

REVISIÓN DE FERRITAS HÍBRIDAS DE METALES PESADOS

Ricardo A. Lozano de la Peña, Lorena Farías–Cepeda*, Lucero Rosales Marines,
Rodolfo Ramos–Gonzáles

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila., Ing. José Cárdenas Valdez S/N, Col. República, C.P. 25080, Saltillo, Coahuila, México. Correo electrónico: ricardolozano@uadec.edu.mx; lorenafarias@uadec.edu.mx; lucerorosales@uadec.edu.mx; rodolfo.ramos@uadec.edu.mx

Recibido: Noviembre 2018 & Aceptado:

RESUMEN

En la presente revisión bibliográfica se llevó a cabo el análisis de las distintas rutas de síntesis de las nanopartículas de ferritas como lo son los métodos de coprecipitación, hidrotérmico, sol–gel, descomposición térmica, solvotérmico, sonoquímico, microondas, microemulsión, polirol, electroquímico, molienda mecánica y ablación láser. De estos métodos, la microemulsión es la que presenta las ventajas más favorables ya que por medio de esta técnica las partículas se pueden producir de distintas formas. Otra de las cualidades de tal sistema es que se puede controlar el tamaño de las partículas resultantes, aunado a estas cualidades se utilizan bajas temperaturas de síntesis, asimismo se pueden producir partículas en cantidades industriales. Por otra parte, también se expone el estado del arte de la síntesis de las nanopartículas de ferritas y de nanopartículas híbridas de ferrita/polímero. Este proyecto tiene la finalidad de analizar la síntesis de ferritas de metales pesados, así como su función en un material híbrido incorporado en una matriz polimérica.

Palabras clave: Nanopartículas, ferrita, ferrita/polímero, síntesis.

ABSTRACT

These literature review, it was carried out the analysis about some methods for synthesis of ferrite nanoparticles, like methods of co–precipitation, hydrothermal, sol–gel, thermal decomposition, solvothermal, sonochemical, microwave, microemulsion, polyol, electrochemical, mechanical grinding and laser ablation. Of these methods, the microemulsion presents the most favorable advantages since through this technique the particles can be produced in different forms. Another of the qualities of this system is the control of the measurement of the resulting particles, coupled with these qualities are used low temperatures of synthesis, also can produce particles in quantities of industrial level. Also, we expose a state of the art about projects in which it has been carried out the synthesis of ferrite nanoparticles and hybrid nanoparticles of polymer/ferrite. The purpose of this project is analyzing the synthesis of heavy metal ferrites, as well as their function in a hybrid material incorporated in a polymeric matrix.

Keywords: Nanoparticles, ferrite, polymer/ferrite, synthesis.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha llevado a cabo la síntesis de materiales compuestos formados por una fase orgánica y otra inorgánica, los que se denominan híbridos. La combinación de dichas fases da como resultado productos que adquieren ventajas que no poseen sus componentes de forma individual, los cuales pueden usarse de forma extensiva en diversas áreas. Actualmente se ha demostrado que los polímeros con partículas inorgánicas a nivel micro o nano tienen distintas y extensas aplicaciones como catálisis, revestimientos, biomedicina, formulaciones cosméticas, óptica, etc. En un compuesto híbrido el polímero proporciona la función estructural y procesabilidad, mientras que las partículas inorgánicas proporcionan propiedades como luminiscencia, conductividad térmica y eléctrica, o simplemente como refuerzo para incrementar las

propiedades mecánicas [1]. Un tipo de compuestos que han atraído más la atención tanto a nivel industrial como en la academia son las partículas híbridas, de diferentes tamaños y morfologías, ya que estas poseen alta área superficial, se puede controlar su distribución y tamaño promedio de partícula, la química de su superficie puede ser modificada y pueden tener propiedades magnéticas, eléctricas u ópticas [2].

