

REACTOR A BASE DE YESO PARA LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DEL CO₂ PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TERMOELÉCTRICA

Gypsum Carbonation Reactor for CO₂ sequestration from Thermoelectric Industry

Liz Añez¹, Nicole Pirela²

¹Departamento de Física. ²Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela
lizanez@gmail.com

RESUMEN

La agenda para el desarrollo sostenible de la Asamblea General de Organización de las Naciones Unidas (ONU) demanda la reducción de las emisiones de gases invernadero, entre ellos el dióxido de carbono (CO₂), en pro de conservar la vida y el ambiente para las generaciones presentes y futuras. Venezuela siendo un país emergente es uno de los países con mayor emisión per cápita de CO₂. Una diagnosis de las emisiones nacionales señala a las centrales termoeléctricas como una de las principales fuentes de CO₂ y SO₂, unas 68.400 kt y 301,7 kt por año respectivamente, con contribución a las emisiones totales mayores al 25%. Por tal motivo, el objetivo del presente es proponer un reactor de carbonatación mineral del yeso para la captura y almacenamiento del CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles de la industria termoeléctrica. La investigación es proyectiva, transeccional de fuente mixta. La propuesta se basa en la carbonatación mineral del sulfato de calcio dihidratado para la captura y almacenamiento permanente del CO₂, cuyos productos generados pueden ser comercializados en el mercado nacional o internacional. El sistema integrado de reactores propuesto consiste en un proceso de tres fases: eliminación del material particulado (MP), supresión del SO₂, y captura de CO₂, todas orientadas a la disminución de los contaminantes presentes en los gases de escape de la industria. Los resultados indican que los factores a considerar en el diseño

del reactor para la carbonatación mineral son: el contenido de hidróxido de amonio, el caudal de flujo de entrada y concentración de CO₂. Además la tasa de carbonatación o eficiencia del proceso es del 95%, pudiendo siempre ser alcanzada con un tiempo de reacción dependiente del caudal y la concentración de CO₂. Por su parte, el análisis financiero de la propuesta se expresa positivamente como la relación inversión/ganancia por adquisición de reactivos y la venta de los productos. En consecuencia, se recomienda la aplicación de la propuesta en la industria termoeléctrica con el fin de reducir las emisiones de CO₂ y SO₂ para colaborar con el cumplimiento de los objetivos del milenio.

Palabras Clave: Captura y Almacenamiento de CO₂, Carbonatación Mineral Acuosa, Yeso, Industria Termoeléctrica

ABSTRACT

The Agenda for Sustainable Development of the General Assembly of the United Nations (UN) demands the reduction of greenhouse gas emissions, including carbon dioxide (CO₂), in order to preserve life and the environment for present and future generations. Venezuela, being an emerging country, is one of the countries with the highest per capita emission of CO₂. A diagnosis of national emissions points to thermoelectric plants as one of the main sources of CO₂ and SO₂, some 68,400 kt and 301.7 kt per year respectively, with contribution to total emissions greater than 25%. For this reason, the objective of the present study is to propose a mineral carbonation reactor of gypsum for the capture and storage of CO₂, from the burning of fossil fuels of the thermoelectric industry. It is a

projective, mixed-source cross-sectional research. The proposal is based on the mineral carbonation of calcium sulphate dihydrate for the capture and permanent storage of CO₂, whose products can be commercialized in the national or international market. The proposed integrated reactor system consists of a three-phase process: removal of particulate matter (PM), suppression of SO₂, and capture of CO₂, all aimed at reducing the pollutants present in the exhaust gases of the industry. The results indicate that the factors to be considered in the design of the reactor for mineral carbonation are: the ammonium hydroxide content, the inflow of inlet flow and concentration of CO₂. In addition, the rate of carbonation or efficiency of the process is 95%, and can always be reached with a reaction time dependent on the flow and the concentration of CO₂. On the other hand, the financial analysis of the proposal is positively expressed as the investment / profit ratio for the acquisition of reagents and the sale of the products. Consequently, the application of the proposal in the thermoelectric industry is recommended, in order to reduce the CO₂ and SO₂ emissions to collaborate with the achievement of the millennium objectives.

