

CARACTERIZACION DE MAGNETITA OBTENIDA POR REDUCCION DE HEMATITA UTILIZANDO LA TECNICA DE ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

CHARACTERIZATION OF MAGNETITE OBTAINED BY HEMATITE REDUCTION USING THE MÖSSBAUER SPECTROSCOPY TECHNIQUE

Humberto Alejandro López Medina

INCITEMA – Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Boyacá, Colombia.
Humberto.lopez@uptc.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se realiza la caracterización por Espectroscopia Mössbauer de magnetita (Fe_3O_4) obtenida en un proceso de reducción de hematita (Fe_2O_3). Se busca observar el proceso con manejo de temperatura y atmósfera controlada, la evolución de fase a una temperatura dada, como una función del tiempo de tratamiento térmico. El seguimiento del proceso se hace teniendo en cuenta el cambio de estructura cristalina mediante el uso de la **espectroscopia de Mössbauer**. El efecto Mössbauer es la emisión y absorción resonante de fotones gama sin pérdida de energía por retroceso, puesto que la fuente y el absorbente están embebidos en una malla sólida. La Espectroscopia de Mössbauer EM es eficiente a la hora de estudiar propiedades magnéticas, eléctricas y estructurales de cierto tipo de materiales que contengan una proporción de hierro. Para que se origine el efecto Mössbauer es necesario tener en cuenta que, este puede ser producido siempre y cuando se conozca la instrumentación con la cual se lleva a cabo el desarrollo del efecto, análisis por difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (FRX), utilizando también el microscopio electrónico de barrido (MEB). El mineral a trabajar Hematita obtenido directamente de la mena, es sometido a molienda mecánica para luego ser tratado térmicamente en el horno linder, haciendo seguimiento de los cambios producidos en la transformación que presenta este mineral al reducirse a magnetita por efecto de la variación de la temperatura y la inyección de CO.

Palabras clave: Espectroscopia Mössbauer, caracterización, reducción.

ABSTRACT

In this work, the characterization is done by Mössbauer spectroscopy of magnetite (Fe_3O_4) obtained in a hematite reduction process (Fe_2O_3) is performed. With the handling of temperature and a controlled atmosphere, the phase evolution at a given temperature, as a function of time of the heat treatment. The process monitoring is carried out taking into account the change in crystalline structure through the use of **Mössbauer spectroscopy**. The Mössbauer effect is the resonant emission and absorption of gamma photons without loss of energy due to recoil, since the source and the absorber are embedded in a solid mesh. The Mössbauer EM Spectroscopy is efficient in studying magnetic, electrical and structural properties of certain types of materials containing a proportion of iron. In order to give rise to the Mössbauer effect it is necessary to take into account that it can be produced as long as the instrumentation with which the effect development is carried out is known, X-ray diffraction analysis (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and also using scanning electron microscopy (SEM). Hematite, the mineral to be worked on extracted directly from the ore, is subjected to mechanical milling and then heat-treated in the linder furnace, monitoring the changes produced in the transformation that this

mineral presents when being reduced to magnetite by effect of the variation of the temperature and the injection of CO.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, characterization, reduction.

INCITEMA-UPTC (Tunja-Boyacá-Colombia). humberto.lopez@uptc.edu.co

1. INTRODUCCION

El uso de la técnica de Espectroscopia de Mössbauer para monitorear la magnetita obtenida en el proceso de reducción, es de gran importancia puesto que arroja resultados confiables que garantizan que el proceso es el más eficiente en el momento de hacer un análisis de este tipo de materiales. La caracterización de la magnetita usando esta técnica de EM nace de la necesidad de hacer análisis de fases de los diferentes óxidos de hierro y especialmente de la magnetita obtenida en este proceso de reducción. El material llamado “Magnetita” cuyo uso es amplio como se explica a continuación. La magnetita (Fe_3O_4) en forma de nano partícula ha encontrado diversas aplicaciones en el campo de la biomedicina: en fenómenos como la hipertermia y el transporte selectivo de fármacos, ambos de prometedor futuro en la terapia del cáncer, en el mejoramiento por contraste de las imágenes por resonancia magnética. En la industria para fabricación de: imanes, piedras para pulir entre otros. Teniendo en cuenta que el uso del mineral hematita es muy limitado actualmente en la medicina y la industria, utilizando el mineral hematita como material precursor para dar un valor agregado al reducirlo a magnetita. Siendo la magnetita un material muy importante debido a sus propiedades físicas y químicas únicas.

