

Improvement of the thermal capacity of paraffin by adding silica doped with graphite and carbon black nanoparticles

Antonio Holguino Huarza¹; Jose Quiñonez Choquecota²; Arturo Flores Condori³ Víctor Román Salinas⁴
^{1,2,3,4}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, aholguino@unap.edu.pe, josequch@unap.edu.pe, aflores@unap.edu.pe,
vroman@unap.edu.pe

Abstract– This research work seeks to identify materials with high heat storage capacity, with the objective of developing heat accumulator systems that can efficiently supply heat for different applications; since conventional energy sources are increasingly limited. In South America, solar radiation is an abundant and free source of energy that can be harnessed by storing heat in accumulator materials, such as phase change materials. These materials can improve their heat accumulation capacity by incorporating high thermal conductivity nanomaterials, which facilitate heat transfer, and absorbent and homogenizing nanomaterials that improve energy absorption and the chemical stability of the composite material. In this research, paraffin was used as a phase change material, silica gel as an absorbent, and graphite and carbon black as high thermal conductivity materials. The results obtained were: the composite material with graphite showed an increase of 20.04%; While the composite material with Carbon Black showed a 30.97% increase in latent heat of fusion storage compared to pure paraffin. These results suggest that the addition of graphite and Carbon Black to paraffin can significantly improve the latent heat of fusion storage capacity, which could have practical applications in thermal energy storage systems.

Keywords– Graphite and Carbon Black nanoparticles, latent heat of fusion, phase change materials.

Mejora de la capacidad térmica de parafina mediante la adición de sílice dopada con nanopartículas de grafito y carbón black

Antonio Holguino Huarza¹; Jose Quiñonez Choquecota²; Arturo Flores Condori³ Víctor Román Salinas⁴
^{1,2,3,4}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, aholguino@unap.edu.pe, josequch@unap.edu.pe, aflores@unap.edu.pe, vroman@unap.edu.pe

Resumen– Este trabajo de investigación busca identificar materiales con alta capacidad de almacenamiento de calor, con el objetivo de desarrollar sistemas acumuladores de calor que puedan suministrar calor de manera eficiente para diferentes aplicaciones; ya que las fuentes de energías convencionales son cada vez limitadas. En Sudamérica, la radiación solar es una fuente de energía abundante y gratuita que puede ser aprovechada mediante el almacenamiento de calor en materiales acumuladores, como los materiales de cambio de fase. Estos materiales pueden mejorar su capacidad de acumulación de calor mediante la incorporación de nanomateriales de alta conductividad térmica, que facilitan la transferencia de calor y nanomateriales absorbentes y homogeneizadoras que mejoran la absorción de energía y la estabilidad química del material compuesto. En esta investigación, se utilizó a la parafina como material de cambio de fase, Sílice Gel como absorbente, Grafito y Carbón Black como materiales de alta conductividad térmica. Los resultados obtenidos fueron: el material compuesto con Grafito mostro un aumento del 20.04 %; mientras que el material compuesto con Carbón Black mostro un aumento del 30.97 % en la acumulación de calor latente de fusión en comparación con la parafina pura. Estos resultados sugieren que la adición de Grafito y Carbón Black a la parafina pueden mejorar significativamente la capacidad para almacenar calor latente de fusión, lo que podría tener aplicaciones prácticas en sistemas de almacenamiento de energía térmica.

Palabras clave– Calor latente de fusión, materiales de cambio de fase, nanopartículas de Grafito y Carbón Black.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la demanda energética es un problema creciente, debido a la disminución de recursos energéticos convencionales e incremento de la población. Sin embargo, la energía solar es una fuente de energía renovable cuya producción energética se representa por la transformación de la radiación solar en energía térmica, que es otra de las formas de energía más utilizadas por la humanidad. La transición a fuentes de energía solar y su producción depende de la ubicación y del clima de cada lugar geográfica [1]. Es necesario almacenar a la energía térmica para su posterior uso, por ello se requiere encontrar materiales con mayor capacidad de almacenamiento de esa energía. El objetivo de este trabajo de investigación es mejorar las propiedades de almacenamiento de energía térmica de la cera de parafina (PW), que deben ser utilizados para elaborar acumuladores de calor y mantener el equilibrio energético [2]. Según [3], los acumuladores prometedores que pueden resolver la carencia la