Keywords: CO₂ Capture and Storage, Aqueous Mineral Carbonation, Gypsum, Thermoelectric Industry

INTRODUCCIÓN

Desde el comienzo de la era industrial la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en un 30% aproximadamente, de 280 a 370 ppm (Herzog y col., 2000), siendo el principal responsable las actividades humanas, trayendo como consecuencia el aumento del efecto invernadero y la acidificación de la superficie de los océanos.

En este contexto, el Banco Mundial (2011) informa que sólo por el consumo de combustibles fósiles, Venezuela registra las más altas emisiones de CO₂ por habitante de América Latina: 6,4 toneladas por habitante. Las emisiones de CO₂ por unidad del producto interno bruto son también las más altas de la región, lo que implica la menor eficiencia económica por unidad de CO₂ emitido por el consumo de energía: 0,377 kg de CO₂ por dólar del PIB-PPA. Por otra parte, la industria termoeléctrica en Venezuela produce el 35% de la generación eléctrica del país (Corpoelec, 2016) siendo responsable de más del 25% de las emisiones de CO₂ nacionales. A este hecho

se le agrega la emisión de otros contaminantes generados en el proceso, entre ellos: SO₂, NO_x, CO y material particulado (MP), que forma parte del impacto negativo de estas plantas en el aspectos de las emisiones atmosféricas.

Desde el protocolo de Kyoto en 1997, los países firmantes, entre ellos Venezuela, se propusieron la meta de reducir al menos el 5,2% de sus emisiones de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, entre ellos el de mayor importancia es el CO₂ (ONU, 2009). En la misma dirección apuntan los objetivos del desarrollo sostenible, también llamados objetivos mundiales, de la Organización de las Naciones Unidas puestos en marcha desde enero de 2016 y vigentes para los siguientes 15 años (PNUD, 2015).

A nivel mundial, se han desarrollado e implementado diversas tecnologías de control de emisiones dirigidas a disminuir sus efectos negativos. La carbonatación mineral es una técnica cuya tecnología es prometedora para la reducción de las emisiones de CO₂. Los productos formados en la carbonatación mineral (sílice y carbonatos) son termodinámicamente estables (Newall, 2000) y por lo tanto, el secuestro del CO₂ es permanente y seguro (Lackner, 2003). Tradicionalmente para la carbonatación mineral se ha trabajado con materiales alcalinotérreos como la wollastonita (CaSiO₃), olivine (Mg₂SiO₄) y serpentine (MgSi₂O₅(OH)₄), (Teir, 2006; Iizuka, 2004).

Recientes investigaciones han centrado su atención en la carbonatación mineral del sulfato de calcio dihidratado o yeso, reportando una alta carbonatación bajo condiciones de presión y temperatura ambiente (Lee y col., 2012; Song y col., 2014). Estos avances junto al bajo costo y disponibilidad en el mercado nacional hacen de esta fuente de calcio una opción atractiva para el desarrollo e instalación de tecnologías de capturas de CO₂ mediante carbonatación mineral. La presente propuesta, enmarcada dentro de las iniciativas mundiales para la reducción de gases de efecto invernadero, tiene como objetivo: proponer un reactor de carbonatación mineral del yeso para la captura y almacenamiento del CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles de la industria termoeléctrica.

FUNDAMENTACIÓN

Principales Impactos Ambientales de las Termoeléctricas

Los principales impactos ambientales asociados

a las centrales termoeléctricas tienen relación con emisiones a la atmósfera, consumo de agua y alteración del ecosistema acuático, descargas de residuos líquidos, manejo de residuos sólidos y de materiales peligrosos, y emisiones acústicas.

