

Diseño de una Planta Piloto para la Obtención de Aluminato de Sodio Mediante el Método de Precipitación Controlada

Vallejo Fidel¹; Mera Luis²; Lascano Luis³

¹ Escuela Politécnica Nacional, Carrera de Ingeniería Química, Quito, Ecuador

² Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Química, Quito, Ecuador.

³ Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Física, Quito, Ecuador.

Resumen: En este trabajo se ha sintetizado aluminato de sodio por el método de Precipitación Controlada (MPC). Se determinó que un precursor adecuado para obtener aluminato de sodio es el nitrato de aluminio 2,0 M, que fue llevado a un pH de 11,25 mediante la adición como agente precipitante de hidróxido de sodio 2,0 M a 10 mL/min. El polvo precipitado fue sometido a un tratamiento térmico a 900 °C por una hora. El polvo obtenido fue caracterizado por DRX y MEB, los resultados indican que se obtuvo un tamaño promedio de partícula de 9 micras. Además, se realizó el diseño y el análisis económico preliminar de una planta piloto para la producción de 100 kg/semana de aluminato de sodio. El proceso en planta consta de la reacción del nitrato de aluminio 2,0 M con el hidróxido de sodio 2,0 M, la sedimentación del precipitado, el secado en bandejas horizontales por convección y la calcinación en un horno programable. Se realizaron los diagramas de bloque y de flujo del proceso, y la distribución en planta de los equipos y de las áreas de almacenamiento previstas. Finalmente se estimó la tasa interna de retorno (TIR) en dos casos extremos.

Palabras claves: Aluminato de sodio; diseño de plantas químicas; nitrato de aluminio; curva potenciométrica

Plant design for Sodium Aluminate Production by Controlled Precipitation Method

Abstract: In this work, sodium aluminate was obtained by Controlled Precipitation Method. The optimum precursor was aluminum nitrate 2,0 M, that reaches a pH of 11,25 by the addition of sodium hydroxide 2,0 M which rate is 10 mL/min. After this the dry powder was subjected to a heat treatment at 900 °C for 1 hour. The resulting powder was characterized by XDR and SEM, the results indicate that sodium aluminate had an average particle size of 9 microns.

The second part includes the design and preliminary economic analysis of a pilot plant for the production of 100 kg/week of sodium aluminate. The global process involves the reaction of aluminum nitrate with sodium hydroxide, sedimentation of the precipitate solids, the drying in horizontal trays and calcination in a convective oven. In this section, the flow diagram, the block diagram and the layout were made. Finally, IRR was calculated considering two extreme cases.

Keywords: Sodium aluminate; chemical plant design; aluminum nitrate; potentiometric curve

1. INTRODUCCIÓN

El aluminato de sodio ha sido obtenido mediante procesos tradicionales tales como síntesis hidrotérmica, reacción en estado sólido y descomposición térmica. Cao, Y. Zhang y Y. Zhang (2009), presentaron un estudio sobre la preparación de aluminato de sodio a partir de la lixiviación de bauxita en soluciones concentradas de NaOH, en el cual el producto final es un aluminato de sodio hidratado. En dicho estudio se explica el método de reacción en estado sólido para producir aluminato de sodio anhidro, mediante el cual una mezcla de

carbonato de sodio y bauxita o hidróxido de aluminio se calcina en hornos rotatorios a 1000 °C. Otra posibilidad, según esta misma fuente, consiste en secar una solución acuosa de aluminato de sodio proveniente del proceso Bayer, en lechos fluidizados (Rai et al., 2012)

Contreras, Sugita y Ramos (2006) reportan la posibilidad de sintetizar aluminato de sodio a partir de sulfato de sodio básico tratado con carbonato de sodio, que permite la formación de dawsonita de sodio que, a su vez, se somete a diferentes temperaturas entre los 600 y 1100 °C durante 30 minutos.

luis.lascano@epn.edu.ec

López et al. (2011) señalan que, para la obtención de las zeolitas sintéticas se parte de una solución precursora de aluminato de sodio en una solución de hidróxido de sodio, la cual se añade de manera lenta a una solución de sílice. Posteriormente, se calienta a 190 °C durante 24 h, se procede a un filtrado y a un tratamiento térmico final para darle su estructura definitiva a la zeolita.

