



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

**Tesis de Maestría
Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

**Determinación de la difusividad térmica del
hidrogel de poliacrilamida mediante técnicas
fototérmicas**

Presenta:

Elí Chagolla Inzunza

Asesora de tesis:

Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes

Coasesor de tesis:

Dr. Pablo Genaro Martínez Torres

Dedicatoria

A mi padre, quien me ha inspirado con su pasión por el conocimiento y los libros, enseñándome que en cada página hay un universo por descubrir y heredándome ese amor infinito por aprender.

A mi madre, quien con su ejemplo me mostró que cuando las cosas se hacen con amor, tienen el poder de transformar, motivándome a poner el corazón en todo lo que hago.

A Gaby, por ser una luz constante en mi vida, recordándome que los sueños se alcanzan mejor cuando hay amor, paciencia y alguien dispuesto a caminar a tu lado.

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para llevar a cabo este proyecto, y por guiarme en cada paso de este proceso.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por enseñarme los valores que me han permitido llegar hasta aquí. A mi familia, por su comprensión y por estar siempre a mi lado, brindándome su confianza y aliento.

A CONAHCYT, por el apoyo económico y la confianza depositada en mí, lo que ha sido fundamental para poder realizar este trabajo y continuar con mi formación académica.

A mis asesores, la Dra. Laura y el Dr. Pablo, por su valiosa orientación a lo largo de todo este proceso. Ambos, en todo momento, mostraron una gran disposición para enseñarme y resolver todas mis dudas, lo que fue fundamental para el desarrollo de este proyecto. La Dra. Laura, por su paciencia, dedicación y por siempre estar dispuesta a compartir su conocimiento. Al Dr. Pablo, por su enorme inteligencia matemática, que combina con una visión práctica, lo que me permitió abordar los problemas desde una perspectiva más profunda y aplicada. Su apoyo, compromiso y guía fueron esenciales para mi crecimiento académico y profesional.

A mis maestros, por haberme enseñado más allá de los libros, por su dedicación y por inspirarme a seguir adelante en mi camino académico y profesional.

A mis compañeros de la maestría, con quienes inicié este camino, por ser parte fundamental de esta etapa. Gracias por compartir experiencias, conocimientos y por el apoyo mutuo durante todo el proceso. Su amistad y compañerismo han sido una parte esencial de esta experiencia, convirtiendo este tiempo en algo inolvidable.

A mis compañeros de laboratorio, Luis, Hipólito, Miguel, Pedro y Carlos, por su colaboración, apoyo y por compartir el trabajo y los retos de la investigación. Junto a ellos, además de enfrentar los desafíos académicos, disfrutamos de un ambiente de camaradería que hizo el proceso mucho más ameno. Gracias por su valiosa amistad, por su trabajo en equipo y por contribuir a hacer de este proceso una experiencia enriquecedora.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por brindarme la oportunidad de formarme en un ambiente académico y de investigación de alta calidad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por ser el lugar donde se gestaron este trabajo y muchas de las experiencias que me han permitido crecer profesionalmente.

Mis agradecimientos son extensos porque considero que la finalización de este proyecto no es el resultado de un esfuerzo individual, sino de la colaboración y el apoyo de muchas personas. Cada uno de los mencionados ha sido fundamental para que este trabajo sea posible, y por ello, estoy profundamente agradecido con todos ellos.

Contenido

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Resumen	xi
Abstract	xiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Estado del arte	2
1.3. Objetivo general	6
1.3.1. Objetivo específico	6
1.4. Justificación	7
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	8
2.1. Primera ley de la termodinámica	9
2.2. Balance de energía para sistemas cerrados	9
2.3. Transferencia de calor	10
2.3.1. Conducción	10
2.3.2. Ecuación de difusión de calor	13
2.4. Efecto fototérmico	18
2.4.1. Ondas térmicas	18
2.4.2. Fuente de calor periódica	19
2.4.3. Calentamiento con una capa de material	23
2.5. Hidrogeles	27
2.5.1. Acrilamida	30
2.5.2. Poliacrilamida	30
Capítulo 3. Metodología	33
3.1. Molino de bolas	33
3.2. Preparación de las muestras	34

3.3. Cavidad de ondas térmicas	36
3.3.1. Amplificador lock-in.....	38
3.3.2. Diodo láser.....	39
3.3.3. Voltaje de modulación de referencia.....	40
3.3.4. Generador de ondas térmicas.....	41
3.3.5. Sistema de control de temperaturas	45
Capítulo 4. Resultados y discusiones	47
4.1. Clasificación de muestras por tamaño de partícula	47
4.2. Capacidad de absorción	52
4.3. Difusividad térmica	53
4.4. Efecto de la temperatura en la difusividad térmica del hidrogel PAAm	53
4.5. Efecto de la fracción volumétrica en la difusividad térmica del hidrogel PAAm	54
4.6. Efecto del tamaño de partícula en la difusividad térmica del hidrogel PAAm.....	56
4.7. Conductividad térmica.....	57
4.8. Efecto del tamaño de las partículas en la conductividad térmica del hidrogel PAAm	60
4.8.1. Modelo Lewis-Nielsen	60
4.8.2. Modelo Jang y Choi.....	63
4.9. Efecto de la fracción volumétrica en la conductividad térmica del hidrogel PAAm.....	65
4.9.1. Modelo Lewis-Nielsen	65
4.9.2. Modelo de segundo orden y tres fase de Xu et al.	66
Capítulo 5. Conclusiones	71
Referencias bibliográficas	74

Lista de figuras

Figura 1. Transferencia de calor por conducción en un material de espesor	11
Figura 2. Flujo de calor en dirección perpendicular al área para cada caso.	13
Figura 3. Volumen de control diferencial, $dx dy dz$, en coordenadas cartesianas.	14
Figura 4. Conducción de calor en tres dimensiones para un volumen de control diferencial rectangular.	15
Figura 5. Sólido semi-infinito calentado uniformemente por un láser modulado.	19
Figura 6. Calentamiento armónico mediante un láser modulado de dos materiales en contacto (un sólido y un gas).	23
Figura 7. Representación gráfica de la estructura de un hidrogel. Adaptación de Gonzales (2019). 28	
Figura 8. Clasificación de los hidrogeles.	29
Figura 9. Estructura química de: a) acrilamida, b) MBAm. Adaptación de Gonzales (2019).	30
Figura 10. Mecanismo de reacción para la formación de poliacrilamida. Adaptación de Gonzales (2019).	31
Figura 11. Mecanismo de reacción para la formación de poliacrilamida con agente entrecruzante MBAm. Adaptación de Gonzales (2019).	32
Figura 12. Diagrama esquemático de la técnica molino de bolas para obtener diferentes tamaños de partícula del polímero original de PAAM.	34
Figura 13. Gráfica que muestra la relación entre las masas de agua y polímero necesarias para realizar una mezcla de hidrogel de PAAM al 0.1% de fracción volumétrica.	35
Figura 14. a) Pesaje de masa del polímero PAAM. b) Pesaje de masa de agua. c) Resultado final de la mezcla de hidrogel PAAM.	36
Figura 15. Diagrama esquemático de la configuración experimental para obtener la difusividad térmica de los fluidos estudiados.	37
Figura 16. Diagrama esquemático de un amplificador lock-in.	38
Figura 17. Divergencia perpendicular del haz del diodo láser.	39
Figura 18. Corrientes de operación del láser.	41
Figura 19. Generador de ondas térmicas.	42
Figura 20. Diagrama esquemático del generador de ondas térmicas.	43
Figura 21. Diagrama esquemático del sistema de control de temperaturas.	46
Figura 22. Imágenes de partículas de PAAM: a) partículas en su tamaño original (G1) y b) partículas después del procesamiento mediante molienda en molino de bolas de acero, mostrando cuatro tamaños distintos (G2, G3, G4 y G5).	48

Figura 23. Imagen del microscopio óptico de partículas de poliacrilamida en su tamaño original (G1).....	49
Figura 24. Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica de muestras de poliacrilamida después del tratamiento de molienda, mostrando diferentes tamaños de partícula: a) Tamaño 2 (G2), b) Tamaño 3 (G3), c) Tamaño 4 (G4), d) Tamaño 5 (G5).....	50
Figura 25. Distribución del tamaño de partículas de poliacrilamida: a) Tamaño original (G1), b-e) Tamaños obtenidos mediante el método de molienda con molino de bolas: b) Tamaño 2 (G2), c) Tamaño 3 (G3), d) Tamaño 4 (G4), e) Tamaño 5 (G5).....	51
Figura 26. Experimento para determinar la cantidad de agua que puede absorber el polímero PAAm.	52
Figura 27. Difusividad térmica a diferentes temperaturas de hidrogel PAAm y diferentes porcentajes de fracción volumétrica.	55
Figura 28. Difusividad térmica del hidrogel PAAm a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.	55
Figura 29. Difusividad térmica del hidrogel PAAm de muestras obtenidas a partir de diferentes tamaños de partículas.....	56
Figura 30. Conductividad térmica a diferentes temperaturas de hidrogel PAAm a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.	58
Figura 31. Conductividad térmica del hidrogel PAAm a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.	59
Figura 32. Conductividad térmica del hidrogel PAAm de muestras obtenidas a partir de diferentes tamaños de partículas.....	59
Figura 33. Compuestos con partículas consideradas por Lewis-Nielsen.	61
Figura 34. Relación de la conductividad térmica normalizada (conductividad efectiva/ conductividad de la fase continua) en función de la fracción volumétrica de la fase dispersa.	62
Figura 35. Variación de la conductividad térmica normalizada (conductividad efectiva/ conductividad de la fase continua) en función del tamaño de las partículas.	64
Figura 36. Comparativa de los resultados analíticos (modelo Lewis-Nielsen) y experimentales de la conductividad térmica del hidrogel PAAm en función de % fracción volumétrica.	65
Figura 37. a) Modelo tridimensional del hidrogel PAAm con estructura esférica.	66
b) Corte esquemático del hidrogel PAAm, dividido en tres fases. [Interpretación basada en el modelo de Xu et al. (2018)]......	66
Figura 38. Comparativa entre los resultados experimentales y la predicción del modelo teórico de segundo orden de tres fases.	69

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del Polyacrylamide/acrylate.	33
Tabla 2. Parámetros utilizados para la obtención de diferentes tamaños de muestras PAAm y promedio de tamaño de partículas obtenido.	47
Tabla 3. Propiedades del agua a diferentes temperaturas. Fuente: (Cengel y Ghajar, 2020).	57

Resumen

En esta investigación se presenta el estudio de hidrogel de poliacrilamida (PAAm), partiendo del polímero sin hidratar y reduciendo el tamaño de sus partículas para caracterizarlo con el objetivo principal de obtener su difusividad térmica. Se describe detalladamente el proceso de reducción de tamaño mediante el método de molino de bolas. Posteriormente, se preparan varias muestras del hidrogel PAAm con diferentes porcentajes volumétricos del polímero para el análisis de sus propiedades térmicas.

También, se presenta la metodología de técnicas fototérmicas, tanto en muestras de agua como en muestras de hidrogel PAAm, enfocándose en la caracterización térmica de este hidrogel, evaluando su difusividad en condiciones variables: cambio de temperatura, cambio en la fracción volumétrica de las mezclas y cambios en el tamaño de las partículas. Se emplea la técnica de cavidad de ondas térmicas (TWRC, por sus siglas en inglés), utilizando una luz láser modulada para generar calor en una muestra.

Se observa una variación significativa de la difusividad térmica del hidrogel en respuesta a cambios de temperatura, abarcando un rango desde 20 °C hasta 30 °C. Además, se analiza el impacto de la fracción volumétrica del polímero en el hidrogel, revelando variaciones notables en la difusividad térmica en un rango de fracción volumétrica que osciló entre 0 % y 0.5 %. Asimismo, se identifica una influencia directa del tamaño de las partículas en la difusividad térmica del hidrogel.

Los resultados obtenidos indican que esta técnica, cuando se utiliza para la medición de difusividad térmica del agua, ofrece buena precisión ya que los resultados obtenidos teniendo como parámetro el agua son similares a valores ya establecidos en la literatura. Se concluye que esta técnica es eficaz para obtener la propiedad térmica del hidrogel PAAm, obteniendo valores de difusividad térmica de hasta $1.517 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a una temperatura de 30 °C. Estas mediciones indican que la adición de este polímero en concentraciones entre el 0 % y el 0.5 % en agua

provoca un aumento en su difusividad térmica. Asimismo, se obtiene la conductividad térmica a partir de la ecuación de la difusividad térmica y se verifican los resultados con los modelos teórico-empíricos propuestos por Xu *et al.* (2018).

Estos resultados resaltan la importancia de considerar múltiples factores, como la temperatura, la fracción volumétrica del polímero y el tamaño de partícula, al caracterizar las propiedades térmicas de los hidrogeles. Esta comprensión detallada puede ser fundamental para el diseño y desarrollo de hidrogeles con propiedades térmicas controladas, con aplicaciones potenciales en diversas áreas científicas, biomédicas e industriales.

Palabras clave: hidrogeles, caracterización térmica, resonador de ondas térmicas, conductividad térmica, poliacrilamida.

Abstract

In this research, a study of polyacrylamide (PAAm) hydrogel is presented, starting from the unhydrated polymer and reducing the size of its particles to characterize it with the primary objective of obtaining its thermal diffusivity. The size reduction process using the ball milling method is described in detail. Subsequently, several samples of PAAm hydrogel with different volumetric percentages of the polymer are prepared for analysis.

The methodology of photothermal techniques is also presented, both in water samples and in PAAm hydrogel samples, focusing on the thermal characterization of this hydrogel. The study evaluates its diffusivity under varying conditions: changes in temperature, changes in the volumetric concentration of the mixtures, and changes in particle size. The technique of Thermal Wave Resonance Cavity (TWRC) is employed, using modulated laser light to generate modulated heat in a sample.

A significant variation in the thermal diffusivity of the hydrogel is observed in response to temperature changes, covering a range from 20 °C to 30 °C. Additionally, the impact of the polymer's volumetric concentration in the hydrogel is analyzed, revealing notable variations in thermal diffusivity within a volumetric concentration range of 0% to 0.5%. A direct influence of particle size on the thermal diffusivity of the hydrogel is also identified.

The obtained results indicate that this technique, when used for measuring the thermal diffusivity of water, offers good precision, as the results obtained with water as a reference are similar to values already established in the literature. It is concluded that this technique is effective for obtaining the thermal property of PAAm hydrogel, yielding thermal diffusivity values of up to 1.517×10^{-7} m²/s at a temperature of 30 °C. These measurements indicate that adding this polymer in concentrations between 0% and 0.5% to water causes an increase in its thermal diffusivity. Additionally, thermal conductivity is derived from the thermal diffusivity

equation, and the results are verified with the theoretical-empirical models proposed by Xu *et al.* (2018).

These results highlight the importance of considering multiple factors, such as temperature, polymer volumetric concentration, and particle size, when characterizing the thermal properties of hydrogels. This detailed understanding can be fundamental for the design and development of hydrogels with controlled thermal properties, with potential applications in various scientific, biomedical, and industrial fields.

Key words: hydrogels, thermal characterization, thermal wave resonator, thermal conductivity, polyacrylamide.

Capítulo 1. Introducción

En la actualidad, el uso de hidrogeles en la sociedad ha experimentado un notable aumento, lo que subraya la importancia de comprender sus propiedades para el desarrollo, diseño y mejora de sus diversas aplicaciones. Estos hidrogeles, formados por cadenas poliméricas entrelazadas en una malla tridimensional, representan un estado intermedio entre líquido y sólido, capaz de retener líquidos hasta en un 99 % en su estructura. Esta capacidad se debe a la debilidad de las uniones que conforman la malla, lo que permite que se descomponga y reforme en respuesta a cambios en su entorno, como temperatura, luz, pH u otros estímulos (Díaz, 2006).

Los hidrogeles, ya sean orgánicos o acuosos, poseen propiedades únicas que los hacen materiales versátiles y prometedores para una variedad de aplicaciones. Estos polímeros hidrofílicos son insolubles en agua, blandos, elásticos y capaces de hincharse en presencia de líquido, manteniendo su forma hasta alcanzar un equilibrio físico-químico (Katime *et al.*, 2004). La red polimérica compatible y su alto contenido de agua les otorgan excelentes propiedades de deformación y biocompatibilidad, así como la capacidad de reducir su volumen de manera reversible en respuesta a estímulos externos, como cambios de temperatura, pH, fuerzas iónicas, campos eléctricos y reacciones químicas (Lei *et al.*, 2021). Esta combinación de atributos hace de los hidrogeles unos materiales altamente prometedores para una amplia gama de aplicaciones, desde la agricultura hasta la medicina (Xu *et al.*, 2018).

La caracterización detallada de las propiedades de los hidrogeles es esencial para comprender su rendimiento y sus limitaciones, así como para identificar sus posibles aplicaciones en diversos campos. En este sentido, la difusividad térmica es una propiedad de interés particular, que puede estudiarse mediante técnicas fototérmicas como la técnica de cavidad de ondas térmicas, TWRC (Almond y Patel, 1996). Esta técnica permite medir las fluctuaciones de temperatura en una muestra como resultado del proceso de de-excitación no radiativa que ocurre tras la absorción de radiación modulada en intensidad. La propagación de

ondas térmicas en un material está directamente relacionada con su difusividad térmica, y el desarrollo de la técnica TWRC ha permitido medir estas propiedades térmicas mediante el seguimiento del comportamiento espacial de la onda térmica a través de escaneos en longitud de la cavidad (Balderas-Lopez *et al.*, 2000).

1.1. Planteamiento del problema

Uno de los campos donde se hace más investigación es en la ciencia de los materiales y el área de los polímeros se ha convertido en una de las más estudiadas y con más desarrollo. Los hidrogeles son polímeros que han ido cobrando gran importancia en nuestra sociedad debido a su amplia gama de aplicaciones como por ejemplo: en agricultura, para protección del medio ambiente, en electricidad y electrónica, en la industria alimenticia y en medicina, entre otras.

Dentro de las aplicaciones médicas más importantes de los hidrogeles están la liberación controlada de fármacos, como regeneradores de tejidos y como prótesis. Para el uso de un hidrogel en el organismo es fundamental conocer sus propiedades tanto térmicas como mecánicas. Algunos hidrogeles están bien estudiados en relación de sus propiedades mecánicas y térmicas. Sin embargo, el continuo avance en el desarrollo de materiales poliméricos lleva a crear materiales que todavía no han sido caracterizados. Por ello en este trabajo se enfoca en la caracterización térmica del hidrogel PAAm. Asimismo, se estudian las propiedades térmicas de este hidrogel en función de su concentración y se subraya la importancia de considerar diversos factores, como la temperatura, la concentración de polímero y el tamaño de partícula, al abordar la caracterización de las propiedades térmicas de los hidrogeles.

1.2. Estado del arte

La investigación en el campo de los polímeros y, específicamente, en los hidrogeles PAAm, ha generado un interés significativo debido a sus diversas aplicaciones. Durante la revisión bibliográfica, se examinó detalladamente la estructura, propiedades y aplicaciones de los

hidrogeles PAAm, con un enfoque particular en su conductividad térmica; así como, artículos en los que se explica la técnica fototérmica TWRC. A continuación, se presentan los trabajos más destacados en orden cronológico.

Tessema y Kidane (2015) investigaron el cambio de la conductividad térmica de nanocompuestos poliméricos variando su fracción volumétrica y el tamaño de las partículas. Además, tomaron como base a Lewis-Nielson y la aproximación de medio efectivo modificada, con lo que propusieron un modelo analítico de tres fases para determinar la conductividad térmica de diferentes nanocompuestos. Observaron que la conductividad térmica aumenta linealmente a medida que aumenta la fracción de volumen de las partículas. Asimismo, concluyeron que a menor tamaño de partícula y a la misma fracción volumétrica la conductividad es mayor. Por otro lado, aunque el tamaño de partícula tiene un efecto en la conductividad térmica de los nanocompuestos, el efecto es mínimo en comparación con la fracción de volumen.

Forero-Sandoval *et al.* (2016) examinaron la conductividad térmica y la viscosidad de una suspensión magnetorreológica (MR) compuesta por partículas de hierro carbonilo (CIP, por sus siglas en inglés) inmersas en aceite de silicona. Las mediciones de la difusividad térmica se realizaron utilizando la técnica fototérmica llamada TWRC, utilizando un montaje que incluía un cilindro contenedor con una película piroeléctrica en la parte inferior, junto con un cristal de silicio y un sensor piroeléctrico en el interior. Mientras que, emplearon un viscosímetro rotacional para medir la viscosidad. Los resultados mostraron que la adición CIP, combinada con un campo magnético, induce la formación de cadenas que aumentan significativamente la conductividad térmica y la viscosidad. Se halló una dependencia funcional entre la conductividad térmica y la viscosidad, mostrando que cuando la viscosidad aumenta, la conductividad térmica alcanza un valor máximo estable.

Tang *et al.* (2017) investigaron teórica y experimentalmente la dinámica molecular de equilibrio de la conductividad térmica en hidrogeles PAAm. Desarrollaron diversas tecnologías

para medir las propiedades termofísicas de materiales en diferentes estados, destacando el método 3ω que consiste en aplicar una corriente eléctrica alterna a una frecuencia angular de 1ω en dos electrodos, se detecta una pequeña señal de voltaje a través del calentador hacia otros dos electrodos. Se selecciona el voltaje a una frecuencia de 3ω que lleva la señal del efecto térmico. Los resultados de la investigación revelan que la conductividad térmica de los hidrogeles PAAm depende de la densidad de entrecruzamiento efectiva y el contenido de agua.