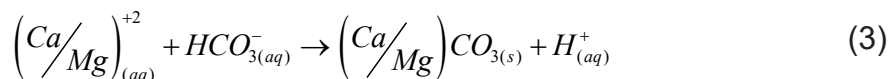
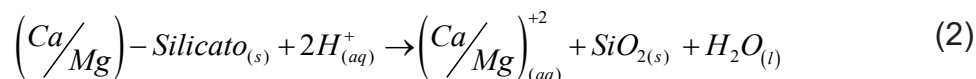
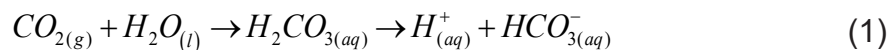
Con respecto a las emisiones atmosféricas, la cantidad y las características de las emisiones a la atmósfera dependen de factores como el combustible, el tipo y el diseño de la unidad de combustión, las prácticas operacionales, las medidas de control de las emisiones y su estado de manutención y la eficiencia general del sistema. Las principales emisiones generadas por combustión de combustibles fósiles son: dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) y gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2). Cabe señalar que el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno son precursores de lluvia ácida (Superintendencia del Medio Ambiente 2014).

Carbonatación Mineral

La carbonatación mineral es una tecnología prometedora para la reducción de las emisiones de CO_2 . Imita el desgaste natural de las rocas de calcio

o magnesio que ha tenido lugar desde la creación de la tierra. Comprende la reacción del CO_2 con minerales no carbonatados, principalmente silicatos de calcio o magnesio, para formar uno o más componentes carbonatados, normalmente sólidos. El proceso de carbonatación mineral se produce de forma natural y se conoce como meteorización (IPCC, 2005).

La captura y almacenamiento de CO_2 en la carbonatación mineral acuosa ocurre en tres pasos que suceden simultáneamente en el mismo reactor. Primero, la disolución y especiación del CO_2 en el agua (ecuación 1), luego los iones de calcio o magnesio se liberan de la matriz del mineral debido a la presencia de protones (ecuación 2), y finalmente los cationes libres de calcio o magnesio reaccionan con el bicarbonato para formar carbonato sólido (ecuación 3).



Reactivos

Carbonato de Calcio (CaCO_3)

El uso más importante del carbonato de calcio es en la industria del papel. El carbonato de calcio actúa como material de carga en la elaboración del papel. También se utiliza en formulaciones de látex y de pintura alquídica, además se encuentra en diversos productos diseñados para usos cosméticos y farmacológicos de la gente. Es el ingrediente activo que neutraliza la acidez estomacal en diferentes antiácidos, puede utilizarse como abrasivo suave en las pastas dentales y sirve como material de carga en algunos cosméticos (Williams 1996). Su precio oscila desde los 60 hasta 450 dólares por tonelada.

Hidróxido de Amonio ($\text{NH}_4(\text{OH})$)

El hidróxido de amonio es una solución química líquida e incolora que se forma cuando el amoníaco se disuelve en agua. Por lo general se encuentra en concentraciones hasta el 30% y se utiliza en productos de limpieza doméstica, fotografía, fertilizantes, textiles, cauchos y fármacos también se utiliza como refrigerante (NJHealth 2012) refirió el precio del $\text{NH}_4(\text{OH})$ oscila de los 170 a los 500 dólares por tonelada.

Sulfato de Amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)

El sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ fue uno de los primeros y más ampliamente utilizados fertilizantes nitrogenados para la producción de cultivos. En la actualidad es menos usado, pero es especialmente

valioso donde ambos nutrientes, N y S, son requeridos. Su alta solubilidad provee versatilidad para un gran número de aplicaciones agrícolas. Ciertos sub-productos que contienen amoníaco o utilizan ácido sulfúrico son comúnmente transformados en sulfato de amonio para uso agrícola. Aunque el color puede variar del blanco al beige, siempre es vendido como un cristal altamente soluble que posee excelentes propiedades de almacenaje (IPNI 2016). Su precio oscila desde los 90 a los 300 dólares la tonelada.