Los yacimientos de mineral de hierro encontrados en Boyacá-Colombia son principalmente el óxido de hierro llamado hematita (Fe_2O_3). El mineral a trabajar es obtenido directamente de la mena, se somete a molienda mecánica para luego ser tratado térmicamente en el horno reactor “linder”, haciendo seguimiento de los cambios producidos en la transformación que presenta este mineral al reducirse a magnetita por efecto de la variación de la temperatura y la inyección de CO. La magnetita obtenida a partir de la reducción de la hematita procesada en el horno Linder a temperatura y atmosfera controlada, se caracteriza por medio de la técnica de **Espectroscopia Mössbauer**. Es importante el uso de la Microscopia Mössbauer EM para el desarrollo del proyecto, técnica especializada en el estudio de: análisis de fases, propiedades magnéticas, eléctricas y estructurales de materiales que contengan una buena proporción de hierro. Se han hecho estudios referentes a esta reducción como: Análisis de modificación de la estructura cristalina, comportamiento magnético entre otros, que conllevan a resultados exitosos que sirven como base para el desarrollo del presente proyecto.

Al hablar de reducción de óxidos de hierro es importante tener claro los procesos que suceden. Por tanto necesario tocar el tema sobre la cinética y la termodinámica de los procesos de reducción de estos óxidos.

2. ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER DE TRANSMISION ^{57}Fe .

El efecto Mössbauer es la emisión y absorción resonante de fotones gama sin pérdida de energía por retroceso, puesto que la fuente y el absorbente están embebidos en una malla sólida, la emisión y absorción resonante presenta un proceso cero fonón. Esta técnica fue desarrollada por Rudolf Mössbauer (Premio Nobel en 1961). La EM es eficiente a la hora de estudiar propiedades magnéticas, eléctricas y estructurales de cierto tipo de materiales que contengan una proporción de hierro. Para que se origine el efecto Mössbauer es necesario tener en cuenta que, este puede ser producido siempre y cuando se conozca la instrumentación con la cual se lleva a cabo el desarrollo del efecto.

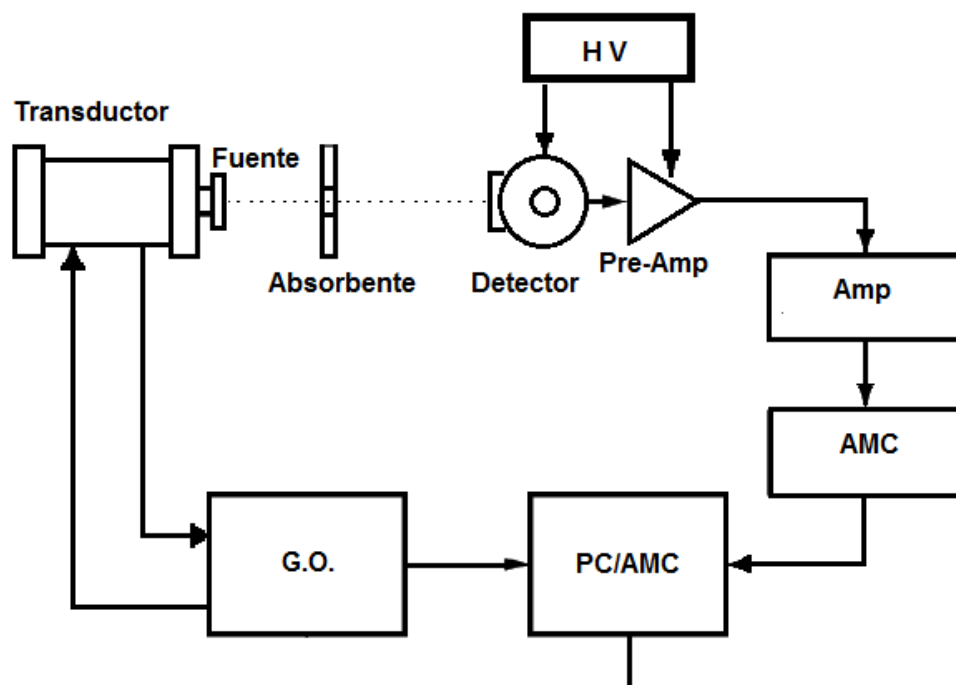


Figura 1. Diagrama de Flujo de un espectrómetro Mössbauer de Transmisión ^{57}Fe , que consta de: un Generador de onda (G.O), Fuente, Absorbente, Detector, Preamplificador (Pre-Amp), Amplificador (Amp), Analizador Mono-Canal (AMC), Analizador Multi-Canal (AMC) y sistema de almacenamiento de datos (PC)