energía térmica necesario para la calefacción, refrigeración, procesos industriales y otros, son los que están elaborados con materiales de cambio de fase (PCM). Los PCM poseen una capacidad de mayor almacenamiento de calor para una unidad menor de masa [4], o que la acumulación de energía térmica es mayor para mínimas variaciones de temperatura mientras que el PCM se encuentra en cambio de fase [5]. La PW es un PCM que acumula calor latente y tiene diversas aplicaciones porque es estable y no afecta al medio ambiente [2], la limitante es su baja conductividad térmica [6], que permite una rapidez de transferencia de calor en los procesos de almacenamiento y descarga de la energía. Sin embargo la baja conductividad térmica y otras propiedades físicas de los materiales, se puede mejorar añadiendo partículas que tienen alto valor de conductividad térmica, como son las nanopartículas de carbono [7], específicamente el Carbón Black (CB) y Grafito (G); según [8], los materiales derivados de carbono tienen la capacidad de conversión de energía solar a energía térmica por tener una buena absorción de la luz en el espectro solar. Los materiales derivados de carbono, además de tener excelente conductividad térmica son porosos que permiten un buen soporte para sujetar a los PCM fundidos [9]. Por eso, es una opción prioritaria el uso de la PW para mejorar su capacidad de almacenamiento del calor latente de fusión, ya que los sistemas fototérmicos basados en PCM incluyen los subprocesos de absorción de luz, conversión fototérmica, almacenamiento de calor y aplicaciones térmicas [10], como la solución a problemas relacionados con la deficiencia del confort térmico en viviendas de zonas geográficas frías. La capacidad de almacenamiento de calor en PCM, depende las propiedades físicas como la entalpia de cambio de fase, absorptividad térmica, densidad energética, conductividad térmica, así como de las propiedades químicas como la homogeneidad, morfología, estabilidad a la reacción química de la sustancia. Por otro lado, los nanomateriales de carbono mezcladas con PW no tienen una distribución homogénea; por lo tanto, como elemento homogeneizador y absorbente de las componentes de la muestra se utiliza a nanopartículas de Sílice Gel (SG), que caracteriza por poseer un alto valor de su superficie específica (Tabla 1) y tiene como su componente principal a la sílice. La identificación las propiedades de entalpia de fusión, absorción de energía y conductividades de calor en los materiales acumuladores de calor como la parafina con nanopartículas de SG con presencia de CB y G, permiten implementar sistemas acumuladores de calor.

I. MÉTODOS Y MATERIALES

A. Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de las muestras son la PW de Thermo Fisher Scientific como PCM para el almacenamiento de calor latente. El aglutinante del compuesto está constituido por la SG dopado con nanopartículas G y CB. Los materiales utilizados son la SG de 200 - 400 mesh 60 Å de Aldrich Chemical Company, Inc. Los nanomateriales de carbono tanto CB como G son etiquetados por Cabot Corporation MA 01821, USA. G, de Fisher Chemical US.

B. Preparación de muestras

El absorbente y homogeneizador constituido por la SG es un componente principal de la arena del mar, de los ríos y rocas que abundan en la corteza de la Tierra, que tiene las propiedades de facilitar la distribución eficiente de calor debido a su conductividad térmica (Tabla 1). Por otro lado, las nanopartículas de CB y G también tienen eficiente conductividad térmica las que se muestran en (Tabla 1), se espera que al doparlos con la SG mejoraran la conductividad térmica del compuesto y cuando se mezcla con la PW, su capacidad de almacenamiento de calor latente también aumentará significativamente. Los costos de los materiales utilizados como la SG y la PW que constituyen el mayor porcentaje del compuesto son accesibles y baratos; también los nanomateriales de carbono utilizados como CB y G en proporciones próximos al 1% son accesibles, que permitirá implementar sistemas de colectores de energía térmica.

Para la cuantificación de las proporciones de cada componente de las muestras, se utiliza la balanza electrónica de precisión Adventurer Ohaus. En el proceso de mezclado, se utiliza el calentador de placa térmica H280-Pro a una temperatura de 80°C para mezclar las muestras con contenido de PW y SG dopadas con nanomateriales de carbono y ultrasonicador Eco-Sonic a una potencia de 80 watts, utilizadas durante 3 minutos para obtener las muestras mediante la mezcla de los compuestos de PW y SG dopadas con los nanomateriales de CB y G.

El procedimiento de dopado de la SG con nanomateriales de CB y G es: con la balanza de precisión se identifica las cantidades proporcionales de la SG y de cada uno de los nanomateriales utilizados, la SG y los nanomateriales se disuelve en 10 mL de agua desionizada, posteriormente se efectúa el proceso de sonicación en la lavadora ultrasónica durante 180 minutos a 50 ° C y finalmente se separa el agua con la centrifuga Hettich Zentrifugen- Rotina 380 a la revolución de 9550 rpm durante 10 minutos, para completar la extracción del agua se utiliza la Estufa Secagem - Marconi a 70° durante 20 horas. Los compuestos de la SG con los nanomateriales de CB y G, se mezclan con la PW en las proporciones especificadas. Las muestras son obtenidas como una mezcla de los compuestos y la PW en las proporciones especificadas.

1) *Muestras referenciales:* Estas muestras tienen contenido de SG pura, PW pura y PW con 10% de contenido de SG. Con estas muestras se efectúan comparaciones de las muestras que tiene contenido de nanomateriales de CB y G, que permiten evaluar la estabilidad química mediante la termogravimetría (TG), la morfología y el análisis de composición mediante la microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDX), también la capacidad de acumulación de calor mediante la prueba de calorimetría diferencia de barrido (DSC). Las muestras referenciales obtenidas para las evaluaciones tienen las representaciones dadas por: la PW pura (PW-100), la SG pura (SG-100) y 90 % de PW con 10% de SG (PW/SG-10).

Estas muestras están constituidas por la PW que es un PCM disponible y barata, mientras que la SG que es también disponible por su origen como principal componente de las rocas y arenas de los ríos constituidos por los cuarzos o el bióxido de silicio (SiO_2) [11].

