

Fenómeno de convección natural en líquidos conductores

José Luis Morón-Cruz, Alberto Beltrán

Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México
albem@materiales.unam.mx

Resumen

La convección natural es un fenómeno en el que el movimiento de un fluido se produce debido a diferencias de densidad causadas por variaciones de temperatura y está presente en múltiples fenómenos naturales, tales como en la circulación atmosférica, las corrientes oceánicas, corrientes de magma en el manto terrestre, etc. Recientemente ha cobrado relevancia el estudio del fenómeno de convección por su presencia en algunas aplicaciones tecnológicas: sistemas de calefacción y refrigeración, sistemas innovadores de almacenamiento de energía, entre otros. En este trabajo se presenta el fenómeno de convección natural en fluidos conductores de la electricidad, como los metales líquidos a temperatura ambiente. Finalmente, se proporciona información visual de pruebas realizadas en el laboratorio.

Palabras clave:

Almacenamiento de energía, metal líquido, baterías

Introducción

El fenómeno de convección natural tiene implicaciones importantes, tanto en contex-

tos naturales como tecnológicos. La comprensión de estos procesos es fundamental para un mejor entendimiento de algunos flujos observados en la naturaleza y/o presentes en la industria. La convección solar y estelar [1], la geodinamo de un reactor de fusión nuclear y la generación de viento [2] son solo algunos ejemplos que ilustran la importancia de la convección. Además, los principios de la transferencia de calor por convección desempeñan un papel fundamental en diversos ámbitos industriales y energéticos, especialmente a medida que surgen desafíos debido al aumento de las densidades de flujo de calor.

Un parámetro determinante de la naturaleza de los flujos convectivos son las propiedades termofísicas de los fluidos involucrados; el número de Prandtl (Pr) es una cantidad adimensional que se deriva de la relación entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica. Este parámetro sirve como un indicador de la difusión de calor dentro del fluido. En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos de valores para el número de Prandtl de fluidos.

Existe un interés particular en el estudio de

Tabla 1. Valores típicos del número de Prandtl para diversas sustancias a su temperatura de fusión T_f (cuando no se especifica, se supone que los fluidos están a temperatura de 315 K). Tabla propia con información de Lappa [3]

Tipo	Fluido	T_f (K)	Pr
Metales líquidos	Al	934	0.053
	Ga	303	0.0207
	Hg	300	0.025
	Sn	505	0.009
Componentes semiconductores y aleaciones metálicas	GaAs (arseniuro de galio)	298.15	0.068
	InP (fosfuro de indio)	298.15	0.015
	InSb (antimoniuro de indio)	298.15	0.039
Sales fundidas	KCl	1043	1.16
	NaCl	1073	1.02
	LiCl	883	1.52
Líquidos transparentes orgánicos e inorgánicos	Ciclohexano	–	14.6
	Glicol etileno	–	159
	Vidrio fundido	1873	6750
	Acetona	–	4.3
	Agua	–	6.9
Fluidos de interés geofísico	Magma	–	10^4 - 10^8
	Manto rocoso de la Tierra	–	10^{23}

fluidos con número de Prandtl mucho más pequeños que la unidad, ($Pr \ll 1$) donde la difusividad térmica supera ampliamente a la difusividad de momento. Ya que estos fluidos participan en los flujos internos en cuerpos celestes [4], zonas turbulentas en estrellas [5] y recientemente en baterías de metal líquido (BML) [6] [7]. Las BML nacen con la necesidad de tener sistemas de almacenamiento estacionarios a gran escala y son una alternativa de almacenamiento para la generación de energía eléctrica a través de las denominadas fuentes renovables de energía, de las cuales los principales exponentes son la energía geotérmica, hidroenergética, eólica y fotovoltaica [8]. Sin embargo, derivado de que estas fuentes de energía dependen de variables tales como la radiación solar, el calor interno de la Tierra, la velocidad del viento, entre otras; la capacidad de almacenar grandes cantidades de

electricidad será fundamental. Además de hacer la red eléctrica actual más eficiente, permitiendo entregar suministros rápidos durante las interrupciones y satisfacer los picos de demanda temporales.

En dichas baterías, tanto los electrodos como el electrolito se encuentran en estado líquido. Los componentes líquidos pueden ofrecer una mayor conductividad iónica, lo que se traduce en una mejor capacidad de carga y descarga. Esto puede conducir a una mayor densidad de energía y una mayor potencia específica, lo que significa que estas baterías pueden almacenar más energía y liberarla más rápidamente.

Actualmente, los desarrollos de BML funcionan a temperaturas superiores a 240°C , para mantener los electrodos metálicos en estado líquido. Estas temperaturas de tra-

bajo conllevan a un gradiente de temperatura de alrededor de 10 °C, lo cual provoca el fenómeno de convección natural de los fluidos al interior.

Adicionalmente, durante la carga o descarga, la corriente eléctrica genera disipación de Joule. Es importante mencionar que la capa de electrolito tiene la mayor resistencia eléctrica de las tres capas, provocando que el mayor calentamiento ocurra en esta región. De esta forma, el metal localizado al fondo se calienta desde la parte superior, mientras que el de arriba se calienta por abajo, generándose un flujo convectivo en el electrodo superior.

Estudios experimentales y numéricos

En el grupo de trabajo se ha estudiado el fenómeno de convección en líquidos conductores. Para los experimentos, se usa un metal líquido a temperatura ambiente como el Galio-Indio-Estaño (GaInSn) y se realizan mediciones con la técnica de velocimetría de ultrasonido por efecto Doppler (UDV, por sus siglas en inglés); mientras que, para los estudios numéricos se emplean herramientas de software comercial. Dichos estudios han permitido medir la velocidad del flujo convectivo de GaInSn, siendo posible obtener la velocidad máxima, tiempos característicos de los patrones de flujo, entre otros parámetros.

