

## Disipadores de calor a base de esponja de aluminio sinterizada para aplicaciones electrónicas

Heat sinks based on sintered aluminum foam for electronic applications

Angel Adad Franco Baltazar<sup>1</sup>  
Isabel Ernestina López Navarro<sup>2</sup>  
Lucino Hernández Lumbreras<sup>3</sup>  
Sandra Zamudio Reséndiz<sup>4</sup>  
Lizbeth Reséndiz Reséndiz<sup>5</sup>

### RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y caracterización experimental de disipadores de calor innovadores fabricados a partir de esponjas metálicas de aluminio sinterizado, diseñados específicamente para mejorar la eficiencia térmica en sistemas electrónicos. La investigación parte del desafío creciente de gestionar adecuadamente el calor generado por componentes electrónicos, cuya exposición prolongada a temperaturas elevadas compromete tanto su rendimiento como su vida útil. Utilizando rebaba de aluminio como materia prima, se fabricaron prototipos mediante compresión a dos niveles de carga (1.5 y 2.5 toneladas) y posterior sinterizado a temperaturas de 550 °C y 650 °C durante 45 y 75 minutos, según una matriz experimental Taguchi L4. El desempeño térmico fue evaluado aplicando carga eléctrica controlada por un relevador de estado sólido (SSR), registrando la respuesta térmica de cada configuración. Los resultados revelan que el disipador sinterizado a 550 °C durante 45 minutos y comprimido a 1.5 Tn (P1.5T550A) alcanzó una mejora del 16.7% en eficiencia térmica respecto a un Disipador Calor Metálico Solido (DCMS), lo que valida el potencial de esta tecnología como una solución eficiente y sustentable para la gestión térmica en electrónica avanzada.

**PALABRAS CLAVES:** Disipación de Calor, Esponjas de aluminio, Sinterizado, Materiales porosos.

**Fecha de recepción:** 25 de septiembre, 2025.

**Fecha de aceptación:** 08 de octubre, 2025.

<sup>1</sup> Profesor-Investigador del Tecnológico Nacional de México/IT de San Juan del Río (ITSJR), [angel.fb@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:angel.fb@sjuanrio.tecnm.mx), <https://orcid.org/0000-0002-9746-6709>

<sup>2</sup> Profesora-Investigadora del Tecnológico Nacional de México/IT de San Juan del Río (ITSJR). Autor Corresponds: [isabel.ln@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:isabel.ln@sjuanrio.tecnm.mx), <https://orcid.org/0000-0001-6748-1871>

<sup>3</sup> Profesor-Investigador del Tecnológico Nacional de México/IT de San Juan del Río (ITSJR), [lucino.hl@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:lucino.hl@sjuanrio.tecnm.mx), <https://orcid.org/0009-0001-8578-7476>

<sup>4</sup> Estudiante de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/I.T. de San Juan del Río (ITSJR), Av. Tecnológico S/N, San Juan del Río, [I21590252@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:I21590252@sjuanrio.tecnm.mx), <https://orcid.org/0009-0001-4022-3136>

<sup>5</sup> Estudiante de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/I.T. de San Juan del Río (ITSJR), Av. Tecnológico S/N, San Juan del Río, [I21590267@sjuanrio.tecnm.mx](mailto:I21590267@sjuanrio.tecnm.mx), <https://orcid.org/0009-0000-9273-2521>

Disipadores de calor a base de esponja de aluminio  
sinterizada para aplicaciones electrónicas

## ABSTRACT

This work presents the development and experimental characterization of innovative heat sinks fabricated from sintered aluminum metallic sponges, specifically designed to improve thermal efficiency in electronic systems. The research is based on the growing challenge of properly managing the heat generated by electronic components, whose prolonged exposure to high temperatures compromises both their performance and their lifespan. Using aluminum burr as raw material, prototypes were fabricated by compression at two load levels (1.5 and 2.5 tons) and subsequent sintering at temperatures of 550°C and 650°C for 45 and 75 minutes, according to a Taguchi L4 experimental matrix. Thermal performance was evaluated by applying an electrical load controlled by a solid-state relay (SSR), recording the thermal response of each configuration. The results reveal that the heatsink sintered at 550°C for 45 minutes and compressed to 1.5Tn (P1.5T550A) achieved a 16.7% improvement in thermal efficiency compared to a Solid Metal Heat Sink (SMHS), validating the potential of this technology as an efficient and sustainable solution for thermal management in advanced electronics.