2) *Muestras con contenido de nanopartículas de Carbón Black y Grafito:* En la elaboración de las muestras dopadas, solo se utilizó concentraciones bajas, el 1 % de CB y G, el 10 % de SG, porque las bajas concentraciones de los nanomateriales son ventajosas por diferentes aspectos, tales como: bajo costo, evitan la saturación, mantienen la estabilidad molecular y evitan la reactividad molecular [12]; sin embargo, mejoran la calidad de otras propiedades físicas de la materia dopada. Otro aspecto fundamental en el proceso de dopado es la calidad de dispersión de las nanopartículas [13]. Según [14], la dispersión homogénea de las nanopartículas de SiC con un contenido volumétrico de 3 % en un material con contenido de aluminio, mejoró del 273 al 400 % la resistencia al límite elástico.

Se elaboran dos muestras dopadas, las dos muestras tiene un contenido de 99 % de la muestra referencial PW/SG-10, una con 1 % de las nanopartículas de CB y la otra 1 % de G, cuyas denominaciones son PW/SG-10/CB-1 y PW/SG-10/G-1 respectivamente.

C. Técnicas de caracterización

De las tres muestras referenciales PW-100, SG-100 y PW/SG-10, se identifican la estabilidad térmica en el rango de temperatura de trabajo, la capacidad de almacenamiento el calor latente de fusión de cada una de estas muestras, la absorbancia y transmitancia de la energía. Con respecto a las dos muestras dopadas PW/SG-10/CB-1 y PW/SG-10/G-1, se añade pruebas de evaluación de estabilidad química durante el proceso de acumulación de calor.

Las propiedades térmicas como punto de fusión y demás relacionadas con la acumulación de la energía térmica de los materiales utilizados en la elaboración de las muestras, se muestran en la Tabla 1. La identificación de las propiedades térmicas es necesaria para implementar la elaboración de las muestras dopadas de la PW con las nanopartículas de carbono. Es así que el punto de fusión, calor latente de fusión y otras

propiedades de los materiales utilizados, se muestran en la Tabla 1.

TABLA I
PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MUESTRAS.

Muestra	Punto de fusión (°C)	ΔH_f (J.s ⁻¹)
Parafina	51.9[15]	184.1[15]
2% EG, 8% 20nm SiO2	51.8[15]	168.3[15]
Muestra	Conductividad térmica (W/mK)	
PW	0.2[16]	
G	100-400[17]	
CB	6-174[17]	
Silica	0.198[18]	
Muestra	Área de la superficie específica (m ² /g)	
Silica aerogel sintetizada	945.8[17]	
	Punto de degradación	
CB	222 - 300 °C[18]	

La baja conductividad térmica de los PWs es el principal obstáculo para su utilización diversificada [16]. El uso de la SG es por que posee dos excepcionales peculiaridades de ser un material muy abundante y tener el valor de conductividad térmica mucho mayor que de la PW (Tabla 1). La estabilidad de degradación de las muestras en el proceso de acumulación y almacenamiento de calor, ha sido evaluado de las muestras referenciales con el Analizador Termogravimétrico (TGA Hewlett-Packard Company). La determinación de la entalpia de fusión como el punto de fusión de todas las muestras se hizo con el Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC Mettler Toledo), que permitió identificar la cantidad de calor acumulada por cada una de las muestras y efectuar las comparaciones. Para la identificación de la morfológica de las muestras con contenidos de nanopartículas de CB y G dentro de la mezcla de PW con SG, que permite identificar la estructura de cada muestra, ha utilizado el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Quorum Sputter Coaters and SEM. También se ha identificado el contenido porcentual de las nanopartículas presentes en las muestras mediante el análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDX). Por otro lado, la eficiencia en la absorción de la energía del espectro de radiación se identifica con la absorbancia, que ha sido determinado con el Espectrofotómetro UV-Visible Genesys 150.

III. RESULTADO Y DISCUSIÓN

A. Estabilidad de la degradación de la materia

Los materiales utilizados para la elaboración de las muestras, la PW, SG y la muestra PW/SG-10, tiene una estabilidad de degradación de la materia para las temperaturas próximas a la temperatura de fusión de la PW que se aproxima a 65 °C (Fig. 1a y Fig. 1b). La muestra SG -100 que contiene a Si, se degrada en un 0.05%, debido a que el Si es un elemento absorbente de masa. La muestra SG – 100 en contacto con la atmosfera, absorbe partículas de agua y esa es la que degrada a temperaturas menores a 65°C (Fig. 1a); por ello el resto de la

masa de SG – 100 no se degrada en el rango de temperaturas de fusión próximas a 65 °C de las muestras con contenido de PW (Fig. 1a). Todas las muestras que contienen PW, inician su degradación por encima de 165 °C, y permanecen estables a temperaturas próximas a la temperatura de fusión de la PW (Fig. 1a y Fig. 1b). Por lo tanto, se existe una estabilidad correspondiente a la degradación de la materia para las muestras elaboradas en base a CB, G (Tabla 1), PW-100 y SG (Fig. 1).