Sulfato de Calcio Dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

El sulfato de calcio o yeso es un mineral que se encuentra en la naturaleza con cierta abundancia. Es materia cerámica y, si se analiza su estructura, por ejemplo, con microscopía electrónica y otros medios de estudio como la difracción de radiaciones, puede detectarse su naturaleza multicristalina. (Macchi 2007). Su precio oscila desde los 150 hasta los 900 dólares por tonelada.

METODOLOGÍA

La presente investigación, según Hurtado (2010) es de tipo proyectiva, el diseño de la investigación, es de fuente mixta, transeccional contemporáneo y multivariable. A continuación se describen las fases metodológicas y actividades de la investigación:

Fase 1: Caracterización de las emisiones de CO_2 provenientes de la quema de combustibles fósiles en la industria termoeléctrica en Venezuela.

Fase 2: Descripción del proceso de carbonatación mineral del yeso como método para la captura y almacenamiento de CO_2 .

Fase 3: Identificación de los componentes de un sistema para la captura y almacenamiento de CO_2

basado en reacciones de carbonatación mineral del yeso.

Fase 4: Determinación de la eficiencia de captura y almacenamiento de CO_2 del sistema de reacción propuesto.

Fase 5: Análisis de las variables de diseño del sistema de captura y almacenamiento de CO_2 en función de su eficiencia.

Fase 6: Diseño de un sistema para la captura y almacenamiento de CO_2 provenientes de la quema de combustibles fósiles en la industria termoeléctrica basado en reacciones de carbonatación mineral del yeso.

RESULTADOS

La industria termoeléctrica venezolana, según Rangel (2016) tiene una capacidad instalada de generación termoeléctrica de 15.300 MW. Se estima que sólo 55% de la capacidad instalada está operativa, debido a que según cifras de Corpoelec (2016) se generan unos 8.400 MW por este método. Los combustibles utilizados en estas plantas son básicamente: Gas Natural, Fuel Oil, y Petróleo.

Para caracterizar las emisiones atmosféricas proveniente de combustibles en la industria termoeléctrica de Venezuela, se calcularon índices promedio de emisiones de CO_2 y SO_2 por MWh para cada tipo de combustible en plantas generadoras de tecnología equivalentes a las del país. Los datos utilizados para ello corresponden a emisiones de la industria termoeléctrica de Estados Unidos, Canadá y México (Miler y Van Atten, 2004). A partir de estos índices, como se muestra en la tabla 1, se estimaron las emisiones totales de la industria termoeléctrica en el Estado Zulia y de todo el país.

Tabla 1. Estimación de emisiones atmosféricas de CO_2 y SO_2 de la industria termoeléctrica del Zulia y de Venezuela.

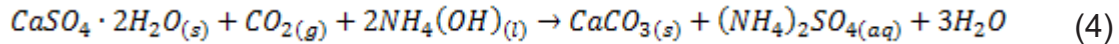
Región	(MW)	Índice de emisiones (kg CO_2 /MWh)	kt CO_2 / año	Índice de emisiones (kg SO_2 /MWh)	kt SO_2 / año
Zulia	1905		15685,3		68,4
Venezuela	8400	930	68433,1	4,10	301,7

Fuente: Elaboración propia.

Las cifras de emisiones ambientales estimadas evidenciaron que una medida de reducción de emisiones en la industria termoeléctrica podría tener un alto impacto sobre las emisiones netas del país. Esto conduce a la propuesta de utilizar la carbonatación mineral acuosa como técnica para la captura y almacenamiento permanente del CO_2 .

La atención se centró en la utilización del yeso o sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por ser un mineral abundante en la naturaleza y disponible en el país, además es un producto generado en el proceso de desulfuración de gases de combustión, considerado en ocasiones como un desecho.

La carbonatación mineral del yeso se establece a través de la siguiente reacción (Lee y col., 2012):



Como se expresa en la reacción de carbonatación, el sulfato de calcio suspendido en una solución básica de hidróxido de amonio reacciona con el dióxido de carbono disuelto para formar cristales de carbonato de calcio y sulfato de amonio que son productos termodinámicamente estables y amigables con el ambiente.