El método de precipitación controlada para sintetizar polvo cerámico permite un buen control de las características del polvo final obtenido y una buena reproducibilidad del proceso experimental, pues las variables de control son de una índole más simple que en los otros métodos de síntesis, ya que no involucra una excesiva preparación de las muestras ni condiciones extremas de operación, como altas presiones (Rodríguez, 2001; Segal, 1997).

En el Ecuador, la Escuela Politécnica Nacional a través del Departamento de Física ha empleado el método de precipitación controlada para la obtención de óxidos simples de compuestos metálicos (Berrones y Lascano, 2012; Herrera, Cadena y Lascano, 2012).

En este trabajo se ha sintetizado el óxido doble de aluminato de sodio por el método antes mencionado. Si bien Ruiz y Rodríguez (2010) han realizado un trabajo similar de síntesis de aluminato de sodio por el MPC, el presente trabajo aborda dos aspectos: la comparación de la síntesis de dicho compuesto con dos tipos de precursores a nivel de laboratorio y, previo escalamiento, el diseño de una planta piloto para la producción de aluminato de sodio. La producción local de materiales sintéticos de alta pureza es un reto para el Ecuador, de ahí la importancia de hacer diseños de plantas industriales que utilicen procesos validados en el laboratorio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Todos los reactivos químicos empleados fueron de calidad analítica. El agua fue destilada antes de su utilización. Como precursores se utilizaron nitrato de aluminio noahidratado e isopropóxido de aluminio de Aldrich Chemistry, e hidróxido de sodio de Riedel-de-Haën como agente precipitante.

2.2 Síntesis de aluminato de sodio por el método de precipitación controlada

2.2.1. Diseño de los experimentos

Se eligieron como variables de análisis el precursor: nitrato de aluminio e isopropóxido de aluminio; la temperatura final de calcinación: 600, 900 y 1200 °C, y la duración de la meseta en el tratamiento térmico: 1 y 1,5 horas. Una vez determinados el precursor y el tratamiento térmico óptimos, se procedió a aumentar la concentración del mejor precursor a 1,0 M y 2,0 M. Además, se aumentó la tasa de adición del hidróxido de sodio 2,0 M desde 5 mL/min hasta 10 mL/min.

2.2.2. Preparación de soluciones a partir de dos precursores

Precursor nitrato de aluminio

La solución 0,1 M de nitrato de aluminio se preparó pesando 1,875 g que se aforaron con agua destilada en un matraz de 50 mL. A esta solución se adicionó sosa cáustica 2,0 M (preparada con 80 g en un recipiente de 2000 mL), a una tasa de 0,5 mL/min con un dosificador Metrohm. La curva potenciométrica del sistema se obtuvo mediante el registro del cambio de pH en función del volumen añadido de la base.

Precursor isopropóxido de aluminio

Una cantidad de 20,4 g de isopropóxido de aluminio se pesaron para obtener una solución 0,1 M al aforar en un matraz de 250 mL. La adición de sosa cáustica y la obtención de la curva potenciométrica se realizaron de la misma manera que en el caso anterior. El pH óptimo para la finalización de la reacción se determinó mediante el análisis de la curva potenciométrica.

2.3 Caracterización del polvo sintetizado

Se obtuvieron difractogramas de rayos X de todas las muestras calcinadas con un equipo Norelco Philips, con el fin de identificar las fases presentes. Se buscó determinar si el aluminato de sodio es fase mayoritaria en el polvo cerámico mediante la comparación de los picos del difractograma con la base bibliográfica PDF2 del Centro Internacional de Cristalografía. Para ello, las muestras se almacenaron en envases herméticos debido al carácter higroscópico que se observó en ellas. A la muestra con mayor fase de aluminato de sodio se la caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (equipo Tescan Vega II LMU) con el fin de conocer el tamaño y la morfología de las partículas.

