

Diseño de plástico magnético amigable con el medio ambiente

Victor Manuel Baldenebro Tamayo^a, Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzman^{b*}

^aTecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Otay Tecnológico, Tijuana BC, México, m22210005@tectijuana.edu.mx.

^bTecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Otay Tecnológico, Tijuana BC, México, oropeza1@tectijuana.edu.mx.

Resumen

En este trabajo se plantea la preparación de material compuesto por uno de los polímeros más utilizados en la vida diaria, como es el Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), y un material magnético con actividad fotocatalítica. La combinación de estos dos materiales, ABS y magnetita tiene por objeto reducir el tiempo de degradación y permanencia en el ambiente. Esto debido a que el ABS que es un plástico comúnmente utilizado en juguetes, bienes de consumo, teléfonos, cascos de seguridad, carcasas de electrodomésticos, paneles de control, carcasas de controles de automóviles, carcasas de controles de televisiones, tableros de mando, entre otros. Esto último gracias a que la magnetita en forma de nanopartícula tiene propiedades fotocatalíticas dado que es un óxido mixto de hierro; (su composición corresponde a 27.6% de oxígeno y 72.4% de hierro). Al tener nanopartículas en el ABS ayudará a su degradación ambiental en menor tiempo que el ABS normal [4].

Palabras clave—ABS, ABS/Fe₃O₄, Composito, Nanomagnetita, Polímero.

Abstract

The aim of this paper is the preparation of composite material containing one of the most used daily life polymer ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) and a photocatalytic magnetic material. The purpose of combining ABS and magnetite is to improve its degradation time and to reduce its permanence in the environment, since ABS is a common plastic used to make toys, consumer goods, phones, safety helmets, electrical housings, control panels, car control housings, tv control housings, dashboard, among others. The above mentioned is based on the fact that magnetite nanoparticles are mixed iron oxides (its composition corresponds to 27.6% oxygen and 72.4% iron) having photocatalytic properties. Then, magnetite nanoparticles in ABS will help its environmental degradation in less time than normal ABS [4].

Keywords— ABS, ABS/Fe₃O₄, Composite, Nanomagnetite, Polymer.

1. INTRODUCCIÓN

1.1.-Justificación

La permanencia del ABS en el medio ambiente es uno de los retos actuales, dado que su uso se ha hecho parte de la vida diaria de las personas que viven en las grandes ciudades por su gran durabilidad, resistencia y bajos costos de producción.

Todo indica que dejar de usar y consumir el plástico ABS será difícil debido a que cada día se incorpora más y más a nuestras vidas, el enfoque puede ser un gran campo de oportunidad en el poder buscar vías alternas para lograr la reducción de su tiempo de vida útil del material en el medio ambiente.

Atendiendo al reto, la propuesta de este trabajo es probar la modificación del ABS con un nanomaterial como la magnetita que puede representar una disminución en el tiempo de degradación por efecto de sus propiedades fotocatalíticas.

Proponiendo innovar un material el cual sea más amigable al medio ambiente y nos pueda dar las mismas características o mejorarlas para aplicarlas en ciertas áreas tecnológicas.

1.2.-Hipótesis

Se plantea que la creación de un compuesto que combine el polímero ABS con nanopartículas de magnetita puede ser una solución efectiva para mitigar la contaminación causada por el plástico en el medio ambiente. Se espera que esta combinación permita una degradación más rápida y completa del plástico, facilitando su reciclaje y reduciendo así el impacto ambiental negativo asociado con la acumulación de residuos plásticos.

2. CONTENIDO

2.1.- Metodología

2.1.1.- Síntesis de Np de Fe₃O₄

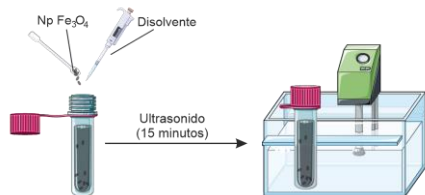
Las nanopartículas de magnetita (Fe₃O₄) fueron sintetizadas por el método de coprecipitación basado en el review llamado “Métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita”[7] que se publicó en la Universidad Politécnica de Bucarest en Rumania en el año de 2021.

