

Artículo Original
Original Article

PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE UN CLARIFICADOR-COAGULANTE PARA TRATAMIENTO DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES, A PARTIR DE CHATARRA DE ALUMINIO

PROCESS FOR MANUFACTURING A CLARIFIER-COAGULANT AGENT FOR WATER AND WASTEWATER TREATMENT, FROM ALUMINUM SCRAP

Héctor A. Moreno C.

Instituto Tecnológico de La Laguna del Tecnológico Nacional de México. Torreón, México.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0740-6209>

Ma. Cristina García C.

Instituto Tecnológico de La Laguna del Tecnológico Nacional de México. Torreón, México.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-7420-6984>

Adriana Gamboa H.

Instituto Tecnológico de La Laguna del Tecnológico Nacional de México. Torreón, México.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3355-1234>

Karla V. Guevara A.

Instituto Tecnológico de La Laguna del Tecnológico Nacional de México. Torreón, México.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-2894-4861>

Juana Ma. Nájera S.

Instituto Tecnológico de La Laguna del Tecnológico Nacional de México. Torreón, México.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7777-3596>

Autor correspondiente: Héctor Moreno: honerom@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Moreno CHA, García CMA, Gamboa HA, Guevara AKV, Nájera SJM. Proceso para la fabricación de un Clarificador-Coagulante para Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales, a partir de chatarra de aluminio. Rev. Soc. cient. Parag. 2024;29(2):79-89.

RESUMEN

Este trabajo busca diseñar un proceso para la fabricación de un agente floculante ($Al_2(SO_4)_3$), a partir del reciclaje de chatarra de Al. En su desarrollo se fabricó primero un prototipo artesanal de horno de fusión, y luego aprovechando la experiencia adquirida se elaboró otro con mejores características de funcionamiento. Se probaron diferentes métodos de obtención del sulfato utilizando: Al en placa, en granalla y con los botones de fundición obtenidos en el horno y reacción con ácido sulfúrico y electrocoagulación. Los resultados obtenidos fueron muy buenos y el proceso diseñado es prometedor para su escalamiento.

Palabras claves: coagulante, floculación, sulfato de aluminio, electrocoagulación, prueba de jarras.

ABSTRACT

This Project aims to design a process to produce a flocculant agent ($Al_2(SO_4)_3$), from aluminum scrap. First a handcrafted fusion furnace was made, then taking advantage of the experience acquired, another one, with better working characteristics, was made. Several obtention methods for the aluminum sulphate were tried using aluminum plates, powder, grains and the melted buttons from the fusion furnace, using electrocoagulation and/or reaction with sulfuric acid. Results were good, and the designed process is promising for escalation.

Keywords: coagulant, flocculation, aluminum sulfate, electrocoagulation, jar-test

INTRODUCCIÓN

Actualmente el cuidado y preservación del medio ambiente es uno de los temas más importantes a nivel mundial. Debido a la sobreexplotación y el agotamiento de los recursos minerales y en beneficio del medioambiente, la



comunidad científica se ha centrado en la búsqueda de nuevas alternativas para la recuperación, reutilización y reciclado de metales de fuentes secundarias como residuos, escorias, relaves, etc. Por sus características el aluminio es un metal que puede ser reciclado en repetidas ocasiones, sin perder sus propiedades⁽¹⁾. La Industria Europea del

Aluminio en su plan de acción circular de aluminio (The Circular aluminum action plan, European Aluminium Association, 2019^a) tienen como estrategia mejorar la recolección, clasificación y reciclaje de la chatarra ya que tiene grandes beneficios económicos y ambientales, pues la producción de aluminio reciclado solo requiere alrededor del 5 % de la energía necesaria para producir la misma cantidad de aluminio primario^(2,3). Reciclarlo cambia el equilibrio hacia una mayor sostenibilidad, se estima que se duplique la cantidad de aluminio para reciclarse para 2050^(3,4), por lo que producir aluminio a partir de chatarra representa una alternativa viable, trayendo consigo grandes beneficios al medio ambiente, ya que no solo se está reciclando un residuo, sino que también disminuye la energía requerida para producirlo, impactando directamente en la disminución de los gases de efecto invernadero^(5,6).

