

MONITOREO TÉRMICO EN MICROCANALES THERMAL MONITORING IN MICROCHANNELS

M. V. Freytes^{1,2}, A. Donofrio^{1,3} y A. E. Juarez^{*1,2,3}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Godoy Cruz 2290- CABA- Buenos Aires- Argentina.

²Grupo de Medios Porosos- Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Buenos Aires (FiUBA)
Av. Paseo Colón 850- CABA- Buenos Aires- Argentina.

³Universidad General Sarmiento (UNGS)
Av. Juan María Gutiérrez 1150- Los Polvorines- Buenos Aires- Argentina.

Recibido: 12/03/2024 ; Aceptado: 10/02/2025


En este artículo se desarrolla un método de monitoreo de temperatura dentro de microcanales. Se diseñó una plataforma microfluídica para el sensado de temperatura. Se siguió la variación de la intensidad de fluorescencia emitida por una muestra marcada con rodamina B, cuya fluorescencia es fuertemente dependiente de la temperatura. Se construyó un dispositivo microfluídico con un inserto de cobre capaz de inducir un gradiente de temperatura en el fluido circulando en un microcanal, al pasar una intensidad de corriente por el inserto. Se encontró que los perfiles de intensidad de fluorescencia registrados son consistentes con los gradientes de temperatura esperados. El método resultó eficiente para implementar en plataformas más complejas.

Palabras Clave: microfluidos, monitoreo térmico, rodamina B.

This article presents a method for temperature monitoring in microchannels. A microfluidic platform was designed for temperature sensing. The variation in fluorescence intensity emitted by a sample marked with rhodamine B, whose fluorescence strongly depends on temperature, was monitored. A microfluidic device with a copper insert capable of inducing a temperature gradient in the fluid flowing through a microchannel, by passing a current intensity through the insert, was constructed. It was found that the recorded fluorescence intensity profiles are consistent with the expected temperature gradients. The method proved to be efficient for implementation in more complex platforms.

Keywords: microfluids, thermal monitoring, rhodamine B.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2025.36.1.16>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías que mejoren la gestión térmica de las arquitecturas electrónicas es un tema particularmente crítico para las industrias que involucran procesos térmicos en condiciones hostiles de desempeño, como es el caso de la industria aeroespacial [1], [2]. Dichas arquitecturas, compuestas por dispositivos y aplicaciones de GaN, requieren cada vez mayores densidades de potencia, con sistemas de empaquetamiento electrónico cada vez más pequeños, que tienen un rendimiento térmicamente limitado donde los flujos de calor localizados pueden alcanzar valores del orden o superior a $1 \text{ kW} / \text{cm}^2$ [1]. Los dispositivos de base microfluídica se presentan como una solución a este problema, porque en intercambiadores de calor el decrecimiento del diámetro hidráulico que implica un aumento de la superficie por unidad el volumen de flujo, es una forma muy efectiva de eliminar el exceso de calor, produciendo una mejora del coeficiente de transferencia de calor (HTC) [2]. Un intercambiador de calor microfluídico consta principalmente de un fluido que transfiere el calor de un sitio a otro a través de una estructura de microcanales. Tuckerman y Peace [3] sugirieron utilizar microca-

nales como sumideros de calor para circuitos integrados a muy gran escala (VLSI) para obtener altos rendimientos al enfriar, hace aproximadamente dos décadas. Desde entonces, numerosos estudios han demostrado una alta tasa de transferencia de calor obtenida mediante el uso de dispositivos de refrigeración de microcanales. Los intercambiadores de calor basados en microestructuras generalmente comparten los mismos principios que los de macroescala convencionales. Morini [4] revisó los resultados experimentales de transferencia de calor convectiva en microcanales. Reportó los valores de factor de fricción en la transición de flujo laminar a turbulento y número de Nusselt (cociente entre la transferencia de calor por convección y por conducción) en microcanales. Mostró que en muchos casos los datos experimentales del factor de fricción y el número de Nusselt en microcanales están en desacuerdo con la teoría convencional. Algunas de las hipótesis que se han utilizado para explicar las desviaciones son rarefacción y efectos de compresibilidad, efectos de disipación viscosa, efectos electro-osmóticos, condiciones de superficie del canal (rugosidad relativa) e incertidumbres experimentales. Teniendo en cuenta esto, se requiere una revisión de la teoría y nuevos estudios para el diseño óptimo de microcanales y para lograr altos coeficientes de transferencia térmica, por