Las ferritas son compuestos químicos que poseen propiedades ferromagnéticas, se conforman por óxidos de hierro y sus principales componentes son el Fe_2O_3 y el FeO , estos dos compuestos pueden estar unidos químicamente por algún elemento metálico (puede ser Mn, Fe, Co, Ni, Cu o Zn). Las ferritas con metales son excelentes opciones en muchas aplicaciones como lo son la catálisis, producción de hidrógeno, dispositivos electrónicos, etc. Por ejemplo, las ferritas utilizadas en catálisis presentan la ventaja de que se pueden remover fácilmente con la ayuda de un magneto una vez que se ha llevado la reacción por completo. Las nanopartículas magnéticas como las ferritas son uno de los materiales que ofrecen un futuro innovador en el campo de la catálisis, por sí solas o incorporadas en un algún otro material [3]. A continuación, se citan algunas aplicaciones importantes de diversos tipos de ferritas.

El arsénico (As) está presente en el medio ambiente, esto implica un problema a nivel mundial ya que este elemento es altamente tóxico y cancerígeno. La contaminación del agua por As es ocasionada por la minería, agricultura y otras actividades llevadas a cabo por el hombre. Una exposición corta a altas concentraciones de arsénico tiene graves consecuencias cardiovasculares y respiratorias. Para mitigar esta problemática, se han llevado a cabo estudios donde usan nanopartículas de óxido cúprico como adsorbente del As (III) y As (V), y también se ha encontrado que cuando se combina con hierro se obtiene una ferrita de cobre magnética (CuFe_2O_4), la cual aumenta la eficiencia de la eliminación de arsénico [4]. También se han sintetizado ferritas de cinc, las cuales presentan propiedades magnéticas, eléctricas, fotocatalíticas, entre otras [5].

La presente revisión de literatura se lleva a cabo para poder analizar de forma clara los diferentes métodos de síntesis de ferritas de metales pesados, así como las metodologías para su incorporación en una matriz polimérica y formar un material híbrido.

ANTECEDENTES

Las ferritas son materiales cerámicos magnéticos que se componen de óxido de hierro y óxidos metálicos, tienen aplicaciones potenciales en dispositivos tales como imanes permanentes,

dispositivos de microondas y equipos de telecomunicaciones. Las ferritas tienen buenas características eléctricas y magnéticas, presentan alta resistividad eléctrica, baja pérdida dieléctrica, alta magnetización de saturación, alta permeabilidad y permitividad moderada. Las ferritas de forma nanocristalina tienen aplicaciones en los campos de la administración de fármacos guiados magnéticamente, imágenes de resonancia magnética, catálisis, fluidos magnéticos y sensores de humedad y gases [6]. Presentan la ventaja de que se pueden recolectar fácilmente después de su uso, lo que presenta una ventaja para el tratamiento de aguas [7]. Por ejemplo, la ferrita de cobre puede utilizarse en sensores de humedad ya que posee excelentes propiedades magnéticas, eléctricas y además presenta estabilidad química en comparación con los sensores polímeros. Los mecanismos de conducción de las ferritas están determinados por el método de preparación, las condiciones de sinterizado y la porosidad [8].

Las ferritas tienen la fórmula molecular de $M(Fe^{3+})_2O_4$, donde “M” representa al ion de un metal divalente como lo puede ser Fe^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} o Cd^{2+} , entre otros, las cuales son materiales súperparamagnetismo, lo que significa que pueden ser atraídas por un campo magnético externo. Las ferritas de hierro, cinc y cobre han demostrado ser eficientes en la eliminación de fosfatos y otros contaminantes del agua y en ese sentido también existen investigaciones en donde se utilizan ferritas funcionalizadas con aminas para poder formar quelatos y poder remover metales pesados del agua [9].

Las nanopartículas magnéticas poseen dos componentes; un material magnético (regularmente es hierro, níquel o cobalto) y un constituyente químico que es el encargado de dar la funcionalización y por sus propiedades pueden ser aprovechadas en diversas áreas como la catálisis, biomedicina microfluidos, imágenes de resonancia magnética y remediación ambiental por mencionar unos ejemplos. Como las nanopartículas presentan una alta área superficial estas se pueden utilizar como adsorbentes para contaminantes en una solución acuosa y por sus propiedades magnéticas las nanopartículas se pueden recuperar simplemente haciendo uso de un imán, sin necesidad de llevar a cabo una filtración o centrifugación. Las propiedades físicas y químicas de las nanopartículas magnéticas dependen de su ruta de síntesis, así como de su estructura química, por ejemplo, las partículas con tamaño promedio entre 1 y 100 nm pueden poseer propiedades súperparamagnéticas [10].