El experimento realizado por Lee y col. (2012) permitió estudiar los factores que afectan la cinética de esta reacción a escala de laboratorio. Del análisis se concluye que la cinética de la reacción a temperatura y presión ambiente se ve afectada básicamente por el contenido de hidróxido de amonio, el caudal de flujo de CO_2 y la concentración de CO_2 en el caudal de gas. De modo que estos son los factores que deben considerarse al momento de diseñar el reactor a escala industrial. Se concluyó que siempre es posible alcanzar una tasa de carbonatación máxima de 95%, lo que puede

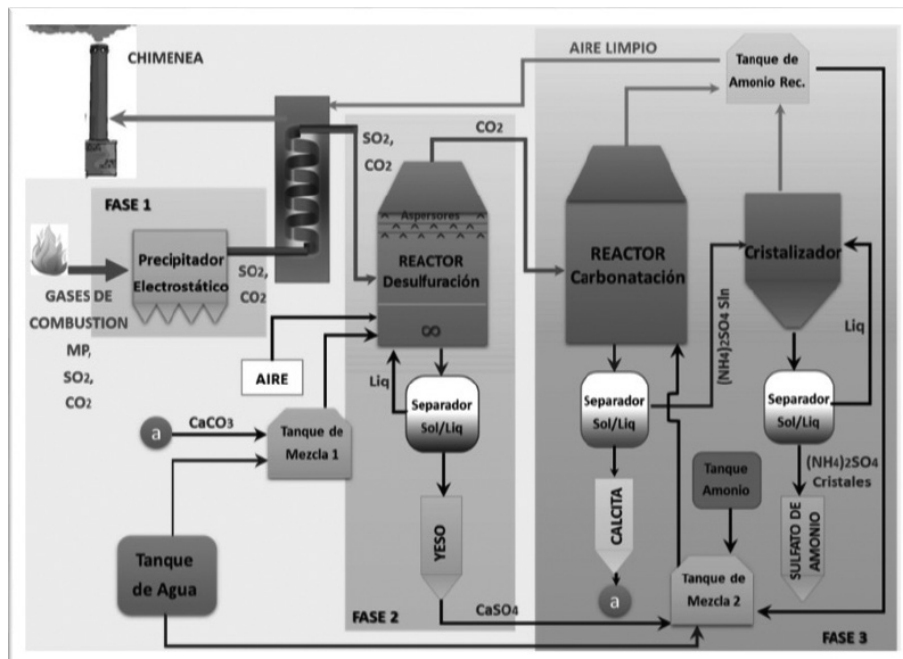
variar según el diseño del reactor es el tiempo de retención.

PROPUESTA

Con base en el diagnóstico de las emisiones realizado y el conocimiento científico disponible se desarrolla una propuesta con enfoque sistémico para el control de emisiones provenientes de la quema de combustibles en plantas termoeléctricas del país, la cual se muestra en la figura 1.

La propuesta consiste en un proceso en tres (3) fases, cada una de las cuales elimina un factor contaminante del flujo de gases de escape. La 1era fase consiste en la eliminación del Material Particulado (MP) o cenizas volantes por medio de un precipitador electrostático. El flujo libre de MP pasa por un intercambiador de calor para disminuir su temperatura antes de entrar a la segunda fase.

Figura 1. Diseño de un sistema de tratamiento de gases de escape de una planta termoeléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

La 2da fase del sistema elimina el SO_2 de la corriente de gas por medio de un proceso de desulfuración al húmedo. En esta etapa se utiliza una suspensión de carbonato de calcio para absorber el azufre, la suspensión de calcita

se introduce mediante aspersores en un reactor heterogéneo en el cual la solución se encuentra bajo agitación continua. La solución luego pasa por un separador sólido/líquido de dos etapas para separar los cristales de yeso. El agua recuperada

se reinyecta al reactor. A la salida del mismo, el flujo de gas "libre" de SO_2 junto con el CO_2 producido durante la reacción de desulfuración pasa a la 3era etapa