aliciajuarez@conicet.gov.ar

lo que el monitoreo térmico de los procesos involucrados se vuelve esencial en estos estudios. En este trabajo presentamos técnicas de fluorescencia para el monitoreo de temperatura en microcanales utilizando como marcador rodamina B, un compuesto orgánico que presenta fluorescencia y cuyo espectro de absorción tiene un máximo alrededor de la longitud de onda de 532 nm, y una emisión de fluorescencia entre 570 nm y 590 nm. La intensidad de emisión de fluorescencia de la rodamina B es fuertemente dependiente de la temperatura, lo que la hace un muy buen marcador para monitoreo térmico. Presentamos pruebas en plataformas de PDMS con insertos de cobre, como un modelo muy básico de sistema microfluídico acoplado a un circuito.

II. DISEÑO DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Construcción del dispositivo microfluídico

Para la construcción del dispositivo microfluídico se eligió como material Polidimetilsiloxano (PDMS) por su buena transmitancia de la luz, no toxicidad y bajo costo [5]. Se utilizó como molde una caja de Petri con una oblea de Silicio en la base para dar un acabado liso a la pared inferior y dos portaobjetos para delimitar un ancho de 2,5 cm. Se armó un dispositivo de capas (PDMS-Cobre-PDMS), con un procedimiento de dos etapas de curado. Se preparó 55 g de una mezcla 10:1 de PDMS y agente curador SYLGARD. Se vertió la mitad de la mezcla sobre el molde preparado y se procedió a su curado durante 30 minutos en una mufla a 80 °C. Se colocó sobre el PDMS y en medio de los dos portaobjetos una cinta de cobre de 6 mm de ancho y 30 μm de espesor como inserto de cobre y de manera transversal a esta, una varilla de acero de 4,5 cm de largo de sección rectangular de 500 μm x 1500 μm , a modo de molde para formar el microcanal. Luego se vertió la otra mitad de la mezcla de PDMS y curador. Se llevó el molde nuevamente a la mufla a 80 °C durante 40 minutos. Luego de 24 horas se separó el PDMS de la oblea de silicio, se retiró la varilla de acero y se cortaron los extremos lindantes con la pared de la caja de Petri de manera de obtener un dispositivo prismático de 4 cm de largo, 2,5 cm de ancho y un espesor de 0,7 cm, con inserto de cobre y un microcanal, como se esquematiza en la Fig.2.

Preparación de solución de rodamina

Se prepararon varias soluciones de rodamina B (Sigma) en Etanol absoluto (Sintorgan) a fin de encontrar los valores óptimos de concentración, teniendo en cuenta que una solución muy concentrada absorberá demasiada luz y no se excitarán de manera uniforme las moléculas de rodamina a lo ancho del canal y una concentración demasiado baja no permitirá observar claramente la fluorescencia. Se seleccionó una concentración 0,001 % p/p para hacer las pruebas.

Montaje del dispositivo experimental

El montaje del dispositivo experimental se observa en la Fig.1 y se representa esquemáticamente en la Fig.2. Se monitoreó la fluorescencia de la muestra con un montaje óptico que constó de una lupa de laboratorio Leica conectada a una cámara policromática que permitía la visualización y registro de las experiencias realizadas. Se acopló un filtro (B+W 58 040 4X) a fin de filtrar la luz debida a la excitación del

láser. Se colocó el dispositivo microfluídico sobre un portaobjeto debajo de una lupa y se atravesaron los extremos de la cinta de cobre con 2 varillas cilíndricas de cobre para conectarlos a bornes de la fuente de corriente. Se conectó el canal del dispositivo microfluídico con un capilar lleno de la solución de rodamina B y se lo fijó a una altura que permitiera que el fluido permaneciera estático. Se colocó sobre un posicionador un diodo láser con emisión en 532 nm para iluminar el canal de manera perpendicular al flujo.