**KEYWORDS:** Heat Dissipation, Aluminum Sponges, Sintered, Porous Materials.

## INTRODUCCIÓN

El control de temperatura es un aspecto crítico en el diseño de sistemas electrónicos modernos, ya que el sobrecalentamiento puede comprometer la funcionalidad, reducir la vida útil y generar fallas en componentes electrónicos. Tradicionalmente se utilizan Disipadores Calor de Metálicos Sólidos (DCMS), pero estos son caros, importados y poco adaptables.

El objetivo de esta investigación fue diseñar Disipadores Calor de Esponjas Metálicas (DCEM), que tenga mayor capacidad de transferencia de calor con respecto a los DCMS, aprovechando su estructura porosa, que combina baja densidad, alta área superficial, mejorando en al menos un 15% respecto a un DCMS. Estos nuevos materiales representan una solución innovadora en el manejo de residuos metálicos, promoviendo procesos más limpios y eficientes que contribuyen a un futuro industrial sostenible.

Las esponjas de aluminio han emergido como materiales clave en aplicaciones de transferencia de calor, disipación de energía térmica. Su estructura porosa permite una combinación única de baja densidad, alta permeabilidad y propiedades térmicas mejoradas. Estas características las hacen particularmente atractivas en industrias como la aeroespacial, la automotriz y la electrónica. La revisión de la literatura busca sintetizar los avances recientes en el estudio de la eficiencia térmica de las esponjas de aluminio, evaluando sus metodologías de análisis, tendencias en investigación y aplicaciones industriales.

Uno de los enfoques más empleados para evaluar la eficiencia térmica en esponjas de aluminio es el uso de simulaciones numéricas basadas en el Método de Elementos Finitos (FEM). Un estudio de (Hu, et al., 2020) investiga la conductividad térmica efectiva (ETC) de espumas metálicas de celda cerrada, concluyendo que la distribución del tamaño celular y la forma de las celdas afectan significativamente la transferencia de calor. Se introducen parámetros como el diámetro característico ( $\Delta_c$ ) y la anisotropía de forma ( $ac$ ), demostrando que una mayor heterogeneidad reduce la conductividad térmica en un 19.2% (Hu, et al., 2020).

Además, el estudio de (Almonti, et al., 2020) evaluó espumas metálicas con diferentes geometrías celulares mediante simulaciones numéricas, concluyendo que el grosor de los ligamentos y el



## Disipadores de calor a base de esponja de aluminio sinterizada para aplicaciones electrónicas

número de poros por pulgada (PPI) influyen en la transferencia de calor y la resistencia aerodinámica en aplicaciones de convección forzada. Un aspecto innovador de este estudio fue la evaluación del coeficiente global de transferencia de calor y su relación con la morfología de la espuma.

Diversos estudios han abordado la eficiencia térmica de esponjas de aluminio mediante caracterización experimental. (Fernandez Morales, et al., 2017) analizaron la permeabilidad y conductividad térmica de esponjas metálicas fabricadas por infiltración de preformas solubles (IPS). Sus resultados indican que la conductividad térmica aumenta con el tamaño del poro, alcanzando valores de hasta 3.0 W/mK para poros de 2.0 mm, lo que las hace ideales para intercambiadores de calor.

Por otro lado, (Berenguer Monge, 2012) estudió el desarrollo de procesos de soldadura térmica en espuas de aluminio, permitiendo su integración en estructuras sin comprometer sus propiedades térmicas. Sus experimentos demostraron que el soldado TIG y la soldadura fuerte en horno son técnicas viables para unir espuas de aluminio con mínima degradación estructural.

Además, el estudio de (Vallejo, et al., 2017) propuso un método innovador para la fabricación de espuas de célula abierta con regularidad controlada, empleando manufactura aditiva y modelos de Voronoi 3D, lo que mejora la homogeneidad térmica del material.

Otro trabajo destacado es el de (Restrepo, et al., 2014) quienes analizaron las propiedades termohidráulicas de metales celulares con porosidad abierta, encontrando que la conductividad térmica disminuye conforme aumenta la porosidad, mientras que la permeabilidad al flujo de aire mejora.