El modo más común de operar un espectrómetro Mössbauer es por transmisión Figura 1, en el cual, los fotones emitidos por una fuente de ^{57}Co , son absorbidos por una muestra muy fina. Los fotones no absorbidos se transmiten y son detectados por medio de un detector (Contador proporcional). La señal producida en el detector es amplificada con un dispositivo de pre-amplificación y amplificación luego es convertida por medio de un analizador de pulsos a cuentas de absorción por canal en un sistema de cómputo.

Al hablar de reducción de óxidos de hierro es importante tener claro los procesos que suceden. Por tanto necesario tocar el tema sobre la cinética y la termodinámica de los procesos de reducción de estos óxidos.

2.1. TERMODINÁMICA

La termodinámica de reducción de óxidos de hierro se relaciona con el equilibrio entre sus óxidos y los agentes reductores, nos dirá si una reacción toma lugar o no, aunque no nos indica la rapidez con la que se llevará a cabo la reacción, esto depende de las condiciones que gobiernen la cinética del proceso.

La reducción de óxidos de hierro por monóxido de carbono empieza con el óxido férrico, el óxido más estable. [J. O. Edtrom 1953]-[H U. Ross 2009] llevándose a cabo el proceso de reducción a través de tres fases a temperaturas mayores de 570°C , de acuerdo al diagrama Fe-O. **$\text{Fe}_{203} \bullet \text{Fe}_{304} \bullet \text{FeO} \bullet \text{Fe}$**

las tres reacciones que se obtienen son:



El equilibrio entre FeO, Fe₂₀₃, Fe₃₀₄ respectivamente con CO-CO₂ ocurrirá a la temperatura donde las curvas en el diagrama de Ellingham. [Terkel 1988].

Así, tenemos que Fe se reducirá a FeO a una temperatura superior a los 560°C y FeO a Fe sobre 700°C , mientras que la Fe₂₀₃ teóricamente se puede reducir a temperaturas mucho menores de 500°C .

Así, vemos que la reducción de óxidos de metal relativamente nobles con CO es exotérmica, mientras que la reducción de óxidos de metal menos nobles es endotérmica, y que la reacción entre C y CO₂ es fuertemente endotérmica. Sin embargo, la reducción de prácticamente todos los óxidos de metal es endotérmica y la entalpía de reducción aumenta linealmente con la estabilidad del óxido.

2.2. CINÉTICA

Se sabe que la rapidez de una reacción puede afectarse por diversas variables [Octave L. 1974]-[W. Baukloh 1984]. En los sistemas heterogéneos como lo es el caso de reducción, los factores más importantes son: temperatura, composición de la atmósfera y de los reactivos así como la transmisión de calor. La influencia de la temperatura puede ser evaluada siguiendo la teoría de colisión descrita por Arrhenius, el efecto de la concentración puede ser descrito mejor por el orden de reacción química. Podemos decir que a temperaturas mayores de 900°C, la reacción de reducción de óxidos de Fe, seguirá de acuerdo a:



donde la reacción de Boudouard (8) juega un papel importante.

Ahora bien, la rapidez de gasificación del carbono por dióxido de carbono dependerá de la reactividad del carbono, de la temperatura y de la disponibilidad de calor para mantener la reacción a la temperatura de reacción.

Se ha encontrado que a temperaturas por arriba de los 900°C la conversión de carbón a CO se lleva prácticamente al equilibrio, por lo tanto, la rapidez de gasificación del carbono no controla la rapidez de reducción. En la actualidad la magnetita obtenida en procesos de reducción es tratada y posteriormente purificada.