Xu *et al.* (2018) construyeron modelos de dinámica molecular (MD, por sus siglas en inglés) de hidrogeles PAAm reticulados aleatorios con diferentes volúmenes de agua a través de un método de reacción. Sobre la base de estos modelos, las conductividades térmicas de hidrogeles a nanoescala fueron investigadas mediante un método MD fuera de equilibrio (NEMD, por sus siglas en inglés). Concluyendo que cuando la fracción de agua de los hidrogeles está por debajo del 85 %, la conductividad térmica aumenta con la fracción de agua y puede ser incluso mayor que las conductividades térmicas de las redes de polímeros puros y del agua pura, esto debido a la influencia de la interfaz entre las redes de polímeros y agua. Sin embargo, cuando la fracción de agua en los hidrogeles es superior al 85%, su conductividad térmica disminuye y se acerca a la conductividad del agua. En consecuencia, para explicar este fenómeno anormal, propusieron un modelo teórico de 2 órdenes y 3 fases considerando el hidrogel como un compuesto de 3 fases. Encontraron que la teoría propuesta puede predecir resultados que concuerdan bastante bien con los resultados simulados.

Gonzales (2019) investigó la síntesis y características de hidrogeles PAAm y poli(acrilamida-co-ácido acrílico), ambos entrecruzados con N, N'-bismetilenacrilamida (MBA) y un derivado de quitosana (DCHI). Utilizando diversas técnicas de caracterización, se evaluaron propiedades como la capacidad de absorción de agua, resistencia mecánica y comportamiento viscoelástico. Los resultados mostraron que la microestructura de los hidrogeles influyó significativamente en su capacidad de absorción de agua, con valores que oscilaron entre el 2300 % y el 6800 %. Además, observó que un aumento en la densidad de entrecruzamiento

condujo a mejoras en las propiedades mecánicas y reológicas de los hidrogeles, aunque esto se asoció con una reducción en su capacidad de absorción de agua.

Xu y Liu (2019) derivaron las ecuaciones gobernantes no lineales acopladas para las propiedades transitorias de los hidrogeles, con balances de entropía. En lugar de escribir la energía libre de los hidrogeles como una combinación del estiramiento de las redes de polímeros y la mezcla con el solvente, derivaron la energía libre en forma de hinchamiento de los hidrogeles y estiramiento de los hidrogeles hinchados, que es una función del contenido de agua y relación de estiramiento de hidrogeles bajo fuerzas o restricciones externas. Concluyeron que la nueva forma de energía libre es más adecuada para su uso en laboratorio o para la aplicación de hidrogeles en situaciones reales, y su significado físico es más claro. Por último, realizaron una simulación numérica del proceso de secado de una película de hidrogel adherida a un sustrato en base a las ecuaciones gobernantes y energía libre. Investigaron la distribución transitoria del contenido de agua, el perfil de temperatura y el campo de tensión.

Zhou *et al.* (2020) utilizaron una estrategia para demostrar que se podía potenciar la conducción de calor en polímeros amorfos ajustando sus interacciones intermoleculares. Utilizando el hidrogel polivinilalcohol (PVA) como sistema modelo, demostraron cómo las fuerzas intermoleculares dinámicas, que se rompen y se vuelven a formar constantemente, también pueden mejorar el transporte térmico. Utilizando medidas calorimétricas y espectroscópicas, mostraron que esto surge de los enlaces de hidrógeno formados entre el agua y las cadenas de polímero cercanas, que mejoran la eficiencia de transferencia de calor entre cadenas. Concluyendo que aunque la mejora observada es pequeña en escalas absolutas, este mecanismo puede ser potencialmente útil para desarrollar materiales conductores de calor con funcionalidades de autorreparación o reconfigurables utilizando fuerzas intermoleculares dinámicas como bloques de construcción. Además, observaron que a medida que aumenta la fracción de agua, el módulo del hidrogel también disminuye.

Jiang *et al.* (2021) combinaron hidrogel polivinilpirrolidona (PVP), plata y selenio para utilizarlo como película sobre una membrana de nailon para un generador termoeléctrico flexible que transforma la energía térmica del cuerpo, en energía eléctrica. Combinaron una película de PVP sobre una membrana de nailon preparada *in situ* con la síntesis de nanoestructuras de Ag₂Se (NSs) recubiertas con PVP, luego filtraron por vacío las NSs y finalmente prensaron en caliente. Concluyeron que, la microestructura única y el efecto sinérgico de los dos componentes, la película compuesta óptima exhibió un factor de potencia ultra alto de $\sim 1910 \mu\text{W}/\text{mK}^2$ a 300 K y excelente flexibilidad. Además, que el factor de potencia y la flexibilidad aumentan en 37.5 % y 94.5 %, respectivamente entre una película con PVP y una película sin PVP.

Ohm *et al.* (2021) elaboraron una combinación de plata y una matriz de hidrogel PAAm para usarla en circuitos digitales y en aplicaciones de bioelectrónica ya que los hidrogeles ofrecen flexibilidad similar a la de un tejido, capacidad de estiramiento, resistencia a la fractura, conductividad iónica y compatibilidad con sustancias biológicas, añadiendo con la plata propiedades de conductividad eléctrica. Esta combinación dio como resultado un compuesto con alta conductividad eléctrica ($>300 \text{ S cm}^{-1}$), estabilidad eléctrica bajo cargas mecánicas repetidas, bajo módulo de Young ($<10 \text{ kPa}$) y alta capacidad de estiramiento (hasta 250% de deformación sin falla eléctrica).

1.3. Objetivo general

Determinar la difusividad térmica del hidrogel PAAm utilizando técnicas fototérmicas, con el fin de entender su comportamiento térmico.

1.3.1. Objetivo específico

- Preparar hidrogeles con diferentes concentraciones a partir de PAAm.
- Determinar la difusividad térmica del hidrogel PAAm mediante la técnica de cavidad de ondas térmicas.

- Aplicar modelos térmicos efectivos para describir el comportamiento de los datos experimentales.

1.4. Justificación

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento científico existente sobre el hidrogel PAAm, así como, ofrecer información valiosa para su aplicación en diversos sectores. Además, los resultados obtenidos podrían servir de base para futuros estudios en la mejora de las propiedades térmicas de hidrogeles, posibilitando el desarrollo de materiales con características optimizadas para aplicaciones específicas. En este sentido, la caracterización térmica del hidrogel PAAm realizada en esta investigación es una contribución para el avance de la ciencia de materiales y su aplicabilidad en tecnologías emergentes.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

El estudio de las propiedades térmicas de los materiales desempeña un papel fundamental en una amplia gama de campos científicos y tecnológicos, desde la ingeniería hasta la física y la química. Estas propiedades, son cruciales para comprender y predecir cómo los materiales responden a los cambios de temperatura y cómo se propaga el calor a través de ellos.

En este contexto, este marco teórico se centra en definir y explicar estas propiedades térmicas, primero desde el punto de vista conceptual y después desde el punto de vista de las ecuaciones físicas que las involucran. Centrándose en examinar las formas de transferencia de calor y las propiedades fundamentales que influyen en este proceso, tales como la conductividad térmica, el calor específico y la difusividad térmica.

La ecuación de Fourier para conducción de calor define el flujo de calor a través de un material. La facilidad con la que el calor se transfiere a través del material está determinada por el coeficiente conductivo. Además, la difusividad térmica se relaciona con el coeficiente de conductividad térmica a través de la densidad y el calor específico del material. Esta relación indica cuán rápido se propaga el calor dentro de un material, considerando tanto su capacidad para conducir calor como para almacenar energía térmica.

Posteriormente, se aborda el tema de las ondas térmicas, explorando situaciones específicas donde la transferencia de calor se manifiesta en forma oscilatoria. Se analiza el caso de una fuente de calor armónica periódica en un material semi-infinito, así como en sistemas de una capa o dos capas de materiales distintos. Estos análisis permiten comprender cómo la naturaleza periódica de la fuente de calor influye en la distribución y propagación del calor en el material.

Finalmente, se hace un enfoque en los polímeros que son materiales ampliamente utilizados en diversas aplicaciones debido a sus propiedades únicas. En particular, se examina el

hidrogel PAAm, un tipo de polímero con propiedades hidrofílicas que lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones farmacéuticas, biomédicas y ambientales.

2.1. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, establece que la energía no puede ser creada ni destruida durante un proceso; únicamente puede transformarse de una forma a otra. Como consecuencia, es fundamental considerar todas las pequeñas cantidades de energía involucradas en un proceso. Puesto que la energía puede ser transferida hacia un sistema o desde él a través de calor, trabajo y flujo de masa, y dado que la energía total de un sistema compresible simple incluye las energías interna, cinética y potencial, el balance energético para cualquier sistema en proceso se formula de la siguiente manera (Cengel *et al.*, 2019):

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sistema} \quad (2.1)$$

El estudio de la transferencia de calor, suele enfocarse en las formas de energía que son transferibles debido a una diferencia de temperatura, específicamente el calor o la energía térmica. En estas situaciones, es útil formular un balance de calor, considerando la conversión de energías nuclear, química, mecánica y eléctrica en energía térmica como generación de calor. De esta manera, el balance de energía puede expresarse de la siguiente forma (Cengel *et al.*, 2019):

$$q_{ent} - q_{sal} + E_{gen} = \Delta E_{térmica, sistema} \quad (2.2)$$

2.2. Balance de energía para sistemas cerrados

Un sistema cerrado está compuesto por una masa fija. Para la mayoría de los sistemas prácticos, la energía total E está compuesta principalmente por la energía interna U . Esto es especialmente cierto en sistemas estacionarios, donde no se producen cambios en la velocidad o la altura

durante el proceso. En tales casos, la ecuación de balance de energía se simplifica como (Cengel *et al.*, 2019):

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U = m c_p \Delta T. \quad (2.3)$$

Donde el calor específico, c_p medido en kJ/kgK se define como la cantidad de energía térmica requerida para incrementar la temperatura de una unidad de masa de un material en una unidad de temperatura. En otras palabras, representa el calor absorbido o liberado por una unidad de masa m de una sustancia cuando su temperatura varía en una unidad ΔT (Cengel *et al.*, 2019):

$$\Delta U = E_{alm} = m c_p \Delta T. \quad (2.4)$$

2.3. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se transfiere de un cuerpo o sistema a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos. Este proceso se lleva a cabo a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. Estos modos de transferencia de calor ocurren naturalmente desde el medio con temperatura más alta hacia el medio con temperatura más baja (Cengel y Ghajar, 2020).

En este estudio se asume que el efecto de la convección y la radiación son despreciables en comparación con la contribución de la conducción, por lo que el análisis se centra exclusivamente en el estudio de la transferencia de calor por conducción.

2.3.1. Conducción

La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de un medio estacionario, como un sólido, debido a la interacción directa entre las partículas del medio. Se produce cuando las

partículas más energéticas transfieren energía térmica a las partículas adyacentes menos energéticas a medida que vibran y colisionan entre sí.

La transferencia de calor por conducción a través de un medio está determinada por varios factores, como su configuración geométrica, su espesor y el material del que esté hecho. Además, depende de la diferencia de temperaturas entre las superficies involucradas, con el calor fluyendo desde la superficie con mayor temperatura T_1 a la superficie con menor temperatura T_2 , $T_1 > T_2$, como se ilustra en la Figura 1. Este fenómeno se representa por la ley de Fourier (Cengel y Ghajar, 2020):

$$q = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (2.5)$$

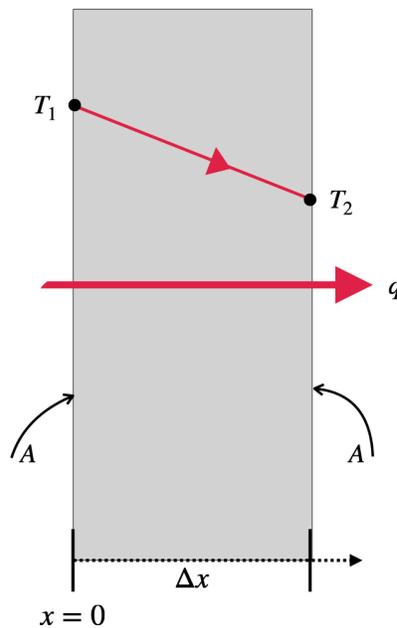


Figura 1. Transferencia de calor por conducción en un material de espesor Δx .

Donde k es la conductividad térmica (W/mK) del material. Comenzaremos definiendo esta constante k como la propiedad que describe la capacidad de un material para conducir el calor, es decir, la capacidad de un material para transferir el calor en respuesta a un gradiente de

temperatura dT/dx . El gradiente de temperatura, que se define como la pendiente de la curva de temperatura en un gráfico T-x, describe cómo cambia la temperatura con respecto a la posición x . La relación establecida indica que la tasa de conducción de calor en una dirección específica es directamente proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor fluye hacia la región de menor temperatura, lo que provoca que el gradiente de temperatura sea negativo cuando la temperatura disminuye a medida que x aumenta. El signo negativo en la ecuación (2.5) asegura que la transferencia de calor en la dirección positiva de x se exprese como una cantidad positiva. El área A representa una superficie perpendicular a la dirección del flujo de calor, en este caso en dirección x (Cengel y Ghajar, 2020).

Cengel y Ghajar en 2020 mencionan que:

Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica α (m^2/s), la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como:

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p}. \quad (2.6)$$

La conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρc_p representa cuanta energía almacena un material por unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica α de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor por el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducida a través de él. (p. 22)

2.3.2. Ecuación de difusión de calor

Una vez que se establece mediante la ley de Fourier, que el flujo de calor en la dirección en x está dado por la ecuación (2.5) y que la dirección de este flujo es perpendicular a la superficie A , para un elemento diferencial cúbico (véase Figura 2), la conducción de calor es una cantidad vectorial. Esta cantidad puede representarse de manera general en tres dimensiones como el gradiente de temperatura a través de cada una de las caras del cubo (Incropera *et al.*, 1996):

$$\vec{q} = kA \vec{\nabla} T, \quad (2.7)$$

donde $\vec{\nabla}$ es el operador nabla y $T(x,y,z)$ es el campo de temperaturas en tres dimensiones:

$$\vec{\nabla} = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}, \quad (2.8)$$

de manera general, el flujo de calor en tres dimensiones puede expresarse como:

$$\vec{q} = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \hat{n}, \quad (2.9)$$

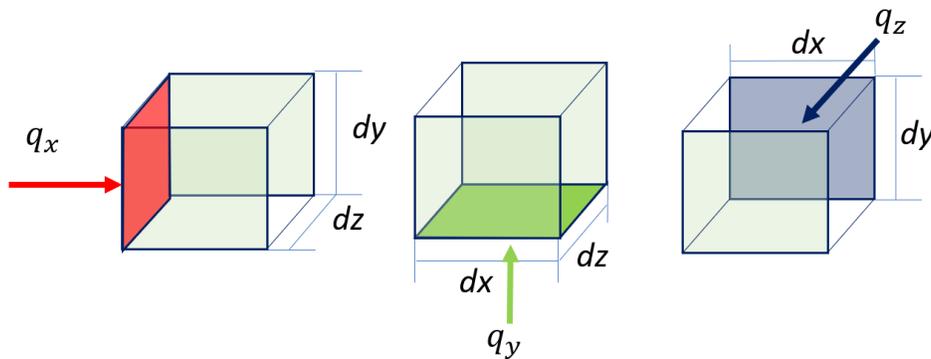


Figura 2. Flujo de calor en dirección perpendicular al área para cada caso.

de manera tal que en coordenadas cartesianas:

$$\vec{q} = \hat{i}q_x + \hat{j}q_y + \hat{k}q_z, \quad (2.10)$$

donde cada componente puede expresarse como:

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2.11)$$

El interés en el comportamiento del mecanismo de transferencia de calor por difusión, se extiende más allá del cálculo del flujo de calor a través de un medio. Uno de los objetivos principales es determinar el campo de temperaturas en un medio que está sujeto a diferentes temperaturas en sus fronteras. Para ello, considere un medio continuo, del cual se obtiene un elemento volumétrico tan pequeño que puede decirse que se considera un elemento, con un volumen diferencial definido por $dV = dx dy dz$, Figura 3 (Incropera *et al.*, 1996).

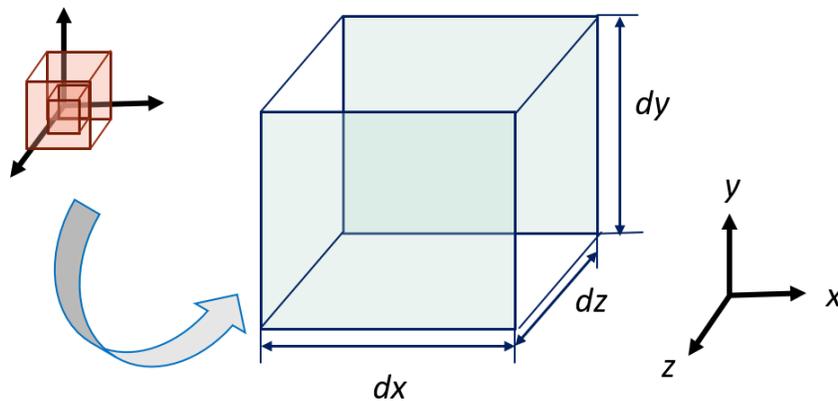


Figura 3. Volumen de control diferencial, $dx dy dz$, en coordenadas cartesianas.

Sobre este diferencial de volumen, se realiza un balance de energía aplicando el principio de conservación de energía o la primera ley de la termodinámica. La contribución de los flujos de calor en cada superficie del diferencial de volumen (véase Figura 4) se definen como (Incropera *et al.*, 1996):

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx, \quad (2.12)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy, \quad (2.13)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz. \quad (2.14)$$

Donde q_{x+dx} representa el flujo de calor q_x que entra en la dirección en $x=0$ más la razón de cambio que el flujo de calor experimenta a lo largo del dx , $(\partial q_x / \partial x) dx$. El mismo principio aplica para q_{y+dy} y q_{z+dz} (Incropera *et al.*, 1996).

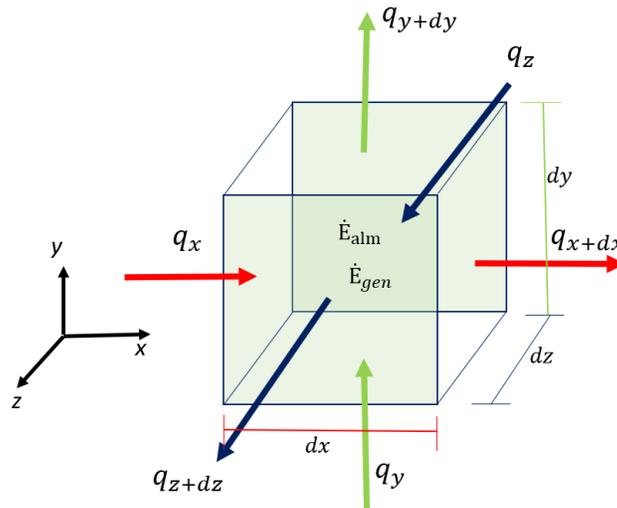


Figura 4. Conducción de calor en tres dimensiones para un volumen de control diferencial rectangular.

En el volumen de control, puede presentarse un término fuente de energía vinculado con la tasa de generación de energía térmica. Este término se expresa como (Incropera *et al.*, 1996):

$$\dot{E}_{gen} = \dot{q} dx dy dz. \quad (2.15)$$

Donde \dot{q} se refiere a la tasa de generación de energía por unidad de volumen del material (W/m^3). Mientras tanto, los cambios en la cantidad de energía interna almacenada se expresan como (Incropera *et al.*, 1996):

$$\dot{E}_{alm} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.16)$$

Donde $\rho c_p(\partial T/\partial t)$ es la tasa de cambio con respecto al tiempo de la energía sensible del material por unidad de volumen. Cuando no hay cambio de fase, el efecto de la energía latente se considera despreciable. Aplicando el principio de conservación de la energía al diferencial de volumen (Incropera *et al.*, 1996):

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{alm}. \quad (2.17)$$

Así, al considerar que las tasas de transferencia de calor por conducción representan el flujo de energía entrante por unidad de tiempo, $\dot{E}_{ent} (q_x + q_y + q_z)$, y el flujo de energía saliente, $\dot{E}_{sal} (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz})$, y al sustituir las ecuaciones (2.15) y (2.16) en (2.17), se obtiene (Incropera *et al.*, 1996):

$$q_x + q_y + q_z - (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz}) + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz, \quad (2.18)$$

sustituyendo las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.14) en (2.18) y eliminando los términos correspondientes se tiene que:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (2.19)$$

La ley de Fourier para cada una de las direcciones está dada por la ecuación (2.11), sustituyéndola en la ecuación (2.19) y dividiendo entre las dimensiones del volumen diferencial de control ($dx dy dz$), se obtiene (Incropera *et al.*, 1996):

$$\frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.20)$$

Si la conductividad térmica no varía con respecto a la dirección, es decir, $k_x = k_y = k_z = k$, lo que significa que es un material homogéneo e isotrópico, por lo que la conductividad es constante en la derivada, entonces la ecuación (2.20) puede escribirse como:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.21)$$

dividiendo la ecuación (2.22) entre k , obtenemos:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.22)$$

donde $\alpha = k/\rho c_p$ y representa la difusividad térmica del material, ya mencionada anteriormente, que expresa la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de un medio. En otras palabras, representa la rapidez con la que el calor se difunde dentro de un medio, hasta alcanzar el estado permanente (Incropera *et al.*, 1996). De lo anterior se deduce que:

- La difusividad térmica solo tiene sentido mientras el sistema se encuentre en estado transitorio.
- Entre menor sea el valor de la difusividad térmica, mayor será el tiempo en que el sistema le tome alcanzar el estado estacionario.

Una forma más simple de la ecuación (2.22) se obtiene cuando el estudio del fenómeno se puede reducir a una dimensión:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.23)$$

suponiendo que no hay generación de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (2.24)$$

La ecuación (2.24) es conocida como la ecuación de transferencia de calor unidimensional.

2.4. Efecto fototérmico

El efecto fototérmico abarca una amplia gama de técnicas y fenómenos basados en la conversión de la energía óptica absorbida en calor. La energía óptica es absorbida y eventualmente convertida en energía térmica por una enorme cantidad de materiales: sólidos, líquidos y gases (Almond y Patel, 1996).