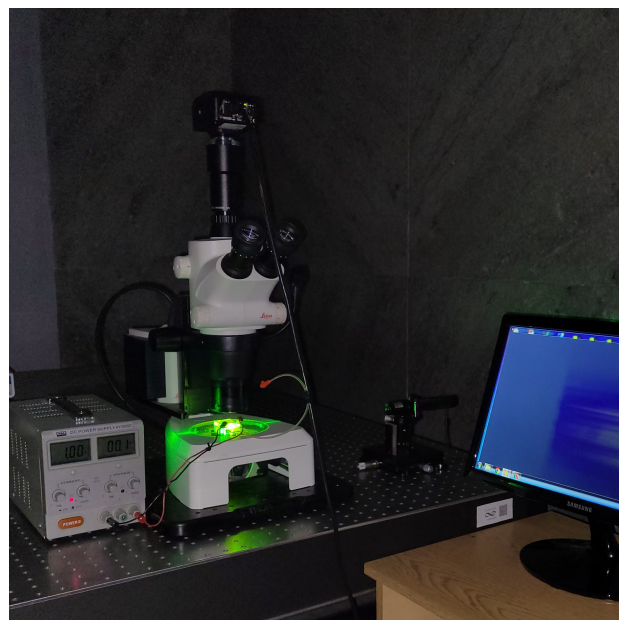


FIG. 1: Fotografía del dispositivo experimental utilizado.

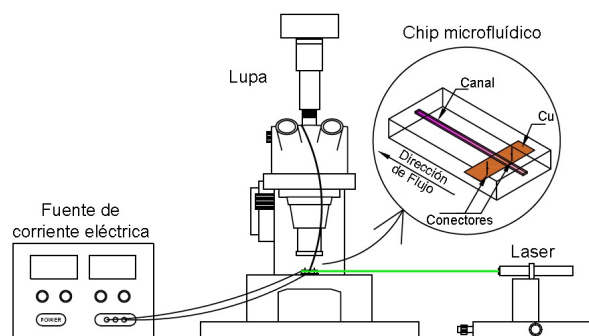


FIG. 2: Esquema del dispositivo experimental con ampliación en la zona del chip microfluídico.

III. ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Para cada ensayo se aplicó una determinada intensidad de corriente sobre las varillas de cobre del dispositivo microfluídico mediante la fuente de corriente a fin de calentar el inserto de cobre y se registró un video de la porción del microcanal más próxima a éste. Seleccionando un valor de intensidad de corriente aplicada, se conoce a qué temperatura llegará el inserto de cobre cuando llegue al estado estacionario ya que previamente se realizó una calibración de la temperatura versus corriente aplicada como se observa en la Fig.3. Para realizar la curva de calibración de la Fig.3 se aplicó corriente sobre el inserto de cobre mientras se medía la temperatura con una termocupla hasta que se estabilizara,

sin presencia de fluido.

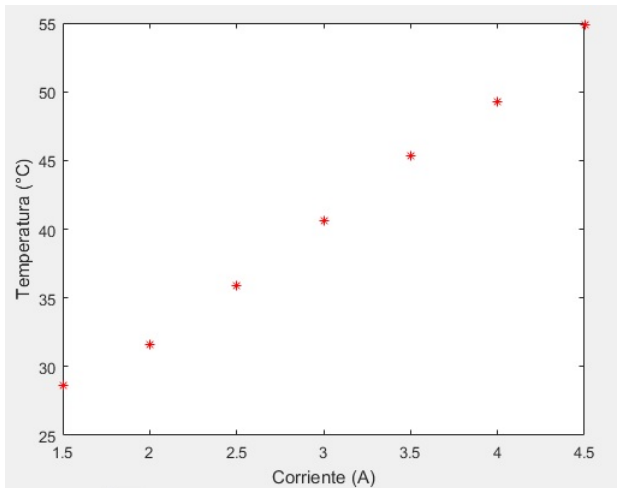


FIG. 3: Variación de la temperatura del inserto de cobre con la corriente aplicada.

A continuación presentamos las imágenes finales de cada video registrado durante los ensayos. En las Fig.4- Fig.7 se observan las imágenes de la fluorescencia para las intensidades de corriente aplicada de 1 A a 4 A respectivamente correspondiente a temperaturas de 24,7, 32,9, 41,2 y 49,4 °C. Se puede ver como la intensidad de fluorescencia disminuye conforme aumenta la intensidad de corriente y por tanto la temperatura.

