

Calefactor flexible para fluidos intravenosos obtenidos por procesos de electrónica impresa

Joaquín Bonilla
Universidad Nacional de San
Martín (UNSAM)
Buenos Aires, Argentina
jmarcillabonanno@estudiantes.u
nsam.edu.ar

Damian Ricalde
Dto Prototipado Microelectrónico
y Electrónica Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
dricalde@inti.gob.ar

Mariano Roberti
Dto Prototipado Microelectrónico
y Electrónica Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
froberti@inti.gob.ar

Julián Marinoni
Dto Prototipado Microelectrónico
y Electrónica Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
marinoni@inti.gob.ar

Alex Lozano
DT. de Micro y Nanotecnologías
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
alozano@inti.gob.ar

Mijal Mass
Dto Prototipado
Microelectrónico y Electrónica
Impresa
Instituto Nacional de Tecnología
Industrial
Buenos Aires, Argentina
*mmass@inti.gob.ar

Liliana Fraigi
Escuela de Ciencia y Tecnología
UNSAM
Dto de Electrónica
Universidad Nacional Tecnológica –
UTN-FRBA
Buenos Aires, Argentina
lili@frba.utn.edu.ar

Resumen — En el presente trabajo se detalla el diseño, fabricación y caracterización de dos modelos de calefactores flexibles para fluidos intravenosos para un rango de 20°C a 33°C, utilizando impresión serigráfica sobre sustratos PET. Para su desarrollo se tuvieron en cuenta la selección de los materiales, la geometría de los calefactores en función de la distribución de calor, la velocidad de calentamiento, la variación con la temperatura, la tensión de alimentación, entre otros aspectos fundamentales. Se obtuvo un calefactor de tipo fractal con una capa de tinta Ag de 22Ω@20°C y otro de tipo interdigital con una capa de tinta de carbón/grafito con electrodos de Ag de 10.7Ω@20°C; TCR de 1200ppm/°C y de 1100ppm/°C; y velocidades de calentamiento cuasi-lineales de 0.16°C/min y 0.34°C/min entre 10°C a 70°C, respectivamente.

Palabras clave—*electrónica impresa, calefactores flexibles, impresión serigráfica, fluidos intravenosos*

I. INTRODUCCION

Los fluidos intravenosos (FIV) son soluciones líquidas administradas directamente en el torrente sanguíneo mediante vía intravenosa, siendo una de las intervenciones más utilizadas en medicina. El objetivo de dicha administración es la de mantener o restablecer el estado de equilibrio del medio interno, homeostasis, garantizando el correcto funcionamiento de los sistemas del cuerpo. Dichos fluidos cumplen varios propósitos en la atención médica, tales como conservar el volumen extracelular, mantener la hidratación y el equilibrio tanto de electrolitos como de nutrientes del organismo.

La temperatura de los FIV es un aspecto crítico en la administración de tratamientos médicos, ya que tiene un impacto significativo en la salud del paciente. La temperatura óptima para la transfusión de los mismos suele estar en el rango de 20°C a 25°C (68 a 77°F); sin embargo existen evidencias de un efecto favorable con 33°C [1]. Mantener esta temperatura es fundamental por varias razones: evitar la hipotermia o hipertermia inducida por fluidos, mejorar la absorción y la tolerancia del paciente, reducir el estrés fisiológico, entre otros [2,3]. Su

temperatura no debe superar los 37°C ya que puede aumentar el riesgo de contaminación bacteriana, por lo que se deben seguir las medidas de asepsia adecuadas.

La monitorización constante de la temperatura y atención a las prácticas seguras de administración de FIV son fundamentales para evitar riesgos y garantizar la seguridad del paciente durante la infusión intravenosa.

En este trabajo presentamos el desarrollo de dos modelos de calefactores flexibles mediante el proceso de impresión serigráfica: 1) arreglo de curva fractal de Moore de orden 4, impreso con una sola capa de tinta de Ag; 2) de electrodos interdigitados con tinta de Ag, mediante una configuración del tipo paralelo que se genera entre los electrodos sobre una resistencia impresa con tinta de carbón/grafito.

La motivación de este desarrollo radica en la necesidad de encontrar una solución innovadora, económica y efectiva para el calentamiento de FIV. En la actualidad, las alternativas tradicionales enfrentan una serie de desafíos tecnológicos y/o económicos que dificultan su adopción generalizada.