2.1.2.- Dispersión de Fe₃O₄ en diferentes solventes

Se investigaron diferentes solventes orgánicos a prueba y error que disolvieran el polímero ABS, los de mejor rendimientos se resumieron en 6 tipos de solventes a estudiar, acetona, acetato de etilo, dioxano, diclorometano, dimetilformamida y tetrahidrofurano.

Posteriormente realizamos pruebas de dispersión de Fe₃O₄ con dichos solventes, este proceso se realizó preparando 6 viales que contenían 10 mL de cada solvente donde se agregó 1.0 mg de nanopartículas (Np) de magnetita (Fe₃O₄), se selló con papel Parafilm para protegerlo de alguna contaminación y evitar la evaporación de los solventes, después se dejó 15 min. en el equipo de ultrasonido de marca BRANSONIC, modelo CPX1800H (ver **Figura 1**).

Figura 1.- Esquema de la dispersión de Fe_3O_4 en diferentes solventes.



Fuente: Elaboración propia.

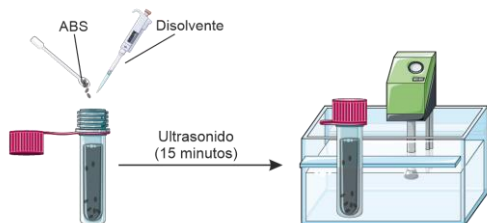
2.1.3.- Análisis de Fe_3O_4 por Dispersión de luz dinámica (DLS)

Los 6 disolventes se filtraron en su estado puro con filtros de Nylon de un tamaño de poro de $0.22 \mu\text{m}$, para así dispersar una cantidad mínima de 1.0 mg de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) en 10 mL de cada disolvente, teniendo una concentración de la solución de 0.1 mg/mL , se dejó 15 minutos en baño de ultrasonido para lograr su dispersión, después se tomó una alícuota de 1.0 mL de cada solución con Np de Fe_3O_4 y se diluyó en 10 mL del mismo tipo de disolvente para llegar así a una concentración de 0.01 mg/mL , posteriormente se volvió a dejar 15 minutos en ultrasonido para así pasar rápidamente al análisis del DLS. Para esto se hizo una corrida de blanco para cada disolvente.

2.1.4.- Dispersión de ABS en diferentes solventes

El material ABS que nos aportó la empresa SMK venían en forma de pellets, piezas en granel diminutas con forma semi esféricas, del tamaño entre 2.8 y 3.2 mm de color negro, cabe mencionar que se le hizo un pre-lavado con etanol para eliminar cualquier impureza. Como se mencionó en el apartado 2.1.3 (Dispersión de Fe_3O_4 en diferentes solventes) los solventes que lograron la dispersión, en este caso disolver el polímero ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) fueron la acetona, acetato de etilo, dioxano, diclorometano, dimetilformamida y tetrahidrofurano, de igual manera se prepararon 6 viales con 10 mL de cada disolvente, donde se les agregó 1 pallet por vial, cada pallet pesa aproximadamente 17 mg , se le colocó papel parafilm en la tapadera y se dejó en ultrasonido durante 15 min. para su dispersión. (ver Figura 2).

Figura 2.- Esquema de la dispersión de ABS en diferentes solventes.



Fuente: Elaboración propia.

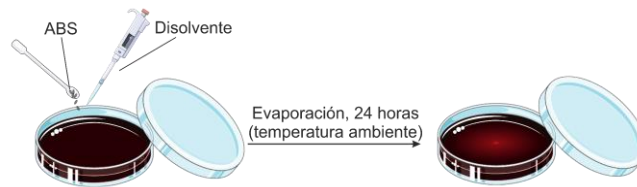
2.1.5.- Desarrollo de películas de ABS

Se generaron varias series de muestras de películas del sustrato (ABS) para encontrar las mejores condiciones en tamaño, transparencia y grosor, para después agregarle las Np de magnetita (Fe_3O_4). Para esto se disolvió el terpolímero

ABS en 10 mL de cada disolvente dejándolo 20 minutos a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ en el ultrasonido para posteriormente verterlo en una caja petri de vidrio y dejarlo 24 horas a temperatura ambiente por método de evaporación.