Tan solo alrededor de la mitad de la chatarra de aluminio al final de su vida útil se recicla en EE. UU.⁽⁵⁾, por lo que es importante promover el reciclado y la reutilización de la chatarra de aluminio, como una alternativa para la preservación y cuidado del medio ambiente. La utilización de chatarra de aluminio ya está siendo estudiada gracias a las ventajas medioambientales que esta alternativa representa, por ejemplo; se desarrollaron colectores solares verticales de aire (VSAC) para ser utilizados en edificios, utilizado latas de bebida de aluminio como aletas para mejorar la eficacia del sistema colector⁽⁷⁾.

En otros trabajos relacionados: Se reciclo una mezcla de aleaciones de aluminio de aviones de desecho concluyendo que se pueden obtener aleaciones de aluminio 7075 de alta calidad⁽⁸⁾. Se realizó un estudio en el que se propuso un método de purificación para eliminar las impurezas del aluminio reciclado⁽⁹⁾. También se hizo un estudio de la evaluación ambiental del proceso de reciclaje de cables, los datos fueron tomados de una planta de reciclaje en Francia. El proceso se basó únicamente en la separación mecánica y clasificación óptica en cables trituradores y el estudio demuestra enormes beneficios ambientales para el aluminio reciclado en comparación con el aluminio primario⁽¹⁰⁾.

Por otra parte, uno de los productos de aluminio, que se obtiene a partir de la bauxita, es el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, un sólido blanco de cristales lustrosos. Puede tener muchas estructuras, aunque sus hidratos tienden a adoptar el sistema cristalino monoclinico. Es una sal muy soluble en agua, y en la naturaleza es raro encontrarlo en su forma anhidra. Usualmente se encuentra hidratado bajo la forma de sulfato de aluminio octadecahidratado $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ o hexadecahidratado $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O]$.

De la gran cantidad de acciones para el cuidado del medio ambiente, se considera de suma importancia el tratamiento de aguas, donde para dar cumplimiento a las legislaciones existentes, se hace uso de diversos agentes químicos que ayuden a cumplir los límites máximos permitidos, y dentro de estos, la selección del coagulante es un proceso en el que se consideran varios criterios de modo que se garantice las óptimas condiciones del tratamiento en el equipo de clarificación con la consecuente mejor calidad del agua tratada y a un menor costo.

Los coagulantes se clasifican en dos grupos: inorgánicos y orgánicos. Los coagulantes inorgánicos (químicos) más usados en el mundo para el tratamiento del agua, que pueden ser simples o polimerizados, son el sulfato de aluminio, las sales de hierro y la cal; cada coagulante tiene un valor de pH específico donde ocurre la mínima solubilidad y la máxima precipitación⁽¹¹⁾.

Si bien los usos de diversos coagulantes presentan ventajas y desventajas, el sulfato de aluminio sigue siendo una opción para la coagulación o floculación en el tratamiento de aguas. Al mezclarse con el agua (potable, servida o de desecho), el sulfato de aluminio origina hidróxido de aluminio, el cual forma complejos con los compuestos y las partículas en suspensión acelerando su sedimentación y la remoción de turbidez y color. Postalochi, L. et al, demostraron que el $Al_2(SO_4)_3$ es uno de los coagulantes más utilizados para el tratamiento del agua⁽¹²⁾.



Figura 2. Primer prototipo de horno.

Para el segundo prototipo; tanque de gas, aislante térmico de fibra cerámica para el interior, exterior y tapa, malla de acero inoxidable para soporte del aislamiento interior, lámina galvanizada para la cubierta exterior y tapa. En la figura 3, se presentan el diagrama esquemático del horno e imágenes del segundo prototipo.