La 3era etapa del proceso se concentra en la disminución de las emisiones de CO_2 mediante la carbonatación mineral. En un reactor que maneja reactivos en las tres fases (sólido, líquido y gas), se introduce una suspensión de sulfato de calcio (yeso) en una base de hidróxido de amonio. El CO_2 proveniente de la etapa anterior se disuelve y reacciona formando cristales de carbonato de calcio y sulfato de amonio en solución. Un separador sólido/líquido permite extraer la calcita producida. La solución recuperada de sulfato de amonio luego debe pasar por un cristizador en donde se formarán los cristales que luego serán recuperados a través de otro separador sólido/líquido. Finalmente el aire libre de MP, SO_2 y CO_2 , pasa nuevamente por el intercambiador de calor para finalmente ser liberado al ambiente a través de la chimenea.

Lo innovador de la propuesta radica, en principio, en la implementación a nivel industrial de una tecnología hasta ahora probada a escala de laboratorio, a saber la secuestación de CO_2 a través de reacciones de carbonatación mineral del yeso como mineral fuente de calcio. Por otra parte, la integración de algunas tecnologías existentes para la eliminación de contaminantes (MP y SO_2) al reactor de carbonatación mineral, permite concebir la propuesta como un sistema de control de emisiones atmosféricas y no un simple reactor.

Además, integrar los procesos de carbonatación junto con el de desulfuración a húmedo en un circuito cerrado facilita el almacenamiento y manejo de materiales y reactivos, en particular de la calcita y el yeso; por ser complementariamente reactivo en un proceso y producto en el otro. Vale la pena resaltar de que el hecho de trabajar con reacciones hasta cierto punto inversas implica que el CO_2 y CaSO_4 generado para absorber el SO_2 en el proceso de desulfuración serán transformados durante la carbonatación en la misma cantidad de CaCO_3 que se usó en primera instancia para absorber el SO_2 . Esto quiere decir que una vez el sistema se inicie producirá la materia prima necesaria para mantener el proceso de desulfuración, facultad que se hereda del diseño de un sistema de circuito cerrado.

La propuesta es sostenible desde el punto de vista:

a) Ambiental: En el sistema diseñado, los productos generados por la carbonatación mineral, calcita y sulfato de amonio, son termodinámicamente estables y amigables con el ambiente; de hecho supone un almacenamiento permanente y seguro del CO_2 , lo que lo hace ambientalmente sustentable.

b) Social: La propuesta implica un mejoramiento significativo en la calidad del aire circundante a las plantas termoeléctricas. La eliminación del MP en los gases de escape disminuye en el aire la presencia de factores que pueden desencadenar enfermedades respiratorias en los habitantes que residen en los alrededores. Por otra parte, la eliminación del SO_2 reduce la probabilidad de lluvias ácidas en las adyacencias de la planta y si se considera la influencia del viento podría afectar también otras zonas menos cercanas.

c) Económico: El costo de la propuesta se expresa como la diferencia entre el costo de los reactivos y la ganancia obtenida por la venta de los productos. La estimación de costos de la propuesta es inevitablemente susceptible a cambios en los precios de los reactivos y productos. Un análisis de sensibilidad del costo de la propuesta ante cambios en los precios del mercado permitió definir los rangos de valores de precios para los reactivos dentro del cual no se generan pérdidas financieras. Como resultado se obtuvieron los rangos de precios de los reactivos dentro de los cuales la propuesta es rentable: para el yeso (134,8 \$/t – 269,1\$/t) y para el sulfato de amonio (170 \$/t – 484,8 \$/t).

CONSIDERACIONES FINALES

La carbonatación mineral del sulfato de calcio dihidratado es una técnica prometedora para ser aplicada a escala industrial en la captura y almacenamiento permanente y seguro del CO_2 . Los productos generados son carbonato de calcio y sulfato de amonio. Su implementación como proceso industrial requiere de un reactor heterogéneo (gas-líquido-sólido), un separador sólido/líquido y un cristizador. La tasa de carbonatación máxima del proceso es del 95% y siempre puede ser alcanzada, lo que puede variar en función de los factores que afectan la cinética, es el tiempo de reacción.