La fuente óptica modulada es una característica común de todas las técnicas y fenómenos fototérmicos. El calentamiento producido en todos los casos es no estacionario. Esta característica ha llevado al descubrimiento de una gran cantidad de fenómenos asociados con la interacción y propagación del calor modulado en medios de todo tipo.

2.4.1. Ondas térmicas

El término "onda térmica" comenzó a aparecer en la literatura fototérmica a principios de los años 1980. Una fuente de luz modulada es un medio muy conveniente para generar ondas térmicas. La longitud de onda y las características de propagación de una onda térmica se controlan simplemente mediante la frecuencia del modulador de la fuente de luz. Los láseres se pueden utilizar para generar ondas térmicas en un punto específico de la superficie de una muestra, lo que permite un sondeo térmico resuelto espacialmente. Estos atributos, combinados con el desarrollo de técnicas de detección térmica muy sensibles, llevaron a la adopción generalizada de ondas térmicas como un nuevo medio para sondear la materia (Almond y Patel, 1996).

2.4.2. Fuente de calor periódica

Considere un sólido semi-infinito homogéneo isotrópico, cuya superficie es calentada uniformemente (de tal manera que el enfoque unidimensional sea válido) por radiación (típicamente un haz de luz en los fenómenos fototérmicos), como se muestra en la Figura 5, de intensidad periódicamente modulada $(Q_0/2)[1 + \cos(\omega t)]$, donde Q_0 es la intensidad de la fuente, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia de modulación angular y t es el tiempo (Marín, 2009).

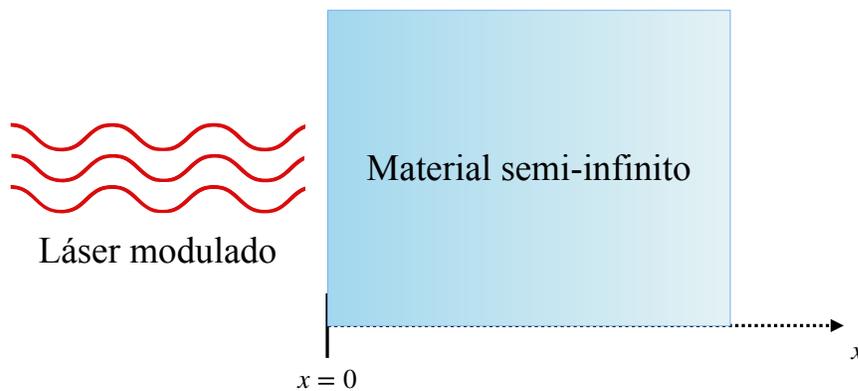


Figura 5. Sólido semi-infinito calentado uniformemente por un láser modulado.

Si se considera que la superficie calentada ocupa el plano y - z en $x = 0$, la distribución de temperatura dentro del sólido se puede obtener resolviendo la ecuación unidimensional de difusión de calor en x y t dada por la ecuación (2.24). La distribución de temperatura $T(x, t)$ dentro del sólido se puede obtener resolviendo dicha ecuación con las siguientes condiciones de frontera:

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{Q_0}{2} [1 + \cos(\omega t)], \quad (2.25)$$

$$T(x \rightarrow \infty) = 0. \quad (2.26)$$

Qué expresa que la energía térmica generada en la superficie del sólido por absorción de luz se disipa en su masa por conducción y que la temperatura en una distancia muy alejada de la fuente será una constante, en particular cero. Utilizando la propiedad, $e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x)$, con $i = \sqrt{-1}$, en (2.25) para que se comporte de forma oscilatoria:

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \operatorname{Re} \left[\frac{Q_0}{2} e^{i\omega t} \right]. \quad (2.27)$$

Resolviendo por separación de variables:

$$T(x, t) = X(x)\tau(t), \quad (2.28)$$

sustituyendo en (2.24) se obtiene:

$$\tau \frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{1}{\alpha} X \frac{d\tau}{dt} = 0, \quad (2.29)$$

dividiendo entre $X\tau$:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{d\tau}{\alpha\tau dt} = \lambda^2, \quad (2.30)$$

donde λ es la constante de separación. Resolviendo la parte de la derecha se tiene:

$$\ln \tau = \lambda^2 \alpha t. \quad (2.31)$$

Para que se comporte de manera periódica, λ tiene que ser complejo, entonces $\lambda^2 \alpha = i\omega$.

$$\tau(t) = e^{\lambda^2 \alpha t} = e^{i\omega t}. \quad (2.32)$$

La solución de interés física para aplicaciones en técnicas fototérmicas es la relacionada con el componente dependiente del tiempo. Si separamos este componente desde la parte espacial, la temperatura se puede expresar de la siguiente manera:

$$T(x, t) = X(x)e^{i\omega t}, \quad (2.33)$$

sustituyendo $(1/\tau)(d\tau/dt) = \lambda^2\alpha = i\omega$ y (2.32) en (2.29) se tiene:

$$e^{i\omega t} \frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{1}{\alpha} X(i\omega) e^{i\omega t} = 0, \quad (2.34)$$

simplificando:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{i\omega}{\alpha} X = 0, \quad (2.35)$$

utilizando cambio de variable donde $\lambda^2 = i\omega/\alpha$, que representa la longitud difusiva de onda térmica compleja:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} - \lambda^2 X = 0, \quad (2.36)$$

usando la ecuación auxiliar:

$$m^2 - \lambda^2 = 0, \quad (2.37)$$

se obtienen las raíces $m = \pm \lambda$, que son reales y distintas. La solución general se puede expresar como:

$$X(x) = C_1 e^{\lambda x} + C_2 e^{-\lambda x}, \quad (2.38)$$

derivando X para obtener dX/dx

$$\frac{dX}{dx} = \lambda C_1 e^{\lambda x} - \lambda C_2 e^{-\lambda x}, \quad (2.39)$$

sustituyendo (2.33) y después (2.39) en la condición de frontera (2.27) se tiene que:

$$-k\lambda[C_1 - C_2] = \frac{Q_0}{2}, \quad (2.40)$$

y aplicando la condición de frontera (2.26) en la solución general (2.38):

$$0 = \lim_{x \rightarrow \infty} (C_1 e^{\lambda x} + C_2 e^{-\lambda x}). \quad (2.41)$$

Para que se cumpla la ecuación (2.41), C_1 tiene que ser igual a cero. Sustituyendo $C_1 = 0$ en (2.40) y despejando C_2 se tiene que:

$$C_2 = \frac{Q_0}{2k\lambda}, \quad (2.42)$$

sustituyendo valores de las constantes en la ecuación general obtenemos:

$$X(x) = \frac{Q_0}{2k\lambda} e^{-\lambda x}, \quad (2.43)$$

con esto la solución completa quedaría de la siguiente forma:

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2k\lambda} e^{-\lambda x} e^{i\omega t}. \quad (2.44)$$

Como $(i + 1)^2 = 2i$, entonces λ se puede expresar como $\lambda = (1 + i)\sqrt{\omega/2\alpha} = (1 + i)/\mu$, entonces:

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c_p k \omega}} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} e^{i\left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x - \frac{\pi}{4}\right]}, \quad (2.45)$$

sustituyendo la efusividad térmica denotada por $\varepsilon = \sqrt{\rho c_p k}$:

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\varepsilon\sqrt{\omega}} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} e^{i\left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x - \frac{\pi}{4}\right]}. \quad (2.46)$$

Al igual que la propagación normal de las ondas, la onda térmica tiene una dependencia espacial oscilatoria de la forma e^{ikx} , tomando $Re(\lambda) = 1/\mu = \sqrt{\omega/(2\alpha)}$, se llega a la ecuación (2.47):

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2\varepsilon\sqrt{\omega}} e^{-\frac{x}{\mu}} e^{i\left[\omega t - \frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4}\right]}. \quad (2.47)$$

Este caso representa un modo a través del cual el calor generado en la muestra se transfiere al medio circundante por difusión a una velocidad determinada por la difusividad térmica. El parámetro μ da la distancia en donde se produce una transferencia de energía apreciable. Se denota como la amortiguación o longitud de difusión de calor (Ceja, 2019).

2.4.3. Calentamiento con una capa de material

Consideremos ahora un gas semi-infinito (convencionalmente aire, pero funciona para cualquier gas), que está en contacto con una capa de material homogéneo e isotrópico la cual está sujeta a un calentamiento armónico (véase Figura 6), como el del caso anterior.

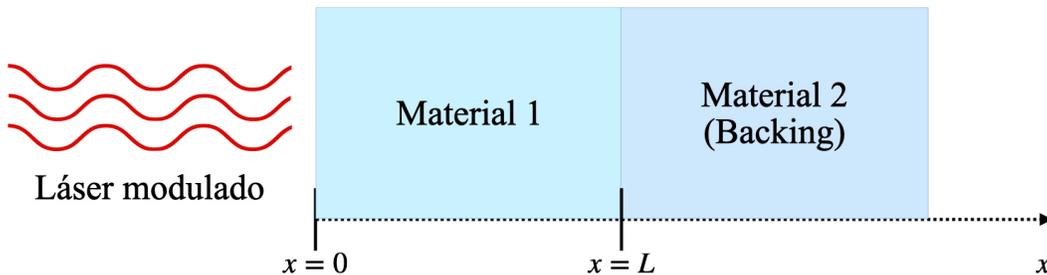


Figura 6. Calentamiento armónico mediante un láser modulado de dos materiales en contacto (un sólido y un gas).

Para este caso, se estudia la transferencia de calor a través de dos materiales, o elemento multicapa. Se utiliza la ecuaciones de difusión de calor unidimensional (una para cada material),

en los cuales la diferencia principal es que cada material tendrá una difusividad térmica distinta, $\alpha_1 \neq \alpha_2$.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 0 \leq x \leq L, \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad x \geq L. \quad (2.49)$$

Donde hay ahora cuatro condiciones de frontera:

$$-k_1 \left. \frac{dT_1}{dx} \right|_{x=0} = \frac{Q_0}{2} e^{i\omega t}, \quad (2.50)$$

$$T_1(x=L) = T_2(x=L), \quad (2.51)$$

$$-k_1 \left. \frac{dT_1}{dx} \right|_{x=L} = -k_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=L}, \quad (2.52)$$

$$T_2(x \rightarrow \infty) = 0. \quad (2.53)$$

Para cada material habrá una distribución de temperatura dependiente de la variable x y t :

$$T_1(x, t) = T_1(x) e^{i\omega t}, \quad (2.54)$$

$$T_2(x, t) = T_2(x) e^{i\omega t}. \quad (2.55)$$

Resolviendo de la misma manera que en la sección pasada y utilizando los mismos cambios de variables:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} - \lambda_1^2 T_1 = 0, \quad (2.56)$$

$$\frac{d^2 T_2}{dx^2} - \lambda_2^2 T_2 = 0. \quad (2.57)$$

Cuya solución general, vista anteriormente, es:

$$T_1(x) = A_1 e^{\lambda_1 x} + B_1 e^{-\lambda_1 x}, \quad (2.58)$$

$$T_2(x) = A_2 e^{\lambda_2 x} + B_2 e^{-\lambda_2 x}. \quad (2.59)$$

Aplicando condiciones de frontera en las soluciones generales se obtienen los siguientes coeficientes:

$$A_2 = 0, \quad (2.60)$$

$$A_1 = \frac{Q_0(1-b)}{2k_1\lambda_1(e^{2\lambda_1 L} + e^{2\lambda_1 L}b + b - 1)}, \quad (2.61)$$

$$B_1 = \frac{Q_0 e^{2\lambda_1 L}(1+b)}{2k_1\lambda_1(e^{2\lambda_1 L} + e^{2\lambda_1 L}b + b - 1)}, \quad (2.62)$$

$$B_2 = \frac{Q_0 e^{\lambda_1 L} e^{\lambda_2 L}}{2k_1\lambda_1(e^{2\lambda_1 L} + e^{2\lambda_1 L}b + b - 1)}. \quad (2.63)$$

Definiendo el parámetro $b = (k_1\lambda_1)/(k_2\lambda_2) = \varepsilon_1/\varepsilon_2$ que se considera que equivale a la relación de la efusividad de los dos medios y que puede considerarse como una medida del desajuste térmico entre los dos medios y $R = (1-b)/(1+b)$ definido como el coeficiente de reflexión térmica. Al sustituir los coeficientes obtenidos y los parámetros definidos en (2.58) y (2.59) las soluciones particulares quedan de la siguiente forma:

$$T_1(x) = \frac{Q_0}{2k_1\lambda_1} \left[\frac{R e^{-2\lambda_1 L}}{1 - R e^{-2\lambda_1 L}} e^{\lambda_1 x} + \frac{1}{1 - R e^{-2\lambda_1 L}} e^{-\lambda_1 x} \right], \quad (2.64)$$

$$T_2(x) = \frac{Q_0}{2k_1\lambda_1} \left[\frac{R e^{-\lambda_1 L} + e^{-\lambda_1 L} e^{-\lambda_2 L}}{1 - R e^{-2\lambda_1 L}} e^{-\lambda_2 x} \right]. \quad (2.65)$$

En particular, en esta investigación se utiliza la técnica fototérmica TWRC. El principio básico de esta técnica consiste en medir las fluctuaciones de temperatura en una muestra como resultado del proceso de desexcitación no radiativo que tiene lugar tras la absorción de radiación de un láser de intensidad modulada. La propagación de ondas térmicas en un material depende de su difusividad térmica. El desarrollo de la técnica TWRC ha introducido la posibilidad de medir propiedades térmicas mediante el seguimiento del comportamiento espacial de la onda térmica a través de un barrido en espesor de la cavidad (Balderas-López *et al.*, 2000).

Para el caso del TWRC, evaluando $x = L$ en la ecuación (2.64) se tiene que la distribución de temperaturas en el material 1 es:

$$T_1(x = L) = \frac{Q_0}{k_1 \lambda_1} \frac{R e^{-\lambda_1 L}}{1 - R e^{-2\lambda_1 L}}. \quad (2.66)$$

Se supone que el segundo material 2 (backing) es aire, esto haría que $R \approx 1$

$$T_1(x = L) = \frac{Q_0}{k_1 \lambda_1} \frac{e^{-\lambda_1 L}}{1 - e^{-2\lambda_1 L}}. \quad (2.67)$$

A partir de esta definición de la longitud de difusión de calor (μ), se suelen considerar dos aproximaciones: aproximación térmicamente fina ($\mu \gg L$), cuando la longitud de difusión térmica es más grande en comparación con el espesor del material, se dice que el material es "térmicamente fino". En este caso, el calor se difunde rápidamente a través del material, lo que puede provocar un calentamiento rápido pero también una rápida pérdida de calor; aproximación térmicamente gruesa ($\mu \ll L$), cuando la longitud de difusión térmica es relativamente más pequeña en comparación con el espesor del material, se dice que el material es "térmicamente grueso". En este caso, el calor se difunde más lentamente a través del material, lo que puede resultar en un mayor almacenamiento de energía térmica y una distribución más uniforme de la temperatura en su interior. Para esta investigación se utiliza la suposición de térmicamente grueso, con $L = 2\mu$, sustituyendo en la ecuación (2.67) se tiene (García, 2023):

$$T_1(x = L) = \frac{Q_0}{k_1 \lambda_1} e^{-\lambda_1 L} = \frac{Q_0}{k_1 \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}}} e^{-\lambda_1 L} = \frac{Q_0}{\frac{k_1}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{i\omega}} e^{-\lambda_1 L}. \quad (2.68)$$

Utilizando las relaciones de efusividad térmica y la aproximación térmica gruesa se llega a:

$$T_1(x = L) = \frac{Q_0 e^{-i\pi/4}}{\varepsilon_1 \sqrt{\omega}} e^{-(1+i)\frac{L}{\mu}}. \quad (2.69)$$

Agrupando términos:

$$T_1(x = L) = \frac{Q_0}{\varepsilon_1 \sqrt{\omega}} e^{-\frac{L}{\mu}} e^{-\left(\frac{L}{\mu} + \frac{\pi}{4}\right)i} = \bar{A} e^{i\phi}. \quad (2.70)$$

La ecuación (2.70) tiene la forma de Euler para números complejos, $\bar{A} e^{i\phi}$, por lo que se separan en amplitud y fase:

$$Amplitud = \bar{A} = \frac{Q_0}{\varepsilon_1 \sqrt{\omega}} e^{-\frac{L}{\mu}}, \quad (2.71)$$

$$Fase = \phi = -\frac{L}{\mu} - \frac{\pi}{4}. \quad (2.72)$$

Para el término de amplitud, como todas son constantes, se realiza un cambio de variable $\bar{A}_0 = Q_0/(\varepsilon_1 \sqrt{\omega})$:

$$\bar{A} = \bar{A}_0 e^{-\frac{L}{\mu}}, \quad (2.73)$$

$$\ln(\bar{A}) = \ln(\bar{A}_0) - \frac{L}{\mu}. \quad (2.74)$$

2.5. Hidrogeles

Los hidrogeles son materiales conocidos por su notable capacidad de absorber grandes cantidades de agua. Esta alta afinidad por el agua se debe a la presencia de diversos grupos funcionales distribuidos en su estructura, como amino (-NH₂), carboxilo (-COOH), amida (-NHCO), hidroxilo (-OH), entre otros (Ren, 2009). Los hidrogeles se generan mediante el entrecruzamiento de monómeros o cadenas poliméricas, lo cual puede ocurrir a través de

interacciones físicas, iónicas o covalentes (Xu *et al.*, 2016). En la Figura 7, se presenta una representación de la estructura interna de un hidrogel, donde se destacan parámetros importantes de la red, como el tamaño de malla (ξ), que están lleno de agua, y \overline{M}_a indica el peso molecular de la cadena polimérica entre dos puntos de entrecruzamiento. Por último, se ilustran las diferentes formas de unión de las cadenas poliméricas entrecruzadas (Gonzales, 2019).

Los polímeros utilizados en la formación de hidrogeles pueden clasificarse como sintéticos, semisintéticos y naturales. Entre los polímeros naturales más empleados en el desarrollo de hidrogeles se encuentran el almidón, la celulosa, el alginato, el colágeno y la quitosana, entre otros (Van *et al.*, 2011). Estos polímeros naturales han ganado interés debido a sus características de biocompatibilidad, no toxicidad y biodegradabilidad, que los distinguen de los polímeros sintéticos. La clasificación de los hidrogeles puede variar según el método de síntesis, el tipo de entrecruzamiento, el origen del polímero, entre otras características (Gong *et al.*, 2003; Ullah *et al.*, 2015), como se resume en la Figura 8.

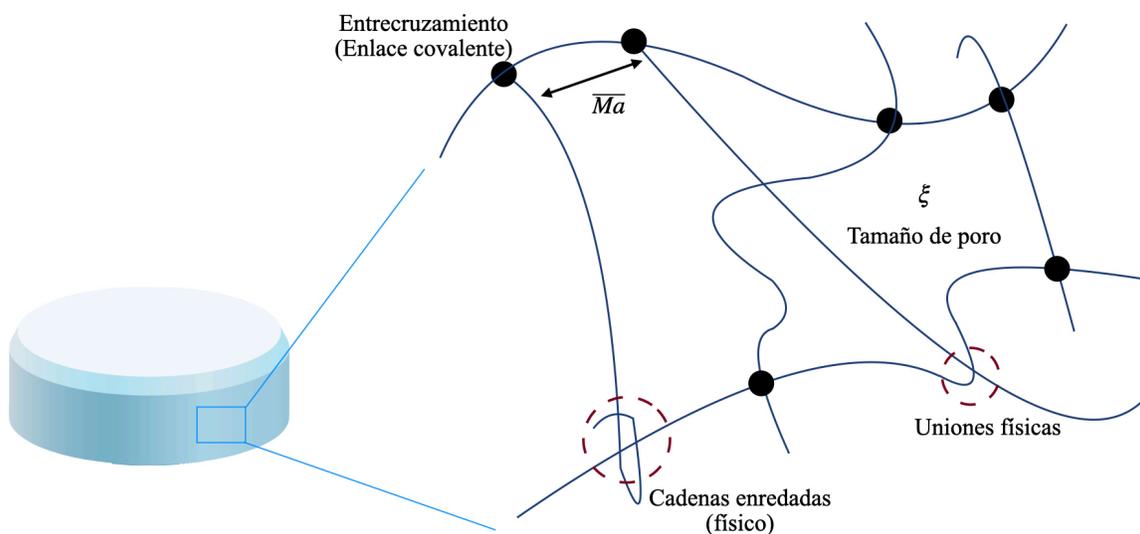


Figura 7. Representación gráfica de la estructura de un hidrogel. Adaptación de Gonzales (2019).

Así como, los hidrogeles tienen la capacidad de absorber agua y aumentar su tamaño también son capaces de revertir este proceso volviendo a su tamaño original en respuesta a diversos factores, como cambios en el pH, temperatura, luz, reacciones químicas y campos

eléctricos. Debido a esto se han considerado a los hidrogeles como materiales versátiles para una amplia gama de aplicaciones, como la absorción de colorantes, inmovilización de enzimas, como agentes floculantes, para la liberación controlada de fármacos, para su uso en la ingeniería de tejidos, facilitando el desarrollo de órganos artificiales como cartílagos, tendones, ligamentos, entre otros tejidos humanos (Van *et al.*, 2011; Caló y Khutoryanskiy, 2015; Shariatinia y Jalali, 2018; Ahmed, 2015; Gupta *et al.*, 2002).



Figura 8. Clasificación de los hidrogeles.

2.5.1. Acrilamida

La Figura 9 presenta la estructura química de la acrilamida (AAm), destacando la presencia de grupos funcionales como carboxilo (-COOH) y metileno (-CH₃). Este último es particularmente reactivo, lo que lo hace ideal para llevar a cabo polimerizaciones a través de la iniciación por radicales libres o mediante radiación, resultando en la formación de PAAm (Souza *et al.*, 2014; Benítez *et al.*, 2011). Para la obtención de PAAm, se puede emplear N,N'-bismetilenacrilamida (MBAm) como agente entrecruzante (Gonzales, 2019).