Generalmente se considera inerte en medios biológicos, lo que hace apropiado su uso en métodos de imagen y separación en tejidos vivos. [Noval Lara 2017]-[Reddy, L 2012]. En este sentido, en el campo de la medicina y la biotecnología, las nanopartículas de magnetita son útiles en la detección de la hipertermia y en el transporte selectivo y liberación de fármacos, fenómenos con futuras aplicaciones en terapias contra el cáncer [Yang, C. 2011], En el mejoramiento y contraste de las imágenes por resonancia magnética para efectos de diagnóstico médico [Hu, F.;Mac 2009], en la caracterización de fluidos magnéticos inteligentes, en la reparación de tejidos y en la separación celular.

En general, diversos óxidos nanoestructurados basados en magnetita son buenos dispositivos para la manufactura de materiales magnéticos, películas de protección sensibles y pigmentos, así como para el tratamiento y eliminación de residuos y agentes contaminantes del agua [Costa, A].

A nivel nacional e internacional se han llevado a cabo estudios y proyectos relacionados con el proceso de reducción de hematita a magnetita por vía piro metalúrgica. Entre otros el uso de la microscopía de Mössbauer, difracción de rayos x, MEB, se han trabajado en el proceso de reducción independientemente. [J.P. Gaviria 2007].

La reducción de hematite / magnetita como una de las etapas de reducción de óxidos de hierro refleja los cambios morfológicos muy importantes debido a la reconstrucción red cristalina. La estructura cristalina de la hematita es hexagonal compacta mientras que para la magnetita es una estructura vertebral inversa. Químicamente la magnetita es soluble en ácidos e insoluble en H₂O mientras que el cristal único de magnetita es estable ya que no es destruida por los procesos de reducción de re-oxidación repetidas. La morfología de magnetita durante la reducción de hematita con mezclas de gas CO₂-CO a diferentes temperaturas se ha estudiado en muchas investigaciones [M. Bahgat 2007].

Se encontró que a temperaturas más altas (más de 800 ° C) la magnetita se observó en placas laminares o estructura de espaciado aproximadamente igual. A temperaturas más bajas (hasta 800 ° C), se forma la

magnetita porosa y la reducción tiene lugar en una interfaz de encogimiento de núcleo mientras que los núcleos crecen a tasas similares en todas las direcciones que cubren la superficie del grano. El gas penetra a través de la reducción de los límites de grano, planos de exfoliación y las dislocaciones. Así, las colonias de magnetita se pueden observar también en los límites de los granos de hematita que contienen una densa red de túneles. Estos túneles se extienden desde la interfaz a la superficie exterior, mejora de las reacciones de gases de contacto. También en temperaturas mucho más bajas (350 ° C) la fase de nucleación de magnetita se observó cómo forma distorsionada de casquete esférico y viene en una forma heterogénea, especialmente en los bordes o escalones en la superficie. [J. P. Gaviria 2007].

3. Materiales y procedimiento

3.1. Materiales

El equipo es el espectrómetro Mössbauer de Transmisión ^{57}Fe , utilizado para el análisis de la magnetita.

Como materia prima para la producción de la magnetita Fe_3O_4 se usa se usa el mineral hematita Fe_2O_3 . Muestra de Mineral de hierro N 28 f de la mina quebrada honda. Este mineral es llevado a 3/4 de pulgada para posteriormente ser tratado en el horno reactor Linder. Equipos de DRX, FRX, MEB son utilizadas para caracterizar las diferentes muestras procesadas en el horno.

La caracterización inicial de la hematita se realiza por medio de DRX. Arrojando los resultados mostrados en las Figuras 2 y 3.