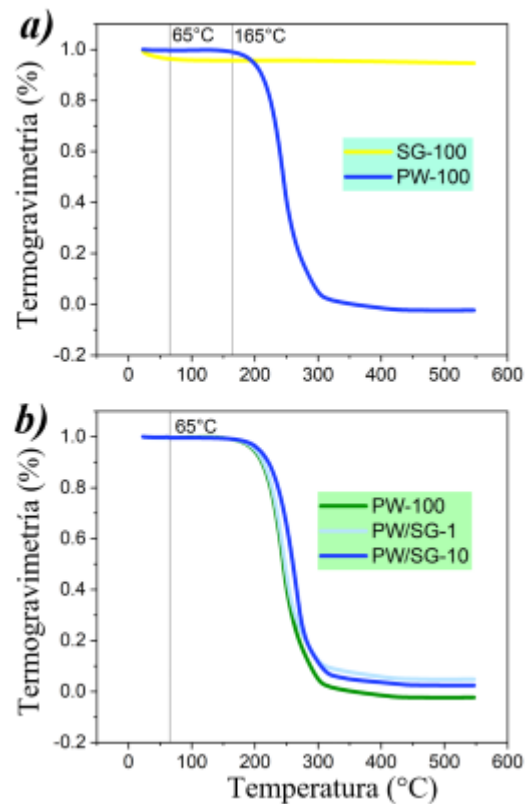


Fig. 1 Proceso de degradación de las muestras preliminares (PW-100, SG-100 y PW/SG-10)

B. Almacenamiento de energía y puntos de fusión

La capacidad de almacenamiento de energía calorífica en las muestras está representada por el valor de sus entalpías de fusión. En el diagrama de flujo de calor que varía con las temperaturas, se identifica las variaciones de los flujos de energía entre las muestras. Para las muestras preliminares de PW – 100 y PW/SG – 10, los picos de flujo de calor son similares (Fig. 2a), por lo tanto, ambos acumulan cantidad de energía similares. Las muestras dopadas en comparación con la muestra PW – 100, estas tienen mayor capacidad de almacenamiento de energía calorífica (Fig. 2b); también ocurre similarmente con la muestra PW/SG – 100 (Fig. 2c). Entre las muestras dopadas, la que mejor capacidad de acumulación tiene es la muestra PW/SG – 10/CB -1 (Fig. 2d).

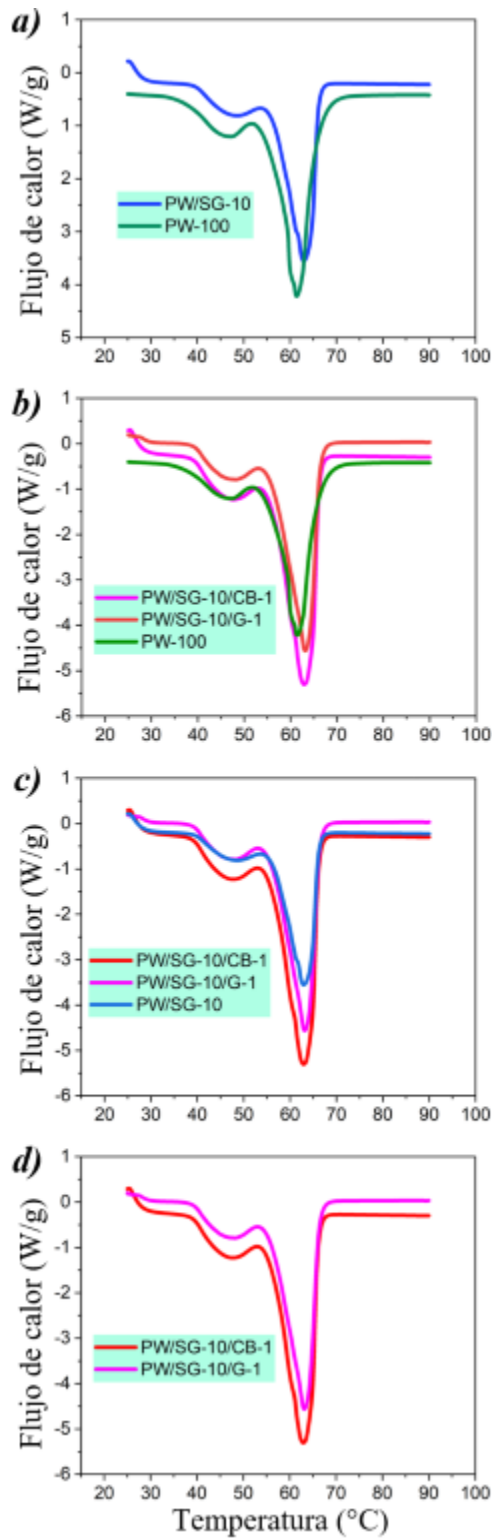


Fig. 2 Comparación de los procesos de flujo de calor para diferentes temperaturas entre, (a) muestras preliminares PW/SG-10 y PW -100, (b) la muestra preliminar PW - 100 con las muestras dopadas PW/SG 10/CB - 1 y PW/SG 10/G - 1, (c) la muestra preliminar PW/SG 10 con las muestras dopadas PW/SG 10/CB - 1 y PW/SG 10/G - 1, (d) las muestras dopadas PW/SG 10/G - 1 y PW/SG 10/CB - 1.