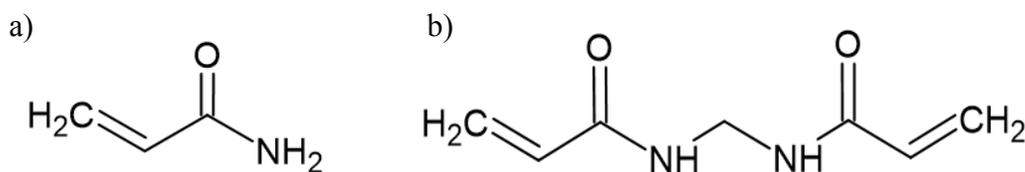


Figura 9. Estructura química de: a) acrilamida, b) MBAm. Adaptación de Gonzales (2019).

2.5.2. Poliacrilamida

La PAAm es un polímero sintético ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y ambientales. Se forma a partir de la polimerización del monómero AAm y se caracteriza por su alta capacidad para retener agua y formar geles viscosos. Su estructura química y sus propiedades la hacen especialmente útil en aplicaciones donde se requiere la formación de matrices poliméricas que puedan retener agua y otros compuestos químicos.

Gonzales (2019) describe la síntesis de PAAm de la siguiente forma:

La síntesis de PAAm puede ocurrir en presencia de un agente entrecruzante o sin agente. En los dos casos, el mecanismo de síntesis de PAAm se da vía radicales libres y se lleva a cabo en tres etapas (iniciación, propagación y terminación), las cuales se muestran en la Figura 10 (Povea *et al.*, 2008; Benítez *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2006) y se detallan a continuación:

i) Iniciación: en esta etapa se generan los radicales libres a partir de las cantidades iniciales de persulfato de sodio y calor. El rango de temperatura más adecuada para este paso es 60 - 70 °C, debido a que a temperaturas más bajas la reacción es más lenta y a temperaturas más altas la reacción es muy violenta. Una vez activados los iniciadores, estos reaccionan con las moléculas de acrilamida para generar más radicales.

ii) Propagación: una vez que se forman los radicales libres a partir del persulfato de sodio y las moléculas de acrilamida (AAM), estos reaccionan con las demás unidades presentes de AAM para empezar a formar cadenas lineales basadas en uniones repetitivas de dichas moléculas (Oadian, 2004; Braun *et al.*, 2005) como se muestra en la Figura 10. En el caso que la reacción contenga moléculas de agente entrecruzante, este se une con las moléculas de acrilamida de manera que puede ser un conector entre moléculas de AAM y cadenas lineales de AAM, como se muestra en la Figura 11.

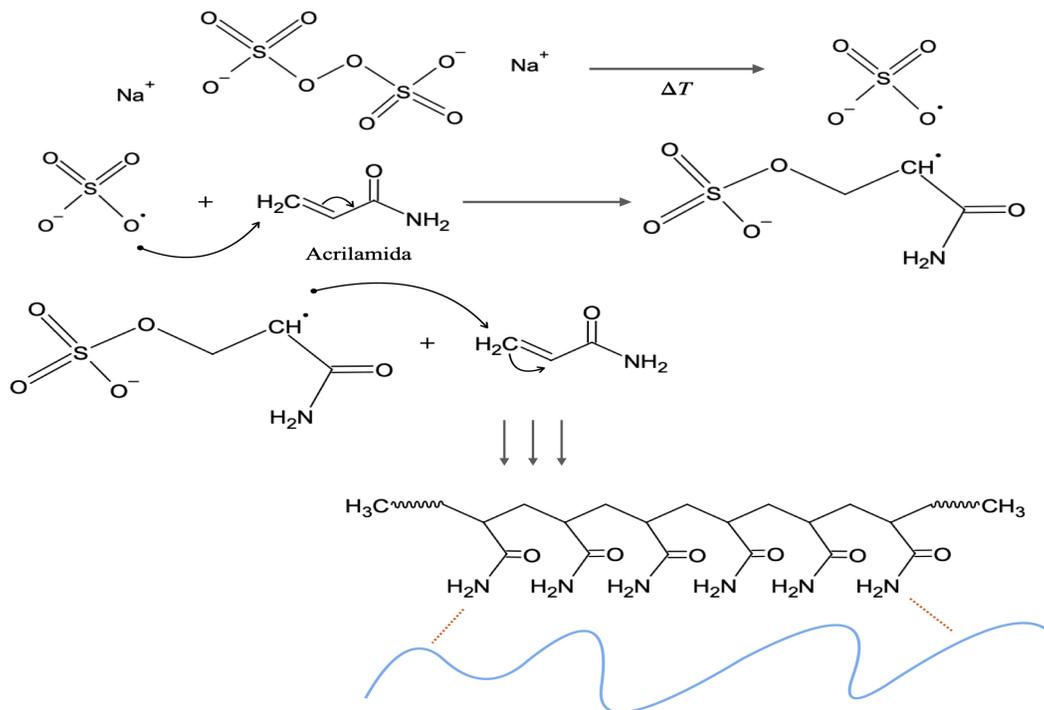


Figura 10. Mecanismo de reacción para la formación de poliacrilamida. Adaptación de Gonzales (2019).

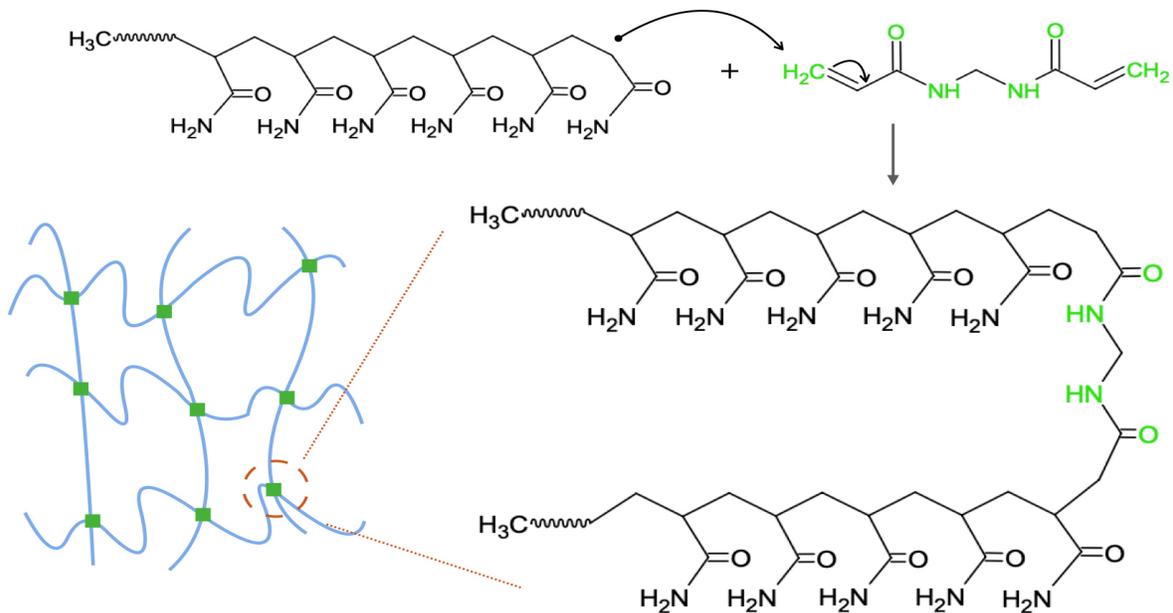


Figura 11. Mecanismo de reacción para la formación de poliacrilamida con agente entrecruzante MBAm. Adaptación de Gonzales (2019).

iii) Terminación: es la etapa final del proceso de polimerización para la formación de hidrogeles de poliacrilamida. Se puede dar por diferentes vías: por combinación o desproporción o transferencia de cadena.

Es así que, dependiendo de la presencia del agente entrecruzante, como por ejemplo usando MBAm, en la síntesis de poliacrilamida se obtendrán diferentes estructuras como se presentan en las Figuras 10 y 11.

Capítulo 3. Metodología

El principal reactivo utilizado en esta investigación es el polímero Polyacrylamide/acrylate elaborado por el laboratorio *Goodfellow* y distribuido por *Sigma-Aldrich*. Las características proporcionadas por el fabricante se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas del Polyacrylamide/acrylate.

Elemento	Densidad (g/cm^3)	Tamaño nominal (mm)
Polyacrylamide/acrylate	1.5	2.5

A partir del reactivo original se obtienen diferentes tamaños de partículas con la técnica de molienda a través de un molino de bolas. Se prepararon soluciones con los diferentes tamaños de grano obtenidos y se varió el porcentaje de agua para obtener diferentes muestras con intervalos de fracción desde 0 hasta 0.5 en porcentaje volumétrico del polímero.

3.1. Molino de bolas

La obtención de diferentes tamaños de partículas con el molino de bolas de marca *RETSCH MM 400*, se realiza de la siguiente manera:

(a) Carga del molino de bolas: las muestras de PAAm se colocan en dos recipientes de acero inoxidable con una capacidad de 20 ml por recipiente. Se disponen 14 bolas de acero inoxidable 316 de 10 mm de diámetro que ayudan a triturar y reducir el tamaño de las partículas al chocar y moverse dentro del molino.

(b) Parámetros de configuración: se establecen los parámetros como la velocidad de oscilación del molino (Hz) y el tiempo de molienda (min).

(c) Molienda: se pone en marcha el molino de bolas lo que permite que las bolas de molienda entren en contacto con las muestras de PAAm. A medida que las bolas chocan entre sí y con la muestra, las partículas reducen gradualmente su tamaño. Este proceso se muestra en la Figura 12.

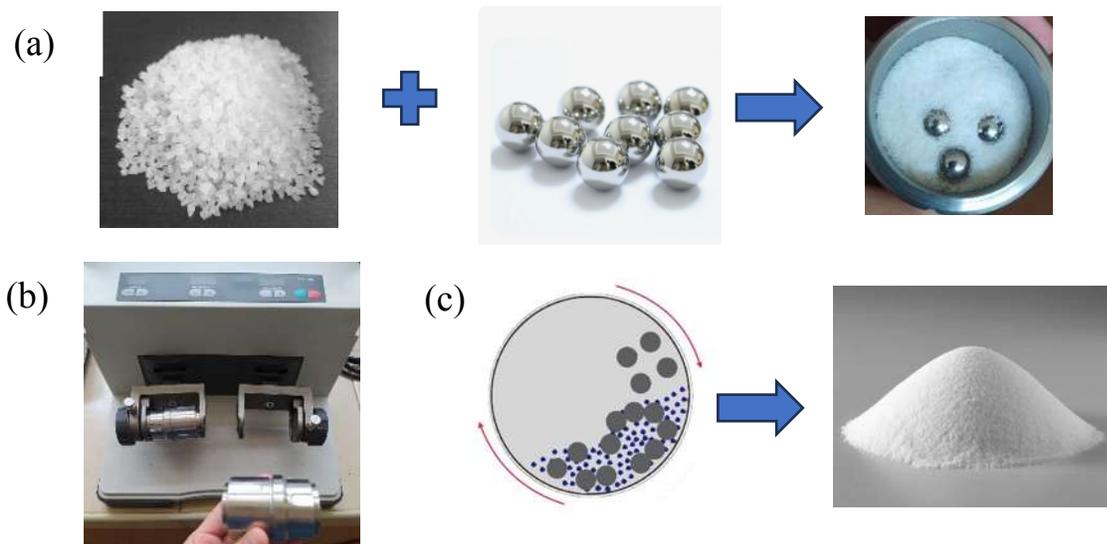


Figura 12. Diagrama esquemático de la técnica molino de bolas para obtener diferentes tamaños de partícula del polímero original de PAAM.

3.2. Preparación de las muestras

Las muestras utilizadas en los experimentos se preparan a diferentes concentraciones volumétricas en relación al polímero PAAM. El proceso de elaboración de estas muestras se lleva a cabo mediante una serie de pasos que se describen a continuación.

El primer paso consiste en seleccionar el volumen de agua con el que se desea trabajar, siendo en la mayoría de los casos de 20 ml. Se define el porcentaje volumétrico del hidrogel PAAM que se necesita obtener, siendo estos valores del 0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, 0.4 % y 0.5 %. La Figura 13 muestra la relación entre las masas de agua y polímero necesarias para realizar una mezcla de hidrogel de PAAM al 0.3% en fracción de volumen. Luego, se utiliza la ecuación (3.1) de mezclas, que relaciona el volumen del polímero PAAM con el volumen total de la mezcla, el cual es la suma del volumen de PAAM con el volumen del agua, previamente seleccionado:

$$V_{\%PAAm} = \frac{V_{PAAm}}{V_{total}}(100\%) = \frac{V_{PAAm}}{V_{PAAm} + V_{agua}}(100\%). \quad (3.1)$$

Después, se despejó la incógnita V_{PAAm} , ecuación (3.2). Como los otros valores de la ecuación son los valores previamente seleccionados, se determina así el volumen del polímero necesario para alcanzar el porcentaje volumétrico deseado.

$$V_{PAAm} = \frac{V_{\%PAAm} V_{agua}}{100 - V_{\%PAAm}}. \quad (3.2)$$

Dado que, medir el volumen de un sólido irregular puede resultar complicado, se opta por determinar la masa de polímero PAAm necesaria para la mezcla utilizando la ecuación de densidad. Este enfoque se basa en el conocimiento de las densidades tanto del agua como del polímero PAAm ($\rho_{agua} = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{PAAm} = 1500 \text{ kg/m}^3$).

$$m_{PAAm} = V_{PAAm} \rho_{PAAm}. \quad (3.3)$$

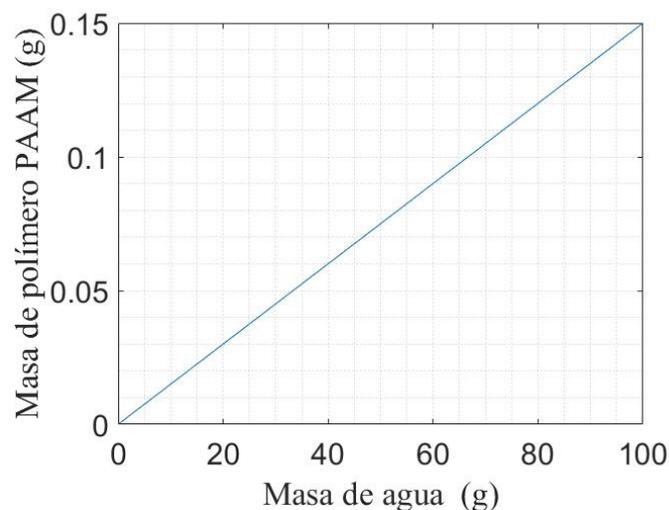


Figura 13. Gráfica que muestra la relación entre las masas de agua y polímero necesarias para realizar una mezcla de hidrogel de PAAm al 0.1% de fracción volumétrica.

Finalmente, se pesa con una balanza analítica *Sartorius bl2105* la masa de agua y de polímero PAAm, como se muestra en la Figura 14 , las cuales se mezclan y agitan con un agitador magnético durante 30 minutos.

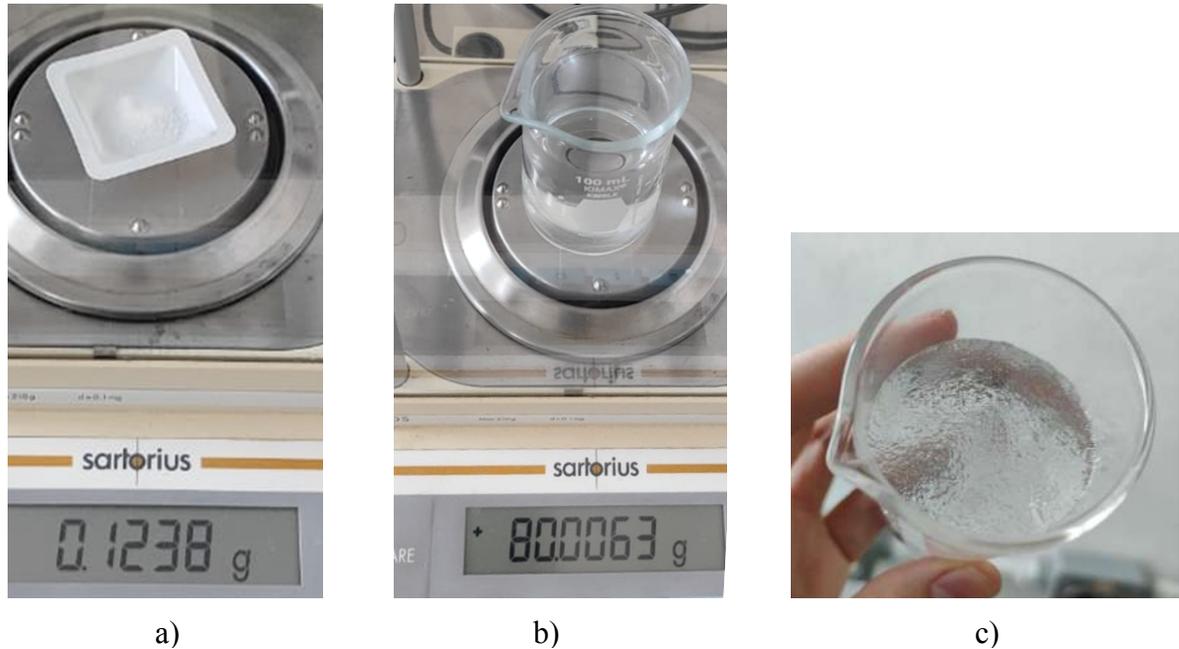


Figura 14. a) Pesaje de masa del polímero PAAm. b) Pesaje de masa de agua. c) Resultado final de la mezcla de hidrogel PAAm.

3.3. Cavidad de ondas térmicas

La configuración experimental para medir la difusividad térmica en el hidrogel se muestra de manera esquemática en la Figura 15. De manera general, este sistema consiste en un diodo infrarrojo. La luz láser de intensidad modulada incide sobre una oblea de silicio de 252 μm de espesor que actúa como convertidor de potencia óptica a térmica, conocida como generador de ondas térmicas.

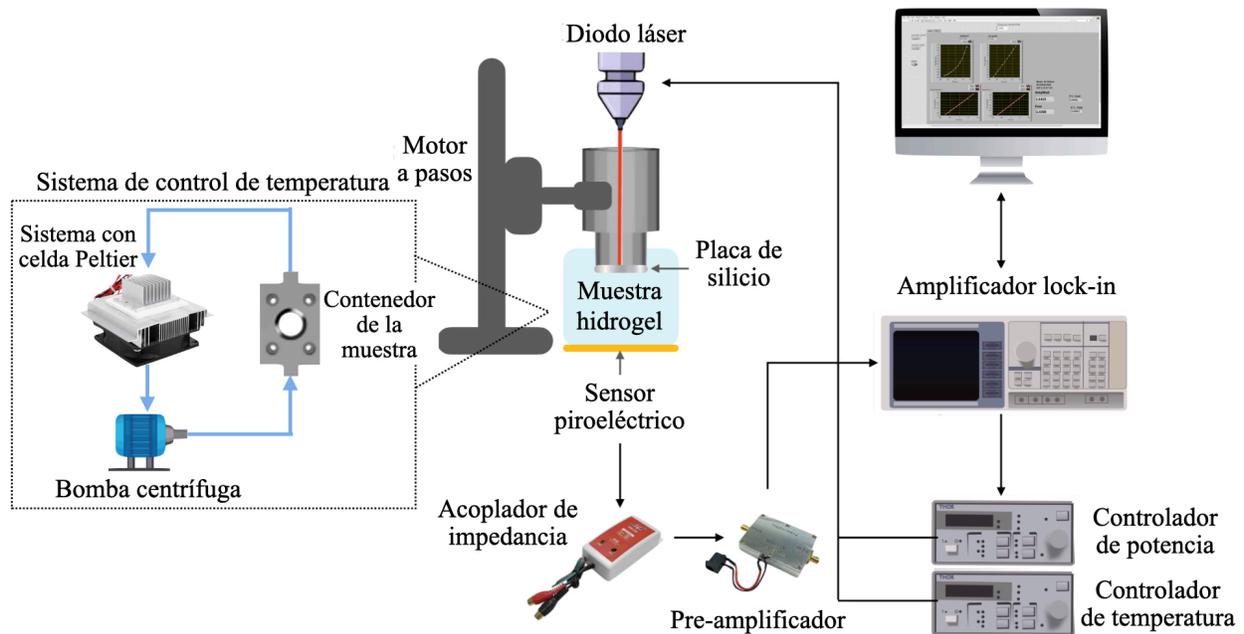


Figura 15. Diagrama esquemático de la configuración experimental para obtener la difusividad térmica de los fluidos estudiados.

Tras la absorción del haz de luz de intensidad modulada, la temperatura de la placa fluctúa periódicamente a la frecuencia de modulación del haz incidente, generando una onda térmica en una cavidad que contiene la muestra de estudio, en este caso es el hidrogel PAAM. Las dimensiones de la cavidad son 14.3 mm de diámetro y una altura de 10 mm, es decir un volumen aproximado de 1.6 ml. Para realizar el estudio, se coloca 1 ml de muestra en el contenedor.

Las oscilaciones de temperatura en $x = L$ se pueden medir con un sensor en función del espesor de la capa del hidrogel. La variación en la distancia vertical x se logra con un micrómetro al que está sujetado el generador de ondas térmicas. Las ondas térmicas se conducen a través de la interfase del hidrogel (región intracavitaria), llega a un sensor piroeléctrico, que es una oblea cerámica piezoeléctrica PZT (zirconato titanato de plomo). La señal de tensión piroeléctrica generada en el sensor se pre-amplifica, luego se envía a un amplificador y finalmente, manda los resultados obtenidos a una computadora.