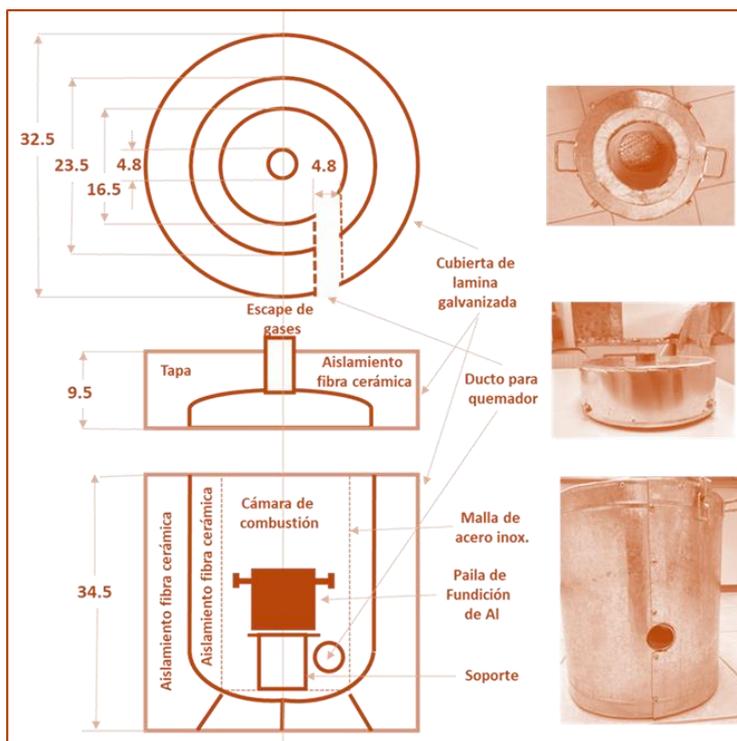


Figura 3. Diagrama e imágenes del segundo prototipo de horno fundición de chatarra de Al.

Para las pruebas de funcionamiento (Figura 4) se utilizaron los siguientes materiales y equipos: Gas LP, 500 gr de chatarra de Al (latas), copelas de barro, balanza Torrey EE30 serie 208 de 30 Kg y bascula de triple barra OHAUS de 26120 gr, quemador Flamineta para gas LP con boquillas de 1 y 1¼", soporte para paila (tubo galvanizado 7 cm de diámetro x 7.5 de altura X 1 mm de espesor), payonera de fierro de 4 cavidades, ganchos para vaciado de la paila, equipo de seguridad como: caretas y lentes, guantes y mandil, y 4 Termómetros con las siguientes marcas y características: CEM DT-8819 Infrarrojo de -50 a 750 °C, de mercurio Allafrance de -20 a 250 °C y Gain Express Digital tipo K de 2 canales de -50 a 1300 °C.

Para la fabricación del sulfato de aluminio, se utilizaron placas de Al de 30 x 60 x 3 mm, granalla de Al, botones de Al obtenidos por la fundición de chatarra, ácido sulfúrico comercial (98%) y material de laboratorio. También un rectificador Kaselco de 50 V y 10 A de CD y un equipo para Prueba de Jarras.



Figura 4. Pruebas de Funcionamiento, fundición y vaciado de Al.

El cálculo del % de recuperación de Al, se hizo considerando el peso del aluminio recuperado x 100 y dividido entre los 500 gr que se alimentaron de chatarra Ecuación (1).

$$\% \text{ Recuperación de Al} = \frac{(W \text{ botones de Al} + \text{diferencia de peso de paila} + \text{diferencia en peso de gancho}) * 100}{500} \quad (1)$$

Mientras que la eficiencia energética se calculó considerando el calor aprovechado x 100, dividido entre el calor disponible Ecuación (2).

$$Ef. \text{ energética } (\%) = \frac{[CpAl (680^{\circ}\text{C} - T_{amb}) + W \text{ Al recuperado } (Cf)] * 100}{PC \text{ gas LP} * W \text{ gas consumido}} \quad (2)$$

Dónde: W es peso, Cp es el calor específico del Al (910 J/kg°C), Cf el calor de fusión del Al (394,000 J/kg°C), y PC el poder calorífico del gas LP (49,650 J/kg°C).

El siguiente paso fue la selección de un Diseño Experimental, se eligió un 22 con dos replicas, los factores seleccionados fueron: el tamaño de la boquilla del soplete con dos niveles 15/16" y 1-3/16", y soporte para la paila, con dos niveles "con" y "sin". Luego se corrieron las pruebas del Diseño Experimental y se analizaron los resultados obtenidos.

Para la fabricación del sulfato de aluminio a partir de Al, primero se elaboró una calculadora de las cantidades estequiometrias en Excel. Se hicieron cuatro pruebas: Prueba 1, obtención del sulfato de aluminio por Electrocoagulación (EC) de placas de aluminio con solución de ácido sulfúrico. Se utilizaron placas de aluminio de 28 x 58 x 3 mm y un rectificador Kaselco de 50 VCD y 20 A. Se aplicaron 40 VCD y con una corriente de 1.3 A; Prueba 2, obtención de Al(OH)₃ por medio de electrocoagulación utilizando una placa de Al y su posterior conversión a Al₂(SO₄)₃, por reacción con H₂SO₄; Prueba 3, reacción de placa de Al con H₂SO₄; Prueba 4, reacción de granalla de

Al₂O₃ con H₂SO₄, la Prueba 5, reacción de granalla de Al con H₂SO₄ y la Prueba 6 los botones de fundición obtenidos en el horno fabricado con H₂SO₄. En caso de resultados satisfactorios se prueba el producto obtenido mediante Prueba de Jarras.