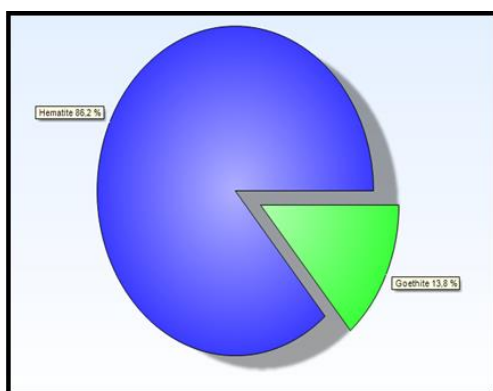


Figura 2: Composición porcentual

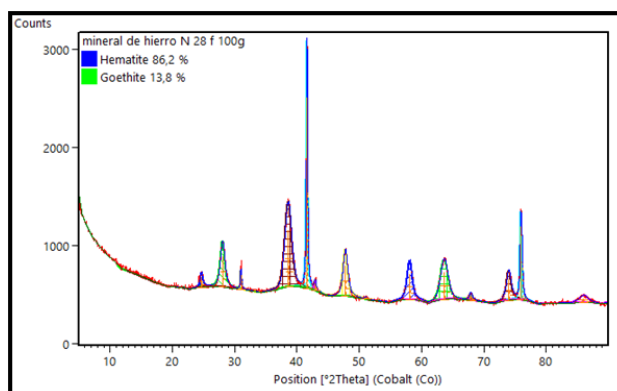


Figura 3: Especies presentes en la muestra analizada

3.2. Procedimiento

Se toma una muestra de 200 mg de magnetita con un tamaño de malla 300 muy fina, la cual es llevada al espectrómetro el cual utiliza una fuente radiactiva de ^{57}Co . La magnetita es sometida a radiación por medio de fotones de rayos gamma, utilizando una velocidad en el oscilador inmerso dentro del transductor de 2mm/seg. Previo a lo anterior se ha caracterizado el mineral por DRX para analizar las propiedades físicas, químicas, estructurales, etc. iniciales de la hematita a trabajar durante el proceso. La magnetita obtenida es el resultado de la reducción de mineral hematita el cual ha sido sometido a temperaturas de 800°C y 900°C respectivamente. El seguimiento del proceso se hace utilizando la técnica de espectroscopia Mössbauer (EM), apoyados en DRX, FRX y MEB. El propósito del proyecto es caracterizar la magnetita obtenida usando el Espectrómetro de Mössbauer, técnica especializada en el estudio de propiedades magnéticas, eléctricas y estructurales de materiales que contengan una buena proporción de hierro. El efecto Mössbauer es la emisión y absorción resonante de fotones gama sin pérdida de energía por retroceso, puesto que la fuente y el absorbente están embebidos en una malla sólida, la emisión y absorción resonante presenta un proceso cero fonón. Para que se origine el efecto Mössbauer es necesario tener en cuenta que, este puede ser producido siempre y cuando se conozca la instrumentación con la cual se lleva a cabo el desarrollo del efecto. El espectrómetro contiene una fuente radiactiva de ^{57}Co que emite radiación gamma de una energía característica. Por ello, es de gran importancia conocer las particularidades fundamentales de la fuente emisora. El núcleo Mössbauer más

utilizado es el ^{57}Fe , su isótopo padre es ^{57}Co , que tiene una vida media de 271.7 días y se desintegra principalmente al nivel excitado de 136.3 keV de ^{57}Fe , después de la captura de un electrón.

4. resultados y análisis de resultados

4.1. Resultados muestra a 800°C

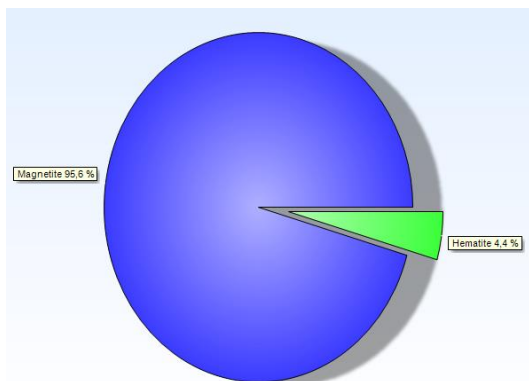


Figura 4. Diagrama de resultados de la composición porcentual.

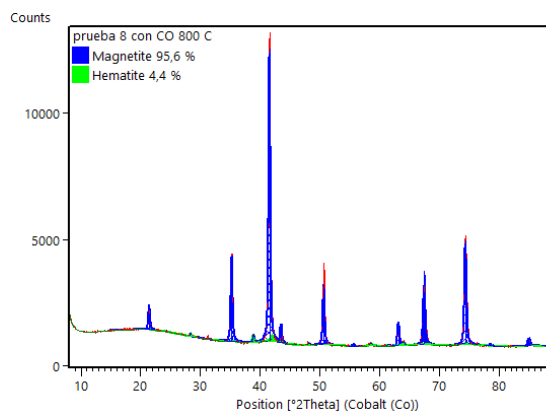


Figura 5. Especies presentes en la muestra analizada

4.1.1. Análisis de resultados muestra a 800°C. Figuras 4 y 5.

En una de las muestras trabajadas a 800°C resultó ser eficiente en términos de cantidades de magnetita obtenida, ya que la muestra revela la presencia de un alto porcentaje (95%) de magnetita mostrando una temperatura adecuada para las muestras analizadas, las razones de este resultado pueden variar dependiendo tanto de la temperatura, residuos de magnetita pertenecientes a procesos anteriores o un control más adecuado de las rampas y estancia de temperatura y su atmósfera reductora.