3.3.1. Amplificador *lock-in*

Un componente fundamental del sistema es un amplificador *lock-in* modelo, *SR850* de *Stanford Research Systems*. Este, modula la radiación emitida del diodo láser con una salida senoidal V_{rms} a una frecuencia seleccionada de 0.5 Hz. Esta señal es enviada a un *driver* que controla al diodo láser (control del experimento). En esta etapa del experimento se genera calor en la muestra, el cual es detectado por un sensor piroeléctrico. La señal producida por el sensor piroeléctrico se dirige primero hacia un circuito acoplador de impedancia y luego atraviesa una etapa de pre-amplificación. Después, la señal se envía de regreso al amplificador *lock-in*, el cual aumenta la señal y elimina el ruido generado. Finalmente, la amplitud y la fase captadas por el *lock-in* son enviados a una computadora para su procesamiento (Laquidara *et al.*, s.f.).

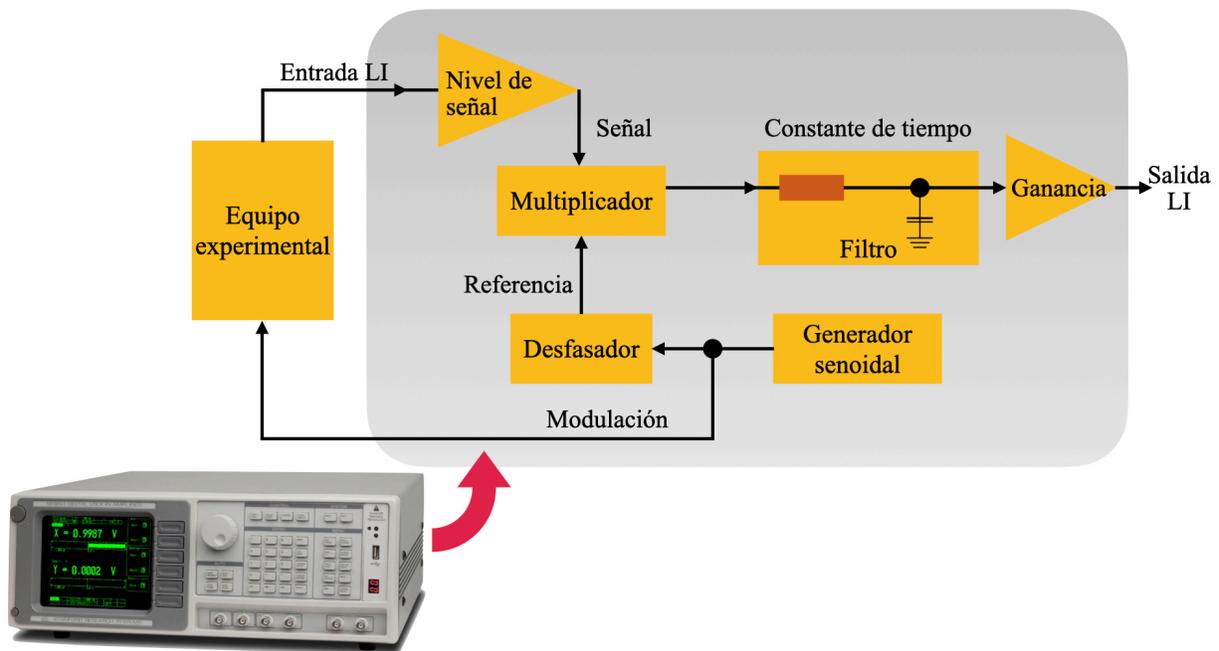


Figura 16. Diagrama esquemático de un amplificador *lock-in*.

Las lecturas que arroja son de amplitud y de fase de la señal, como muestra la Figura 16, son enviados a una computadora que los grafica en función de una distancia $x = L$.

3.3.2. Diodo láser

El diodo láser utilizado en la cavidad de ondas del experimento es el modelo *L808P200* de *Thorlabs* que opera a una potencia de 200 mW, emite luz a una longitud de onda de 808 nm y tiene 5.6 mm de diámetro. Las especificaciones para este diodo láser indican que las divergencias típicas de haz perpendicular son de 30°. La divergencia del haz principal (perpendicular) se muestra en la Figura 17.

Para calcular la distancia focal necesaria para lograr un diámetro de haz colimado de Ø5.6 mm, se utiliza:

$$f = \frac{\Phi/2}{\tan(\Theta/2)}, \quad (3.4)$$

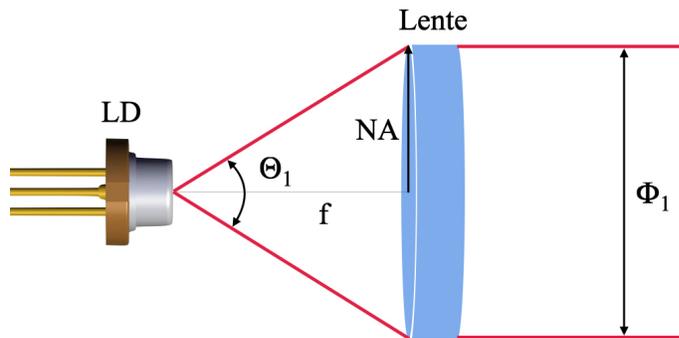


Figura 17. Divergencia perpendicular del haz del diodo láser.

donde f es la distancia focal que produce el diámetro de haz perpendicular deseado, Θ . La distancia focal de la lente necesaria para colimar un haz divergente de 30° en un haz colimado de Ø5.6 mm es $f = 10.4$ mm.

Otro parámetro que es necesario obtener es la apertura numérica (NA, por sus siglas en inglés). La luz del láser se dispersa mientras más distancia recorre, lo que origina un cono de luz,

el radio de este cono es la NA. La NA del diodo debe de ser menor que la NA de las lentes para que la luz emitida por el diodo láser no sea recortada por la lente.

A partir de estos parámetros del diodo láser, la longitud de onda, la longitud focal y la NA se seleccionó el lente modelo *A110TM-B* de *Thorlabs*. El diodo láser junto con la lente van montados en un soporte *LDM56(M)* de *Thorlabs*. A este soporte van conectados dos *drivers* que ayudan a controlar tanto la potencia como la temperatura del diodo láser. El *driver TED200C* de *Thorlabs* controla la temperatura y el *driver LDC220C* de *Thorlabs* controla la modulación y potencia del diodo láser.

3.3.3. Voltaje de modulación de referencia

Como se describió en el párrafo pasado es necesario calcular este parámetro porque es la salida senoidal del amplificador *lock-in*. El valor del voltaje rms se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Volt_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}, \quad (3.5)$$

donde V_p es el voltaje pico y se calcula mediante la ecuación (3.6).

$$V_p = \frac{I_{max} - I_{op}}{P_o}. \quad (3.6)$$

Para calcular el voltaje pico son necesarios varios valores que son características del diodo láser con el que se hace el experimento, los valores de operación con los que cuenta el diodo láser del experimento son los siguientes:

- Corriente máxima de operación $= I_{max} = 260$ mA.
- Corriente mínima de operación $= I_{min} = 80$ mA.
- Potencia óptica de salida $= P_o = 200$ mA/V.

La corriente de operación I_{op} es el promedio de las corrientes máxima y mínima:

$$I_{op} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}. \quad (3.7)$$

La temperatura en uno de los *driver* se fija a 25 ° C y en el otro se fija la corriente de operación a 170 mA, como se muestra en la Figura 18. Esto garantiza que el diodo láser va a operar de manera modulada entre estos valores, variando su intensidad desde los 80 mA hasta los 260 mA.

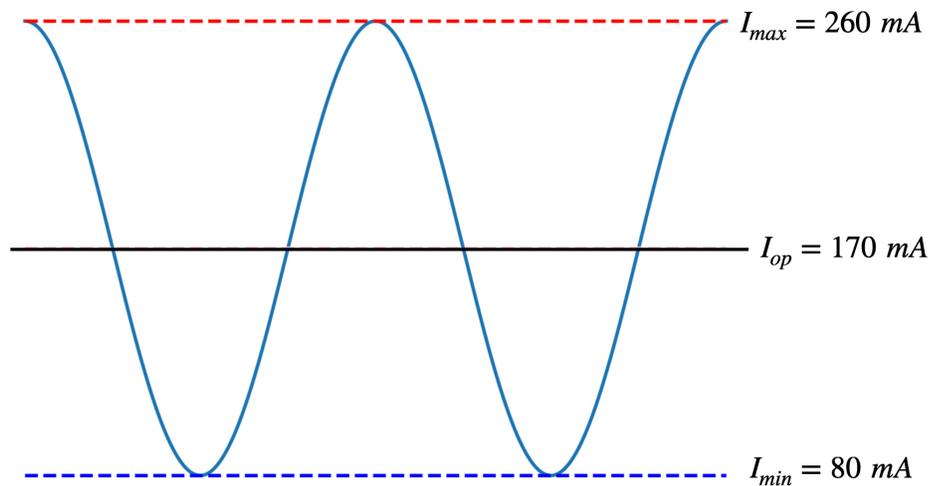


Figura 18. Corrientes de operación del láser.

Sustituyendo los valores correspondientes y efectuando las operaciones se obtiene un valor $V_{rms} = 0.32$ V.

3.3.4. Generador de ondas térmicas

La luz emitida por el diodo láser penetra en un dispositivo cilíndrico de plástico que presenta una reducción de diámetro. Esta reducción está diseñada para alojar un difusor que dispersa la luz del diodo láser de manera uniforme sobre una placa de silicio situada en la parte más baja del dispositivo, como se muestra en la Figura 19.

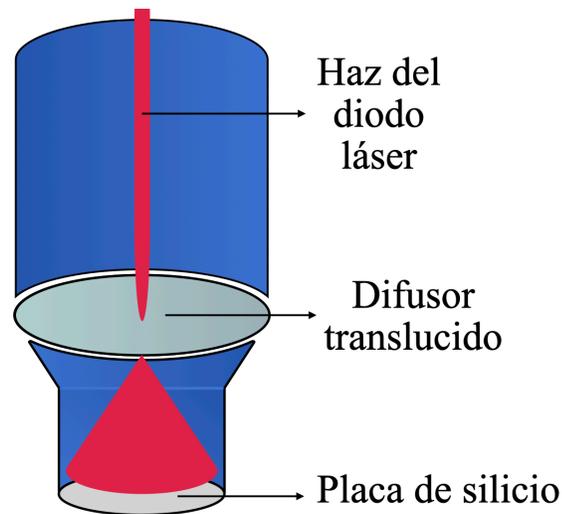


Figura 19. Generador de ondas térmicas.

Una fracción de la luz incidente en la placa es reflejada, mientras que el resto se convierte en energía térmica. Esta energía absorbida provoca un calentamiento periódico en la placa, en respuesta a la frecuencia de modulación del diodo láser, generando una onda térmica (véase Figura 20).

La onda térmica generada calienta una muestra de fluido contenida en un dispositivo que actúa como cavidad. A esta cavidad se le coloca 1 ml de muestra, en este experimento la muestra es hidrogel PAAm, este calentamiento provoca un cambio en la temperatura de la muestra el cual es detectado por un sensor piroeléctrico que genera una diferencia de potencial y esta señal es mandada al amplificador lock-in que registra la amplitud y fase de dicho voltaje.

El generador de ondas térmicas está vinculado a un motor a pasos, modelo *MTS25-Z8* de *Thorlabs* con $0.05 \mu\text{m}$ de resolución por paso. Este motor controla el espesor de la muestra, variándolo verticalmente. Para este experimento los valores de espesor de la muestra varían dentro de un intervalo de $2\mu \leq L \leq 4\mu$, dentro de la aproximación de material térmicamente grueso. Para determinar este barrido en L se utiliza la longitud de difusividad térmica

$\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$, donde se toma como referencia la difusividad térmica del agua $\alpha_{H_2O} = 1.44 \times 10^{-7}$ m²s⁻¹ y la frecuencia de la onda térmica modulada $f = 0.5$ Hz. De este modo se obtiene el valor $\mu \approx 300 \mu\text{m}$. Para que cumpla con la aproximación de material térmicamente grueso $700 \mu\text{m} \leq L \leq 1400 \mu\text{m}$.

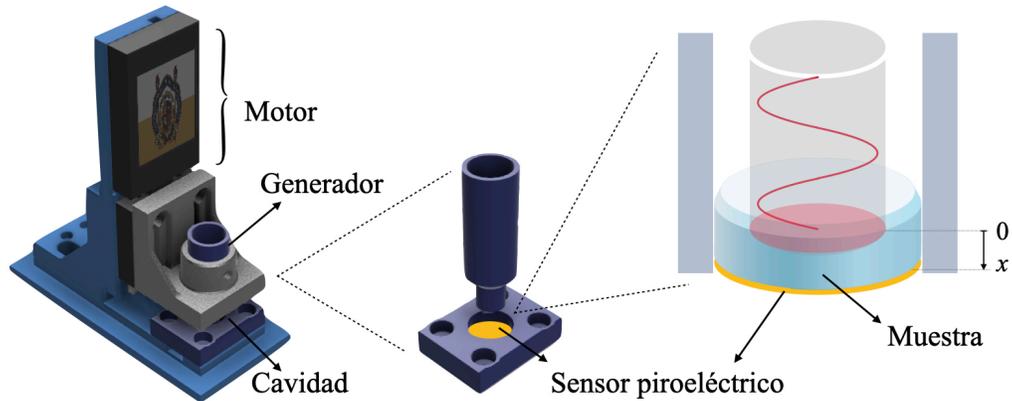


Figura 20. Diagrama esquemático del generador de ondas térmicas.

El voltaje del sensor piroeléctrico responde a la misma frecuencia a la que está ajustado el láser y un campo de temperatura que depende del espesor de la muestra:

$$V(L, \alpha, f) = F(f)T(x = L). \quad (3.8)$$

Donde la respuesta en frecuencia $F(f)$ del sensor se define de la siguiente manera:

$$F(f) = F_0(f)e^{i\theta(f)}. \quad (3.9)$$

Siendo $F(f)$ una constante, ya que $f = \text{cte} = 0.5$ Hz, para el experimento. Y el campo de temperaturas ya definido en la ecuación (2.69), la ecuación (3.8) se puede expresar como:

$$\begin{aligned}
V(L, \alpha, f) &= [F_0(f)e^{i\theta(f)}] \left[\frac{Q_0}{\varepsilon_1\sqrt{\omega}} e^{-\frac{L}{\mu}} e^{-\left(\frac{L}{\mu} + \frac{\pi}{4}\right)i} \right] \\
&= \frac{Q_0 F_0}{\varepsilon_1\sqrt{\omega}} e^{-\frac{L}{\mu}} e^{-\left(\frac{L}{\mu} + \frac{\pi}{4} - \theta\right)i} \\
&= V e^{i\phi}.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

La ecuación (3.10) tiene la forma de Euler para números complejos, $V e^{i\phi}$, por lo que se separa en amplitud y fase:

$$Amplitud = V = \frac{Q_0 F_0}{\varepsilon_1\sqrt{\omega}} e^{-\frac{L}{\mu}}. \tag{3.11}$$

$$Fase = \phi = -\frac{L}{\mu} - \frac{\pi}{4} + \theta \tag{3.12}$$

Para el término de amplitud, como todas son constantes, se realiza un cambio de variable $Q_0 F_0 / (\varepsilon_1\sqrt{\omega}) = V_0$.

$$V = V_0 e^{-\frac{L}{\mu}} \tag{3.13}$$

$$\ln V = \ln V_0 - \frac{L}{\mu} \tag{3.14}$$

Debido a que los términos $-\pi/4 + \theta$ y $\ln V_0$ son constantes se hace un cambio de variable, $C_V = \ln V_0$ en la ecuación (3.14) y $C_\phi = -\pi/4 + \theta$ en la ecuación (3.12)

$$\ln V = C_V - \frac{L}{\mu} \tag{3.15}$$

$$\phi = C_\phi - \frac{L}{\mu} \tag{3.16}$$

Las ecuaciones (3.15) y (3.16) tienen un comportamiento lineal, $y = b + mx$, donde L es la variable independiente y $-1/\mu$ es la pendiente m de la recta, con $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$, se tiene que:

$$m = -\frac{1}{\sqrt{\alpha/\pi f}} \tag{3.17}$$

despejando α :

$$\alpha = \frac{\pi f}{m^2} \quad (3.18)$$

Los datos obtenidos en el experimento son la amplitud y la fase del voltaje en función de una distancia $x = L$, estos datos son procesados y graficados ($\ln V$ vs L y ϕ vs L). De esta manera se obtiene la pendiente m y a partir de esta es posible calcular la difusividad térmica α de la muestra.

Para la captura de datos durante el escaneo de longitud de la muestra en la cavidad y el voltaje medido por el sensor piroeléctrico se emplea el software *LabVIEW* que automatiza el proceso y arroja un resultado promedio de difusividad al final de repetir el experimento n veces (Montes de Oca *et al.*, 2022).

3.3.5. Sistema de control de temperaturas

El control de temperaturas se realiza mediante un sistema de celdas Peltier, un fenómeno que ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa la unión de dos materiales conductores diferentes, generando un intercambio de calor. Para regular la temperatura, se ajusta la corriente eléctrica suministrada a estas celdas. Este ajuste se logra mediante dos fuentes de alimentación y un sistema programado con *Arduino* que envía las señales necesarias para calentar o enfriar según sea necesario, alcanzando así la temperatura deseada.

El sistema Peltier está conectado a una pequeña instalación hidráulica compuesta por una bomba, mangueras y el contenedor de la muestra, que está diseñado para permitir el flujo de agua (es hueco). El contenedor está recubierto con un metal de alta conductividad térmica que, además de estar en contacto con la muestra, también está en contacto con el agua del sistema de control de temperaturas. De esta manera, se busca que la temperatura programada para el sistema Peltier sea muy similar a la de la muestra, como se observa en la Figura 21. La descripción del sistema de refrigeración empleado para variar la temperatura de las muestras de estudio se describe con mayor detalle en el trabajo de tesis presentado por García (2023).

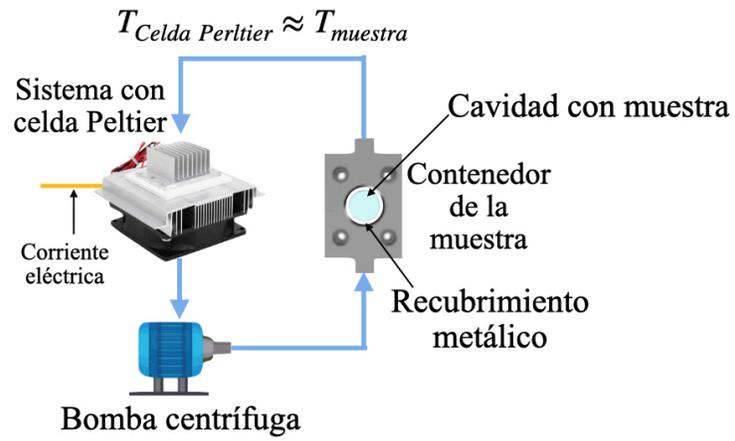


Figura 21. Diagrama esquemático del sistema de control de temperaturas.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1. Clasificación de muestras por tamaño de partícula

Se obtuvieron diferentes tamaños de partícula del polímero, a partir de los cuales se generaron diversas muestras de hidrogel de poliacrilamida (PAAm). Para reducir el tamaño de las partículas, se utilizó un molino de bolas, el cual requiere la configuración de dos parámetros fundamentales: la frecuencia (Hz) y el tiempo (min). Variando estos parámetros, se obtuvieron cuatro tamaños de partícula distintos, tal como se muestra en la Tabla 2.

Con el fin de facilitar la identificación y clasificación de las muestras según el tamaño de las partículas, se les asignaron las denominaciones *G1*, *G2*, *G3*, *G4* y *G5*. La letra “*G*” corresponde a “grano”, y el número asociado indica que a mayor valor numérico, menor es el tamaño de las partículas. De modo que, la muestra *G1* representa el tamaño original de las partículas de PAAm, mientras que las demás corresponden a los tamaños obtenidos tras el proceso de molienda.

Tabla 2. Parámetros utilizados para la obtención de diferentes tamaños de muestras PAAm y promedio de tamaño de partículas obtenido.

Nomenclatura	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)	Tamaño prom. de partícula (mm)	Desviación estándar (mm)
<i>G1</i>	*	*	1.63	0.21
<i>G2</i>	10	1	0.21	0.12
<i>G3</i>	20	1	0.15	0.09
<i>G4</i>	25	2	0.07	0.04
<i>G5</i>	30	3.5	0.05	0.04
* Tamaño original				

A pesar de que no se observa un cambio significativo entre el tamaño original de las partículas de PAAm, designado como *G1*, y el tamaño *G2*, al mezclar las partículas con agua

para formar el hidrogel, la mezcla con partículas de menor tamaño (*G2*) resulta más homogénea. Esto se puede atribuir a que las partículas más finas ofrecen una mayor superficie de contacto con el agua, facilitando una distribución más uniforme en la matriz del hidrogel.

El cambio en el tamaño de las partículas se hace más evidente a partir de *G3*, siendo aún más notable en *G4*. Finalmente, el tamaño más pequeño obtenido, *G5*, presenta una consistencia similar a la arena fina, como se muestra en la Figura 22.