Se pesaron los siguientes gramos de ABS, 255 mg , 340 mg , 374 mg , 425 mg , 510 mg , las cuales se les agregó 10 mL de cada disolvente y se dejó 20 min. en el ultrasonido a $35 \text{ }^\circ\text{C}$, al terminar se procedió a verterlo en las cajas petri de vidrio donde se taparon con una membrana para que no le entrara polvo y se dejó evaporando por 24 horas . Esto con el fin de buscar la película formada que no esté ni tan delgada ni tan gruesa, (ver Figura 3).

Figura 3.- Esquema de la generación de películas.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.6.- Preparación del compuesto Np de Fe_3O_4 al polímero ABS

En el primer paso se pesaron 374 mg de ABS, se colocaron en un vial de una capacidad de 20 mL , se le agregó 10 mL de acetato de etilo, se le colocó papel parafilm en la tapadera y posteriormente se dejó 20 min. con una temperatura de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ para que se diluyera completamente, el segundo paso fue pesar 10 mg de magnetita (Fe_3O_4) para ser agregados a la solución del primer paso, se volvió a dejar 10 min más en el ultrasonido con la misma temperatura, se realizó este procedimiento 3 veces con la misma cantidad de polímero ABS (374 mg) pero con las siguientes diferentes cantidades de magnetita (Fe_3O_4), 40 mg , 70 mg y 100 mg , para así obtener 4 soluciones compuestas de la siguiente manera: ABS- Fe_3O_4 (2.67%), ABS- Fe_3O_4 (10.69%), ABS- Fe_3O_4 (18.71%), ABS- Fe_3O_4 (26.73%).

2.1.7.- Análisis del compuesto por UV-Visible

Se prepararon 6 muestras disueltas en acetato de etilo, 1.0 mg de ABS en 10 mL , 1.0 mL de la solución ABS- Fe_3O_4 (2.67%) en 9.0 mL , 1.0 mL de la solución ABS- Fe_3O_4 (10.69%) en 9.0 mL , 1.0 mL de la solución ABS- Fe_3O_4 (18.71%) en 9.0 mL , 1.0 mL de la solución ABS- Fe_3O_4 (26.73%) en 9.0 mL y 1.0 mg de Fe_3O_4 en 10 mL .

El blanco que se utilizó para la lectura fue solvente de acetato de etilo donde el barrido se hizo a una longitud de onda desde los 250 nm hasta los 800 nm con una resolución de 3 nm .

Cabe mencionar que las muestras antes de entrar al equipo se dejaron 10 min. en ultrasonido, para tener la mejor dispersión a la hora de su lectura.

2.1.8.- Análisis del composito por Potencial Z

Para este análisis se utilizaron las mismas 6 muestras (Sección 2.1.7.), 1.0 mg de ABS en 10 mL, 1.0 mL de la solución ABS-Fe₃O₄(2.67%) en 9 mL, 1.0 mL de la solución ABS-Fe₃O₄(10.69%) en 9 mL, 1.0 mL de la solución ABS-Fe₃O₄(18.71%) en 9.0 mL, 1.0 mL de la solución ABS-Fe₃O₄(26.73%) en 9.0 mL y 1.0 mg de Fe₃O₄ en 10 mL.

Al igual que en el UV-Visible, las muestras antes de meterlas en el equipo se dejaron 10 min. en ultrasonido, para tener la mejor dispersión a la hora de su lectura.