(Jia, et al., 2020) desarrollaron espuas cerámicas anisotrópicas de  $\text{SiO}_2$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$  con estructuras laminares altamente compresibles. Estas presentaron resiliencia a temperaturas desde  $-196$  °C hasta  $1000$  °C y conductividades térmicas de hasta  $0.034$  W/m·K, destacando como materiales prometedores para aislamiento térmico y acústico.

(Gangoso Posadas, 2018) llevó a cabo una detallada caracterización microestructural y electroquímica de espuas metálicas de níquel. Mediante espectroscopía de impedancias y polarización anódica, observó que la resistencia a la corrosión mejora sustancialmente al aplicar recubrimientos de polipirrole, sobre todo en medios fisiológicos, lo que amplía su aplicabilidad en dispositivos médicos y ambientes corrosivos.

Finalmente, el estudio de (AL-Migdady, et al., 2021) investigó la eficiencia de disipadores de calor PCM con inserción de espuma metálica, destacando que la porosidad de la espuma influye directamente en la distribución térmica y en la eficiencia del enfriamiento en dispositivos electrónicos de alto rendimiento.

La capacitancia térmica está relacionada con la capacidad de almacenamiento de energía. Se define como el flujo de calor necesario para variar la temperatura de un medio en una unidad por segundo (Lobontiu, 2018). Al momento de realizar los análisis y curvas de calentamiento y enfriamiento, se relaciona con la rapidez con la que el sistema alcanza la temperatura máxima; una pendiente más pronunciada indica una menor capacitancia térmica.

Las espuas de aluminio han demostrado ser materiales prometedores para intercambiadores de calor debido a su alta conductividad y permeabilidad. Estudios como el de (Fernandez Morales, et al., 2017) confirman su efectividad en la refrigeración de sistemas electrónicos y dispositivos de energía renovable. Además, (AL-Migdady, et al., 2021) resaltan su aplicación en disipadores de calor PCM, optimizando la gestión térmica en dispositivos de alta potencia.

En cuanto al desempeño, el aluminio es un material con alta conductividad térmica, bajo peso específico y resistencia a la corrosión, características deseables para aplicaciones en disipadores de calor. Al aluminio reciclado se le conoce como aluminio secundario, pero mantiene las mismas propiedades que el aluminio primario. Además, en el proceso de reciclado solo se emplea el 5% de la energía necesaria para su producción (Rodriguez, 2024).



## Disipadores de calor a base de esponja de aluminio sinterizada para aplicaciones electrónicas

### JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la investigación se ha centrado en mejorar la estabilidad térmica de estos materiales bajo condiciones extremas, como en turbinas de gas y motores de combustión interna. También se han evaluado sistemas de refrigeración pasiva con esponjas de aluminio en entornos espaciales, donde la transferencia de calor eficiente es crucial para el desempeño de los equipos. Además, el uso de esponjas metálicas como disipadores puede representar una alternativa de bajo costo frente a los disipadores comerciales, especialmente si se optimizan los procesos de fabricación y se emplean materiales reciclables o de fácil acceso en este caso el aluminio. Esto podría reducir significativamente los costos de producción en sistemas electrónicos que requieren gestión térmica.

Las esponjas metálicas ofrecen ventajas tecnológicas como una mayor superficie de contacto con el aire, lo cual puede mejorar la transferencia de calor. Además, su estructura porosa y adaptable abre nuevas posibilidades para su implementación en dispositivos con limitaciones de espacio o formas irregulares, superando algunas limitaciones de los disipadores tradicionales.

Por lo tanto, la fabricación de esponjas metálicas con materiales reciclados (aluminio) puede contribuir a una reducción del impacto ambiental, alineándose con prácticas más sostenibles en la industria electrónica. Además, su menor peso y eficiencia podrían contribuir al ahorro energético en sistemas donde se utilicen.

### METODOLOGÍA

#### Materiales

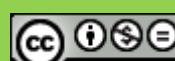
El material base utilizado en la fabricación fue rebaba de aluminio reciclada, proveniente de procesos industriales de maquinado. Esta elección responde tanto a criterios ambientales como funcionales. Desde el punto de vista ecológico, el aprovechamiento de residuos metálicos reduce el impacto ambiental asociado a la extracción y transformación de materias primas.