La ruta de síntesis de las nanopartículas impacta en gran medida en el tamaño y morfología de las partículas, así como en las características superficiales y propiedades magnéticas [11]. A

continuación, se hace una pequeña revisión de los métodos de síntesis de nanopartículas de ferrita.

PRINCIPALES MÉTODOS DE SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE FERRITAS

Método de coprecipitación. Este método de síntesis es el más utilizado, una solución acuosa que contiene una combinación de metales de transición di- y trivalentes, en una relación molar 1:2, respectivamente. Las sales solubles que contienen Fe (III) comúnmente se usan como fuente de metales iónicos trivalentes, generalmente las reacciones se llevan a cabo en medios alcalinos. El pH en este método es un factor muy importante ya que de él dependen las características de las nanopartículas. El pH de la solución se ajusta por lo general utilizando una solución de amonio o hidróxido de sodio. Dicha solución se mantiene en agitación constante, ya sea con o sin temperatura y en una atmósfera inerte. El rendimiento de Fe_3O_4 se encuentra alrededor del 68%. Una característica que vuelve muy popular este método es que es amigable con el medio ambiente debido a que solamente utiliza agua para diluir las sales [11].

Método hidrotérmico. En esta técnica, las sales solubles contienen metales de transición (por lo general hierro) divalentes y trivalentes los cuales se disuelven por separado y se mezclan juntos en una relación de 1:2, respectivamente. Posteriormente, y en presencia de agitación, se añaden disolventes orgánicos gota a gota, puede utilizarse etilenglicol, etanol, entre otros. Esta solución una vez que esta lista se calienta en la autoclave a alta presión. Esta técnica presenta la ventaja de que se puede controlar la distribución y tamaño promedio de partícula con las condiciones de síntesis, es decir con la relación de concentraciones, temperatura, presión y tiempo de reacción. Se obtienen rendimientos alrededor del 68% [11].

Método sol-gel. La ruta de síntesis del método sol-gel por lo regular incluye el uso de soluciones de alcóxidos de metal, los cuales se someten a hidrólisis y a reacciones de polimerización por condensación para crear geles a temperatura ambiente. Para que se puedan obtener los cristales, es necesario someter el producto a tratamiento térmico para eliminar los subproductos volátiles de la mezcla de reacción. Las ventajas de este método es que se utilizan temperaturas bajas, los reactivos son económicos y no requieren instrumentación sofisticada. Las reacciones se llevan a cabo a temperaturas entre 25 y 200°C, dando como resultado distribuciones de tamaño estrecho y con morfología controlada. Esta técnica también resulta ser popular debido a la facilidad con la que se puede controlar la composición, microestructura y pureza de las nanopartículas ajustando distintos parámetros como la agitación, concentración de sol y temperatura [11].

Método de descomposición térmica. La descomposición térmica es un método sencillo para preparar nanopartículas, se lleva a cabo de tal modo que un precursor organometálico se descompone térmicamente, como por ejemplo acetilacetonas y carbonilos metálicos en presencia de disolventes orgánicos y tensioactivos. La temperatura de reacción depende de la clase de precursores utilizados. El tamaño y la forma de las partículas pueden ser controladas mediante la temperatura, las rampas de calentamiento y la concentración de los precursores [11].

Método solvotérmico. En esta técnica hay buen control de la distribución de tamaño de partícula y de la forma de las fases cristalinas. Estas propiedades físicas se pueden modificar al cambiar las condiciones experimentales tales como el tiempo y la temperatura de reacción, el tipo de disolvente y la clase de tensioactivo, así como de los precursores. Se puede llevar a cabo la síntesis de las nanopartículas ya sea utilizando disolventes acuosos o no acuosos [11].

Método sonoquímico. La sonoquímica es una ruta de síntesis efectiva para obtener nanopartículas de Fe_3O_4 y de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Los reactivos disueltos en un disolvente son expuestos a radiación ultrasónica, las burbujas se producen en el disolvente con la finalidad de acumular energía de difusión del ultrasonido. Las burbujas colapsan violentamente, produciendo gran cantidad de energía que se transforma en calor por lo que se forman sitios calientes transitorios con una mayor temperatura y presión, alrededor de 5.000 K y 1.000 bars, por estas condiciones es posible que se lleven a cabo reacciones químicas. Además, el método sonoquímico por su naturaleza genera dispersiones homogéneas, por lo que se reduce del crecimiento del cristal y, por lo tanto, se generan distribuciones de tamaño de partículas estrechos [11].