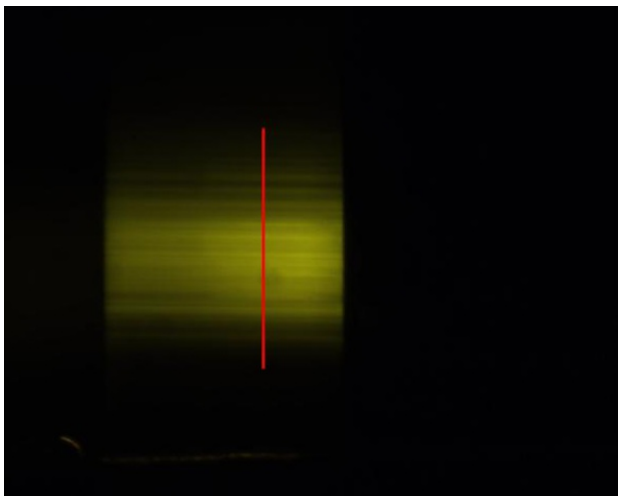


FIG. 4: Imagen del sector del canal del chip contiguo al inserto de cobre iluminado con láser cuando la corriente aplicada es de 1 A.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procesaron las imágenes, midiendo el perfil de intensidad a lo largo de un eje de 1500 μm de largo ubicado de manera paralela a 500 μm de la pared sobre la que incide el láser. La línea de color rojo en las Figs. 4 a 7 representa dicho eje sobre el cual se analizaron los perfiles de intensidad. Los perfiles de intensidades registrados tienen implícitas las contribuciones debidas a la fluorescencia de la rodamina B a diferentes temperaturas y parte de la excitación del láser que no es eficientemente filtrada. Las curvas azules en las Figs. 8 a 11 corresponden al perfil inicial normalizado, I_0 ,

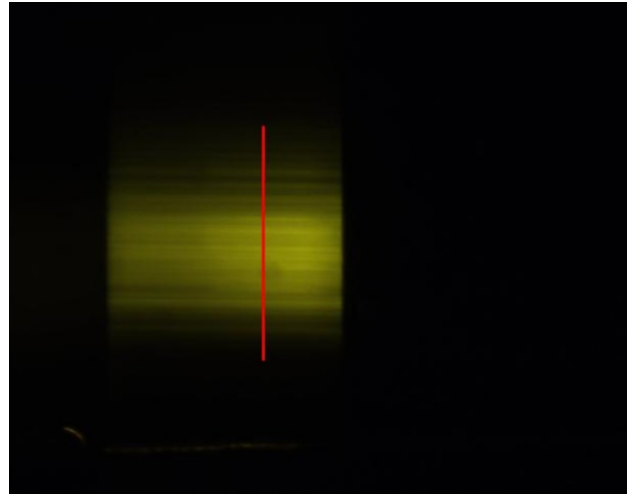


FIG. 5: Imagen del sector del canal del chip contiguo al inserto de cobre iluminado con láser cuando la corriente aplicada es de 2 A.

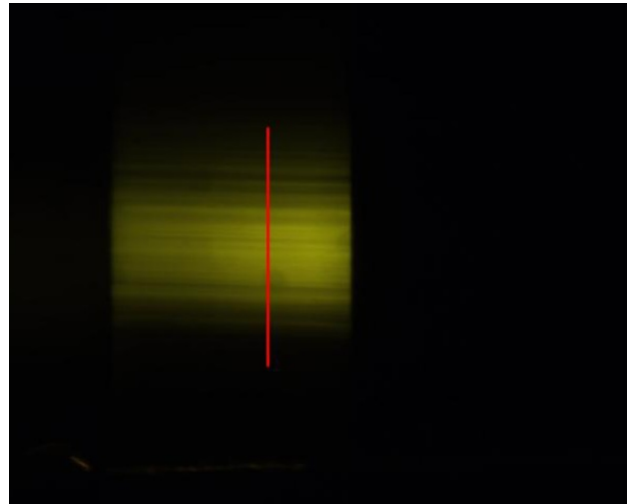


FIG. 6: Imagen del sector del canal del chip contiguo al inserto de cobre iluminado con láser cuando la corriente aplicada es de 3 A.

antes de la excitación térmica. Se puede apreciar a su vez, en estas curvas la correlación de las mismas con el perfil de excitación del láser, el cual se corresponde al modo de emisión del mismo, es por eso que pese a no presentar un gradiente de temperatura, dicho perfil no es uniforme. Por otro lado, estas curvas se normalizan, dividiendo los valores de intensidad por un valor fijo, I_m , de manera que permiten observar las curvas en la misma escala que el cociente de intensidades. $I_m = I_{\text{max}}/2$, donde I_{max} es el valor máximo del perfil inicial. Se analizan los cocientes de las señales, I , respecto del perfil inicial, I_0 , para observar separadamente la variación de fluorescencia producida por el gradiente de temperaturas. En este procedimiento se elimina la contribución a la señal de la excitación láser. En las Figs. 8 a 11, se graficaron para distintos valores de corriente aplicados (1, 2, 3 y 4 A), el cociente entre la intensidad de luz registrada, I , en 5 instantes y la intensidad de luz antes de aplicar la corriente, I_0 , en función de la distancia al inserto de cobre. Se observa, para diferentes instantes que el cociente de intensidades relacionado a la intensidad de fluorescencia