La sostenibilidad económica de la propuesta depende de la combinación de precios de reactivos y productos. En un amplio rango de precios la propuesta además de ser sustentable puede llegar incluso a ser rentable; y al integrar el proceso de desulfuración como una fase del sistema

de tratamiento de gases, se elimina su impacto ambiental negativo (CO₂ adicional) sin incurrir en costos adicionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banco Mundial (2011). Indicadores de Desarrollo. Consultado el 14/09/16. Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador>
- Corporación Eléctrica Nacional Corpoelec (2016). Generación. Consultado el 14/09/16. Disponible en: <http://www.corpoelec.gob.ve>
- Herzog, H. J.; Eliasson, B. & Kaarstad, O. 2000. Capturing greenhouse gases, *Scientific American* 282/2, 54-61.
- Hurtado, J. (2010). El Proyecto de Investigación, comprensión holística de la metodología y la investigación. 6ta edición. Editorial Quiron. Venezuela.
- Iizuka, A.; Fujii, M.; Yamasaki, A. y Yanagisawa, Y. (2004). Development of a new CO₂ sequestration process utilizing the carbonation of waste cement. *Ind Eng Chem Res*; 43(24):7880–7.
- IPCC. (2005). Special Reports on Renewable Energy Sources coping meeting on renewable energy sources Carbon Dioxide Capture and Storage. The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU England.
- IPNI. International Plant Nutrition Institute. (2016). Fuente de nutrientes específicos. Documento en línea. Disponible en: <https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/>
- Lackner, KS. 2003. A guide to CO₂ sequestration. *Science*; 300(5626):1677–8
- Lee, MG., Jang, YN., Ryu, KW., Kim, W., Bang, JH. 2012. Mineral carbonation of flue gas desulfurization gypsum for CO₂ sequestration. *Energy*, 47, 370-377
- Miller, P. y Van Atten, C. (2004) Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte. Comisión para la cooperación ambiental de América del Norte. ISBN: 2-923358-12-0. Canadá.
- Newall, PS.; Clarke, SJ.; Haywood, HM.; Scholes, H.; Clarke, NR.; King, PA. (2000) CO₂ storage as carbonate minerals, report No. PH3/17. IEA Greenhouse Gas R&D Programme
- NJHealth (2012). Hoja informativa sobre sustancias peligrosas. Department of Health. Ney Jersey. Documento en línea. Disponible en: <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0103sp.pdf> Organización de las Naciones Unidas ONU (2009). Cambio Climático. Documento en Línea. Consultado 14/09/2016. Disponible en: <http://www.un.org/es/climatechange/>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD (2015). Objetivos del Desarrollo Sostenible. Consultado 14/09/2016. Disponible en: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Rangel, Clavel (2016) Gobierno persiste en negar información sobre estado de parque termoeléctrico. Nota de prensa publicada el domingo 17 Abril 2016 en el periódico Correo del Caroní. Documento en línea. Consultado el 15/08/2016 Disponible en: <http://www.correodelcaroni.com/index.php/economia/item/44166-gobierno>
- Song, K., Jang, YN., Kim, W., Lee, MG., Shin, D., Bang, JH., Jeon, ChW., Chae, Sch. 2014. Factors affecting the precipitation of pure calcium carbonate during the direct aqueous carbonation of flue gas desulfurization gypsum. *Energy*, 65, 527-532.
- Superintendencia del Medio Ambiente – Gobierno de Chile (2014). Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Documento en línea. Consultado el 14/09/16. Disponible en: <http://www.sma.gob.cl/index.php/documentos>.
- Teir, S.; Eloneva, S.; Fogelholm, C-J. y Zevenhoven, R. 2006. Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production. *Energy*; 32(4):528–39
- William G., William S. (1996) Química. 7ma edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA. México.