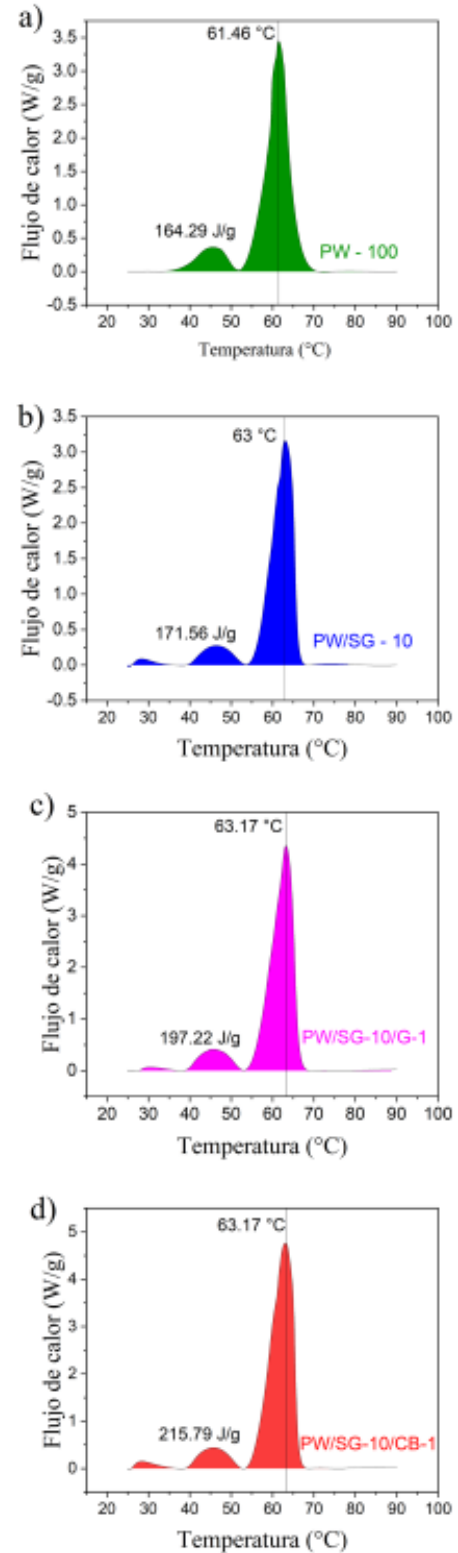


Fig. 3 Entalpías de fusión y punto de fusión de, (a) muestra preliminar PW - 100, (b) muestra preliminar PW/SG 10, (c) muestra dopada PW/SG 10/G - 1 y (d) la muestra dopada PW/SG 10/CB - 1.

El valor de la entalpía de fusión se determina como áreas en el diagrama de flujo de energía. Las entalpías de las muestras preliminares, es mayor de la parafina puro PW – 100. La mayor capacidad de almacenamiento de la energía calorífica efectuada por las muestras PW/SG – 10/CB -1 y PW/SG – 10/G -1, están relacionadas con la velocidad de calentamiento mediante la adición de nanopartículas de SG, CB y G[19].

Los resultados mostrados en la Fig. 3, representan que la capacidad de acumulamiento de calor de la PW es incrementada en un 14.38 % por la muestra PW/SG-10 que tiene 90% de PW y 10 % de SG. Así mismo, se observa que el incremento es mayor en un 31.35 y 20.1 % para las muestras que contienen 1 % de nanomateriales de CB y G respectivamente (Fig. 3). Con respecto al punto de fusión varía levemente entre 61.46 hasta 63.17 °C. El calor acumulado de las muestras a través de la determinación de entalpías de fusión mostradas en la Fig. 3, permiten observar la mejora de la capacidad de acumulación de calor de las muestras con contenido de SG, CB y G. Los resultados obtenidos concuerdan con los resultados prometedores logrados, mejorando el comportamiento térmico del PCM con el uso de nanoplaquetas de grafito[20].

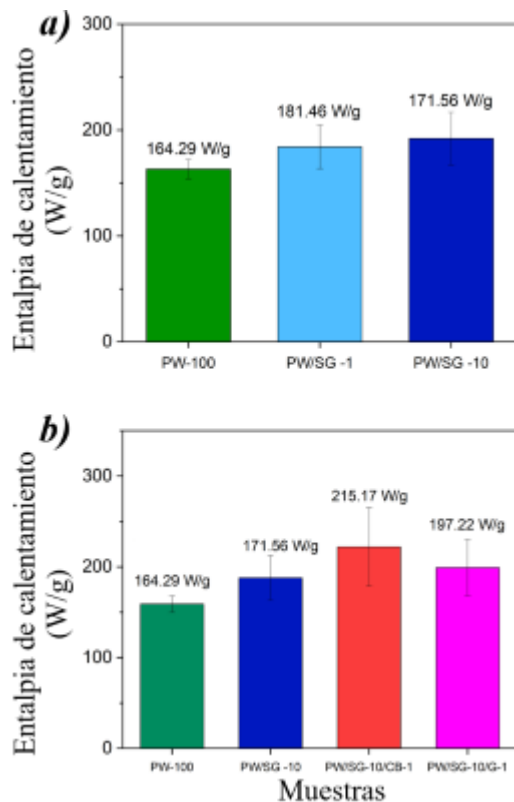


Fig. 4 Comparación de las entalpías de fusión entre, (a) muestras preliminares PW -100 y PW/SG -10, (b) muestras preliminares PW -100 y PW/SG 10 con las muestras dopadas PW/SG 10/CB – 1 y PW/SG 10/G – 1.