RESULTADOS

El segundo prototipo del horno funciona perfectamente permitiendo realizar las corridas del Diseño experimental (DE).

El procedimiento para la realización de las pruebas se fue modificando de acuerdo a las condiciones, a la experiencia adquirida y a los resultados. El procedimiento fue: pesar 500 gr de latas, pala, paila y tanque de gas. Cuando corresponde poner el soporte de la paila. Seleccionar la boquilla del soplete correspondiente, colocar el quemador encendido en el ducto verificando que no haya obstrucción a la entrada de aire y precalentar el horno y paila durante 10 min para alcanzar los 680 °C. Durante la prueba se monitorea la temperatura ambiente, la interna, la de los gases de combustión y la externa. Se alimentan las latas. Cuando este fundiendo, retirar la escoria. Al terminar de alimentar las latas dejar la temperatura en aproximadamente 680 °C por 10 min más y luego apagar el quemador. Sacar la paila del horno con el soporte. Inclinar la paila con el soporte y con el gancho para retirar el resto de escoria. Vaciar el Al a la payonera. Dejar enfriar. Pesar pala, paila, y botones de Al.

Las pruebas de fundición se realizaron de acuerdo con el DE seleccionado (2²), y se corrieron en orden aleatorio. Los resultados se presentan, en el orden estándar, en la tabla 1.

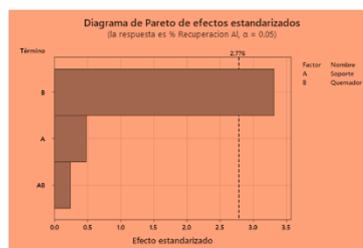
Orden	Soporte	Boquilla	% Recuperación de Al			Eficiencia Energetica (%)		
			1	2	Promedio	1	2	Promedio
1	Sin	Chico	68.76	64.55	66.66	55.766	56.242	56.00
2	Con	Chico	75.87	60.07	67.97	54.333	63.349	58.84
3	Sin	Grande	83.52	84.05	83.79	48.994	57.873	53.43
4	Con	Grande	80.2	95.48	87.84	61.058	65.424	63.24
			PROMEDIO		76.56			57.88

Tabla 1. Resultados del Diseño experimental 2²

De la tabla de datos se concluye que los mejores resultados, para el % de Recuperación de Al y de Eficiencia energética se obtuvieron utilizando soporte para la paila y usando la boquilla grande del quemador. Estos resultados fueron confirmados con el programa estadístico MINITAB.

Para el % de Recuperación de Al (figura 5), el ANOVA indica que únicamente el tamaño de la boquilla afecta significativamente el % de recuperación de aluminio, ni el uso del soporte, ni la interacción entre ambos afectan la respuesta. Los signos positivos de la ecuación de regresión, nos indica que para tener el mejor % de recuperación debemos tener los dos factores en su nivel alto, es decir boquilla grande y utilizando el soporte, lo cual concuerda con los resultados de las pruebas. La R² de 73.77%, nos indica que hay una correlación relativamente fuerte entre los factores y la respuesta.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	703.887	234.629	3.75	0.117
Lineal	2	700.218	350.109	5.59	0.069
Soporte	1	14.575	14.575	0.23	0.655
Quemador	1	685.642	685.642	10.96	0.030
Interacciones de 2 términos	1	3.670	3.670	0.06	0.821
Soporte	1	3.670	3.670	0.06	0.821
*Quemador	1	3.670	3.670	0.06	0.821
Error	4	250.312	62.578		
Total	7	954.199			

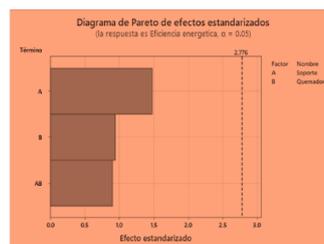


Resumen del modelo			
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
7.91062	73.77%	54.09%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas
 $\% \text{ Recuperación Al} = 76.56 + 1.35 \text{ Soporte} + 9.26 \text{ Quemador} + 0.68 \text{ Soporte} * \text{Quemador}$