4.2. Resultados muestra a 900°C

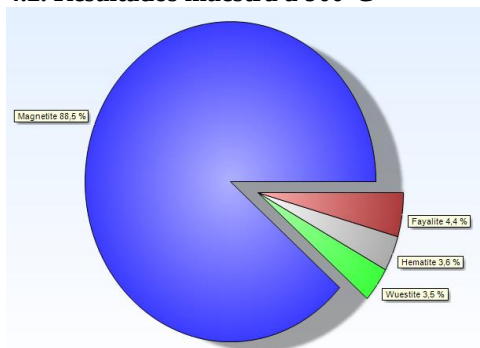


Figura 6. Diagrama de resultados de la composición porcentual.

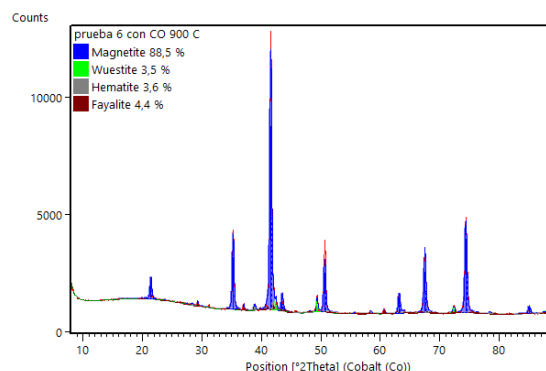


Figura 7. Especies presentes en la muestra analizada

4.2.1. Análisis de resultados muestra a 900°C. Figuras 6 y 7.

La muestra a 900°C reveló tener una gran cantidad de óxidos de hierro tipo magnetita como componente principal evidencia de que el material sometido a reducción consiguió una buena eficiencia en sus procesos; A pesar de que son pequeñas existe evidencia de otros materiales presentes en la muestra, donde se tiene que

resaltan la presencia de silicatos ricos en hierro posiblemente debido a impurezas relacionadas como óxidos de silicio tipo cuarzo que reaccionaron con parte del material ferroso presente en la muestra.

4.3. Resultados muestras analizadas por Espectroscopia Mössbauer a 800°C.

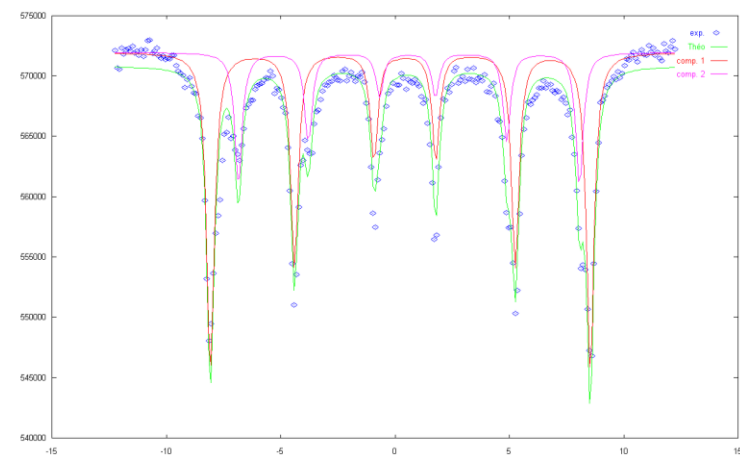


Figura 8. Espectro de la magnetita obtenida a 800°C en Mössbauer. (Grafica: Ctas por seg Vs Vel de desplazamiento fuente mm/s).

4.3.1. Análisis de resultados Espectroscopia Mössbauer a 800°C

Se produce un campo magnético hiperfino. El desdoblamiento magnético es la manifestación de la interacción magnética entre el momento magnético del núcleo y un campo magnético de origen extrínseco o intrínseco (ferromagnetismo, ferrimagnetismo o antiferromagnetismo) al átomo. En este caso se desdoblan tanto el estado fundamental como el excitado, resultando en general un espectro con seis mínimos de transmisión (sextete) Figura 8. Esta es la forma del conocido espectro de una lámina de hierro natural que se utiliza como calibración de los espectrómetros.