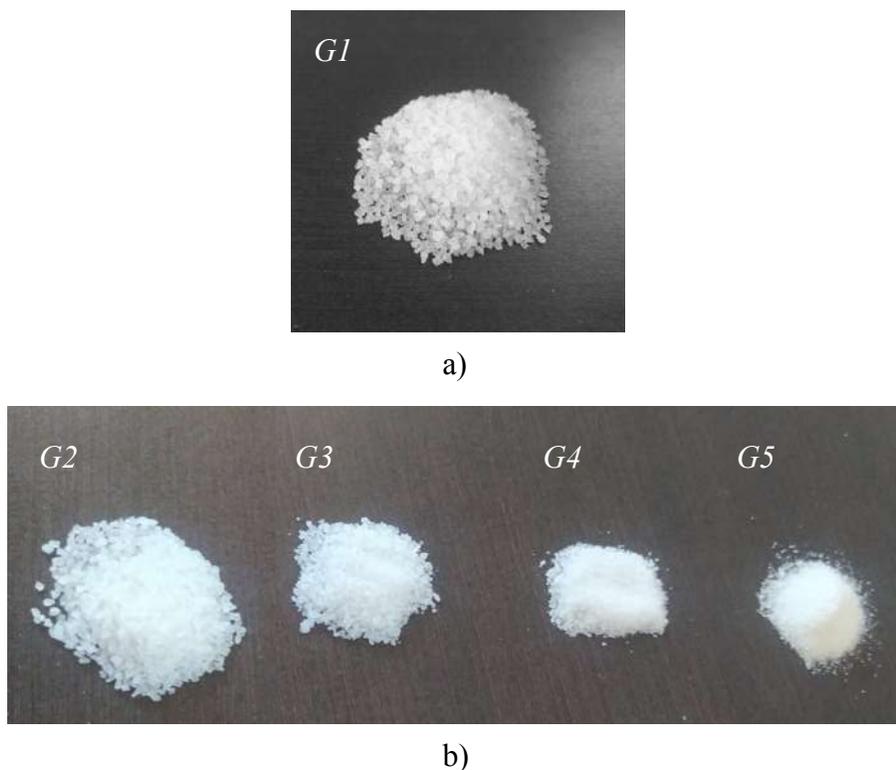


Figura 22. Imágenes de partículas de PAAM: a) partículas en su tamaño original (*G1*) y b) partículas después del procesamiento mediante molienda en molino de bolas de acero, mostrando cuatro tamaños distintos (*G2*, *G3*, *G4* y *G5*).

Las partículas del polímero en su tamaño original (*G1*) fueron observadas utilizando un microscopio digital *USB* comercial “*Fotgear*” (Figura 23). Los diferentes tamaños de partículas obtenidas tras el tratamiento de molienda fueron examinados con un microscopio óptico a un aumento de 40X, Figura 24.

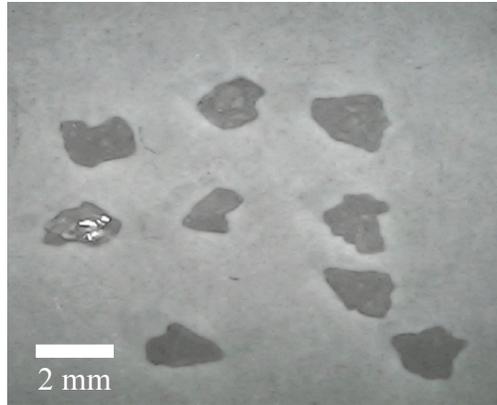


Figura 23. Imagen del microscopio óptico de partículas de poliacrilamida en su tamaño original (*G1*).

Al observar las partículas bajo el microscopio, se evidencia que las partículas en su tamaño original presentan mayor uniformidad. En contraste, las partículas reducidas mediante molienda en el molino de bolas muestran una considerable variabilidad en cuanto a formas y tamaños. En el tamaño *G2*, se encuentran tanto partículas muy grandes como muy pequeñas, y esta variabilidad persiste en los tamaños *G3*, *G4* y *G5*. En particular, en el tamaño *G5*, algunas partículas son tan pequeñas que no son visibles con el aumento del microscopio óptico, apareciendo únicamente como pequeños puntos. Esta distribución no uniforme de los tamaños de partícula es una consecuencia inherente del proceso de molienda, lo que genera una mezcla heterogénea.

Para futuros estudios que requieran una mezcla más homogénea, y con el objetivo de mejorar la consistencia o las propiedades del hidrogel, se propone el uso de técnicas de tamizado o clasificación por ciclones. Además, se sugiere la aplicación de ultrasonido para desaglomerar y distribuir uniformemente las partículas finas en la mezcla.

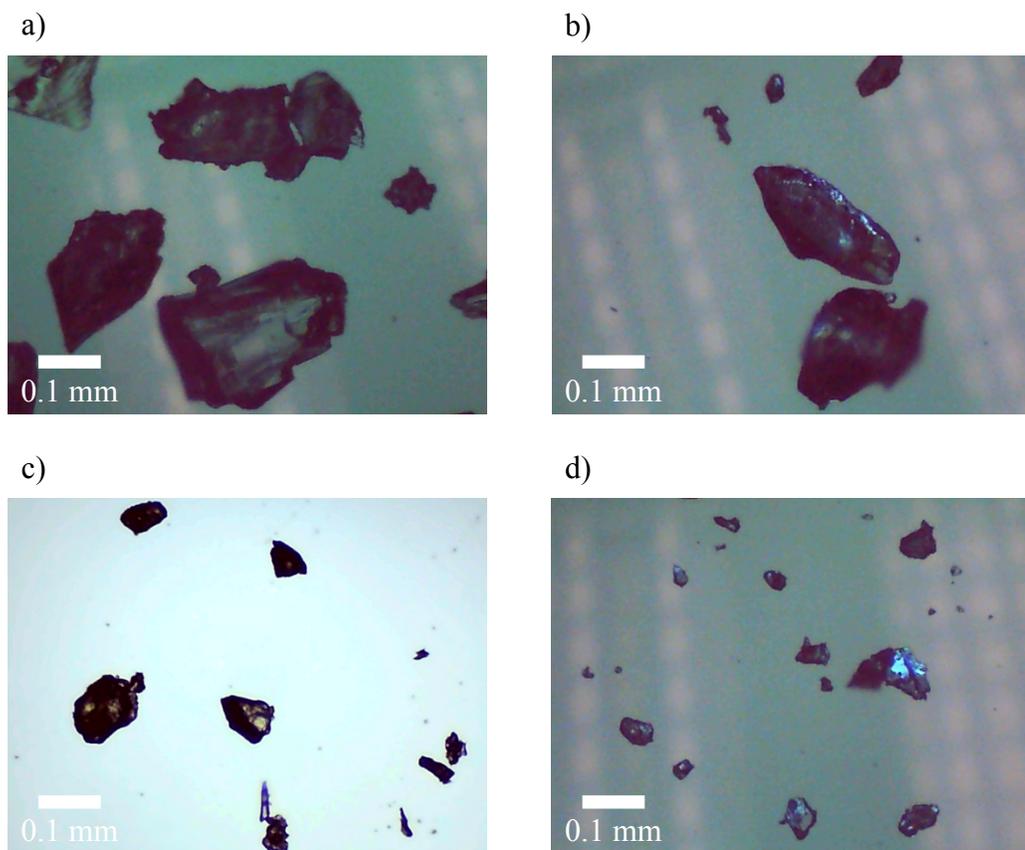


Figura 24. Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica de muestras de poliacrilamida después del tratamiento de molienda, mostrando diferentes tamaños de partícula: a) Tamaño 2 (G_2), b) Tamaño 3 (G_3), c) Tamaño 4 (G_4), d) Tamaño 5 (G_5).

Después de capturar imágenes de las muestras en los diversos tamaños, se procesaron utilizando el software *ImageJ* para realizar la medición precisa de las partículas. En la Figura 25 se presentan cinco distribuciones distintas de tamaños de partículas, obtenidas a partir de las mediciones realizadas.

Los detalles de los parámetros utilizados para obtener los diferentes tamaños de partículas G_2 , G_3 , G_4 y G_5 se presentan en la Tabla 2. Esta tabla incluye el tamaño promedio de las partículas, calculado a partir de las áreas medidas y convertido a un diámetro equivalente, así como la desviación estándar correspondiente a cada grupo de partículas.

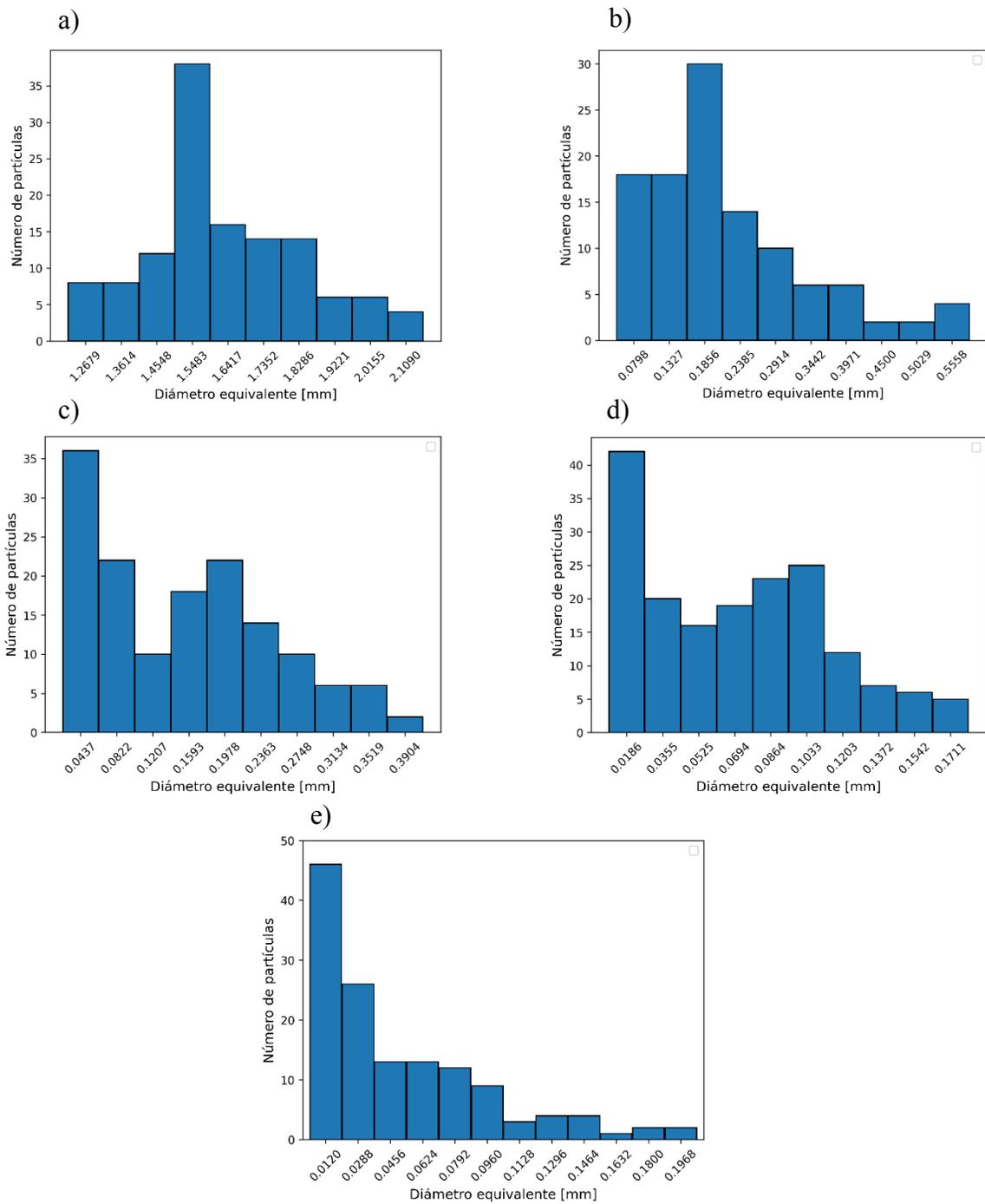


Figura 25. Distribución del tamaño de partículas de poliácridamida: a) Tamaño original ($G1$), b-e) Tamaños obtenidos mediante el método de molinda con molino de bolas: b) Tamaño 2 ($G2$), c) Tamaño 3 ($G3$), d) Tamaño 4 ($G4$), e) Tamaño 5 ($G5$).

4.2. Capacidad de absorción

La poliacrilamida posee una notable capacidad de absorción de agua, atribuida a la presencia de grupos de amida en su estructura molecular. Estos grupos amida son capaces de formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua, lo que permite que la poliacrilamida aumente su tamaño significativamente y forme un hidrogel.



Figura 26. Experimento para determinar la cantidad de agua que puede absorber el polímero PAAM.

Se pesaron varias muestras de granos de poliacrilamida y se les añadieron gotas de agua de manera continua cada 5 minutos, hasta que las muestras alcanzaron su capacidad máxima de absorción, Figura 26. Posteriormente, se pesaron los productos finales. Para cada muestra, la cantidad de agua absorbida se calculó restando el peso inicial del peso final. Luego, se determinó la relación entre el peso de la poliacrilamida y la cantidad de agua absorbida para cada muestra, según la ecuación (4.1).

$$\frac{m_{Total} - m_{PAAM}}{m_{PAAM}} = \frac{m_{agua}}{m_{PAAM}}. \quad (4.1)$$

Se promediaron los valores obtenidos de las diferentes muestras medidas, obteniéndose un valor promedio de la cantidad de agua absorbida, expresado en número de veces el peso del polímero, de 251. El error estándar asociado a este promedio fue de ± 33 .

4.3. Difusividad térmica

Como se menciona en el Capítulo 3, para medir una de las propiedades térmicas del hidrogel de poliacrilamida se empleó la técnica fototérmica llamada cavidad de ondas térmicas (TWRC), la cual permite obtener directamente la difusividad térmica de una muestra. El tamaño de grano seleccionado para la elaboración de las muestras de hidrogel medidas con la técnica TWRC fue G4, debido a que las partículas de este tamaño son lo suficientemente pequeñas como para generar una mezcla homogénea, similar a un fluido, lo que facilita el uso de esta técnica de medición.

4.4. Efecto de la temperatura en la difusividad térmica del hidrogel PAAm

Para controlar las diferentes temperaturas en las que se realizaron los experimentos, se utilizó un sistema de enfriamiento basado en celdas Peltier. Los experimentos se llevaron a cabo en un rango de temperaturas de 20 °C a 30 °C, utilizando diversas muestras de hidrogel de poliacrilamida (PAAm) con concentraciones volumétricas que variaban entre 0.1 % y 0.5 %.

Los resultados mostraron que la difusividad térmica aumentaba con la temperatura dentro de este rango. Este comportamiento fue consistente en todas las muestras, independientemente de su fracción volumétrica (Figura 27). En particular, se registró una difusividad térmica máxima de $1.517 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para una muestra con una fracción volumétrica de hidrogel de 0.1 % a 30 °C, mientras que a 20 °C, el valor correspondiente fue de $1.470 \pm 0.002 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Por otro lado, la difusividad térmica mínima registrada fue de $1.454 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para una muestra con una fracción volumétrica de 0.5 % a 20 °C, la cual aumentó a $1.499 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 30 °C.

Estos resultados indican que, en este rango de temperaturas, la difusividad térmica aumenta aproximadamente un 0.35 % por cada grado Celsius.

4.5. Efecto de la fracción volumétrica en la difusividad térmica del hidrogel PAAM

Otra característica que influye en la difusividad térmica del hidrogel de poliacrilamida (PAAM) es el porcentaje de fracción volumétrica. Este fenómeno se observa en la Figura 27, aunque se aprecia con mayor claridad en la Figura 28, la cual presenta la difusividad térmica de varias muestras a diferentes porcentajes de fracción volumétrica, desde la difusividad térmica del agua (hidrogel PAAM al 0 %) hasta una fracción volumétrica de 0.5 %, obtenida en experimentos realizados a tres temperaturas diferentes (20 °C, 25 °C y 30 °C).

A mayor temperatura, la difusividad térmica es mayor dentro del rango de temperaturas de 20 °C a 30 °C. Además, se observa que la difusividad térmica del hidrogel PAAM alcanza un valor máximo con una fracción del 0.1 %. En particular, en las mediciones efectuadas, desde una fracción volumétrica de 0 % hasta 0.1 % a 30 °C, la difusividad térmica del hidrogel PAAM muestra un incremento de $1.480 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.517 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Sin embargo, al aumentar la fracción de 0.1 % a 0.5 %, se observa una disminución de $1.517 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.499 \pm 0.003 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente.

Es notable que la difusividad térmica del agua (hidrogel PAAM al 0 %) se incrementa al agregar el polímero PAAM, al menos en el rango de concentraciones de hidrogel PAAM utilizadas en los experimentos (del 0 % al 0.5 % de fracción volumétrica). La difusividad térmica aumenta hasta un 3 %, incluso cuando la difusividad térmica del polímero PAAM es significativamente menor que la del agua. Esto sugiere que la introducción de pequeñas cantidades de PAAM mejora la capacidad del agua para conducir calor, creando una estructura más organizada y eficiente para la transferencia térmica. Esta capacidad de mejora alcanza su máximo en la mezcla con una fracción volumétrica del 0.1 %. Sin embargo, a concentraciones superiores al 0.1 %, el exceso de PAAM parece restringir la movilidad de las moléculas de agua, actuando como una barrera y reduciendo la capacidad máxima del sistema para conducir calor.

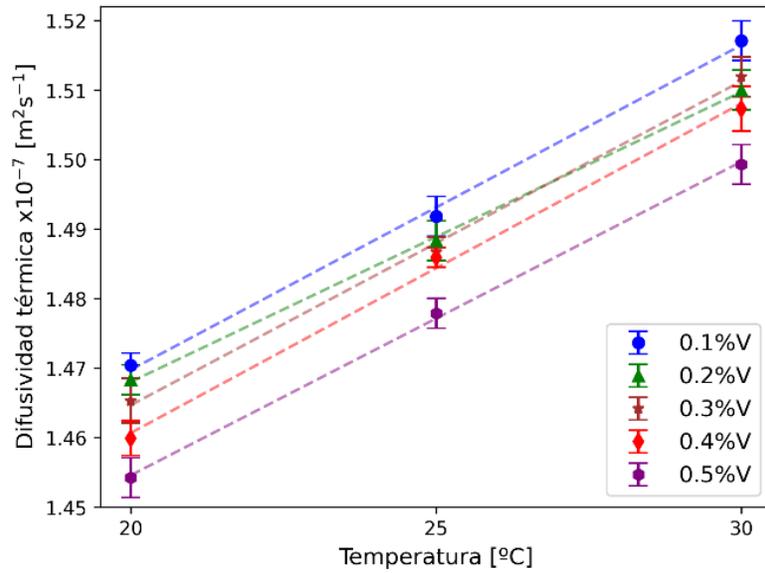


Figura 27. Difusividad térmica a diferentes temperaturas de hidrogel PAAm y diferentes porcentajes de fracción volumétrica.

Para comprender mejor estos resultados, se analiza un modelo teórico propuesto por Xu *et al.* (2018), que explica la relación entre la conductividad térmica y la fracción volumétrica del hidrogel PAAm, que se discutirá en la sección 4.7.

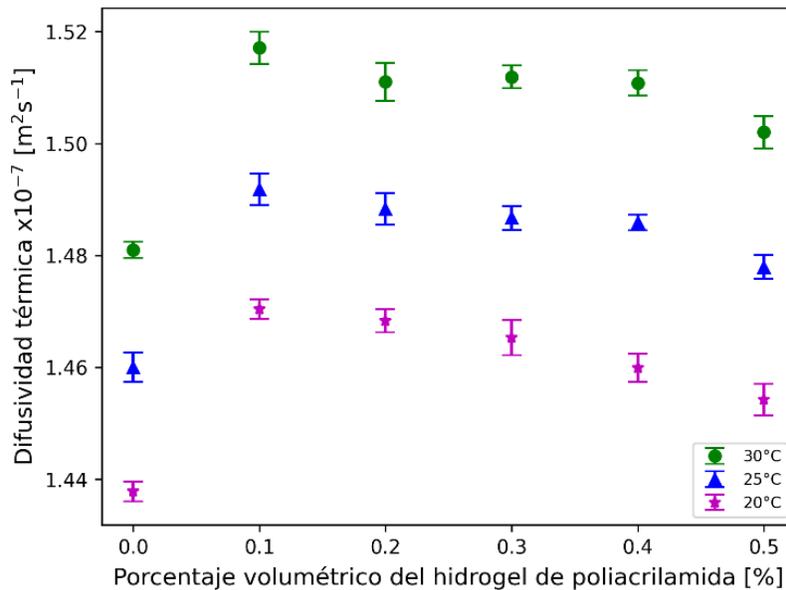


Figura 28. Difusividad térmica del hidrogel PAAm a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.

4.6. Efecto del tamaño de partícula en la difusividad térmica del hidrogel PAAM

Se llevaron a cabo experimentos con muestras de hidrogel PAAM a una fracción volumétrica del 0.1 % y a temperatura de 22 °C, utilizando diferentes tamaños de partículas (*G1*, *G2*, *G3* y *G4*). Los resultados demuestran que el tamaño de las partículas influye en la difusividad térmica de la mezcla (ver Figura 29). Se observa un aumento de la difusividad térmica del 1.13 % al comparar las muestras elaboradas con partículas de tamaño *G2* frente a las de tamaño *G1*. Al comparar los resultados entre las muestras de tamaño *G3* y *G2*, el incremento es menor, de solo 0.2 %, mientras que los valores de difusividad térmica son prácticamente iguales entre las muestras obtenidas a partir de partículas de tamaños *G4* y *G3*.

La difusividad térmica de las muestras obtenidas a partir de partículas de mayor tamaño es inferior a la de las muestras elaboradas con partículas más pequeñas. Esto se debe a que las partículas más pequeñas permiten una mejor conducción del calor debido a una mayor superficie de contacto y a la formación de una estructura más densa.

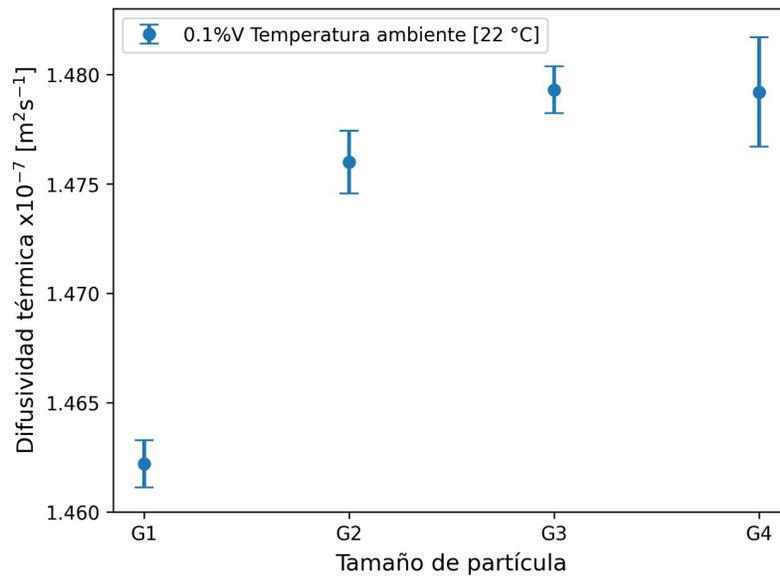


Figura 29. Difusividad térmica del hidrogel PAAM de muestras obtenidas a partir de diferentes tamaños de partículas.