Asistencia por microondas. Es una técnica relativamente nueva, en un horno de microondas la energía se libera directamente sobre los materiales. El calor que se origina se debe a la energía electromagnética que se convierte en energía térmica. Por lo general, la temperatura que se utiliza en las reacciones por microondas oscila entre 100 a 200°C, por lo que los periodos de exposición son cortos. Generalmente, los hornos tienen incorporado algún tipo de extractor o secador, para eliminar los vapores que se generan durante la reacción. Por esta técnica se obtienen nanopartículas con distribuciones de tamaño estrechas, también la reproducibilidad es buena y los tiempos de reacción son cortos y se pueden producir a gran escala, sin embargo, se presenta la desventaja de tener rendimientos más bajos en comparación con las técnicas de coprecipitación, térmicas e hidrotérmicas [11].

Microemulsión. Este procedimiento hace uso de dispersiones líquido-líquido, los cuales

son parcialmente inmiscibles las cuales se dispersan con la ayuda de tensioactivos. Una de las principales ventajas de esta técnica es que existe la oportunidad de llevar a cabo las síntesis de nanopartículas de diversas formas cambiando la naturaleza del tensioactivo, co-tensioactivo, concentración de aceite-agua, y algunas otras condiciones de reacción. La principal ventaja que ofrece el proceso de microemulsión es el control del tamaño de las partículas, también las temperaturas de síntesis suelen ser bajas, y el proceso es fácil de escalar industrialmente. La principal desventaja que presenta este proceso es que las nanopartículas producidas por lo regular poseen baja cristalinidad y disparidades de tamaño altas debido a que la nucleación de las partículas es lenta por las bajas temperaturas utilizadas. Las microemulsiones se clasifican en dos: agua en aceite (inversa) y aceite en agua (normal). La técnica consiste en formar gotas muy pequeñas de la fase dispersa en el intervalo de 2 y 100 nm. Por esta técnica, se han sintetizado partículas de ferritas con metales pesados como manganeso y níquel. La coprecipitación por microemulsión es una técnica de producción económica para producir nanopartículas [11].

Poliol. En la técnica del polioliol el etilen glicol funciona como disolvente y agente reductor, para llevar a cabo la síntesis de nanopartículas combinadas (con varios metales pesados) como lo es $ZnNiFe_2O_4$. Mediante este método se puede llevar a cabo mezclas de nanopartículas que constan de tres constituyentes como MCl_2 (donde M puede ser Mn, Fe, Co, Ni, Cu o Zn), acetilacetato de hierro (III) usado como precursor, y trietilenglicol cuya función es trabajar como disolvente y como recubrimiento de ligando. El sistema de reacción se conforma por MFe_2O_4 , una parrilla de calentamiento con agitación magnética, así como con un sistema de reflujo. La mezcla se calienta a $280^\circ C$ y se enfría a temperatura ambiente y se separa de la solución con un imán externo. Las medidas de las ferritas obtenidas son en orden de nm, poseen buena calidad, altos valores de M_s , y propiedades polares dispersivas [11].

Electroquímico. Esta técnica es parecida a la de coprecipitación, la variación que hay es que los iones provienen de los ánodos de electrodos mediante procesos de oxidación. Cuando el ánodo del electrodo se oxida y se libera en la solución del surfactante, los iones interactúan entre las interfaces de electrodo-electrolito y de esta manera se lleva a cabo la formación de nanopartículas. Una de las principales ventajas de este método es que se obtienen partículas con gran pureza y se puede controlar el tamaño de partícula mediante el control de la corriente y de la distancia entre los dos electrodos. Aunado a estas ventajas, el método de síntesis electroquímica es fácil, ecológico y económico [11].

Molienda mecánica. Esta ruta de síntesis se auxilia ya sea de una criba vibratoria de alta energía, bolas planetarias o de molinos de tambor para la preparación de las nanopartículas. La primordial preeminencia de este método es que se pueden sintetizar toneladas de material, sin embargo, se presenta la desventaja de que las nanopartículas suelen contaminarse durante el proceso de molienda. Se han llevado a cabo la síntesis de nanopartículas de ferritas de cobre, cobalto y níquel mediante esta técnica. Esta ruta de síntesis resulta ser económica y relativamente simple [11].