4.4. Resultados muestras analizadas por Espectroscopia Mössbauer a 900°C.

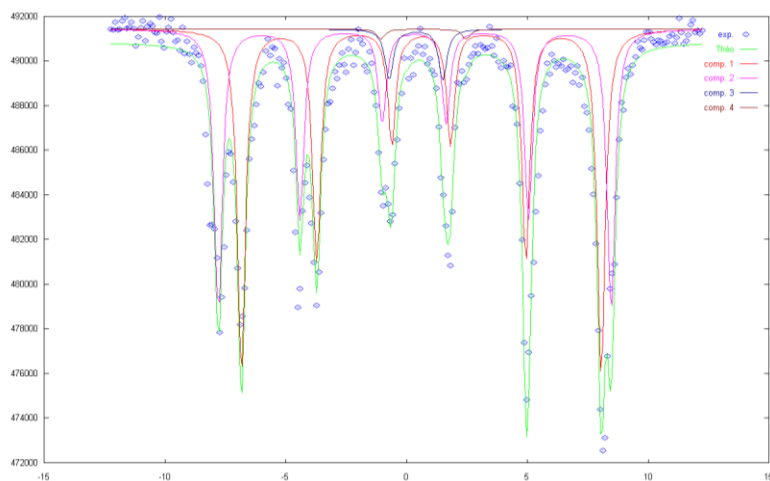


Figura 9. Espectro de la magnetita obtenida a 900°C en Mössbauer. (Gráfica: Ctas por seg Vs Vel de desplazamiento fuente mm/s).

4.4.1. Análisis de resultados Espectroscopia Mössbauer a 900°C

Se observa que con el cambio de temperatura el porcentaje de hierro obtenido es mucho mayor. Lo cual indica la eficiencia en el proceso.

Esto se ve reflejado en el espectro de Mössbauer figura 9. La muestra de magnetita obtenida a 900°C indica que los fotones emitidos por la fuente de ^{57}Co fueron absorbidos por la muestra muy fina analizada.

5. CONCLUSIONES

La magnetita analizada por medio de Espectroscopia de Mössbauer, arroja resultados en los cuales se observa que el material de muy buena calidad. Y que el uso de la técnica de caracterización de Mössbauer es eficiente. Se ve en la formación de sextetes simétricos perfectos. Debido al campo magnético hiperfino formado.

Los resultados observando los diagramas emitidos por el espectrómetro de Mössbauer, dejan ver que la emisión-absorción de los fotones de rayos gamma son bastante altos debido a la cantidad de cuentas por canal absorbidos en la muestra con un gran porcentaje de hierro.

El análisis realizado a la muestra por DRX reveló tener una gran cantidad de óxidos de hierro tipo magnetita como componente principal evidencia de que el material sometido a reducción consiguió una buena eficiencia en sus procesos; a pesar de que son pequeñas existe evidencia de otros materiales presentes en la muestra donde se tiene que resaltan la presencia de silicatos ricos en hierro posiblemente debido a impurezas relacionadas como óxidos de silicio tipo cuarzo que reaccionaron con parte del material ferroso presente en la muestra.

El uso de la técnica de espectroscopia de Mössbauer para análisis de resultados, observando los diagramas obtenidos muestra la eficiencia del proceso, puesto que indica que el elemento encontrado en mayor porcentaje es el Fe. Se observa en el pico más alto del diagrama. Indicando la calidad del material trabajado.

El uso de las diferentes técnicas de análisis: Difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), Microscopia electrónica de barrido (MEB) y Espectroscopia Mössbauer (EM); garantiza los resultados y su respectivo análisis para emitir un concepto de eficiencia y eficacia en el proceso.

AGRADECIMIENTOS

Como autor, agradezco inmensamente a todos los integrantes de INCITEMA, Escuela de Metalurgia y Laboratorios de Metalurgia de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia de Tunja.