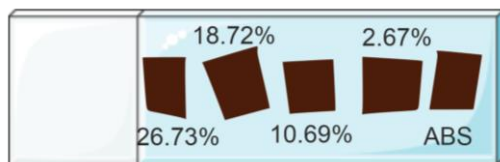
2.1.9.- Generación de películas del composito

En el primer paso se pesaron 374 mg de ABS, se colocaron en un vial de una capacidad de 20 mL, se le agrego 10 mL de acetato de etilo, se le colocó papel parafilm en la tapadera y posteriormente se dejó 20 min. con una temperatura de 35 °C para que se diluyera completamente, el segundo paso fue pesar 10 mg de magnetita (Fe₃O₄) para ser agregados a la solución del primer paso, se volvió a dejar 10 min. más en el ultrasonido con la misma temperatura, para después ser vaciado en una caja petri, que consiste en material de vidrio con un diámetro de 4.5 cm, dejándolo evaporar por 24 horas. Se realizó este procedimiento 3 veces con la misma cantidad de polímero ABS (374 mg) pero con las siguientes diferentes cantidades de magnetita (Fe₃O₄), 40 mg, 70 mg y 100 mg, para así obtener 4 películas compuestas de la siguiente manera: ABS-Fe₃O₄(2.67%), ABS-Fe₃O₄(10.69%), ABS-Fe₃O₄(18.71%) y ABS-Fe₃O₄(26.73%).

2.1.10.- Análisis de la película por AFM y SEM

La serie de películas, desde la de menor a mayor concentración, fueron cortadas en cuadros de 0.5 x 0.5 cm, con tape de doble cara se colocaron en un portaobjeto como se ve en la **Figura 4**, esto para posteriormente tomar las imágenes de AFM, las cuáles fueron tomadas con una ventana de 5 µm a una escala de 1 µm.

Figura 4.- Películas recortadas de ABS-Fe₃O₄ en portaobjeto.



Fuente: Elaboración propia.

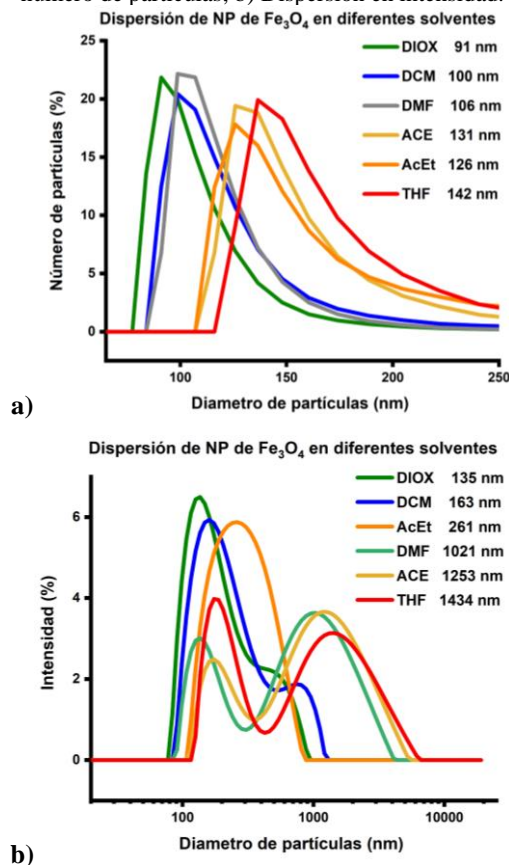
2.2.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.2.1.- Nanopartículas de Magnetita (Fe₃O₄)

En la **Figura 5** se presentan los resultados del Análisis de Dispersión Dinámica de Luz (DLS) de la dispersión de Np de Fe₃O₄ en los 6 diferentes solventes los cuales son dioxano (DIOX), diclorometano (DCM), dimetilformamida (DMF),

acetona (ACE), acetato de etilo (AcEt) y tetrahidrofurano (THF). Estos están representados en términos de número de partículas y de intensidad, como se puede observar están ordenados de menor a mayor diámetro de partícula.

Figura 5.- Análisis de DLS de Np de Fe₃O₄. a) Dispersión en número de partículas; b) Dispersión en intensidad.