En la Figura 1 se puede observar la configuración experimental usada para la medición de los perfiles de velocidad, así como el modelo CAD (Computer-aided design, por sus siglas en inglés) y una imagen representativa de un flujo simulado para dicha configuración. En la Figura 2 se muestran ejemplos de los resultados obtenidos en el estudio, destacando el campo de velocidad.

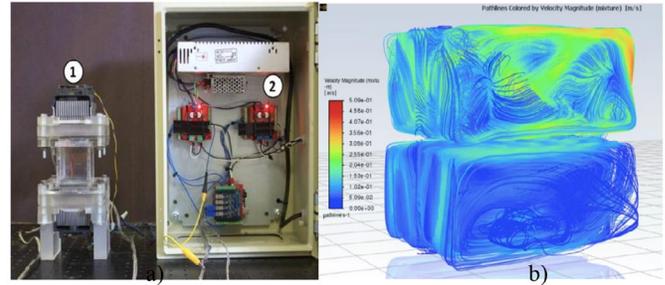


Figura 1.a) Configuración experimental constituida por una actividad cúbica (1) y sistemas de control de temperatura (2). b) Imagen de líneas de trayectoria del flujo de una simulación usando ANSYS Fluent

Con base en los resultados anteriores, es posible determinar que gradientes de temperatura cercanos a los 10 °C son capaces de generar un flujo convectivo de un metal líquido como el GaInSn, dicho movimiento puede influir (de forma positiva o negativa) en el desempeño de tecnologías como las BML. En trabajos futuros, se planea realizar un estudio que considere también campos electromagnéticos (campo magnético y/o corriente eléctrica).

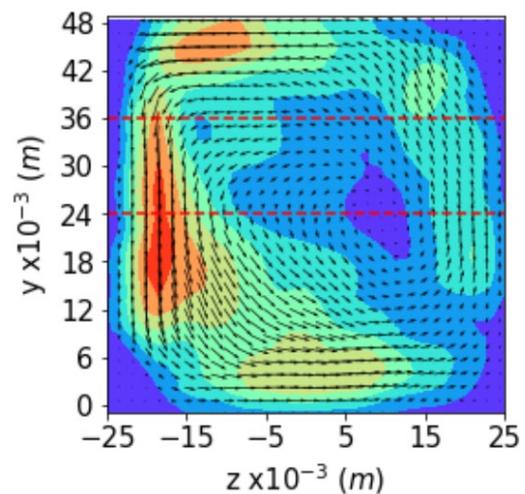


Figura 2. Campo de velocidades numérico para una T=4K en el plano y-z de una cavidad cúbica

Conclusión

La convección en líquidos conductores es un fenómeno que no solo ocurre en la naturaleza, sino que también puede ser aprovechado en tecnologías innovadoras como las baterías de metal líquido. Al compren-

der mejor los mecanismos de convección y otros fenómenos de transporte, es posible estudiar formas de controlarlos y así avanzar hacia una nueva generación de sistemas de almacenamiento de energía.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de los proyectos CONAHCyT CF-2023-I-1373 y UNAM-DGAPA-PAPIIT IN107722. J. L. Morón-Cruz agradece una beca de doctorado del CONAHCyT. La caracterización experimental se realizó en el Laboratorio de Magnetohidrodinámica (MHD), mientras que las simulaciones se realizaron en el Laboratorio de Diseño, Modelado y Simulaciones (LDMS), ambos en la Unidad Morelia del IIM-UNAM.

Referencias

- [1] E. A. Spiegel, "Thermal turbulence at very small prandtl number," *Journal of Geophysical Research*, pp. 1896-1977, 1962. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com>
- [2] J.F Salavy, L.V. Boccaccini, R. Lässer, R. Meyder, H. Neuberger, Y. Poitevin, G. Rampal, E. Rigal, M. Zmitko, and A. Aiello, "Overview of the last progresses for the european test blanket modules projects.," *Fusion Engineering and Design*, p. 2105–2112, 2007. <https://www.sciencedirect.com/>
- [3] M. Lappa, *Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability.*, 2010. <https://www.researchgate.net/>
- [4] J.M. Aurnou, M.A. Calkins, J.S. Cheng, K. Julien, E.M. King, D. Nieves, K.M. Soderlund, and S. Stellmach, "Rotating convective turbulence in earth and planetary cores.," *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, p. 246:52– 71, 2015. <https://www.sciencedirect.com/>
- [5] S. Hanasoge, L. Gizon, and K.R. Sreenivasan, "Seismic sounding of convection in the sun.," *Annual Review of Fluid Mechanics*, p. 191–217, 2016. <https://www.annualreviews.org/>
- [6] T. Weier. and D.H. Kelley, "Fluid Mechanics of Liquid Metal Batteries," *Applied Mechanics Reviews.*, 2018. <https://asmedigitalcollection.asme.org/>
- [7] N-. Weber, T. Weier, A. Bund, W. El-Mofid, G. M. Horstmann, C-C. Lalau, S. Landgraf, M. Nimitz, M. Starace and F. Stefani, "Liquid metal batteries - materials selection and fluid dynamics," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, p. 012013, 2017. <https://iopscience.iop.org/>
- [8] Secretaría de Energía, " Balance Nacional de Energía 2013," 2013. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/>[Accessed 2020].