La SG es un componente muy importante en la elaboración de las muestras, por poseer eficiente absorción debido a su alto valor de su superficie específica. La absorción

de la SG contribuye en la estabilidad y la homogeneidad de las muestras, así como la absorción del calor que irradia sobre las muestras; por otro lado, también la muestra PW/SG – 10 con respecto a PW-100 tiene mayor entalpía en un 4.42 % (Fig. 4a). Estos resultados concuerdan con las mejoras obtenidas de las propiedades térmicas de la parafina dopadas con nanopartículas de SiO₂ y CeO₂ al 1 por ciento de masa[21].

C. Morfología y análisis de composición

La Fig. 5a muestra la morfología homogénea a una aproximación de 40µm de la muestra PW-100. Mientras tanto para la muestra PW/SG-10 la morfología muestra la presencia de Si (Fig. 5b) y en el EDX si visualiza puntos oscuros con relucientes claros (1) la presencia de silicio que constituye a SG, en tanto el punto (3) que es una generalización, su masa tiene un contenido de 81.73 %, 15.72 % de O y 2.54 % de Si. Por otro lado, en la (Fig. 6a) se observa la morfología de PW/SG-10/CB - 1, apreciándose una distribución homogénea de partículas de carbono que constituyen a CB, también se percibe en regiones claras la presencia de SG; mientras que en el EDX (Fig. 6b), la región más representativa, mostrada por el punto (3), tiene un contenido de masa constituido por 71.45 % de C, 23.03 % de O y 5.52 % Si. Finalmente, para la muestra PW/SG-10/G – 1, su morfología (Fig. 6c) representa una distribución homogénea entre los componentes de la muestra, mientras la prueba de la EDX (Fig. 6d) indica que el punto (3) representa a la región más generalizada de la muestra, cuya masa tiene 96.64 % de C, 3.30 % de O y 0.07 % Si de contenido.

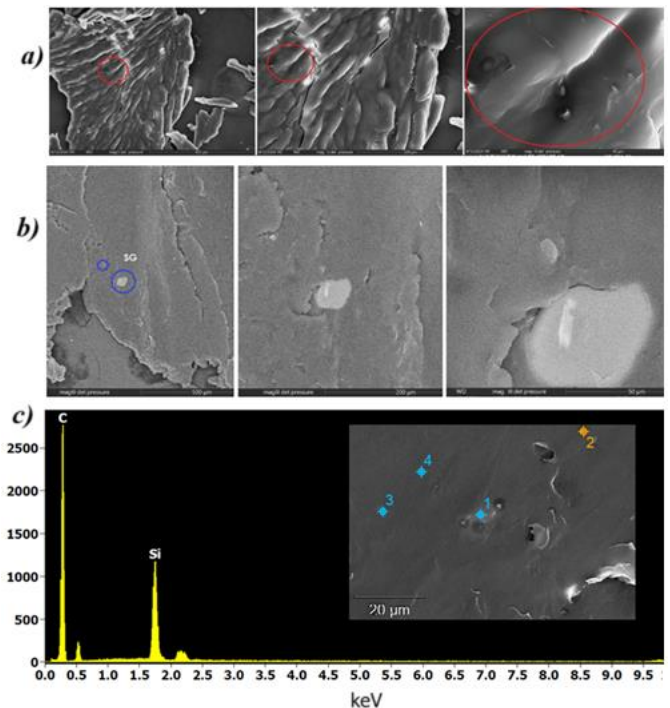


Fig. 5 Morfología y EDX determinada por SEM de las muestras preliminares, (a) morfología de PW -100, (b) morfología de PW/SG -10 y (c) EDX de PW/SG -10.