La figura irregular de la rebaba facilita la generación de una estructura porosa al momento de compactarla, lo cual contribuye a aumentar la superficie específica del disipador mejorando su capacidad de transferencia térmica sin necesidad de procesos complejos de manufactura.

#### Método

Debido a limitaciones de tiempo y recursos en la fase experimental, se optó por un diseño Taguchi L4 (véase la Tabla 1), el cual permite evaluar tres factores (presión de la compactación, temperatura, y tiempo de sinterizado), cada uno a dos niveles, utilizando únicamente cuatro corridas experimentales. Este enfoque permite identificar los efectos principales de cada factor sobre la variable de respuesta, optimizando el número de pruebas sin comprometer significativamente la calidad de los resultados preliminares.

Se seleccionaron los niveles de los factores basándose en criterios metalúrgicos. La presión de compactación se varió entre 1.5 y 2.5 toneladas, con el fin de estudiar su efecto sobre la densidad final del material. Las temperaturas de sinterizado de 550 y 650 °C se eligieron para mantenerse por debajo del punto de fusión del aluminio (660°) y para asegurar el proceso de unión por difusión sin colapso estructural (650°). Finalmente, se evaluaron tiempos de sinterizado de 45 y 75 minutos, rangos que permiten observar el desarrollo de la microestructura sin inducir el sobrecalentamiento del material. Para la identificación de probetas se empleó la siguiente nomenclatura: Presión de Compactación de 1.5 Tn (P1.5), Temperatura de Sinterizado 550 °C (T550), Tiempo de Sinterizado de 45 min (A) y 75 min (B), lo cual se escribe como P1.5T550A y se puede ver en la Tabla 1.



Disipadores de calor a base de esponja de aluminio  
sinterizada para aplicaciones electrónicas

**Tabla 1 Diseño experimental taguchi L4, realizado en Minitab**

Prueba	Presión (ton)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
P1.5T550A	1.5	550	45
P1.5T650B	1.5	650	75
P2.5T550B	2.5	550	75
P2.5T650A	2.5	650	45

**Proceso**

- La rebaba de aluminio fue seleccionada manualmente para eliminar impurezas visibles. Luego, se lavó con acetona para remover residuos de aceite y partículas contaminantes. Posteriormente, se dejó sacar al aire libre durante 24 horas.
- La rebaba seca se colocó en un molde cilíndrico de 60 mm de diámetro. Se aplicaron dos niveles de fuerza (1.5 y 2.5 Tn) mediante una prensa hidráulica de 150 toneladas de capacidad.
- Las pastillas compactadas se introdujeron en un horno eléctrico para tratamientos térmicos. Se sinterizaron a 550 °C y 650 °C, según la combinación.
- Tras el sinterizado, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente dentro del horno (enfriamiento lento) para evitar tensiones térmicas. Finalmente, se inspeccionaron visualmente y se les retiraron residuos sueltos para su posterior análisis.

**Evaluación experimental.**

La evaluación térmica de las muestras se realizó bajo un procedimiento estandarizado que consistió en comparar el comportamiento de las probetas sinterizadas con un disipador comercial de referencia, montado sobre un relevador de estado sólido (SSR).

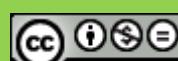
Cada disipador fue acoplado directamente al SSR utilizando pasta térmica para asegurar una transferencia eficiente de calor. El relevador fue energizado al iniciar el calentamiento mediante un horno que simula condiciones reales de operación. Las pruebas se realizaron de manera secuencial, utilizando el mismo ciclo de calentamiento para todas las pruebas, sin modificar el tiempo de exposición ni la fuente de calor.

**Preparación del Sistema:**

Instalar termopares o sensores de temperatura en la base de los disipadores de calor. Asegurar un buen contacto térmico utilizando pasta térmica entre el SSR y los disipadores.

**Curva de Calentamiento:**

Aplicar un ciclo de calentamiento al SSR y registrar la temperatura en intervalos regulares hasta alcanzar el estado estacionario. La pendiente inicial de la curva proporciona información sobre la capacitancia térmica del sistema, mientras que la temperatura final alcanzada permite evaluar la eficiencia del sistema de disipación de calor y su comportamiento ante condiciones de carga sostenida.