II. EXPERIMENTAL

A. Diseño de los calefactores

Los diseños de los calefactores propuestos se enfocan en lograr una distribución de temperatura lo más uniforme posible y estable, sobre un área específica de 10cm x 10cm, el cual coincide con el de las etiquetas gráficas que contienen la información de las bolsas de transfusión comerciales. La velocidad de calentamiento es otra característica que se consideró en el diseño. En cuanto a los materiales, se eligió PET como sustrato, el cual posee una flexibilidad adecuada para nuestra aplicación, soporta las temperaturas requeridas, hay disponibilidad en el mercado local y su costo no es elevado. En el caso de las tintas, se utilizaron:

- Tinta conductora de Ag, Gwent C2080415P2.

- Tinta resistiva de carbón/grafito, Gwent C2030519P4.
- Tinta conductora de Ag, Mateprincs SCAG-003.

Con el fin de preservar la integridad de los fluidos, se propuso obtener un valor intermedio de temperatura de 28°C, en un lapso menor a 30 minutos. Para ello, debemos determinar la potencia requerida en función del volumen y el tipo de líquido que se va a calentar, obedeciendo a (1):

$$P = C_{\text{liquido}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{liquido}}}{\Delta t} \quad (1)$$

siendo C_{liquido} la capacidad térmica del líquido, la cual se calcula conociendo la masa y el calor específico del mismo. Para llevar a cabo las pruebas de concepto, se utilizó 400ml de agua corriente. Calculando C_{liquido} y reemplazando los valores en (1), se llega a:

$$P = 1674,4 \text{ J/}^\circ\text{C} \cdot \frac{(28-20)^\circ\text{C}}{30.60 \text{ seg}} = 7,44 \text{ W} \quad (2)$$

Utilizando una tensión de alimentación nominal de 12V, se calcula el valor de la resistencia mediante (3):

$$R = \frac{V_{\text{nom}}^2}{P} = \frac{(12\text{V})^2}{7,44 \text{ W}} = 19,35 \Omega \quad (3)$$

Con este valor de R y a partir de (4):

$$R = \rho_{\square} \cdot \frac{L}{W} \quad (4)$$

Calculamos la relación de aspecto ($N = \frac{L}{W}$) para ambos diseños, conociendo las resistividades de las tintas: de carbón/grafito ($\rho = 45 \Omega/\square$), y de Ag ($\rho = 45 \text{ m}\Omega/\square$):

$$N_{\text{carbón/grafito}} = 0,43 \quad (5)$$

$$N_{\text{Ag}} = 430 \quad (6)$$

A partir del estudio publicado por Charan et al. [4], que se centra en el diseño de calefactores con forma de meandro, donde se exploran diversas curvas fractales como posibles geometrías, se elige para el presente trabajo la curva fractal de Moore de orden 4. Esta curva logra una distribución de temperatura más uniforme, cumple con la especificación de N_{Ag} y genera una L_{Ag} más reducida en comparación con los diseños convencionales, lo que conlleva a un ahorro de tintas. Se pueden generar a través de su representación alfabética mediante un sistema de Lindenmayer, comúnmente conocido como sistema L [4].

El layout del patrón, se realizó con el software “Inkscape”, el cual incluye la herramienta de generación de representaciones gráficas de sistemas de Lindenmayer y un conjunto de parámetros para generar la estructura de la “Fig. 1”.

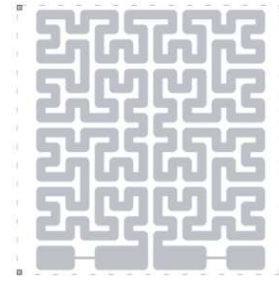


Fig. 1 – Diseño del calefactor fractal utilizando las curvas de Moore de orden 4.

Para el segundo diseño se partió del trabajo de Park et al. [5], que propone un diseño de resistencias paralelas para disminuir la resistencia total “Fig. 2”.

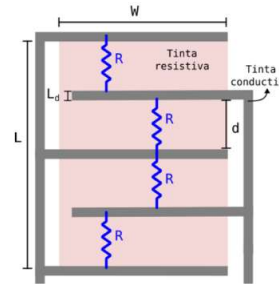


Fig. 2. Esquema del calefactor interdigital de carbón/grafito

Se plantea un diseño con N pistas conductoras, separadas por una distancia d , y de ancho L_d . Si se imprime encima de todas las pistas un rectángulo de tinta resistiva de ancho W y largo L , entonces la resistencia entre dos de ellas sigue la forma de (7), mientras que la resistencia total resulta del paralelo de $(N - 1)$ resistencias según (8), logrando un bajo valor de resistencia sin aumentar la complejidad del diseño ni de los costos.

$$R = \rho_{\square} \cdot \frac{d}{W} \quad (7)$$

$$R_{\text{Total}} = \rho_{\square} \cdot \frac{d}{W} \cdot \frac{1}{(N-1)} \quad (8)$$