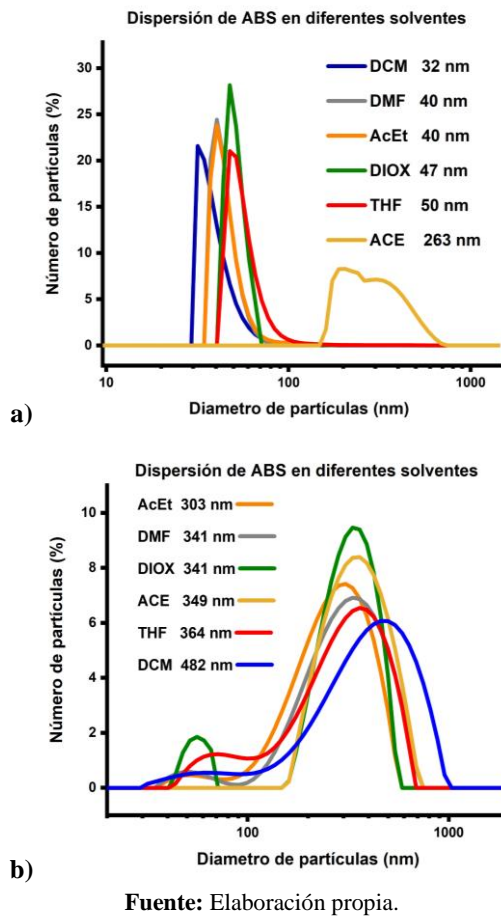


Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.- Polímero de Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

En la **Figura 6** se presentan los resultados del DLS de la dispersión del polímero ABS en 6 diferentes solventes los cuales son DIOX, DCM, DMF, ACE, AcEt y THF. Estos están presentes en términos de número de partículas y en términos de intensidad, estos están ordenados de menor a mayor diámetro de partícula.

Figura 6.- Análisis de DLS del polímero ABS. a) Dispersión en número de partículas; b) Dispersión en intensidad.



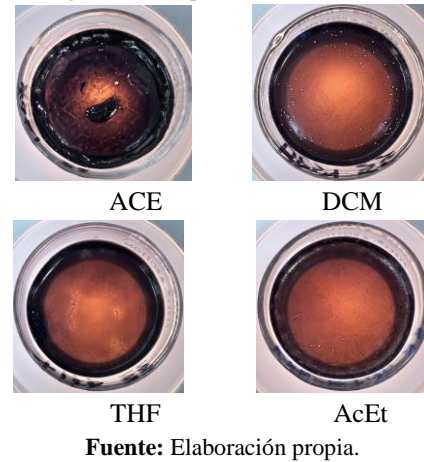
En la **Figura 6a** que nos presenta la dispersión en términos de número de partículas, podemos observar 5 picos definidos, de menor polidispersidad, a comparación con otro de mayor polidispersidad. En este caso el solvente ACE (color amarillo) nos muestra una polidispersidad en su población que va desde 150 nm a 750 nm, mientras que los demás su diámetro promedio de partícula rondan en 32 nm (DCM), 40 nm (DMF), 40 nm (AcEt), 47 nm (DIOX) y 50 nm (THF), respectivamente.

En la **Figura 6b** se muestra la dispersión en términos de intensidad, donde hay partículas, pero recalando que no son las de mayor cantidad en la solución, del tamaño de diámetro de 303 nm (AcEt), 341 nm (DMF), 341 nm (DIOX), 349 nm (ACE), 364 nm (THF), 482 nm (DCM), respectivamente.

Se observa que en el solvente de ACE, tanto en la **Figura 6a** y **6b**, las dispersiones de polímero ABS están en el mismo rango de diámetro de tamaño de partícula, esto nos indica que nos encontramos con aglomeración, debido a su alto índice de polidispersidad, lo cual no nos está haciendo una dispersión uniforme, que al final de cuenta es lo que estamos buscando.

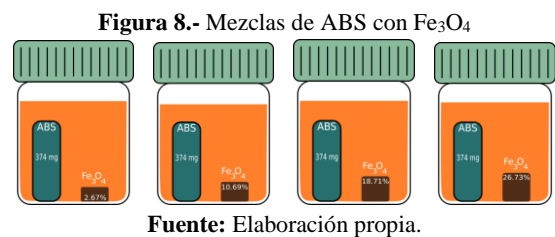
En la formación de películas de ABS puro, se buscó que presentaran una translucidez, lo cual determinó una cantidad fija vertida sobre el molde, esto para que su análisis a la hora de adicionar las nanopartículas de Fe_3O_4 se pudiera observar un cambio óptico, logrando que las películas de mejores características fueran las que se les agregó la cantidad de 374 mg de ABS, (ver **Figura 7**).