2.4 Diagramas de bloque, de flujo y layout del proceso

2.4.1. Diagrama de bloque

Para la síntesis de aluminato de sodio, la solución precursora y el agente precipitante se añaden a un reactor con agitación electromecánica. Una vez que el sistema ha alcanzado el pH adecuado según el análisis de la curva potenciométrica, la solución se transporta a la siguiente etapa que consiste en la separación sólido - líquido. Luego, el polvo seco se calcina en un horno en las condiciones óptimas ya determinadas para obtener aluminato de sodio. El diagrama se muestra en la Figura 1.

2.4.2. Diagrama de flujo

La forma de operación de la planta sería en la modalidad por lotes, y el dimensionamiento de los equipos se realizó para que se produzcan 100 kg por semana de aluminato de sodio en una sola carga.

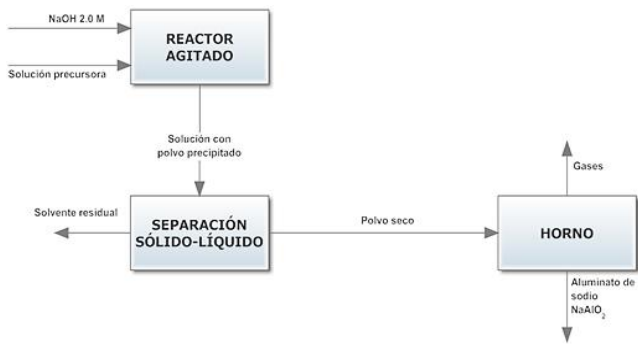


Figura 1. Diagrama de bloque: Proceso de obtención del aluminato de sodio

Reacción del precursor con el agente precipitante

En la primera parte del diagrama de flujo, que corresponde a la reacción, se determinaron los volúmenes necesarios de la solución precursora y del agente precipitante que deben ingresar al reactor.

Separación sólido-líquido

Se debe separar el solvente residual, porque el producto de la reacción de precipitación debe estar seco antes de ingresar a la última etapa del proceso, que es la calcinación (Nonhebel y Moss, 2002).

Calcinación

Se determinó el rendimiento en la calcinación a partir de los datos de masa inicial que entra al horno y masa final que corresponde al aluminato de sodio. Con el valor de los sólidos totales y este rendimiento, se determinaron los valores de los volúmenes de solución iniciales que deben ingresar al reactor, dato que permitió la selección de las bombas necesarias para transportar el fluido desde los tanques de pre-mezcla.

2.4.3. Distribución de los equipos en planta

Se procedió a dimensionar los equipos necesarios para el proceso con los valores de las corrientes obtenidos mediante un balance de masa y energía, y se realizó la distribución de los mismos en la planta piloto (Foust et al., 2000). Se consideraron espacios para las bodegas de almacenaje de producto terminado y de materia prima, así como espacios para reuniones y oficinas, alcanzado un área total de 100 m², aproximadamente.

2.5 Estudio económico preliminar del costo del aluminato de sodio

Una vez determinados los costos de los equipos necesarios para el procesamiento mediante cotización directa con proveedores, se procedió a calcular los valores de la inversión en instalaciones auxiliares y construcciones mediante el uso de porcentajes típicos en la industria química (Peters, Timmerhaus y West, 2003; Towler y Sinnott, 2008). Los costos de materia prima y de venta del producto terminado se obtienen de casas comerciales. Debido a que el objetivo del trabajo fue realizar un análisis preliminar de la planta piloto,

el nivel de confianza del análisis económico es de alrededor del 30 % del costo total determinado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Síntesis y caracterización del aluminato de sodio

3.1.1. Análisis de las curvas potenciométricas

En las Figuras 2 y 3 se presentan las curvas potenciométricas obtenidas con los precursores nitrato de aluminio e isopropóxido de aluminio, respectivamente. La importancia del control del pH radica en que, si es muy bajo, puede producirse una precipitación incompleta porque el sistema se queda en la etapa de formación y crecimiento de los complejos y, en caso contrario, si es muy alto se pueden redisolverse las especies presentes (Ruiz y Rodríguez, 2010). En la curva potenciométrica de la Figura 2 se identifican cuatro zonas definidas por el cambio de pendiente. En la primera zona la sosa cáustica se neutraliza con los iones nitrato presentes en solución, la segunda zona representa el inicio de la nucleación, alcanzando su desarrollo final en la tercera zona y la saturación del sistema en la cuarta, a un pH de 11,25. En la curva potenciométrica de la Figura 3 se diferencian 3 zonas, las mismas que presentan un aumento leve de pH con gran consumo de agente precipitante. La zona de estabilización del pH que indica la saturación del sistema corresponde a valores de pH mayores que 12,4 unidades.