Con los parámetros geométricos de diseño que se listan en la TABLA I, se calcula la resistencia total aplicando (8):

$$R_{\text{Total}} = 45 \frac{\Omega}{\square} \cdot \frac{22,5 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} \cdot \frac{1}{(5-1)} = 2,81 \Omega \quad (9)$$

TABLA I: Valores dimensionales del diseño

L [mm]	W [mm]	A [mm ²]	d [mm]	L_d [mm]	N
90	90	8100	22,5	1	5

B. Fabricación de los calefactores

Luego de fabricar las máscaras de los respectivos calefactores sobre Mylar® con una resolución de impresión de 3600 dpi, se procedió a la preparación de las mallas, seleccionando la cantidad de hilos por pulgadas (*mesh*) según las especificaciones de cada tinta. La transferencia de los diseños a dichas mallas se realizó mediante un proceso fotolitográfico sobre una película fotosensible de 50μm (Ulano®).

Para la impresión se utilizó una impresora serigráfica semiautomática (EKRA modelo Microtronic II) controlando los parámetros de presión y velocidad de espátula, y la distancia entre la malla y el sustrato (“snap off”). Finalmente, para el proceso de curado de las tintas, se utilizó una estufa de secado Thermal TH400DH.

III. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

Las caracterizaciones eléctricas, tanto debidas a deformaciones mecánicas como a cambios de temperatura, se realizaron con la unidad de fuente y medida (SMU) Keithley 2602B [6]. El estudio de las deformaciones es necesario ya que, al llenarse las bolsas de transfusión, estas aumentan su volumen, lo que provoca que los calefactores flexibles adheridos a ellas “copien” su forma, se flexionan y puedan cambiar su valor de resistencia original. Específicamente, nos concentramos en investigar cómo cambia la resistencia de los dispositivos sometidos a esas deformaciones. Para ello se analizaron dos muestras de películas flexibles impresas utilizando estructuras de soporte fabricadas por impresión 3D, con diferentes radios de curvatura “Fig. 3”: 200mm; 175mm; 150mm; 125mm; 100mm; 50mm y 25mm. Por cada muestra, se realizaron 5 repeticiones alternadas con la posición inicial sin deformación.

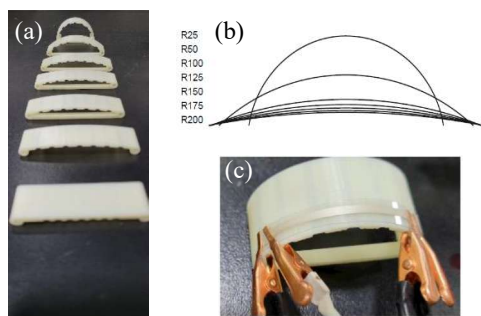


Fig. 3. (a) Estructuras de soporte para ensayos de deformación; (b) Esquema de las diferencias entre los siete radios de curvatura estipulados; (c) Medición de una muestra deformada en la estructura de radio de 25mm.

Las muestras estudiadas soportaron adecuadamente los esfuerzos mecánicos aplicados en todos los radios de curvatura. Ambas muestras impresas han manifestado una variación en su resistencia eléctrica menor al 3%.

Para la caracterización térmica de los dispositivos, se utilizó un banco compuesto por una cámara infrarroja termográfica FLIR One PRO, que permite analizar la distribución térmica en toda el área de los calefactores, como así también medir temperatura en diferentes puntos de la muestra. Esta cámara se conecta al puerto USB tipo C de un celular que se utiliza mediante la aplicación FLIR One o Thermal Camera+.

La “Fig. 4” muestra las imágenes capturadas con la cámara infrarroja para los dos diseños de calefactores. Ambos se encuentran de manera extendida sin deformaciones de los sustratos. La imagen termográfica del calefactor fractal “Fig. 4a” presenta una distribución de temperatura con un alto grado de uniformidad en toda su área, observable a través de las diversas tonalidades de color. También se indican tres valores de temperatura ubicados en

distintas zonas del dispositivo. En el caso de la imagen termográfica del calefactor interdigital “Fig. 4b”, la distribución de temperatura no es uniforme. Dichas variaciones se hacen más evidentes en las pistas conductoras de Ag, en especial en las cercanías de los pads de alimentación.