Ablación laser. Mediante esta técnica se producen partículas con tamaño pequeño por medio de la irradiación de la superficie de los sólidos con un rayo láser. Hay tres etapas principales en esta técnica; en la etapa inicial el material de destino absorbe la energía del láser, después la relajación de la energía promueve la formación de olas de calor las cuales se propagan dentro del material y del líquido. En la segunda etapa, el láser se expande en la presencia de un líquido. Por último, se lleva a cabo la formación de nanopartículas. La técnica permite llevar a cabo la síntesis de una gran cantidad de nanopartículas con control de tamaño por la intensidad del rayo láser. Aunado a esto, este método es libre de agentes reductores por lo que las partículas obtenidas poseen gran pureza [11].

Síntesis de nanopartículas de ferritas con metales pesados. En 2017, *Lassoued y col.* [12] llevaron a cabo la síntesis de nanopartículas de Fe_2O_3 dopadas con cobre por medio de coprecipitación. La caracterización de las nanopartículas se llevó a cabo por medio de difracción de rayos X, microscopía electrónica de transmisión y de barrido, espectroscopia Raman, entre otras técnicas. Se pudo observar que cuando variaba la cantidad de cobre en las ferritas, la estructura de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ permanece sin cambios al aumentar la cantidad del agente dopante. También pudieron notar que los iones de cobre se encuentran sustituidos en la matriz de hematita al aumentar la concentración del cobre, por lo que el tamaño de los granos de la cristalita también. El tamaño promedio de cristalita que se obtuvo osciló entre 21 y 46 nm. Las conclusiones de este proyecto fue que se logró la síntesis de nanopartículas de hematita dopadas con cobre en distintos porcentajes. Por otro lado, se demuestra que a mayor porcentaje de cobre se obtiene menor tamaño de nanopartícula, sin embargo, se obtiene mejor cristalinidad. De este proyecto se tiene planeado hacer investigaciones para tratamiento de aguas residuales [12].

Por otro lado, *Liu y col.* [13] sintetizaron ferritas de cinc en presencia de nanotubos de carbono mediante el método hidrotérmico. Entre las propiedades que analizaron del material la estructura cristalina, morfología, composición, propiedades magnéticas y electromagnéticas, etc.

Ellos variaron la cantidad de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) en el medio de reacción (0, 30, 40, y 50 mg). La morfología y la nanoestructura de las ferritas de cinc y los compuestos con MWCNT resultaron con tamaño promedio de la ferrita de cinc de 25 nm. Se observó que cuando se agregan los MWCNTs a las ferritas de cinc la aglomeración disminuye. También se percataron de que las ferritas de cinc se aglomeran en la superficie de los MWCNT. Los autores enconaron que la magnetización remanente (M_r), coercitividad (H_c) y saturación de magnetización (M_s) aumentan al incrementar la concentración de MWCNTs en los compósitos de ferritas de cinc–MWCNT, por lo que proponen que la adición de MWCNTs afecta de forma significativa la energía anisotrópica de las nanopartículas de ferrita de cinc [13].

Stoia y col. [14] llevaron a cabo la síntesis de nanocompósitos de ferrita/sílica–níquel por medio del método sol–gel, el cual se combinó con descomposición hidrotérmica de precursores organometálicos. De esta forma se pudo obtener una dispersión homogénea de nanopartículas de ferrita en la matriz de sílica con una distribución de tamaño de partículas estrecha. Se analizó la forma en la que el PVA contribuye para la formación de los nanocristales de ferrita de níquel incrustados en una matriz de sílica [14]. Se pudo notar que el avance térmico de los geles sintetizados sin polioles es distinto al desarrollo de los geles con polioles. El resultado más significativo en estos resultados de DTA es el efecto endotérmico, el cual se pudo observar en una temperatura de 50–150°C, lo que se adjudica a la eliminación de agua y alcohol del gel y a la descomposición térmica de nitratos de hierro y níquel. Los autores prepararon de forma exitosa materiales reforzados de $NiFe_2O_4/SiO_2$ por medio del método sol–gel mediante una mezcla de nitratos de metal [14].