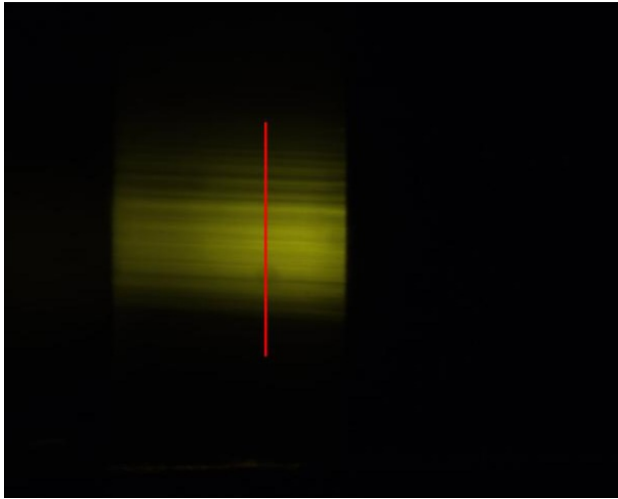


FIG. 7: Imagen del sector del canal del chip contiguo al inserto de cobre iluminado con láser cuando la corriente aplicada es de 4 A.

disminuye en las cercanías del inserto de cobre. Como es de esperarse, en las cercanías al inserto de cobre donde la T es más alta, la intensidad de fluorescencia es menor. Se espera un gradiente de temperaturas lineal con la distancia al inserto de cobre, consistente con los cocientes de intensidad que se muestran en las Figs. 8 a 11. Se observa a su vez, que las curvas a distintos tiempos no difieren mucho entre sí, de lo que puede inferirse que en esta condición de flujo cero rápidamente se llega a un estado estacionario.

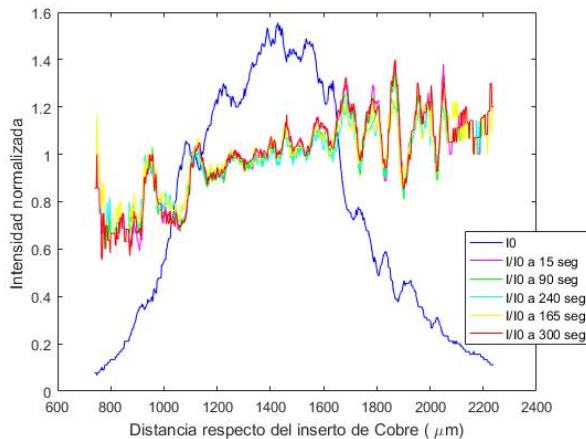


FIG. 8: Gráfico de la intensidad de luz normalizada en función de la distancia respecto del inserto de Cobre cuando la corriente aplicada es de 1 A.

V. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un dispositivo experimental para el monitoreo de temperatura en sistemas microfluídicos. Se observó la variación de la intensidad de fluorescencia con la temperatura a lo largo de un canal microfluídico. Se registraron los perfiles de intensidades de emisión de fluorescencia en dispositivos con insertos de cobre sometidos a variaciones de temperatura. Los perfiles registrados son consistentes con los gradientes de temperatura esperados, con temperaturas mayores en las cercanías del inserto de Cobre que van disminuyendo a medida que se miden en

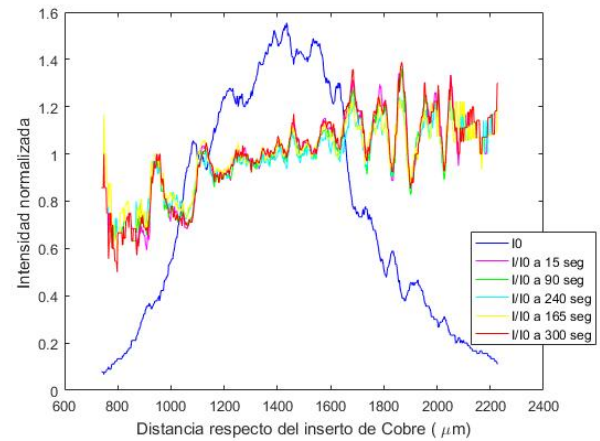


FIG. 9: Gráfico de la intensidad de luz normalizada en función de la distancia respecto del inserto de Cobre cuando la corriente aplicada es de 2 A.