Figura 7.- Fotografía de las películas de ABS con luz de fondo.



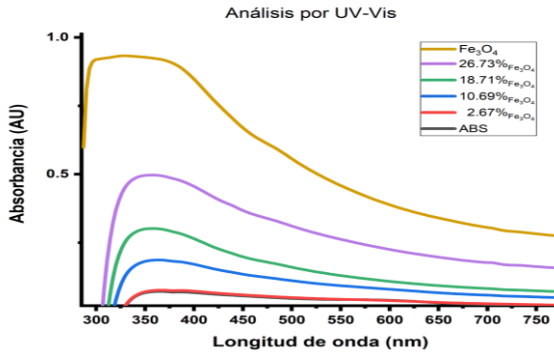
2.2.3.- Composito

En la **Figura 8** se representa de manera gráfica las cuatro soluciones que se realizaron con las siguientes composiciones: ABS- Fe_3O_4 (2.67%), ABS- Fe_3O_4 (10.69%), ABS- Fe_3O_4 (18.71%) y ABS- Fe_3O_4 (26.73%). Siguiendo los colores que hemos indicado en orden en que están en el análisis de DLS el color anaranjado indica el solvente de AcEt.



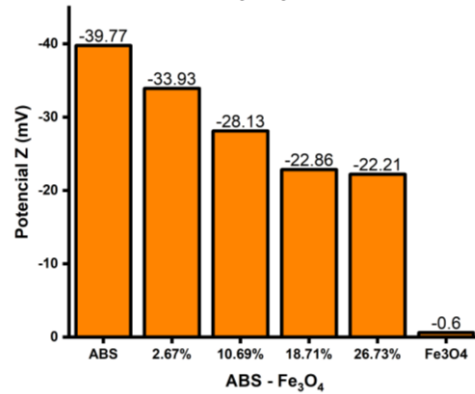
El espectro UV de magnetita indica la presencia de un plasmón superficial que absorbe en el intervalo de longitud de onda de 250 a 400 nm. Esta señal disminuye conforme el composito con ABS va disminuyendo en % de magnetita (Fe_3O_4) como se observa en la **Figura 9**. Esta misma señal plasmónica la observaron T. Kamaskshi y colaboradores cuando prepararon Níquel dopado de nanopartículas de Fe_3O_4 a diferentes concentraciones, dando como resultado el aumento de esa señal por las propiedades metálicas del Ni [9], observando un efecto inverso al de este trabajo.

Figura 9.- Análisis UV-Vis a diferentes concentraciones.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis por potencial Z



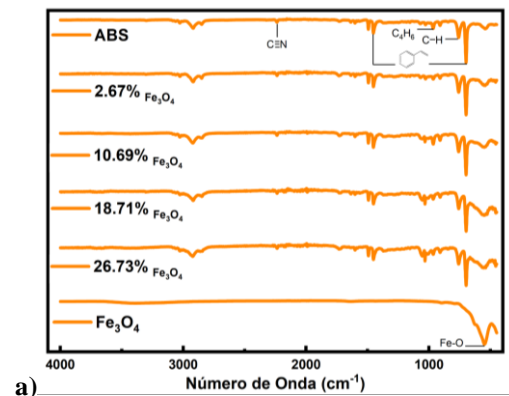
Fuente: Elaboración propia.

Se presenta el análisis por Potencial Z de los componentes puros del polímero de ABS, las Np de Fe_3O_4 y así como sus mezclas a diferentes concentraciones, donde las Np de Fe_3O_4 nos dio un potencial Z de -0.6 mV y el polímero de ABS un potencial Z de -39.77 mV, observando una tendencia de disminución al agregar diferentes concentraciones de Np de Fe_3O_4 al polímero ABS como se muestra en la **Figura 10**, esto nos da como resultado la estabilidad de dispersión que tiene el polímero ABS con el solvente de AcEt. Al tener una concentración alta de Fe_3O_4 en el compuesto notamos que a los días de dejarlas en reposo las partículas de ABS disueltas en el solvente precipitaron junto con las Np de Fe_3O_4 , dados como evidencia que las Np hicieron la función de coagulante debido a su potencial Z aquí reportado.