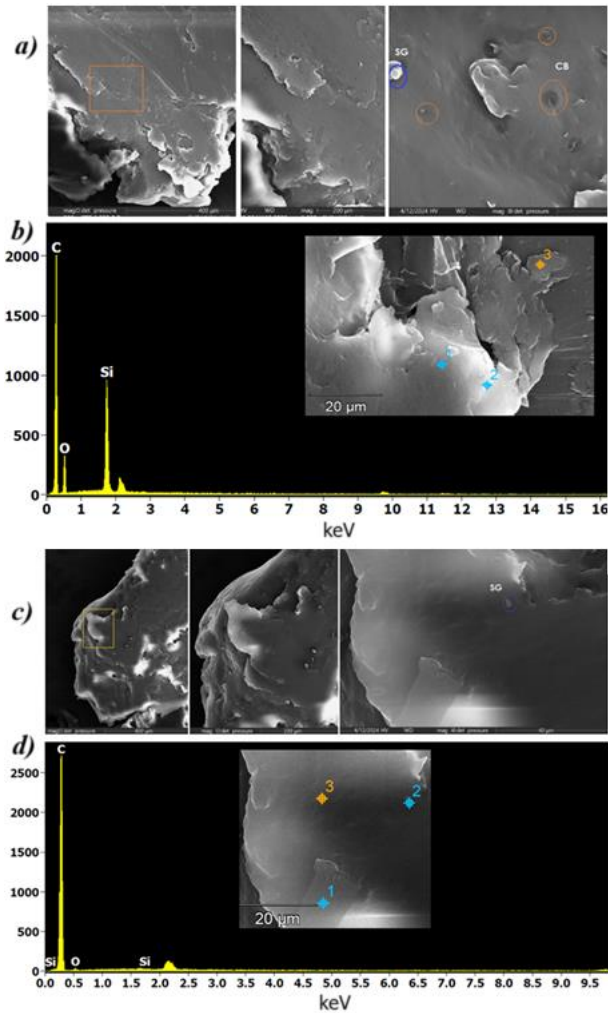


Fig. 6 Morfología y EDX determinada por SEM de las muestras dopadas, (a) morfología de PW/SG 10/CB - 1, (b) EDX de PW/SG 10/CB - 1, (c) morfología de PW/SG 10/G - 1 y (d) EDX de PW/SG 10/G - 1.

D. Absorbancia de radiación y medida del calor latente

La absorbancia de la radiación del espectro solar por las muestras ha sido examinada con espectrómetro UV-Visible Genesys 150. El espectro de radiación solar utilizada son las que tienen longitudes de onda que varían entre 350 -1050 nm, estas corresponden a las ondas electromagnéticas que entregan energía fotónica para la transformación en energía térmica almacenada en las muestras. La Fig. 7, muestra el análisis de absorbancia de las muestras en el espectro de la radiación visible mejora con respecto a la radiación ultravioleta, y se mantiene constante con respecto a la radiación infrarroja; También se observa que las muestras de PW con contenido del material surfactante SG, dopadas con nanomateriales de CB y G tienen mejor absorbancia en el espectro visible.

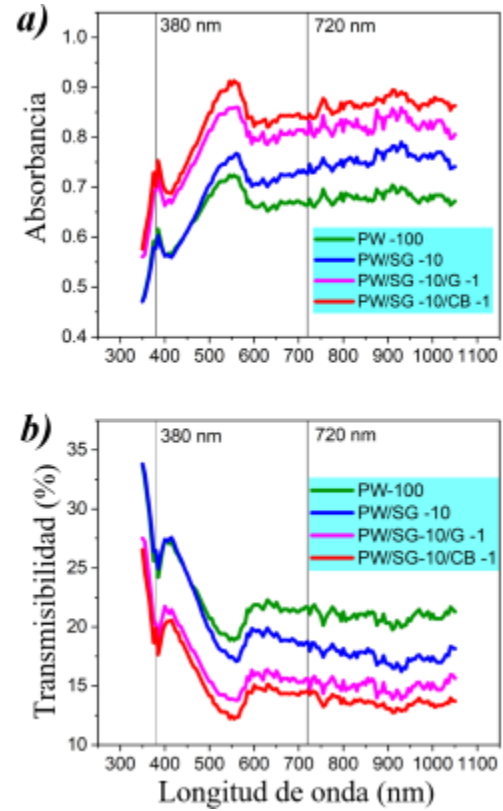


Fig. 7 Comparación de la absorbancia y transmitancia de las muestras para radiación de ondas electromagnéticas del espectro visible, situadas entre el espectro ultravioleta e infrarroja. (a) Absorbancia de las muestras y (b) Transmisibilidad de las muestras.

IV. CONCLUSIÓN

De acuerdo a la Figura 4b. Con respecto a la parafina pura (PW -100), el calor acumulado a través de la entalpía de calentamiento es mayor en un 20.04 y 30.97 % para muestras con contenido de nanomateriales de Grafito (PW/SG-10/G-1) y Carbón Black (PW/SG-10/CB-1) respectivamente.

La SG es un componente muy importante en la constitución de CB y G con la parafina como un material homogéneo, por ser una sustancia con alto coeficiente de absorción de masa y alto valor de superficie específica; ello permite que las muestras PW/SG-10, PW/SG-10/G-1 y PW/SG-10/CB-1 tienen homogeneidad e incrementen sus propiedades de absorbancia de radiación electromagnética.

Los elementos G y CB que son buenos conductores térmicos, al constituirse en la parafina mediante la fijación homogénea de la SG, se logra incrementar los calores latentes de PW/SG-10/G-1 y PW/SG-10/CB-1 con respecto sobre todo a la muestra PW -100.

Las sustancias constituidas por PW/SG-10/G-1 y PW/SG-10/CB-1 pueden ser utilizados para la elaboración de baterías térmicas, que permitirían un almacenamiento de mayor cantidad de calor durante las horas de radiación solar directa.