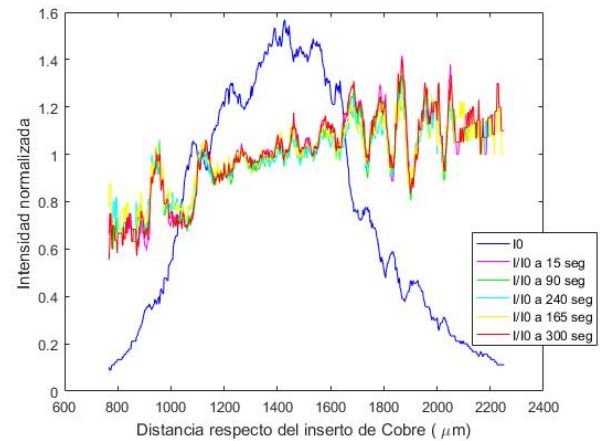


FIG. 10: Gráfico de la intensidad de luz normalizada en función de la distancia respecto del inserto de Cobre cuando la corriente aplicada es de 3 A.

puntos mas alejados del inserto. Si bien la resolución espacial del registro de intensidades es del orden de los 10 μm , esta precisión se ve afectada por las fluctuaciones en la intensidad registrada debidas a diferentes motivos, fluctuaciones en la excitación e impurezas en el armado del dispositivo. No obstante la técnica resulta muy robusta ya que se observan fehacientemente los gradientes de temperatura a lo largo de los microcanales. Se diseñó y construyó un dispositivo experimental para el monitoreo de temperatura en sistemas microfluídicos. Se observó la variación de la intensidad de fluorescencia con la temperatura a lo largo de un canal microfluídico. Se registraron los perfiles de intensidades de emisión de fluorescencia en dispositivos con insertos de cobre sometidos a variaciones de temperatura. Los perfiles registrados son consistentes con los gradientes de temperatura esperados, con temperaturas mayores en las cercanías del inserto de Cobre que van disminuyendo a medida que se miden en puntos mas alejados del inserto. Si bien la resolución espacial del registro de intensidades es del orden de los 10 μm , esta precisión se ve afectada por las fluctuaciones en la intensidad registrada debidas a diferentes motivos, fluctuaciones en la excitación e impurezas en el armado del dispositivo. No obstante la técnica resulta muy

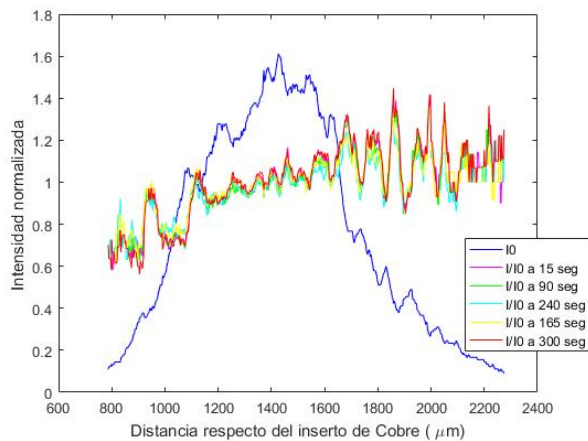


FIG. 11: Gráfico de la intensidad de luz normalizada en función de la distancia respecto del inserto de Cobre cuando la corriente aplicada es de 4 A.

robusta ya que se observan fehacientemente los gradientes de temperatura a lo largo de los microcanales.

REFERENCIAS

- [1] Y. Won, J. Cho, D. Aghafer, M. Asheghi y K. E. Goodson. Fundamental Cooling Limits for High Power Density Gallium Nitride Electronics. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* **5**, 737-744 (jun. de 2015). ISSN: 2156-3985. <http://dx.doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2433132>.
- [2] M. T. Barako, V. Gambin y J. Tice. Integrated nanomaterials for extreme thermal management: a perspective for aerospace applications. *Nanotechnology* **29**, 154003 (feb. de 2018). ISSN: 1361-6528. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aaabel>.
- [3] D. Tuckerman y R. Pease. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters* **2**, 126-129 (mayo de 1981). ISSN: 1558-0563. <http://dx.doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>.
- [4] G. L. Morini. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. *International Journal of Thermal Sciences* **43**, 631-651 (jul. de 2004). ISSN: 1290-0729. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.01.003>.
- [5] K. Hosokawa y R. Maeda. Low-cost technology for high-density microvalve arrays using polydimethylsiloxane (PDMS). *MEMSYS-01* 531-534 (). <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906596>.