Esta misma tendencia la reportó Sivasankar y colaboradores del Instituto Nacional de Tecnología de India, donde sintetizan Np de Fe_3O_4 en un sustrato de un polímero natural, donde el nanocompuesto muestra un potencial Z de -34 mV, mientras que el solo Fe_3O_4 da un potencial Z de -16.6 mV, tendiendo de nuevo la misma tendencia a la disminución con respecto a la concentración de las Nps [5].

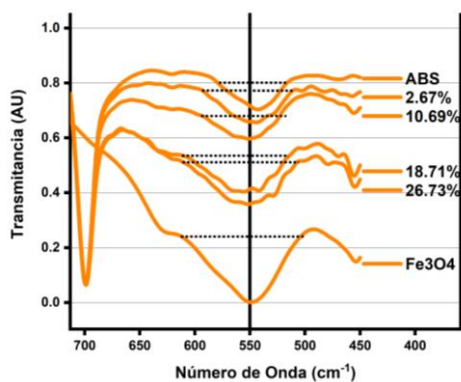
En la **Figura 11** se muestra el espectro de infrarrojo FTIR, de la serie ABS; ABS- Fe_3O_4 (2.67%); ABS- Fe_3O_4 (10.69%); ABS- Fe_3O_4 (18.71%); ABS- Fe_3O_4 (26.73%) y Fe_3O_4 , en la **Figura 11a** se indica las señales características del polímero ABS, alrededor de 2235 cm^{-1} se aprecia la señal del cianuro (CN) del acrilonitrilo, en 962 cm^{-1} se observa los enlaces de vibración del butadieno (C_4H_6), así como en 757 cm^{-1} nos indican los enlaces de vibración del hidrógeno y carbono (CH), las señales 1453 cm^{-1} y 698 cm^{-1} nos indica la presencia del anillo aromático del estireno, el óxido de hierro (Fe_3O_4) tiene su señal característica en 550 cm^{-1} . En la **Figura 11b** observamos como va la tendencia de menor concentración a mayor concentración, donde hay un desfase y crecimiento del pico donde se encuentra la señal de óxido de hierro (Fe_3O_4).

Figura 11.- FTIR a diferentes concentraciones. a) Espectro panorámico; b) Espectro en 550 cm^{-1}



a)

Figura 10.- Potencial Z a diferentes concentraciones.



b)

Fuente: Elaboración propia.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se logró dispersar las nanopartículas Fe_3O_4 en 6 diferentes solventes, los cuales son Dioxano (DIOX), diclorometano (DCM), dimetilformamida (DMF), acetona (ACE), acetato de etilo (AcEt) y tetrahidrofurano (THF), esto se logró por un cierto tiempo debido a que con el paso del tiempo las Np presentan aglomeración por sus propiedades magnéticas, por esta razón se utilizó el ultrasonido el cual ayudó a dispersar los materiales para obtener por DLS, el tamaño de partícula. Es importante mencionar que las dispersiones de Np de Fe_3O_4 se tuvieron que diluir para lograr una concentración que permitiera obtener la información de DLS.

De la misma forma que las Np Fe_3O_4 , el polímero ABS fue dispersado en los seis tipos de solventes DIOX, DCM, DMF, ACE, AcEt y THF. Excepto por el dimetilformamida, logrando una excelente solución apoyándonos con la ayuda del ultrasonido, ya que se requiere agitación para lograr una dispersión ideal. Esto último se refiere a que no haya grumos de polímero sin dispersarse y que la solución sea homogénea, dejándolo a 30 °C es mucho más eficiente este proceso. Se descarta el dimetilformamida por su lenta disolución y su baja capacidad de disolvente hacia el polímero debido a que dejó grumos sin disolver.