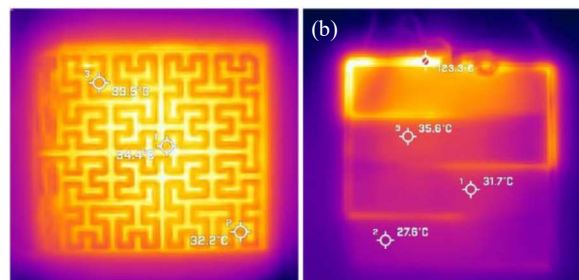


Fig. 4. Imágenes infrarrojas; (a) Calefactor Fractal y (b) Calefactor Interdigital.

Para estudiar la repetibilidad de la variación de la temperatura a lo largo del tiempo y el tiempo de respuesta de los respectivos calefactores se realizaron tres mediciones para dos dispositivos de cada modelo de calefactor. Dichas mediciones se realizaron con un termistor PTC modelo KTY81 de NXP, colocado en el interior de la bolsa y un circuito electrónico de control. Los ensayos para los calefactores flexibles fractales se llevaron a cabo desde una temperatura inicial aproximada de 10°C hasta alcanzar los 33°C calefaccionando las bolsas de transfusión con 400ml de agua. Se obtuvo una respuesta cuasi-lineal ($R^2 \approx 0,98$) que se puede aproximar a una velocidad de calentamiento de 0.16°C/min (25 minutos por cada 4°C). Como se observa en la “Fig. 5”, las dos muestras (“Fractal1” y “Fractal2”) presentan pendientes similares.

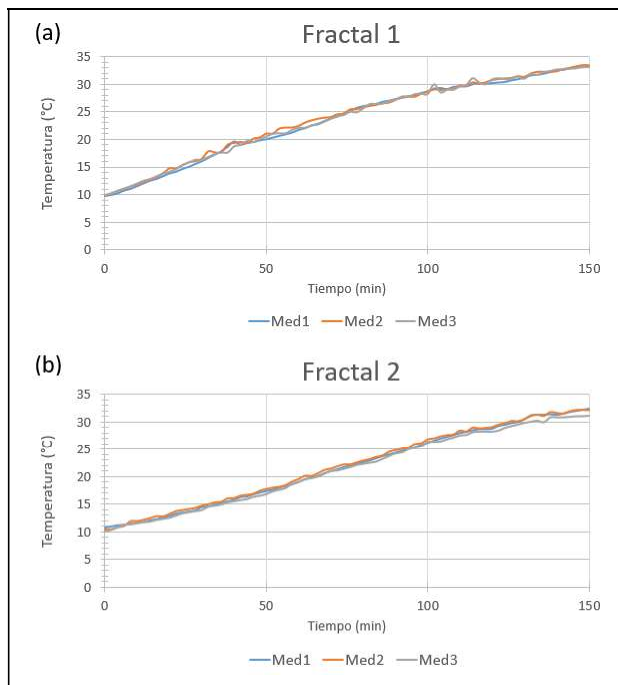


Fig. 5. Variación de la temperatura en función del tiempo de los calefactores (a) Fractal1; (b) Fractal2.

De manera análoga, se repite el procedimiento con los dispositivos interdigitales, donde las tres mediciones realizadas para cada muestra presentaron similitud entre sus curvas “Fig. 6”. Sin embargo, mostraron una velocidad de calentamiento aproximada de $0.34^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (casi 12 minutos por cada 4°C), lo que corresponde a más del doble de la velocidad de calentamiento obtenida para los calefactores fractales.

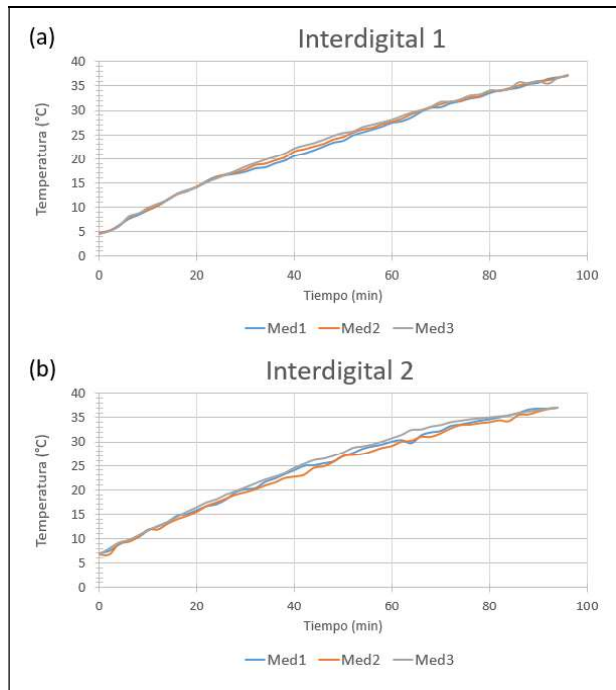


Fig. 6. Variación de la temperatura en función del tiempo de los calefactores (a) Interdigital1; (b) Interdigital2