REFERENCIAS

- [1] N. Rogalev, A. Rogalev, V. Kindra, V. Naumov, and I. Maksimov, "Comparative Analysis of Energy Storage Methods for Energy Systems and Complexes," *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/en15249541.
- [2] C. Xu, H. Zhang, and G. Fang, "Review on thermal conductivity improvement of phase change materials with enhanced additives for thermal energy storage," *J. Energy Storage*, vol. 51, no. April, p. 104568, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104568.
- [3] W. Zhou, B. Wang, M. Wang, and Y. Chen, "Performance Analysis of the Coupled Heating System of the Air-Source Heat Pump, the Energy Accumulator and the Water-Source Heat Pump," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197305.
- [4] S. M. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 11, pp. 1127–1138, 1998.
- [5] M. Barrasso, G. Langella, A. Amoresano, and P. Iodice, "Latest Advances in Thermal Energy Storage for Solar Plants," *Processes*, vol. 11, no. 6, p. 1832, 2023, doi: 10.3390/pr11061832.
- [6] C. Chang, G. Chen, F. Wu, Z. Han, and L. Pei, "Fabrication and Thermal Performance of 3D Copper-Mesh-Sintered Foam/Paraffin Phase Change Materials for Solar Thermal Energy Storage," *Processes*, vol. 10, no. 5, 2022, doi: 10.3390/pr10050897.
- [7] F. A. Alamer, "Overview of the Influence of Silver , Gold , and Titanium Nanoparticles on the Physical Properties of PEDOT : PSS-Coated Cotton Fabrics," 2022.
- [8] G. Wang *et al.*, "Phase Change Thermal Storage Materials for Interdisciplinary Applications," *Chem. Rev.*, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00572.
- [9] P. Singh, R. K. Sharma, M. Khalid, R. Goyal, A. Sari, and V. V. Tyagi, "Evaluation of carbon based-supporting materials for developing form-stable organic phase change materials for thermal energy storage: A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 246, no. August, p. 111896, 2022, doi: 10.1016/j.solmat.2022.111896.
- [10] R. Fan, B. Xu, L. Shi, N. Zheng, and Z. Sun, "A scalable phase change material-based system enhanced by multi-walled carbon nanotubes and fins for efficient solar water heating applications," *J. Energy Storage*, vol. 72, no. PE, p. 108791, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108791.
- [11] L. de Los Santos Valladares *et al.*, "Physical and chemical characterization of sediments from an Andean river exposed to mining and agricultural activities: The Moquegua River, Peru," *Int. J. Sediment Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 780–793, 2022, doi: 10.1016/j.ijsrc.2022.06.002.
- [12] M. Safi, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, and M. J. Mahmoodi, "Effects of nano-sized ceramic particles on the coefficients of thermal expansion of short SiC fiber-aluminum hybrid composites," *J. Alloys Compd.*, vol. 803, pp. 554–564, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.06.314.
- [13] C. Gao, W. Lu, L. Chen, X. Li, and Y. Ke, "A physically-based plastic constitutive model considering nanoparticle cluster effect for metal matrix nanocomposites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 641, pp. 172–180, 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.06.013.
- [14] A. Fadavi Boostani *et al.*, "Solvothelmal-assisted graphene encapsulation of SiC nanoparticles: A new horizon toward toughening aluminium matrix nanocomposites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 653, pp. 99–107, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.12.008.
- [15] X. Han, T. Zhao, X. Gao, and H. Li, "Preparation and characterization of high-temperature non-flowing SiO₂/EG/paraffin composites by high-temperature refining," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 542, no. 5, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.01.043.
- [16] L. P. Myat *et al.*, "Effect of Polyethylene Glycol and Activated Carbon Macroparticles on Thermal Conductivity of Paraffin Wax for Thermal Storage Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/polym14194181.
- [17] Q. Feng *et al.*, "Synthesis of high specific surface area silica aerogel from rice husk ash via ambient pressure drying," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 539, no. December 2017, pp. 399–406, 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.12.025.
- [18] Z. Aguila, E. Bittencourt, T. Garcia, J. L. Trochmann, and U. E. De Campinas, "Influencia de la utilización de compuestos de negro de humo y caucho nitrílico en el desempeño antiestáticos de correas de transmisión," pp. 10–12, 2007.
- [19] D. K. Yadav, P. K. S. Rathore, R. K. Singh, A. K. Gupta, and B. S. Sikarwar, "Experimental Study on Paraffin Wax and Soya Wax Supported by High-Density Polyethylene and Loaded with Nano-Additives for Thermal Energy Storage," *Energies*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.3390/en17112461.
- [20] M. K. Koukou *et al.*, "Performance evaluation of a small-scale latent heat thermal energy storage unit for heating applications based on a nanocomposite organic PCM," *ChemEngineering*, vol. 3, no. 4, pp. 1–16, 2019, doi: 10.3390/chemengineering3040088.
- [21] M. K. Pasupathi, K. Alagar, P. Michael Joseph Stalin, M. M. Matheswaran, and G. Aritra, "Characterization of hybrid-nano/paraffin organic phase change material for thermal energy storage applications in solar thermal systems," *Energies*, vol. 13, no. 19, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/en13195079.