo de la presente investigación.

VI. REFERENCIAS

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (4.ª ed.). McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill.
- CIDESI. (14 de mayo de 2025). *Proceso CIDESI TFS20*.
- Henkel Adhesive Technologies. (2023). *Technical Data Sheet: LOCTITE LF 318*.
- Huang, C. H. (2022). Micromachined Thermal Time-of-Flight Flow Sensors and Their Applications. *Micromachines*, 13(10), 1729. <https://doi.org/10.3390/mi13101729>
- IDEX Health & Science. (2024). *Ismatec Tygon LMT-55 Peristaltic Tubing Technical Specifications*. IDEX Corporation.
- Infineon Technologies. (2023). *PSoC 5LP: Programmable System-on-Chip (PSoC) Family Datasheet*.
- IPC. (2008a). *IPC J-STD-006B: Requirements for Electronic Grade Solder Alloys and Fluxed and Non-Fluxed Solid Solders for Electronic Soldering Applications*. Association Connecting Electronics Industries.
- IPC. (2008b). *IPC J-STD-004B: Requirements for Soldering Fluxes*. Association Connecting Electronics Industries.



- JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). Joint Committee for Guides in Metrology.
- Kuo, J. T. W., Yu, L., & Meng, E. (2012). *Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review*. *Micromachines*, 3(3), 550-573.
<https://doi.org/10.3390/mi3030550>
- Lintel, H. V., et al. (2011). *Time-of-flight thermal flowrate sensor for lab-on-chip applications*. *Lab on a Chip*, 11(2), 215-224.
<https://doi.org/10.1039/c0lc00229a>
- Mechanic Precision Tools. (2024). *Technical Data Sheet: XGSP50 Series High-Precision Solder Paste (Sn63/Pb37)*. HK Mechanic Precision Tools Co., Ltd.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de Fluidos* (7a ed.). Pearson Educación.
- New Era Pump Systems, Inc. (2024). *Model NE-500 OEM Ambidextrous Syringe Pump Series User Manual*. New Era Pump Systems.
- Ofiteck. (s.f.). *Ficha técnica: Soldadura de Estaño en Pasta BAKU BK-5051*. <https://ofiteck.com/products/soldadura-estano-baku-5051-50gr>
- Panhans, C., Koch, T., Kuehne, I., Leonhard, S., Hilliges, R., Stolle, R., & Frey, A. (s. f.). *Modelado de un sensor de tiempo de vuelo térmico para flujo de canal abierto de baja velocidad*.
- Relife. (s.f.). *Product Manual: RL-403 183°C Solder Paste for SMD Repair*.
- Resin-T. (2024). *Technical Data Sheet: UV-Curable Hard Resin for Electronic Components (TDS No. RT-H2024)*. HK Resin-T Chemicals.
- Rodrigues, R. J., & Furlan, R. (2009). *Time-of-Flight Flow Microsensor using Free-Standing Microfilaments*. *Journal of Integrated Circuits and Systems*, 4(2), 84-88.
<https://doi.org/10.29292/jics.v4i2.303>
- Sánchez, R., & Chávez, I. (2025). *Especificación técnica del proceso CIDESI_TFS20*.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.
- Tummala, R. R. (2001). *Fundamentals of Microsystems Packaging*. McGraw-Hill Education.
- White, F. M. (2019). *Mecánica de Fluidos* (8a ed.). McGraw-Hill.

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
2	Curación de datos [Data curation]	Itzel Sarahim González Aroña
3	Análisis formal [Formal analysis]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
5	Investigación [Investigation]	Itzel Sarahim González Aroña
6	Metodología [Methodology]	Itzel Sarahim González Aroña
7	Administración del proyecto [Project administration]	Hesner Coto Fuentes
8	Recursos [Resources]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
9	Software [Software]	Itzel Sarahim González Aroña
10	Supervisión [Supervision]	Hesner Coto Fuentes, Karla Victoria Guevara Amatón
11	Validación [Validation]	Itzel Sarahim González Aroña
12	Visualización [Visualization]	Itzel Sarahim González Aroña
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Hesner Coto Fuentes, Itzel Sarahim González Aroña