REFERENCIAS

1. G. L. Taylor, A. P. Ruotsala, Analysis of iron in layer silicates by Mössbauer spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 16, pp. 381-391.1968.
2. K. J. D. Mackenzie, Mössbauer study of the role of iron impurities in the high temperature reactions of kaolinite minerals. *Clay Minerals* Vol. 8, pp. 51.1969.
3. Simopoulos, A. Kostikas, I. Sigalas, Mössbauer study of transformations induced in clay by firing. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 23, pp. 393- 399.1975.
4. R. Chevalier, J. M. D. Coey, R. Bouchez. A study of iron in fired clay : Mössbauer effect and magnetic measurements. *Journal de Physique Colloque C6, supplement au No 12, Vol 37*, pp. C6-861.1976.
5. S. Sanyal, J. Mukerji. Mössbauer study of the effect of iron on the synthesis of sialon from clay. *Journal of Materials Science Letters* Vol. 5, pp. 787-788, 1986.
6. K. J. D. Mackenzie, C. M. Cardile. A ^{57}Fe Mössbauer study of black coring phenomena in clay-based ceramic materials. *Journal of Materials Science* Vol. 25, pp. 2937-2942, 1990.
7. C. Breen, K. C. Molloy, K. Quill. Mössbauer spectroscopic and thermogravimetric studies of tin-clay complexes. *Clay Minerals* Vol. 27, pp. 445-455, 1992.
8. S. Ram, K. R. Patel, S. K. Sharma, R. P. Tripathi, Distribution of Fe^{2+} in clay minerals in subsurface sediments of the Jaisalmer basin (India) using Mössbauer spectroscopy. *Elsevier Science Ltd. Vol. 76, No. 14/15*, pp. 1369-1375, 1997.
9. E. Murad. *Clays and clay minerals: What can Mössbauer spectroscopy do to help understand them?* Vol. 117, pp. 39–70, 1998.
10. S. Calogero, M. Bertelle, F. Antonelli, L. Lazzrini. A Mössbauer study of some coloured marbles (cipollino mandolato, rosso antico and fior di pesco): implications on the nature of their colour. *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 1, pp. 429–444, 2000.

11. Costa, A.; Ballarin, B.; Spegni, A.; Casoli, F.; Gardini, D. Synthesis of nanostructured magnetic Photocatalyst by colloidal approach and spray drying technique. *J. colloid interface Sci.* 2012 388, 31-39.
12. H U. Ross."Direct reduced iron Technology and economics of production and use AIME, 2009 p. 9-81.
13. Hu, F.;Mac, Renaris, K. W.; Waters, E. A.;Liang, T.; Shultz-Sigma, E. A.; Eckemann, A. L.et al. Ultrasmall water-soluble magnetite. Nanoparticles with high relaxivity for magnetic resonance imaging. *J. Phis. Chem. C.* 2009, 113, 20855-20860.
14. J. O. Edtrom."The mechanism of reduction of Iron oxides" *The Journal of the Iron and Steel Institute*, November 1953, Vol. 175, p. 289-304.
15. J.P. Gaviria, A. Bohé, A. Pasquevich, D.M. Pasquevich. Hemetite to Magnetite reduction monitored by Mossbauer spectroscopy and X-ray diffraction. *Phisica B: Condensed matter* Volume 389, Issue 1, 1 February 2007, Pages 198-201.
16. M. Bahgat. Magnetite Surface morphology during hematite reduction with CO/CO₂ at 1073° K. *Materials letters.* Volume 61, Issue 2, January 2007, Pages 339-342.
17. Noval Lara, Virginia E.; Ochoa Puentes, Cristian; Carriazo Baños, José G. Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples Aplicaciones en catálisis heterogénea.Revista Colombiana de Química, vol. 46, núm. 1, enero-abril, 2017, pp. 42-59 Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
18. Octave Levenspiel. "Ingeniería de las reacciones químicas" Editorial Reverté, 1974.
19. O. Kubaschewski, C. B. Alcock."Metallurgical Thermochemistry" 5th Edition, Pergamon Press, 1983.
20. Reddy, L. H.; Arias, J. L.; Nicolas, J.; Couvreur, P. Magnetic Nanoparticles: Design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications. *Chem. Rev* 2012, 112, 5818-5878.
21. Terkel Rosenqvist."Principles of extractive metallurgy" Second Edition, Mc. Graw Hill, 1988.
22. W. Baukloh and R. Durrer. "On the reduction mechanism of Iron oxides" *Stahl und Eisen*, Vol. 54, p. 673-676, 1934.
23. Yang, C.; Wub, J.; Hou, Y. Fe₃O₄ Nanostructures: Synthesis growth mechanism properties and applications. *Chem. Commun.* 2011, 47, 5130-5140.