Disipadores de calor a base de esponja de aluminio  
sinterizada para aplicaciones electrónicas

**Curva de Enfriamiento:**

Al finalizar el ciclo de calentamiento el horno es apagado y termina el registro de temperatura. La adquisición de los datos se llevó a cabo mediante una tarjeta Arduino Uno y un termopar tipo K. La programación de la tarjeta para el ciclo de adquisición se realizó empleando el lenguaje Python.

**DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Tomando como referencia el aluminio 6061 en estado sólido a temperatura ambiente, tiene una densidad de  $2.7 \text{ gr/cm}^3$ , los DCEM tuvieron las siguientes densidades (Véase Tabla 2, Figura 1).

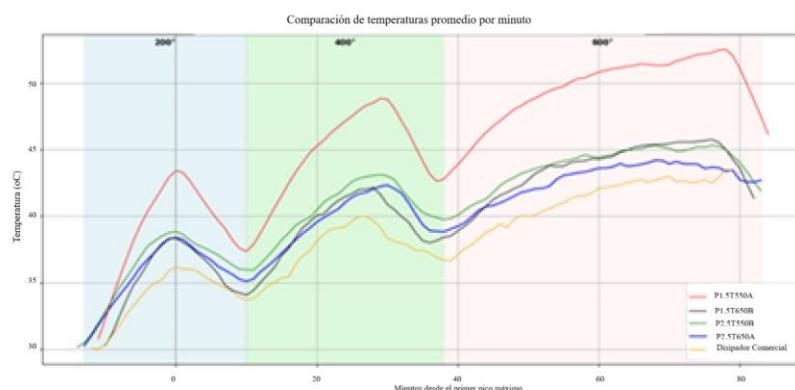
**Tabla 2 Densidad de las esponjas.**

Disipador	Densidad
P1.5T550A	$1.344 \text{ g / cm}^3$
P1.5T650B	$1.364 \text{ g / cm}^3$
P2.5T550B	$1.45 \text{ g / cm}^3$
P2.5T650A	$1.516 \text{ g / cm}^3$



**Figura 1 Disipadores de Calor de Esponjas Metálicas (DCEM) fabricados por Sinterización.**

Se realizó una comparación de cuatro DCEM y un DCMS sometidos a tres fases térmicas distintas ( $200^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$ ). Las gráficas alineadas por el primer pico permiten observar con claridad cómo responde cada dissipador al incremento térmico (Véase Ilustración 2).



**Figura 2 Temperatura vs. Tiempo para cada dissipador en las tres fases térmicas**

**Disipadores de calor a base de esponja de aluminio  
sinterizada para aplicaciones electrónicas**

En la Fig. 2 se observa que la probeta P1.5T550A alcanza una mayor temperatura en cualquier región. Por ejemplo, a 600 °C el disipador comercial se encuentra a 42.57 °C, mientras que la esponja antes mencionada se calienta a 49.68 °C, lo cual es un indicativo de su mayor capacidad de transferir el calor.

Tomando en cuenta la temperatura promedio a 600 °C, las probetas con un mejor desempeño para transferir calor son: P1.5T550A con 49.68 °C, seguida de P1.5T650B (43.74 °C), P2.5T550B (43.61 °C) y P2.5T650A (41.12 °C). Mientras que DCMS se encuentra en los niveles más bajos con 42.57 °C (Ver Tabla 3). El tiempo en alcanzar su máxima temperatura en las diferentes probetas, es muy similar y ronda los 78 min.

**Tabla 3 Comparación entre disipadores al realizar las pruebas**

Material	Temp. Máx (°C)	Tiempo a Máx (min)	Temp. prom. 200 (°C)	Temp. prom. 400 (°C)	Temp. prom. 600 (°C)
<b>P1.5T550A</b>	52.52	76.0	38.94	44.96	49.68
<b>P1.5T650B</b>	45.75	73.0	35.44	39.51	43.74
<b>P2.5T550B</b>	45.32	77.0	35.89	40.23	43.61
<b>P2.5T650A</b>	43.54	77.0	33.92	37.50	41.12
<b>Disipador comercial</b>	44.20	68.0	35.58	39.47	42.57

## CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se lograron fabricar 4 probetas de esponjas metálicas de rebaba de aluminio por el método de compresión y sinterización. Las probetas presentaron buena consistencia para su manipulación.