4.7. Conductividad térmica

El valor de la conductividad térmica es crucial para validar y comparar los modelos teóricos con los datos experimentales obtenidos. La difusividad térmica (α), junto con la densidad (ρ) y el calor específico (c_p), permiten calcular la conductividad térmica (k) utilizando la siguiente relación:

$$k = \alpha \rho c_p. \quad (4.2)$$

Para determinar la conductividad térmica de los hidrogeles PAAm, se utilizaron los datos de difusividad térmica obtenidos en los experimentos. Se asume que la densidad y la capacidad calorífica específica del hidrogel son equivalentes a las del agua, dado que el hidrogel PAAm a bajas concentraciones volumétricas (en el rango de 0.1 % al 0.5 %) presenta una gran similitud con el agua. Esta aproximación es válida ya que al usar la regla de mezclas, el agua constituye la mayor parte de la composición del hidrogel, dominando por tanto el comportamiento general del material.

Los datos de densidad y capacidad calorífica específica utilizados para el cálculo de la conductividad térmica del hidrogel PAAm se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del agua a diferentes temperaturas. Fuente: (Cengel y Ghajar, 2020).

Temperatura, T (°C)	Densidad, ρ (kg/m ³)	Calor específico, c_p (J/kgK)	Conductividad térmica, k (kW/mK)	Difusividad térmica, α (m ² /s)
20	998	4182	0.598	1.433×10^{-7}
25	997	4180	0.607	1.457×10^{-7}
30	996	4178	0.615	1.478×10^{-7}
35	994	4178	0.623	1.500×10^{-7}

Aunque los resultados y la discusión inicial se centran en los datos de difusividad térmica, es importante destacar que la conductividad térmica es directamente proporcional a la

difusividad térmica, como se expresa en la ecuación (4.2). Por lo tanto, los resultados observados, tales como los cambios en la conductividad térmica con la variación de ciertos parámetros, como la temperatura (ver Figura 30), la fracción volumétrica (ver Figura 31) y el tamaño de las partículas (ver Figura 32), se aplican de manera análoga a la conductividad térmica. Para explicar el efecto del tamaño de partícula sobre la conductividad térmica, se consideran los modelos teóricos de Lewis-Nielsen (1974) y de Jang y Choi (2004). Por otro lado, para explicar el efecto de la fracción volumétrica sobre la conductividad térmica, se emplean el modelo teórico de Lewis-Nielsen (1974) y el modelo de segundo orden y tres fases propuesto por Xu *et al.* (2018).

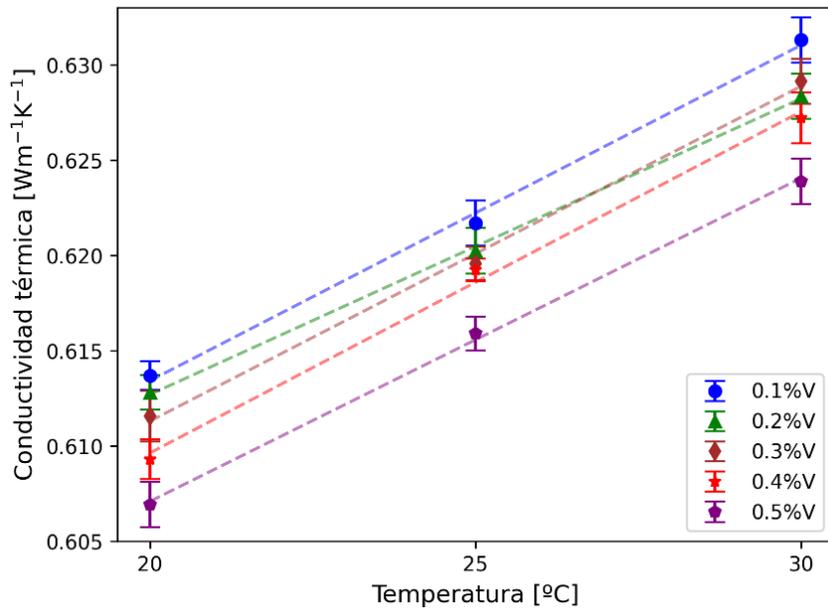


Figura 30. Conductividad térmica a diferentes temperaturas de hidrogel PAAm a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.

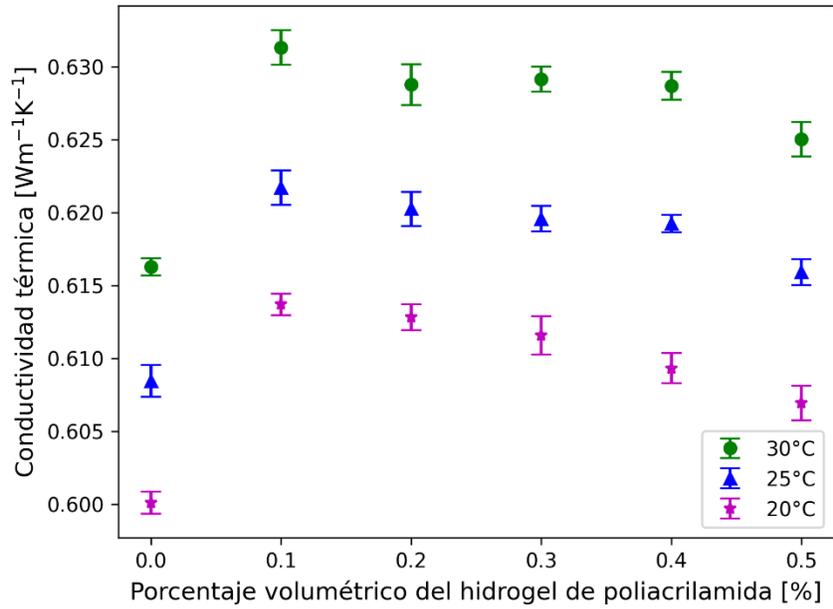


Figura 31. Conductividad térmica del hidrogel PAAM a diferentes porcentajes de fracción volumétrica.

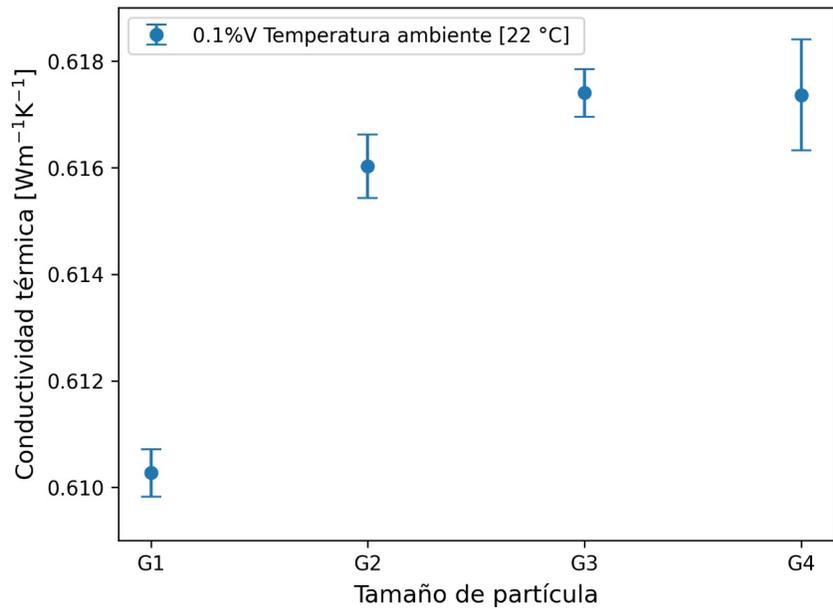


Figura 32. Conductividad térmica del hidrogel PAAM de muestras obtenidas a partir de diferentes tamaños de partículas.

4.8. Efecto del tamaño de las partículas en la conductividad térmica del hidrogel PAAm

4.8.1. Modelo Lewis-Nielsen

Nielsen (1974) desarrolló un modelo teórico para predecir la conductividad térmica de materiales compuestos, considerando tanto la forma como la orientación de las partículas de la matriz. Aunque el modelo no se enfoca explícitamente en el tamaño de las partículas, al tomar en cuenta la forma, aborda indirectamente el área superficial de estas. Es relevante señalar que, a medida que se disminuye el tamaño de las partículas, aumenta el área superficial, lo que establece una conexión entre los resultados experimentales y el modelo de Lewis-Nielsen.

El modelo de Lewis-Nielsen contempla dos fases: una fase continua y una fase dispersa, en las cuales los valores de la conductividad térmica oscilan entre la conductividad térmica de la fase continua y la de la fase dispersa, lo que contrasta con los datos obtenidos experimentalmente. Sin embargo, se emplea el modelo de Lewis-Nielsen para realizar una comparación de la conductividad de un compuesto en dos escenarios diferentes: cuando las partículas añadidas son esferas y cilindros con una relación L/D de 15, como se muestra en la Figura 33. Es importante destacar que, para un volumen equivalente, una esfera presenta un área superficial menor en comparación con la de cualquier cilindro. Además, en el caso de los cilindros, a mayor relación L/D, mayor es el área superficial. Las ecuaciones de Lewis-Nielsen se expresan como (Nielsen, 1974):

$$\frac{k}{k_1} = \frac{1 + AB\Theta_2}{1 - B\gamma\Theta_2}, \quad (4.3)$$

donde:

$$B = \frac{\frac{k_2}{k_1} - 1}{\frac{k_2}{k_1} + A}, \quad (4.4)$$

$$\gamma = 1 + \left(\frac{1 - \Theta_m}{\Theta_m^2} \right) \Theta_2. \quad (4.5)$$

Donde k representa la conductividad del compuesto o conductividad efectiva, y los subíndices 1 y 2 se refieren a la conductividad de la fase continua y la fase dispersa, respectivamente. La constante A es un parámetro que depende de la forma y orientación de las partículas. Para las esferas, el valor de A es 1.5; para cilindros orientados aleatoriamente con una relación longitud-diámetro (L/D) de 15, es 8.38. La fracción volumétrica de la fase dispersa se denota como Θ_2 , mientras que Θ_m representa la fracción de empaquetamiento máxima, definida como el volumen real de las partículas dividido entre el volumen que aparentan ocupar cuando están dispersas. Para esferas, Θ_m es 0.637, y para cilindros es de 0.52.

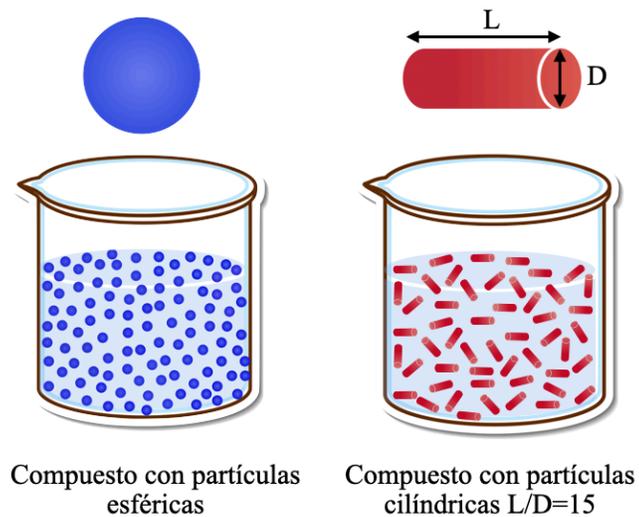


Figura 33. Compuestos con partículas consideradas por Lewis-Nielsen.

De acuerdo al modelo de Lewis-Nielsen, realizaron una simulación para calcular la conductividad térmica efectiva en función de la fracción volumétrica de las partículas añadidas. En este análisis, se consideró un compuesto formado por agua y polímero PAAm. Para los cálculos, se utilizaron los valores de conductividad térmica $k_1 = 0.6$ W/mK para el agua y $k_2 = 0.33$ W/mK para el polímero. La Figura 34 muestra la gráfica obtenida a partir de la ecuación (4.3), considerando los dos casos: la línea azul sólida representa la conductividad térmica efectiva cuando las partículas añadidas son esféricas ($A = 1.5$ y $\Theta_m = 0.637$) y la línea

roja discontinua corresponde a partículas cilíndricas con una relación L/D de 15 ($A = 8.38$ y $\Theta_m = 0.52$). En ambos casos, se observa una disminución de la conductividad térmica efectiva a medida que aumenta la fracción volumétrica de la matriz polimérica. Esto se debe a que el polímero que se añade posee una conductividad térmica inferior a la del agua. No obstante, se logra observar que la línea azul, que correspondiente a las partículas esféricas, presenta una conductividad efectiva más baja que la línea roja correspondiente a cilindros.

Estos resultados muestran que las esferas son menos eficientes en la conducción del calor en comparación con las partículas cilíndricas con una relación L/D de 15. Esto sugiere que una mayor área superficial en las partículas favorece una mayor conductividad térmica en la mezcla. De manera indirecta, esto apoya lo observado de que al reducir el tamaño de los granos de polímero, manteniendo el mismo volumen, se incrementa el área superficial, lo que a su vez provoca un aumento en la conductividad térmica.

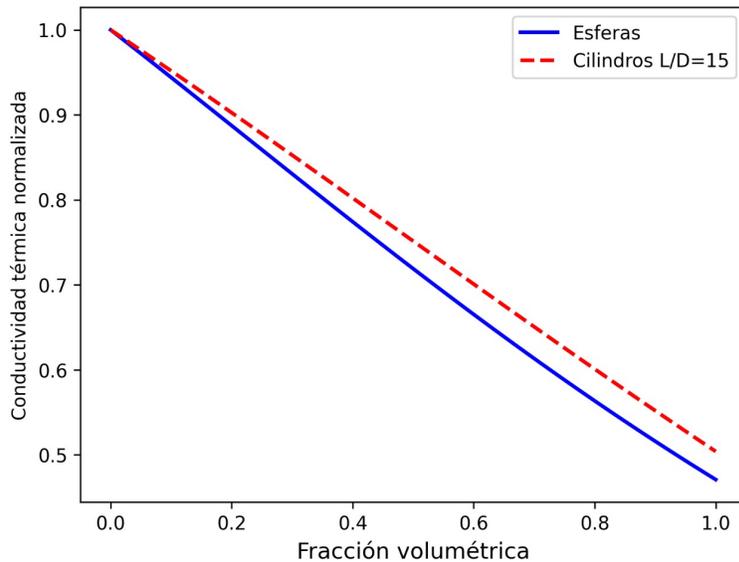


Figura 34. Relación de la conductividad térmica normalizada (conductividad efectiva/ conductividad de la fase continua) en función de la fracción volumétrica de la fase dispersa.

4.8.2. Modelo Jang y Choi

Jang y Choi (2004) identificaron que el movimiento browniano de las nanopartículas es un factor esencial en el comportamiento térmico de los nanofluidos. Con base en esta observación, desarrollaron un modelo teórico que incorpora el papel dinámico de las nanopartículas en estos fluidos. Este modelo captura la conductividad térmica en función de la fracción volumétrica y la temperatura, y también predice una variación significativa en la conductividad térmica dependiendo del tamaño de las nanopartículas. La ecuación (4.6) muestra el modelo desarrollado por Jang y Choi, (2004).

$$k_{eff} = k_{BF}(1 - \eta) + k_{nano}\eta + 3C_1 \frac{d_{BF}}{d_{nano}} k_{BF} Re_{nano}^2 Pr \eta. \quad (4.6)$$

Donde k_{eff} es la conductividad efectiva del compuesto, k_{BF} es la conductividad del fluido base, k_{nano} es la conductividad de la nanopartícula, η es la fracción volumétrica de las nanopartículas, C_1 es una constante de proporcionalidad, d_{nano} es el diámetro de la nanopartícula, Re es el número de Reynolds para la partícula nanométrica, que considera la velocidad aleatoria de la nanopartícula y la viscosidad dinámica del fluido base, y Pr es el número de Prandtl.

Este modelo presenta múltiples variables que no se pueden determinar ya que se encuentran fuera de la escala de estudio del presente abajo, lo que imposibilita su uso completo para predecir la conductividad térmica del hidrogel de poliacrilamida. No obstante, se emplea como referencia para establecer la relación entre la conductividad térmica de los nanofluidos y el tamaño de las nanopartículas.

Para el análisis, se utilizan valores de conductividad térmica correspondientes al agua ($k_{BF} = 0.6$ W/mK) y al polímero PAAm ($k_{nano} = 0.33$ W/mK), con una fracción del 0.1. Se considera el número de Prandtl para el agua ($Pr = 7$) y se elige un valor para el número de

Reynolds de 1, debido a que para nanopartículas suele estar en el rango bajo, aproximadamente 1 o menor, ya que depende del movimiento térmico aleatorio de las partículas, no de un flujo macroscópico y $d_{BF} = 0.27$ nm (basado en el diámetro efectivo de las moléculas de agua). Aplicando el modelo de Jang y Choi, se elabora una gráfica a partir de la ecuación (4.6) que muestra la variación de la conductividad térmica en función de la relación de diámetros entre la molécula de agua y la nanopartícula. La Figura 35, ilustra que existe una clara dependencia entre el tamaño de las nanopartículas y la conductividad térmica del nanofluido: a medida que disminuye el tamaño de las nanopartículas, la conductividad térmica del compuesto aumenta.

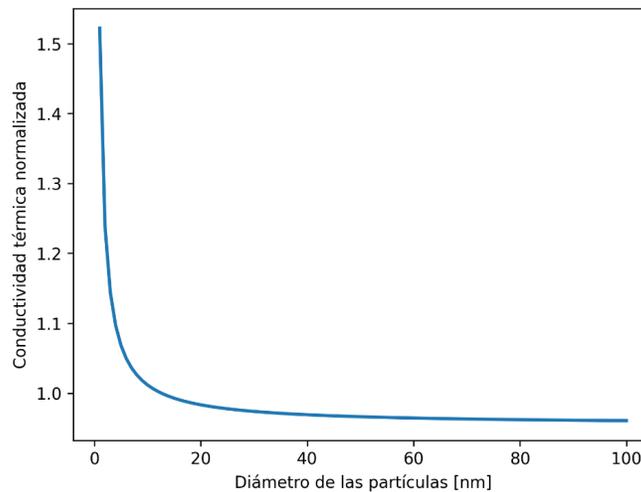


Figura 35. Variación de la conductividad térmica normalizada (conductividad efectiva/conductividad de la fase continua) en función del tamaño de las partículas.

El modelo de Lewis-Nielsen no predice el efecto del tamaño de partícula sobre la conductividad térmica, ya que su ecuación solo considera parámetros como la geometría y la orientación de las partículas, lo cual no puede relacionarse directamente con los datos experimentales obtenidos. En contraste, el modelo de Jang y Choi sí incorpora el tamaño de las partículas, pero también depende de parámetros como el número de Reynolds, que involucra la viscosidad y la velocidad de las partículas, variables que no pueden derivarse de los experimentos realizados. Esto limita su aplicabilidad para validar los resultados experimentales. A pesar de estas limitaciones, ambos modelos respaldan la tendencia observada experimentalmente: a menor tamaño de partícula, mayor es la difusividad térmica de la mezcla.

4.9. Efecto de la fracción volumétrica en la conductividad térmica del hidrogel PAAM

4.9.1. Modelo Lewis-Nielsen

Para evaluar el efecto de la fracción volumétrica en la conductividad térmica del hidrogel PAAM se utiliza el modelo de Lewis-Nielsen explicado anteriormente suponiendo que las partículas añadidas son esferas orientadas aleatoriamente ($A = 1.5$ y $\Theta_m = 0.637$). Se toman los valores del $k_1 = 0.6$ W/mK y $k_2 = 0.33$ W/mK del agua y del polímero PAAM, respectivamente, y se varía la fracción volumétrica desde 0.0 % hasta 0.5 %.

La Figura 36 muestra la comparación entre el modelo de Lewis-Nielsen y los resultados experimentales de la conductividad térmica del hidrogel PAAM en función del porcentaje de fracción volumétrica. Aunque ambos resultados presentan una tendencia descendente en el rango de 0.1% a 0.5%, el modelo no se ajusta adecuadamente a los datos experimentales. Esto se debe a que, aunque el modelo predice correctamente una disminución general en la conductividad, no captura con precisión los valores experimentales, lo que indica que el comportamiento real del sistema presenta más complejidades que las consideradas en el modelo teórico.

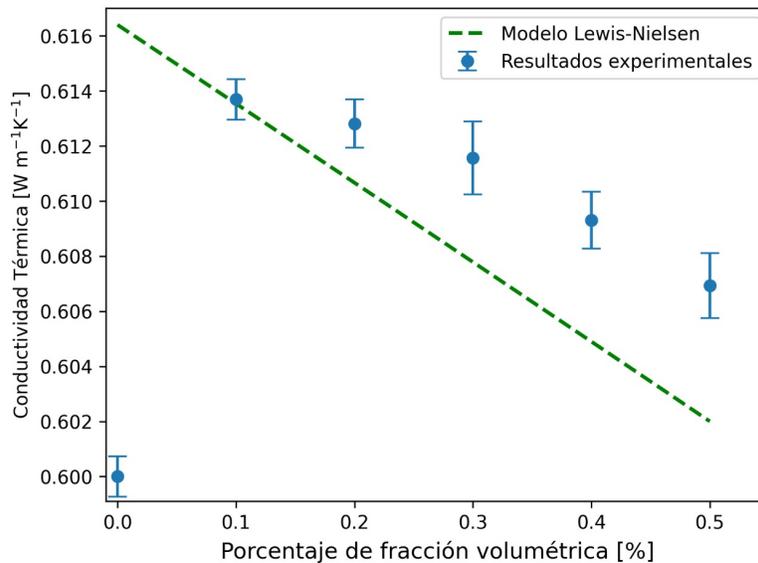


Figura 36. Comparativa de los resultados analíticos (modelo Lewis-Nielsen) y experimentales de la conductividad térmica del hidrogel PAAM en función de % fracción volumétrica.