Se concluyó que los mejores solventes que muestran mejor características de dispersión son el THF, DCM y el AcEt. Debido a que el DMF mostró baja presión de vapor para la generación de película y la ACE mostró alta polidispersidad en sus diámetros de partícula.

Se queda como evidencia gracias a los análisis de DLS que las soluciones presentan todo tipo de tamaño de partículas pero de baja población, donde la mayoría de la población ronda entre 32 nm a 50 nm respecto a la dispersión de polímero ABS y 91 nm a 150 nm con respecto a las Np de Fe_3O_4 .

Se encontró una relación directa entre la densidad de DCM, DIOX y AcEt, con una densidad de 1.330, 1.030 y 0.902 g/cm^3 , el tamaño de partícula y la polidispersidad mostrando

que a una mayor densidad, se logró menor tamaño de partícula y menor polidispersidad.

Se logró la realización de películas de ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) por el método de moldeo por evaporación, donde se llevaron a cabo varias concentraciones para encontrar la película más óptima. La película que logró un grosor adecuado correspondió a una concentración de 374 mg de ABS. Adicionalmente esta prueba sirvió para descartar la dimetilformamida, como solvente para las dispersiones, debido a que su baja presión de vapor generó una película irregular en espesor.

También se obtuvo con éxito el compuesto formado con polímero ABS y la magnetita (ABS- Fe_3O_4), con el que se moldearon películas con diferentes concentraciones, 2.67%, 10.69%, 18.71% y 26.73% respectivamente. Como resultado final cabe mencionar que todas las películas con sus diferentes concentraciones son atraídas por un imán. Esta característica podría ser medida en un futuro próximo, con el fin de encontrar también su relación con la cantidad de magnetita contenida en la película plástica.

4. REFERENCIAS

- [1] J. G. Carriazo, C. O. Puentes, V. E. Noval, "Magnetita (Fe_3O_4): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea", *Revista Colombiana de Química*, Vol. 46(1), pp 42–59, 2017.
- [2] C. A. R. Pari, "Reutilización de plástico PET, papel y bagazo de caña de azúcar, como materia prima en la elaboración de concreto ecológico para la construcción de viviendas de bajo costo", *Uni Na Trujillo*, pp 23-47, 2016.
- [3] H. El Ghandoor, H. M. Zidan, M.H. Khalil, M. I. M. Ismail, "Synthesis and some physical properties of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles", *Int. J. Electrochem. Sci*, 7(6), pp 5734-5745.3, 2012.
- [4] S. H. Vattathurvalappil, S. Kundurthi, L. T. Drzal, M. Haq, "Thermo-mechanical degradation in ABS- Fe_3O_4 polymer nanocomposite due to repeated electromagnetic heating", *Composites Part B: Engineering*, Volume 201, pp 1-3, 2020.
- [5] J. Balachandramohan, M. Kumar, T. Sivasankar, M. Sivakumar, "Natural Polymer-Based Iron Oxide (Fe_3O_4) Synthesis, Characterization and Its Application for 1-Amino-Nitrobenzene Degradation in Assistance with Oxidants", *Dpt Chemical Engi*, pp 1-2. 2022.
- [6] P. Davis, B.E. Tiganis, L.S. Burn, "The effect of photo-oxidative degradation on fracture in ABS pipe resins", *Polym. Degrad. Stab.* Volume 84, Issue 2, 2004.
- [7] A. M. Grumezescu, C. Chircov, A-G. Niculescu, "Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review", *Methods*, pp 1-1, 2021

[8] M. Suzuki, C. A. Wilkie, “The thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer as studied by TGA/FTIR”, *Polym. Degrad. Stab.* 1994.

[9] T. Kamakshi, G. S. Sundari, H. Erothu, R. S. Singh, “Effect of Nickel dopant on structural, morphological and optical characteristics of Fe₃O₄ nanoparticles”, *Rasayan J.Chem*, Vol. 12, 2019.

[10] D. Łukowiec, L. Hawelek, A. Drygala, A. Radon, “Structure and optical properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers”, *Mat. Char.* pp 2-16, 2017.