Para probar su conductividad térmica se realizaron pruebas de calentamiento, bajo un ciclo térmico estandarizado. Se utilizó un relevador de estado sólido (SSR) para las pruebas, el cual sufre un calentamiento debido al paso de la corriente, que por especificaciones del dispositivo no debe superar los 70 °C. Los resultados indican que la probeta P1.5T550A tiene un mejor rendimiento que disipador comercial (DCMS), alcanzando una temperatura máxima mayor en 16.1% que el DCMS, lo cual es un indicativo de su eficiencia térmica. Mientras que las probetas P1.5T650B y P2.5T550B, solo mejoran el rendimiento con respecto al disipador comercial en 2.7% y 2.4% respectivamente. En el caso de la probeta P2.5T650A, presentó un rendimiento ligeramente menor al disipador de referencia.

Estos resultados muestran que es posible lograr una eficiencia térmica mayor del 15% como se planteó inicialmente. La precisión de los resultados depende críticamente del contacto térmico entre el sensor y el Disipador, así como de la calibración del sensor.

En futuras investigaciones se busca repetir el experimento con un mayor número de sensores y puntos de contacto para obtener un mapa de temperatura más detallado y estudiar la durabilidad y el rendimiento del material frente a múltiples calentamientos prolongados. Los resultados obtenidos validan el potencial de las esponjas de aluminio sinterizadas como una alternativa sostenible y eficaz



**Disipadores de calor a base de esponja de aluminio  
sinterizada para aplicaciones electrónicas**

frente a los disipadores comerciales, lo cual abre la puerta a nuevas aplicaciones en sistemas electrónicos de bajo costo.

Por ultimo y una de las principales razones para realizar este estudio, se refiere al costo y al ahorro energético en la fabricación de los DCEM, que puede ser una de las ventajas competitivas al fabricar estos productos por métodos de compresión y sinterizado.

## REFERENCIAS

- AL-Migdady, A., Jawarneh, A., Khali, A. & Dalgamoni, H., 2021. Numerical Investigation of the Cooling Performance of PCM-based Heat Sinks Integrated with Metal Foam Insertion. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 15(2), pp. 191-197.
- Almonti, D., Baiocco, G., Mingione, E. & Ucciardello, N., 2020. Evaluation of the effects of the metal foams geometrical features on thermal and fluid-dynamical behavior in forced convection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volumen 111, pp. 1157-1172.
- Berenguer Monge, O. M., 2012. DESARROLLO, ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE SOLDEO TÉRMICO DE ESPUMAS DE ALUMINIO. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Fernandez Morales, P., Cano Montoya, C. A., Pérez Mesa, J. A. & Navecerrada, M. A., 2017. Thermal and Permeability Properties of Metal Aluminum Foams for Functional Applications1. *Ing. Univ*, 21(1), pp. 115-130.
- Gangoso Posadas, I., 2018. Espumas Metálicas de Níquel Caracterización y Comportamiento en servicio. Tesis Universidad de Valladolid.
- Hu, Y., Fang, Q.-Z., Yu, H. & Hu, Q., 2020. Numerical simulation on thermal properties of closed-cell metal foams with different cell size distributions and cell shapes. *Materials Today Communications*, Volumen 24.
- Jia, C. y otros, 2020. Highly compressible and anisotropic lamellar ceramic sponges with superior thermal insulation and acoustic absorption performances. *Nature Communicatios*.
- Lobontiu, N., 2018. Chapter 5 - Fluid and Thermal Systems. En: *System Dynamics for Engineering Students* (Second Edition). Alaska: Elsevier Inc., pp. 213-272.
- Restrepo, S., Nieto, C. & Fernandez Morales, P., 2014. PROPIEDADES TERMO-HIDRÁULICAS DE METALES CELULARES CON POROSIDAD ABIERTA. *Revista Colombiana de Materiales*, Issue 5, pp. 218-224.
- Rodriguez, H., 2024. Propiedades del aluminio (Al). [En línea] Available at: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-aluminio-al\\_18221](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-aluminio-al_18221)
- Vallejo, C., Chicaisa, D. & Sotomayor, O., 2017. Un Nuevo Método para la Fabricación de Espumas Metálicas Aleatorias de Célula Abierta con Regularidad Controlada. *Revista Politécnica*, 38(2).