4.9.2. Modelo de segundo orden y tres fase de Xu *et al.*

A partir de simulaciones de dinámica molecular no equilibrada (NEMD, por sus siglas en inglés) en hidrogeles de poliacrilamida, Xu *et al.* (2018) propusieron un modelo que explica la conductividad térmica en estos materiales. Los resultados de sus simulaciones mostraron que el hidrogel se puede dividir en tres partes, definidas según sus gradientes de temperatura. En dos de estas partes, las conductividades promedio son consistentes con las conductividades del polímero y del agua. Sin embargo, la conductividad promedio en la tercera parte es considerablemente más alta que la del agua libre.

Xu *et al.* señalaron que cuando las moléculas de agua se encuentran más cerca de la red de PAAm (a una distancia de 0 a 7 Å), las interacciones entre el polímero y las moléculas de agua son más fuertes, lo que restringe el movimiento del agua y, en consecuencia, promueve una mayor transferencia de calor. Definieron estas tres zonas como "fases". La "fase interfaz" incluye las moléculas de agua que están a menos de 7 Å de la red de polímero, presentando una conductividad térmica significativamente mayor que la del agua libre. La "fase de agua libre" abarca las moléculas de agua situadas a más de 7 Å del polímero, con propiedades similares a las del agua libre. Finalmente, la "fase polimérica" se refiere a las regiones dominadas por el polímero, que interactúan directamente con las moléculas de agua cercanas, Figura 37.

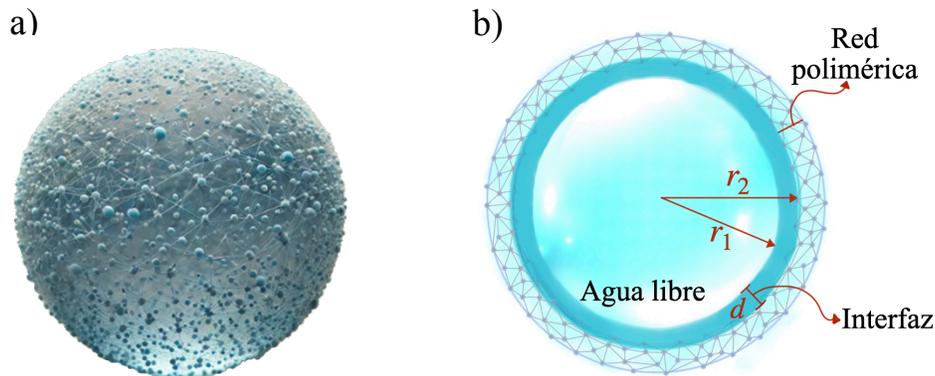


Figura 37. a) Modelo tridimensional del hidrogel PAAm con estructura esférica. b) Corte esquemático del hidrogel PAAm, dividido en tres fases. [Interpretación basada en el modelo de Xu *et al.* (2018)].

El modelo de segundo orden de tres fases para un hidrogel se describe a partir de las ecuaciones (4.7) y (4.8) (Xu *et al.*, 2018).

$$k'_w = k_i \frac{3k_w - 2\nu_{i-w}(k_w - k_i)}{3k_i + \nu_{i-w}(k_w - k_i)}, \quad \text{primer orden} \quad (4.7)$$

$$(1 - \nu_w) \frac{k_p - k_h}{k_p + 2k_h} + \nu_w \frac{k'_w - k_h}{k'_w + 2k_h} = 0, \quad \text{segundo orden.} \quad (4.8)$$

Donde ν_{i-w} es la relación entre el volumen de la interfaz y el volumen total de agua,

$$\nu_{i-w} = \frac{V_i}{V_w} = \frac{\nu_i}{\nu_w}. \quad (4.9)$$

Xu *et al.* define k_h como la conductividad térmica del hidrogel, k_p como la conductividad del polímero, y ν_w como la fracción de volumen total de agua en el hidrogel. En el modelo propuesto, se consideran tres fases: polímero, interfaz y agua libre. En primer orden, se considera el agua como un compuesto con estructura tipo *cluster-filled* y se calcula su conductividad térmica equivalente. En segundo orden, se analiza la mezcla de polímero y agua como un compuesto aleatorio de dos fases. Ambas fases se tratan de manera completamente equivalente, lo cual se considera más apropiado para representar el comportamiento del hidrogel.

Al resolver la ecuación (4.8), se obtiene k_h como una función de ν_{i-w} y ν_w . Sin embargo, es complicado determinar ν_{i-w} directamente, mientras que ν_w se puede calcular fácilmente al comparar el volumen de hidrogel en su estado hidratado con el volumen en su estado seco. Esto sugiere la posibilidad de establecer una relación entre ν_{i-w} y ν_w .

En el modelo de primer orden, se asume que el grosor de la fase 2 (interfaz) es de $d = 7$ Å. Por lo tanto, se tiene $r_2 = r_1 + d$. Así, aplicando la ecuación (4.9) se obtiene:

$$\nu_{i-w} = \frac{\nu_i}{\nu_w} = \frac{r_2^3 - (r_2 - d)^3}{r_2^3} = 1 - \left(1 - \frac{d}{r_2}\right)^3, \quad (4.10)$$

donde se asume que:

$$V_w = \frac{4}{3}\pi r_2^3. \quad (4.11)$$

Donde V es el volumen del hidrogel y se tiene que $V - V_w = V_{pol}$ y $\nu_w = V_w/V$,

$$V = \frac{V_{pol}}{1 - \nu_w} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_2^3}{\nu_w}. \quad (4.12)$$

En la que V_{pol} es el volumen del polímero en estado seco. Despejando r_2 de la ecuación (4.12) y sustituyendo en la ecuación (4.10), se obtiene:

$$\nu_{i-w} = 1 - \left(1 - d \sqrt[3]{\frac{4\pi(1 - \nu_w)}{3\nu_w V_{pol}}}\right)^3. \quad (4.13)$$

Combinando las ecuaciones (4.13) y (4.8), se obtiene que k_h se puede expresar como una función de ν_w .

Con base en el modelo de Xu *et al.*, se realizó el cálculo de la conductividad térmica del hidrogel PAAM, k_h en función de la fracción volumétrica $\nu_p = (1 - \nu_w)$, en el intervalo de 0 % a 0.5 % de fracción volumétrica. Se utilizan las conductividades térmicas del agua a 20 °C y del polímero PAAM como $k_w = 0.6$ W/mK y $k_p = 0.33$ W/mK, respectivamente. Para la estimación, se asumen ciertos valores como $V_{pol} = 650 \text{ \AA}^3$, $d = 7.5 \text{ \AA}$ y $k_i = 0.63$ W/mK. Estos parámetros son estimados con base al modelo debido a que no es posible obtenerlos experimentalmente a escala macrométrica con el equipo disponible. Esta aproximación contrasta con el modelo

original de Xu *et al.*, quien determinó estos valores directamente a partir de simulaciones de dinámica molecular.

Los datos obtenidos del modelo son comparados con los resultados experimentales a 20 °C, estos se muestran en la Figura 38. Donde, la línea continua representa los resultados obtenidos utilizando el modelo de segundo orden de tres fases, mientras que los puntos corresponden a los datos experimentales. El modelo muestra un ajuste adecuado a los datos experimentales y predice con precisión el comportamiento del hidrogel dentro de este rango de fracción volumétrica a diferencia de los modelos anteriormente estudiados.

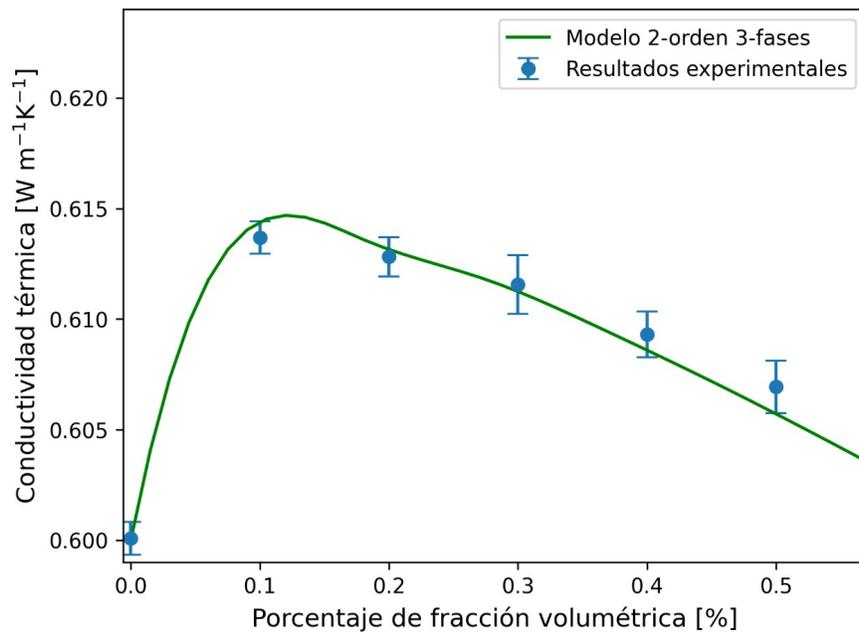


Figura 38. Comparativa entre los resultados experimentales y la predicción del modelo teórico de segundo orden de tres fases.

Los resultados obtenidos por Xu *et al.* evidenciaron un comportamiento similar al observado en el estudio, destacando un incremento en la conductividad térmica a medida que la fracción volumétrica de agua disminuía del 100 % al 85 %, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 1 W/mK en este punto; seguido de una disminución conforme la fracción volumétrica de agua continuaba reduciéndose. Los resultados experimentales muestran una tendencia similar, donde se observa un incremento significativo en la conductividad térmica al

aumentar la fracción volumétrica del polímero PAAm de 0 % a 0.1 %. Sin embargo, a partir de este punto, la conductividad térmica disminuye progresivamente a medida que se incrementa aún más la fracción volumétrica del polímero de PAAm.

Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se determinó la difusividad térmica del hidrogel PAAM utilizando técnicas fototérmicas. A lo largo de este estudio, se han evaluado aspectos clave como la capacidad de absorción de agua, la medición de la difusividad térmica mediante la técnica fototérmica TWRC, y la influencia de variables como la temperatura, la fracción volumétrica y el tamaño de partícula en la difusividad térmica del PAAM. Asimismo, se ha validado el comportamiento observado utilizando modelos teórico-empíricos. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de los resultados experimentales obtenidos.

- Reducción del tamaño de granos de polímeros mediante molino de bolas. La técnica del molino de bolas ha demostrado ser eficaz en la reducción controlada del tamaño de granos de polímeros como la PAAM. No obstante, esta metodología genera una distribución de tamaños de partículas amplia. Para obtener una mayor uniformidad en el tamaño de las partículas, es necesario implementar técnicas adicionales como el tamizado o la clasificación por ciclones.
- Capacidad de absorción de agua de la PAAM. La PAAM presenta una notable capacidad de retención de agua, con la capacidad de absorber en promedio 251 veces su propio peso en agua. Este resultado destaca el potencial de la PAAM en aplicaciones donde se requiere un alto nivel de absorción de humedad.
- Medición de la difusividad térmica mediante la técnica fototérmica TWRC. La técnica fototérmica TWRC se ha confirmado como un método confiable y preciso para la medición de la difusividad térmica en hidrogeles, como el hidrogel de PAAM. Los datos obtenidos fueron consistentes y reproducibles, lo que refuerza la utilidad de esta técnica en el análisis de propiedades térmicas.
- Efecto de la mezcla de PAAM y agua en la difusividad térmica. A pesar de que la PAAM tiene una difusividad térmica inferior a la del agua, su mezcla provoca un incremento en esta

propiedad. Esto sugiere una interacción sinérgica entre la PAAm y el agua, que favorece la transferencia de calor en la mezcla.

- Influencia de la temperatura en la difusividad térmica de la PAAm. Se ha evidenciado que la difusividad térmica del hidrogel de PAAm aumenta consistentemente con el incremento de la temperatura en el rango de 20 °C a 30 °C. Este comportamiento es observable en todas las muestras, independientemente de su fracción volumétrica, lo que indica una relación directa entre la temperatura y la eficiencia térmica del material.
- Variación de la difusividad térmica según la fracción volumétrica. La difusividad térmica del hidrogel de PAAm varía significativamente en función de la fracción volumétrica. Se ha identificado que la adición de PAAm en concentraciones bajas mejora la difusividad térmica del agua en aproximadamente un 4 %, alcanzando un valor máximo en una fracción volumétrica del 0.1 % de PAAm en agua. A partir de esta concentración, la difusividad térmica comienza a disminuir con el aumento de la concentración, lo que sugiere que pequeñas cantidades de polímero pueden optimizar la estructura interna del hidrogel, mientras que concentraciones mayores reducen la eficiencia térmica del sistema.
- Impacto del tamaño de partícula en la difusividad térmica. Los resultados experimentales indican que el tamaño de las partículas influye en la difusividad térmica del hidrogel de PAAm a temperatura ambiente. Se ha observado que, más allá de un cierto umbral, el efecto del cambio en el tamaño de las partículas sobre la difusividad térmica se atenúa. Además, las muestras con partículas de mayor tamaño presentaron una menor difusividad térmica en comparación con aquellas de partículas más pequeñas, lo que sugiere que un tamaño de partícula reducido favorece la conductividad térmica del hidrogel.
- Validación de los resultados con modelos teórico-empíricos. El modelo teórico-empírico propuesto por Xu *et al.* (de segundo orden y tres fases) ha mostrado un buen ajuste con los resultados experimentales, permitiendo predecir con precisión el comportamiento de la

conductividad térmica del hidrogel de PAAm en función de su fracción volumétrica. En contraste, los modelos de Lewis-Nielsen y Jang-Choi presentaron aplicabilidad limitada que permitieran describir la conductividad térmica en función del tamaño de partícula, aunque resultaron útiles para apoyar los hallazgos que indican que la conductividad térmica aumenta con la disminución del tamaño de las partículas en una mezcla.

Referencias bibliográficas

- Almond, D. P., & Patel, P. (1996). *Photothermal science and techniques* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, 6(2), 105-121.
- Balderas-Lopez, J. A., Mandelis, A., & Garcia, J. A. (2000). Thermal-wave resonator cavity design and measurements of the thermal diffusivity of liquids. *Review of Scientific Instruments*, 71(7), 2933-2937.
- Benítez, J., Contreras, D., Guzmán, P., Ramírez, A., Prin, J., & Rojas de Gáscue, B. (2011). Estudio de la Difusión y Cinética de Hinchamiento en Hidrogeles de Poliacrilamida. *Rev. Iberoam. Polim*, 12(6), 292-299.
- Braun, D., Cherdrón, H., & Ritter, H. (2001). *Polymer synthesis: theory and practice: fundamentals, methods, experiments* (pp. 105-110). Heidelberg, Germany: Springer.
- Caló, E., & Khutoryanskiy, V. V. (2015). Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European polymer journal*, 65, 252-267.
- Ceja, M. A. (2019). *Caracterización óptica y térmica de películas de hidróxidos de doble capa de Cu-Al decoradas con nanopartículas de oro* (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Física y Matemáticas.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Chauhan, S. (2015). Acrylic acid and methacrylic acid based hydrogels-A review. *Der Chemica Sinica*, Udaipur, 6(1), 61-72.
- De Souza, M. G., de Gil, Y. F., Ramírez, A. L., Prin, J. L., Guzmán, P. J., Otero, B., ... & De Gáscue, B. R. (2014). Hidrogeles de Poli (acrilamida): Evaluación de su comportamiento en fluido fisiológico simulado (SBF). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(4), 198-210.

- Díaz, D. D. (2006). Los geles: Una maravilla de la Ciencia al servicio de la sociedad. In Un breve viaje por la ciencia (pp. 19-24). Universidad de La Rioja.
- Forero-Sandoval, I. Y., Vega-Flick, A., Alvarado-Gil, J. J., & Medina-Esquivel, R. A. (2016). Study of thermal conductivity of magnetorheological fluids using the thermal-wave resonant cavity and its relationship with the viscosity. *Smart Materials and Structures*, 26(2), 025010.
- García, P. E. (2023). Implementación de un sistema de control de temperatura para mediciones de difusividad térmica de tensoactivos empleando la técnica cavidad de ondas térmicas (Tesis de licenciatura). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.
- Gong, J. P., Katsuyama, Y., Kurokawa, T., & Osada, Y. (2003). Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength. *Advanced materials*, 15(14), 1155-1158.
- Gonzales, K. N. (2019). Síntesis de hidrogeles con derivado de quitosana y caracterización de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas (Master's thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru))
- Gupta, P., Vermani, K., & Garg, S. (2002). Hydrogels: from controlled release to pH-responsive drug delivery. *Drug discovery today*, 7(10), 569-579.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). Fundamentals of heat and mass transfer. New York: Wiley.
- Jang, S. P., & Choi, S. U. (2004). Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied physics letters*, 84(21), 4316-4318.
- Jiang, C., Wei, P., Ding, Y., Cai, K., Tong, L., Gao, Q., ... & Chen, S. (2021). Ultrahigh performance polyvinylpyrrolidone/Ag₂Se composite thermoelectric film for flexible energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105488.
- Katime D., Katime O., Katime I.A. (2004). Los materiales inteligentes de este milenio: los hidrogeles macromoleculares. Síntesis, propiedades y aplicaciones. Servicio editorial de la Universidad del país Vasco.

- Laquidara, A., Perez, I. P., Díaz, C., & Giordana, A. A. (s.f.). *Amplificadores Lock-In. Apuntes de clase. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería. Circuitos electrónicos II.*
- Lei, J., Li, Z., Xu, S., & Liu, Z. (2021). Recent advances of hydrogel network models for studies on mechanical behaviors. In *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao* (Vol. 37, Issue 3, pp. 367–386). Springer Verlag.
- Montes-de-Oca, L. M., Medina-Esquivel, R. A., Zambrano-Arjona, M. A., & Martínez-Torres, P. (2022). Thermal detection of second critical micelle concentration in SDS and CTAB aqueous solutions using a modified Lewis-Nielsen effective thermal model. *Journal of Molecular Liquids*, 363, 119864.
- Nielsen, L. E. (1974). The thermal and electrical conductivity of two-phase systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 13(1), 17-20.
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization*. John Wiley & Sons.
- Ohm, Y., Pan, C., Ford, M. J., Huang, X., Liao, J., & Majidi, C. (2021). An electrically conductive silver–polyacrylamide–alginate hydrogel composite for soft electronics. *Nature Electronics*, 4(3), 185-192.
- Ortiz, L. E., Cruz, R. A., Gómez, J. C., & Mendoza, A. M. (2006). Síntesis y caracterización de hidrogeles obtenidos a partir de acrilamida y metilcelulosa. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(4), 247-253.
- Povea, M. B., Rigñack, J. C., Rivero, N. B., & Covas, C. P. (2008). Síntesis y caracterización de hidrogeles biocompatibles interpenetrados de quitosana y poliacrilamida. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 39(2), 70-74.
- Ren L. (2009). *Preparation, Characterization and in-Vitro Evaluation of Chitosan-Based Smart Hydrogels for Controlled Drug Release*. Thesis. Massey University;
- Shariatnia, Z., & Jalali, A. M. (2018). Chitosan-based hydrogels: Preparation, properties and applications. *International journal of biological macromolecules*, 115, 194-220.
- Tang, N., Peng, Z., Guo, R., An, M., Chen, X., Li, X., ... & Zang, J. (2017). Thermal transport in soft PAAm hydrogels. *Polymers*, 9(12), 688.

- Tessema, A. & Kidane, A. (2015). The effect of particles size on the thermal conductivity of polymer nanocomposite. In *Composite, Hybrid, and Multifunctional Materials, Volume 4: Proceedings of the 2014 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (pp. 151-156). Springer International Publishing.
- Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., & Akil, H. M. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 57, 414-433.
- Van Vlierberghe, S., Dubruel, P., & Schacht, E. (2011). Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: a review. *Biomacromolecules*, 12(5), 1387-1408.
- Xu, S., Cai, S., & Liu, Z. (2018). Thermal Conductivity of Polyacrylamide Hydrogels at the Nanoscale. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10(42), 36352–36360.
- Xu, D., Huang, J., Zhao, D., Ding, B., Zhang, L., y Cai, J. (2016). High–flexibility, high–toughness double–cross–linked chitin hydrogels by sequential chemical and physical cross–linkings. *Advanced Materials*, 28(28), 5844-5849.
- Xu, S., & Liu, Z. (2019). A nonequilibrium thermodynamics approach to the transient properties of hydrogels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 127, 94-110.
- Zhou, J., Lin, S., Zeng, H., Liu, J., Li, B., Xu, Y., ... & Chen, G. (2020). Dynamic intermolecular interactions through hydrogen bonding of water promote heat conduction in hydrogels. *Materials Horizons*, 7(11), 2936-2943.

Elí Chagolla Inzunza

Determinación de la difusividad térmica del hidrogel de poliacrilamida mediantetécnicas fototérmicas

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:404664228

Fecha de entrega

12 nov 2024, 10:09 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 nov 2024, 10:12 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

Determinación de la difusividad térmica del hidrogel de poliacrilamida mediantetécnicas fototér....pdf

Tamaño de archivo

11.8 MB

87 Páginas

18,413 Palabras

101,436 Caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	Determinación de la difusividad térmica del hidrogel de poliacrilamida mediante técnicas fototérmicas	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Elí Chagolla Inzunza	1137626b@umich.mx
Director	Laura Alicia Ibarra Bracamontes	laura.ibarra@umich.mx
Codirector	Pablo Genaro Martínez Torres	pablo.martinez@umich.mx
Coordinador del programa	Miguel Villagómez Galindo	miguel.villagomez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	si	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	sí	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Elí Chagolla Inzunza 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 28 de noviembre de 2024