Existen varias rutas de síntesis para las nanopartículas de ferritas, cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas. Se han llevado a cabo algunas rutas químicas como el método sol–gel, la co–precipitación, auto combustión, descomposición térmica e hidrotérmica para llevar a cabo la síntesis de partículas de ferritas. Estos métodos resultan ser muy eficientes y convenientes ya que por medio de ellos hay un bajo consumo de insumos como energía y de reactivos. Los productos de tales métodos presentan ventajas porque tienen mejor nucleación, distribución de tamaño de partícula estrecha, control de morfología, alto rendimiento, buena estequiometría y aparte de todos estos factores se pueden sintetizar a bajas temperaturas siempre y cuando se utilice el disolvente indicado. Se ha demostrado que el incremento del tiempo en la síntesis hidrotérmica no influye en la morfología y tamaño de las partículas de ferritas de cobalto, así como también se ha demostrado

que cuando se incrementa el tiempo de reacción hidrotérmico la distribución y tamaño de partícula suele aumentar. Los tensioactivos se emplean con el fin de que se pueda controlar la estructura cristalina, la medida de la partícula y la morfología. En las reacciones hidrotérmicas se utiliza Poli vinil alcohol con el fin de dispersar las partículas y para controlar el tamaño nanométrico cuando se lleve a cabo la preparación de los materiales. Las nanopartículas tienen la posibilidad de dispersarse de forma sistemática en las cadenas poliméricas de PVA [15].

Por otro lado, las ferritas o partículas magnéticas se pueden incorporar en diferentes matrices ya sea polimérica, sílice o carbón, estos materiales compuestos o híbridos se utilizan para almacenamiento de información, permeabilidad, aparatos electrónicos y en interferencias electromagnéticas [16]. Por ejemplo, existen polímeros conductores que contienen nitrógeno o azufre, los cuales también resultan eficientes para adsorber iones de metales pesados, los cuales se pueden combinar con las ferritas para obtener un nanocompuesto con aplicación para el tratamiento de aguas residuales [17]. Cuando se añaden nanopartículas magnéticas en una matriz polimérica se cambian las propiedades físicas y mecánicas de ambos materiales, el desafío a vencer cuando se formula o sintetiza un material compuesto es la adecuada dispersión de las nanopartículas ya que estas tienden a agregarse y por ende las propiedades del compuesto no son uniformes, muchas veces en vez de mejorarlas se empeoran [18].

Síntesis de nanopartículas híbridas de ferrita/polímero. *Heidari y col.* [19] llevaron a cabo la síntesis de nanocompuestos de poliestireno (PS) con diferentes nanopartículas, PS/Fe₃O₄, PS/ZnO y PS/óxido de grafeno. Los nanocompuestos los prepararon de tal modo que cada tipo de nanopartícula se mezcló y homogenizó con tolueno, a la par el poliestireno se disolvió en tolueno al 20% y mezclaron ambas soluciones. Determinaron las propiedades de absorción de onda electromagnética de los nanocompuestos de Fe₃O₄. Se pudo observar que el incremento en la absorción y la pérdida de reflexión se debe a que se mejoró la dispersión de las nanopartículas cuando se aumentó la velocidad del homogeneizador incorporado en la dispersión de las nanopartículas [19]. Los autores llegaron a la conclusión de que los nanomateriales reforzados de óxido de grafeno muestran una intensidad de absorción más alta a diferencia de las muestras de los otros nanocompuestos. Esto se puede deber a que el óxido de grafeno tiene buenas propiedades de pérdida de reflexión, otra razón puede ser las diferentes estructuras de las superficies [19].

Hong y col. [20] prepararon y caracterizaron nanocompuestos de poliestireno/Fe₃O₄ mediante polimerización en emulsión inversa. En su trabajo utilizaron queroseno como fase

continua, en la cual dispersaron el estireno. Después dispersaron con ayuda de ultrasonido el ferrofluidos (Fe_3O_4) en la fase dispersa. La reacción se llevó a cabo en presencia de N_2 , utilizaron peroxosulfato de potasio, una vez finalizada la reacción las partículas Cuando la reacción se llevó a cabo por completo, las partículas las aislaron con ayuda de un imán. Las ferritas las caracterizaron mediante difracción de rayos X. Se pudo concluir que las microesferas magnéticas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$ se prepararon de manera exitosa por medio del método de polimerización en emulsión inversa con un fluido ferromagnético a base de agua como fase dispersa y un disolvente orgánico y estireno como fase continúa. Estos experimentos revelan la existencia de microesferas magnéticas poliméricas las cuales poseen altos niveles de magnetita. Las esferas resultantes tienen buenas propiedades superparamagnéticas, lo cual favorece a bioaplicaciones [20].