Asimismo, se estudió el comportamiento de los calefactores por cambios de temperatura externos en un rango más amplio, desde 20°C a 70°C , obteniéndose un $\text{TCR}_{\text{Fractal}} = 1200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$, y $\text{TCR}_{\text{Interdigital}} = 1100\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, con el objetivo de evaluar los procesos de impresión se realizaron las medidas dimensionales en ambos modelos. Para las mediciones X e Y de las impresiones se utilizó la cámara fiducial de una impresora inkjet Dimatix modelo DMP-2850, la que permite medir con resolución micrométrica. En lo que respecta a la caracterización del espesor, se utilizó un perfilómetro por interferometría (Zeiss modelo 5104802). En ambos calefactores las variaciones en X e Y no superan el 1%. En cuanto a los espesores, el valor promedio de la tinta de Ag del calefactor fractal fue de $24.33\mu\text{m}$ y para el interdigitado, el de la tinta de carbón/grafito fue de $23.68\mu\text{m}$.

IV. CONCLUSIONES

- Se ha logrado desarrollar calefactores flexibles para ser aplicados en el calentamiento de fluidos intravenosos, mediante el proceso de impresión serigráfica, siendo una opción innovadora, de producción local/regional y de costos accesibles.
- Se diseñaron dos modelos de calefactores, uno del tipo

fractal que corresponde a la curva de Moore de orden 4, impreso con una sola capa de tinta de Ag ($22\Omega @ 20^{\circ}\text{C}$); el otro de electrodos interdigitados de tinta de Ag que reduce la resistencia total mediante una configuración del tipo paralelo, con tinta de carbón/grafito ($10.7\Omega @ 20^{\circ}\text{C}$).

- Ambos modelos de calefactores han alcanzado las temperaturas necesarias de 20°C a 33°C de máxima, para la aplicación propuesta.

- Ambos diseños han arrojado buenos resultados en las caracterizaciones eléctricas del valor de la resistencia frente a las deformaciones mecánicas (menor al 3%), como así también variaciones de la resistencia frente a cambios de temperatura (TCR) siendo de $1200\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ el del calefactor fractal y de $1100\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ el del calefactor interdigital.

- El calefactor fractal presentó una mejor distribución de temperatura en el total de la superficie del sustrato, en comparación con el calefactor interdigital. El desbalance térmico producido en este último puede originarse debido a la distribución asimétrica de corriente eléctrica en el dispositivo, producto de la ubicación de los pads de contacto. Se estima que con un rediseño de las pistas conductoras es posible mejorar la uniformidad de temperatura en el dispositivo.

- De los TCR obtenidos en ambos calefactores se desprende la posibilidad de utilizarlos simultáneamente con una doble funcionalidad: como calefactores y sensores de temperatura.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los alumnos de la Cátedra de Tecnología Electrónica, curso 2023, de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la UTN-FRBA.

REFERENCIAS

- [1] R. Ferrer Roca. Management of temperature control in post-cardiac arrest care: an expert report. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0210569120302138>; 2021
- [2] L. Lázaro Paradinas. Conocimiento enfermero sobre hipotermia inducida tras parada cardiorrespiratoria: revisión bibliográfica. <https://www.elsevier.es/es-revista-enfermeria-intensiva-142-articulo-conocimiento-enfermero-sobre-hipotermia-inducida-S1130239911000915>; 2011.
- [3] Daniel Simancas Racines. Evidencias científicas sobre las estrategias utilizadas para la prevención de reacciones adversas asociadas a la transfusión de concentrados de glóbulos rojos. <https://www.semanticscholar.org/paper/Evidencias-cient%C3%A9ficas-sobre-las-estrategias-para-a-Racines/0a1e4c454a8ac94820765a396c3892a679b4a6d8>; 2019.
- [4] K. K. S. Charan, et al.. “Design of Heating Coils Based on Space-Filling Fractal Curves for Highly Uniform Temperature Distribution,” MRS Advances, vol. 5, pp. 1007-1015; <https://doi.org/10.3390/polym14020249>; 2020.
- [5] Park, H. K., Kim, S. M., Lee, J. S., Park, J.-H., Hong, Y.-K., Hong, C. H., & Kim, K. K. Flexible plane heater: Graphite and carbon nanotube hybrid nanocomposite. Synthetic Metals, 203, pp. 127–134; <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.02.015>; 2015.
- [6] Keithley Live, Programming a 2600B SMU. https://www.youtube.com/watch?v=TmqD0SPDbM&t=2224s&ab_channel=Tektronix