Figura 5. ANOVA y diagrama de Pareto para % de Recuperación de Al

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	267.31	89.10	1.30	0.391
Lineal	2	211.66	105.83	1.54	0.319
Soporte	1	150.16	150.16	2.18	0.213
Quemador	1	61.49	61.49	0.89	0.398
Interacciones de 2 términos	1	55.65	55.65	0.81	0.419
Soporte*Quemador	1	55.65	55.65	0.81	0.419
Error	4	274.93	68.73		
Total	7	542.24			



Resumen del modelo			
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
8.29044	49.30%	11.27%	0.00%

Ecuación de regresión en unidades no codificadas
 $\text{Eficiencia energética} = 70.10 + 4.33 \text{ Soporte} - 2.77 \text{ Quemador} + 2.64 \text{ Soporte} * \text{Quemador}$

Para la eficiencia Energética el ANOVA (Figura 6), indica que únicamente el uso del soporte afecta significativamente la respuesta. Ni el tamaño del quemador, ni la interacción entre ambos afectan la respuesta. Al igual que con el % de recuperación, los signos positivos de la ecuación de regresión indican que, para tener la mejor Eficiencia, debemos tener los dos factores en su nivel alto, es decir, utilizando el soporte y la boquilla grande. La R2 de 49.3%, nos indica que hay una correlación débil entre los factores y la respuesta.

Figura 6. ANOVA y diagrama de Pareto para la Eficiencia Energética.

En la figura 7, se presentan los resultados del análisis de escoria de la fundición de Al por Absorción Atómica (AA) y por Difracción de Rayos X (XRD), ambos externos. Los principales componentes son: Al, Mg y Fe. Lo que indica que aún podría refinarse más y mejorar el rendimiento.



Figura 7. Análisis de la escoria de la fundición de chatarra de Al por AA y XRD

Los resultados para la fabricación del sulfato de aluminio a partir de Al, fueron para la Prueba 1, obtención del sulfato de aluminio por electrocoagulación de placas de aluminio con solución de ácido sulfúrico. Se utilizaron placas de aluminio de 28 x 58 x 3 mm y un rectificador Kaselco de 50 VCD y 20 A. Se aplicaron 40 VCD y con una corriente de 1.3 A. El sulfato de aluminio presentó coloración, por lo que se tuvo que filtrar. En la Prueba de Jarras los resultados fueron satisfactorios.

Prueba 2, obtención de $\text{Al}(\text{OH})_3$ por medio de electrocoagulación utilizando una placa de Al y su posterior conversión a $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, por reacción con H_2SO_4 (figura 8).

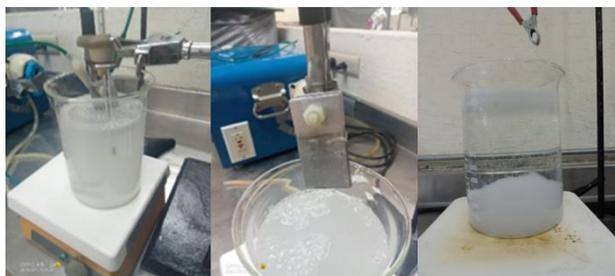


Figura 8. Obtención de $\text{Al}(\text{OH})_3$ por EC y posterior reacción con solución de H_2SO_4

Prueba 3, obtención de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ por medio de reacción de una placa de Al con solución de H_2SO_4 . Los resultados de la producción y de la prueba de jarras fueron excelentes.

Prueba 4 y Prueba 5, reacción de granalla de Al_2O_3 y granalla de Al con H_2SO_4 ; los resultados de ambas pruebas no fueron buenos, y aun con un tiempo de reacción de días, reaccionaron solo parcialmente con la aparición de un precipitado negro.

Prueba 6, reacción de los botones de fundición obtenidos en el horno fabricado, con H_2SO_4 (figura 9). Tampoco hubo resultados favorables, con un tiempo de reacción de días se logró la formación del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, sin embargo, también se presentó la formación de un precipitado negro, posiblemente sulfato u óxido de hierro proveniente de los componentes de la lata. Tuvo que filtrarse y tuvo buen desempeño en la prueba de coagulación - floculación.