CONCLUSIONES

En la presente revisión bibliográfica se llevó a cabo la investigación de los diversos métodos de síntesis para obtener nanopartículas de ferritas, así como también la forma en la que se pueden producir materiales híbridos de nanopartículas de ferritas/polímero. Todos los métodos aquí mencionados presentan ventajas y desventajas. El método de coprecipitación posee la ventaja de ser amigable con el medio ambiente y la desventaja de que requiere de un estricto control del pH. Por su parte el método hidrotérmico tiene la preminencia de que se pueden controlar la medida y la distribución de las partículas obtenidas, sin embargo, sus obstáculos son que se necesita de un preciso control de la presión, temperatura y del tiempo de reacción. Los atributos del método sol gel es que las reacciones son económicas, se pueden obtener nanopartículas con morfología controlada y el método es fácil de controlar, este método posee la mengua de hacer uso de alcóxidos de metal. Por otro lado, el método de descomposición térmica ofrece el beneficio de que se obtienen partículas con formas y medidas controladas, pero utiliza disolventes. Desde otro ángulo, el método solvotérmico tiene la capacidad de hacer un buen control de la distribución de medida y forma de las fases cristalinas de las partículas, lamentablemente esta técnica hace uso de disolventes y tensioactivos. Por su lado las virtudes del sistema sonoquímico es que hay un buen control de la distribución del tamaño de partícula, sin embargo, se lleva a cabo un uso considerable de energía. El método de microondas ofrece las ventajas de obtener buenos tamaños de partícula y es un método económico, se presentan las desventajas de tener bajos rendimientos de reacción. Desde otro punto de vista, el método de microemulsión tiene los atributos de que se puede llevar a cabo la síntesis de las nanopartículas de distintas maneras, se puede controlar el tamaño de la medida de la partícula y

se utiliza baja temperatura, aunque se obtienen partículas con baja cristalinidad y con mayor polidispersidad. En el método del poliol podemos encontrar las preminencias de que se obtienen ferritas de buena calidad, pero se utilizan disolventes. Por contraste con el método electroquímico posee las virtudes de poder obtener partículas muy puras, es un método fácil de llevar a cabo, económico y ecológico y se puede controlar la medida de la partícula, a pesar de ello se requiere de un estricto control de la densidad de corriente, pH, concentración del electrolito, así como la distancia de los electrodos. Desde otra perspectiva, la molienda mecánica tiene la gran ventaja de que se puede sintetizar material a granel, empero las partículas sufren de contaminación. Por último, el método de ablación láser adquiere las ventajas de que se obtiene una buena variedad de partículas con medida controlada, la ruta de síntesis es libre de agentes reductores y las partículas finales son de gran pureza. Su desventaja es que se obtienen partículas de medida pequeña. En otro orden de cosas, se puede notar en la revisión del estado del arte que cuando las ferritas de metales pesados se incorporan a una matriz polimérica se mejoran notablemente sus propiedades como lo son adsorción de contaminantes de metales pesados, lo cual es una gran ventaja para los procesos de remediación de aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Zhang, Liu H “A novel approach to preparing polystyrene/Fe₃O₄ multihollow microspheres with porous walls,” *Colloid Polym. Sci.*, **294**(11), 1755 (2016)
- [2] Chen JH, Cheng CY, Chiu WY, Lee CF, Liang NY “Synthesis of ZnO/polystyrene composites particles by Pickering emulsion polymerization”, *Eur. Polym. J.*, **44**(10), 3271 (2008)
- [3] Kharisov BI, Dias HVR, Kharissova OV “Mini–review: Ferrite nanoparticles in the catalysis,” *Arab. J. Chem.*, 2014
- [4] “Highly porous copper ferrite foam: A promising adsorbent for efficient removal of As(III) and As(V) from water,” *J. Hazard. Mater.*, **347**,15 (2018)
- [5] Qin M, Shuai Q, Wu G, Zheng B, Wang Z, Wu H “Zinc ferrite composite material with controllable morphology and its applications,” *Mater. Sci. Eng. B Solid–State Mater. Adv. Technol.*, **224** (May), 125 (2017)
- [6] Babu KV, Kumar GVS, Jalaiah K, Shibeshi PT “Effects of copper substitution on the microstructural, electrical and magnetic properties of Ni_{0.7}Co_{0.3}–xCu_xFe₂O₄ferrites”, *J. Phys. Chem. Solids*, **118** (October), 172 (2018)
- [7] Muthukumar K, Lakshmi DS, Acharya SD, Natarajan S, Mukherjee A, Bajaj HC “Solvothermal synthesis of magnetic copper ferrite nano sheet and its antimicrobial studies,” *Mater. Chem. Phys.*, **209**, 172 (2018)
- [8] Tudorache F “Investigations on microstructure, electrical and magnetic properties of copper spinel ferrite with WO₃addition for applications in the humidity sensors”, *Superlattices Microstruct.*, **116**, 131 (2018)
- [9] Gu W, Li X, Xing M, Fang W, Wu D “Removal of phosphate from water by amine–functionalized copper ferrite chelated with La(III)”, *Sci. Total Environ.*, (**619–620**), 42 (2018)
- [10] Abu–Dief AM, Abdel–Fatah SM “Development and functionalization of magnetic nanoparticles as powerful and green catalysts for organic synthesis”, *Beni–Suef University J. Basic & Appl. Sci.*, 2017
- [11] Kefeni KK, Msagati TAM, Mamba BB “Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device”, *Mater. Sci. Eng. B Solid–State Mater. Adv. Technol.*, **215**, 37 (2017)
- [12] A. Lassoued, M. Saber, B. Dkhil, and A. Gadri, “Structural , optical and morphological characterization of Cu–doped a – Fe₂O₃ nanoparticles synthesized through co–precipitation technique,” *J. Mol. Struct.*, **1148**, 276 (2017)

- [13] Liu Z, Xing H, Liu Y, Wang H, Jia H, Ji X “Hydrothermally synthesized Zn ferrite/multi-walled carbon nanotubes composite with enhanced electromagnetic-wave absorption performance”, *J. Alloys Compd.*, **731**, 745 (2018)
- [14] Stoia M, Barvinschi P, Barbu-Tudoran L, Bunoiu M “Influence of polyols on the formation of nanocrystalline nickel ferrite inside silica matrices,” *J. Cryst. Growth*, **457**, 294 (2017)
- [15] Jalalian MM, Alamolhoda S, “The effect of poly vinyl alcohol (PVA) surfactant on phase formation and magnetic properties of hydrothermally synthesized CoFe_2O_4 nanoparticles,” *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **419**, 363 (2016)
- [16] Stoia M, Păcurariu C, Mihali C, Mălăescu I, Marin CN, Căpraru A “Manganese ferrite-polyaniline hybrid materials: Electrical and magnetic properties,” *Ceram. Int.*, **45**, (2018)
- [17] Wang W, Cai K, Wu X, Shao X, Yang X “A novel poly(m-phenylenediamine)/reduced graphene oxide/nickel ferrite magnetic adsorbent with excellent removal ability of dyes and Cr(VI)”, *J. Alloys Compd.*, **722**, 532 (2017)
- [18] Vivar Mora L, Taylor A, Paul S, Dawson R, Wang C, Taleb W, Owen J, Neville A, Barker R “Impact of silica nanoparticles on the morphology and mechanical properties of sol-gel derived coatings,” *Surface and Coatings Technology*, **342** (2018)
- [19] Heidari B, Ansari M, Hoseinabadi A, Jiriae H, Heidary F “The effect of ZnO, Fe_3O_4 and graphene oxide nanostructures on the microwave absorbing properties of polystyrene composites”, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **28(1)**, 1028 (2017)
- [20] Hong RY, Feng B, Liu G, Wang S, Li HZ, Ding JM, Zheng Y, Wei DG “Preparation and characterization of Fe_3O_4 /polystyrene composite particles via inverse emulsion polymerization”, *J. Alloys Compd.*, **476(1-2)**, 612 (2009)