Figura 9. Obtención de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ por reacción de botones de la fundición de chatarra de Al con solución de H_2SO_4

DISCUSIÓN

En vista de los resultados obtenidos, se decidió cortar los botones de la fundición, en forma de placas para utilizarlos como electrodos en la EC, se procedió a la aplicación de VCD para la formación de $\text{Al}(\text{OH})_3$, y luego a la producción de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (figura 10). Con muy buenos resultados, en cuanto a tiempo de reacción, sin formación de precipitado negro y prueba de jarras.

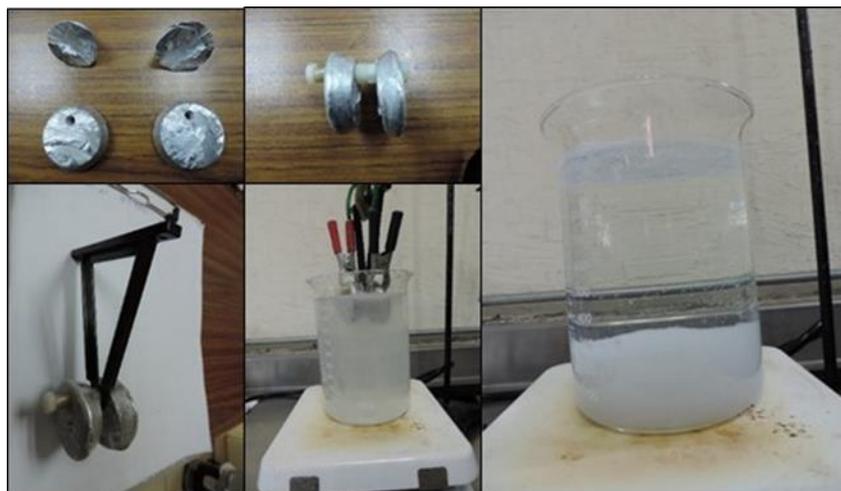


Figura 10. Obtención de $Al_2(SO_4)_3$ por EC utilizando botones de la fundición de chatarra de Al, y reacción con solución de H_2SO_4 .

La figura 11, muestra el proceso para la producción de sulfato de aluminio a partir de chatarra de Al, considerando que la composición de las latas de aluminio puede variar y requerir filtración.

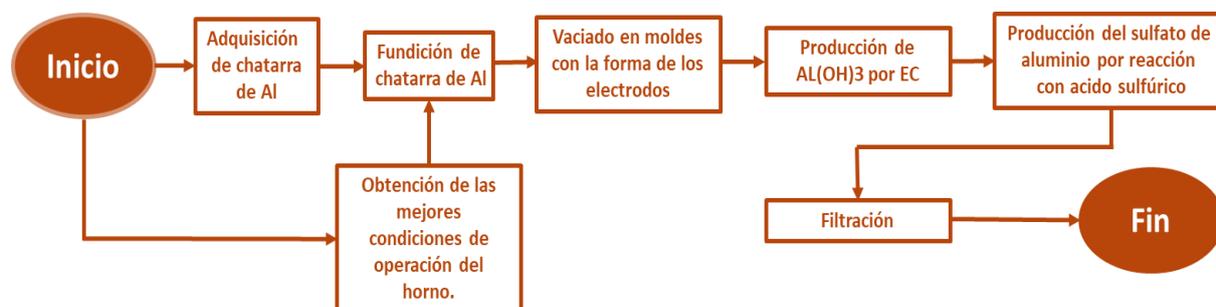


Figura 11. Diagrama de proceso para la producción del sulfato de aluminio a partir de chatarra de Al

CONCLUSIONES

Se cumplieron los objetivos del proyecto de diseñar un horno para la fundición de chatarra de aluminio y se diseñó un proceso para la producción de sulfato de aluminio. Se aplicó un diseño experimental para buscar las mejores condiciones de operación del horno; tanto para la recuperación de aluminio como para la eficiencia energética. El promedio obtenido para él % de recuperación de Al fue de 76.56, y para la Eficiencia Energética de 57.88 %. Mientras que los valores máximos obtenidos para la recuperación del Al, con las mejores condiciones de operación fueron 95.48 y 65.42 % respectivamente. Son muchos los componentes de las latas de aluminio e incluyen impurezas que pueden afectar el proceso. Aunque los principales son: Al, Mg y Fe. Lo que también indica que aún podría refinarse más y mejorar el rendimiento.

Declaración de financiamiento:	El proyecto fue financiado con recursos propios.
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de interés.
Declaración de autores:	Los autores aprueban la versión final del artículo.
Contribución de autores:	Héctor Moreno C.: Hornos, Proceso recuperación Al, Diseño de Experimentos. Ma. Cristina García C.: Hornos y % de recuperación de Al. Adriana Gamboa H.: Hornos y Proceso de obtención de Al. Karla Guevara A.: Pruebas de producción de hidróxido de aluminio. Juana Ma. Nájera I.: Eficiencia Energética.
Agradecimientos:	Al Tecnológico Nacional de México, Campus IT la Laguna por permitir el uso de instalaciones y equipos y a Control de Corrosión de la Laguna SA por la donación de materiales y fabricación del segundo prototipo de horno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kashyap A, Kumar C, Kumar V, Shukla OJ. A DEMATEL model for identifying the impediments to the implementation of circularity in the aluminum industry. *Decision Analytics Journal* [Internet]. 2022;5:100134. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100134>
- Díaz-Romero D, Van den Eynde S, Zaplana I, Zhou C, Sterkens W, Goedemé T, et al. Classification of aluminum scrap by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and RGB + D image fusion using deep learning approaches. *Resources, Conservation and Recycling* [Internet]. 2023;190:106865. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106865>
- Raabe D, Ponge D, Uggowitz P, Roscher M, Paolantonio M, Liu C, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science* [Internet]. 2022;128:100947. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
- Den Eynde SV, Díaz-Romero DJ, Engelen B, Zaplana I, Peeters JR. Assessing the efficiency of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) based sorting of post-consumer aluminium scrap. *Procedia CIRP* [Internet]. 2022;105:278-283. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.046>
- Zhu Y, Cooper DR. An Optimal Reverse Material Supply Chain for U.S. Aluminum Scrap. *Procedia CIRP* [Internet]. 2019;80:677-682. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.065>
- Ding N, Gao F, Wang Z, Gong X, Nie Z. Environment impact analysis of primary aluminum and recycled aluminum. *Procedia Engineering* [Internet]. 2012;27:465-474. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.475>
- Khanlari A, Tuncer AD, Afshari F, Sözen G. Utilization of recyclable aluminum cans as fins in a vertical solar air heating system: An experimental and numerical study. *Journal of Building Engineering* [Internet]. 2023;63(Part A):105446. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105446>
- Lin R, Liu B, Zhang J, Zhang S. Microstructure evolution and properties of 7075 aluminum alloy recycled from scrap aircraft aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology* [Internet]. 2022;19:354-367. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.011>
- Xu X, Li J, Dong Z, Zeng L, Xu Z, Li J. Multiphase modelling of the continuous metallurgical purification process for impurity removing of recycled aluminum. *Journal of Materials Research and Technology* [Internet]. 2022;18:830-840. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.003>
- Grimaud G, Perry N, Laratte B. Life Cycle Assessment of Aluminium Recycling Process: Case of Shredder Cables. *Procedia CIRP* [Internet]. 2016;48:212-218. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.097>
- Castillo Cohaila MA. Revisión sobre clarificación del agua y el uso de semillas de moringa, *Moringa oleifera* Lam. *Rev. Soc. Cient. Py.* [Internet]. 2023;28(1):169-189. Disponible en: <https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.1.169>
- Postolachi L, Rusu V, Lupascu T. Effect of Aluminium Sulphate Aging on Coagulation Process for the Prut River Water Treatment. *Chemistry Journal Moldova* [Internet]. 2016;11 (1):27-32. Disponible en: [https://doi.org/10.19261/cjm.2016.11\(1\).03](https://doi.org/10.19261/cjm.2016.11(1).03)
- González S, Juárez B. Producción y comercialización del sulfato de aluminio en la empresa PROQUIVER, S. A DE C. V. [Tesis de Maestría]. Xalapa: Universidad Veracruzana, Instituto de Investigación y Estudios Superiores de las Ciencias Administrativas; 2006. 73 p. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/31277>
- China CR, Hilonga A, Maguta MM, Nyandoro SS, Kanth SV, Jayakumar GC, et al. Preparation of aluminium sulphate from kaolin and its performance in combination tanning. *Springer Nature Applied Sciences* [Internet]. 2019;1(920). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0979-1>