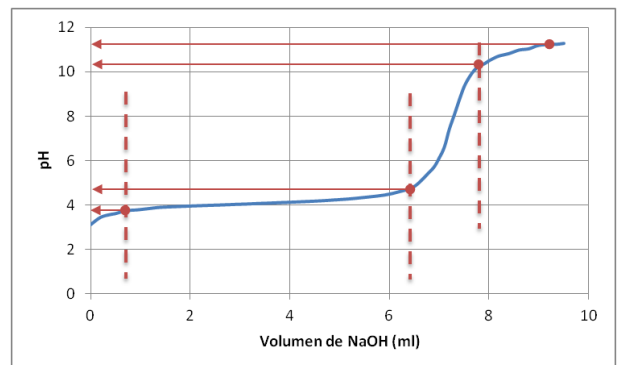


Figura 2. Curva potenciométrica del sistema $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 0,1 M – NaOH 2,0 M

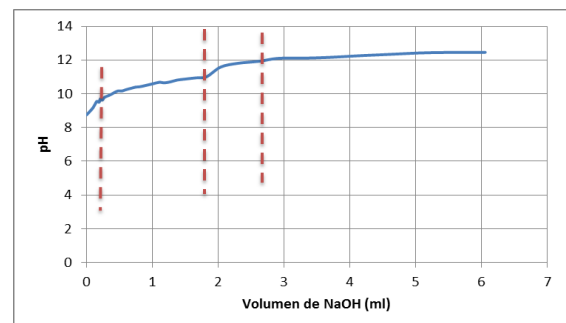


Figura 3. Curva potenciométrica del sistema $\text{C}_9\text{H}_{21}\text{AlO}_3$ 0,1 M – NaOH 2,0 M

Si se comparan las curvas potenciométricas de las soluciones de nitrato de aluminio y de isopropóxido de aluminio se distinguen las siguientes diferencias:

- El pH de la solución de nitrato de aluminio debe ser llevado desde 3,1 hasta 11,25, mientras que el pH del isopropóxido de aluminio debe alcanzar mínimo 12,4, partiendo de 8,4; por lo que la cantidad de NaOH necesario en el último caso es menor para un volumen de solución precursora inicial equivalente.
- Mientras la zona de formación y crecimiento de los núcleos en el caso del nitrato de aluminio abarca el rango de pH comprendido entre 3,8 y 10,2 unidades, cuando se utiliza isopropóxido de aluminio dicha región se encuentra entre el 9,5 y el 12. Esto explicaría la diferencia entre los resultados obtenidos en ambos casos, ya que se requiere que el sodio forme parte de la estructura final del compuesto precipitado, y en el caso del isopropóxido la cantidad de sodio que presenta el sistema antes de la calcinación es baja.

3.1.2 Determinación de las fases cristalinas presentes

En las Figuras 4 y 5 se presentan los difractogramas de los polvos cerámicos obtenidos con cada precursor y tratados a 900 °C durante 1 hora. Se observa que con el precursor nitrato de aluminio (Figura 4) se obtiene aluminato de sodio como fase mayoritaria, lo que no ocurre al utilizar el isopropóxido de aluminio como precursor (Figura 5), donde además la cristalización es baja.

Analizando con mayor profundidad el hecho precedente, y según lo señalado en el numeral anterior, si se comparan las cantidades de solución de hidróxido de sodio necesarias para estabilizar el sistema en cada caso se tiene que para el nitrato de sodio se necesitaron 9,5 mL para 50 mL de solución

precursora, y en el caso del isopropóxido de aluminio se requirieron 5 mL en 250 mL de solución inicial. Esto significa el 19 % para el primer caso y el 2 % para el segundo. Este hecho ratifica que una de las probables razones que explicaría el no haber obtenido aluminato de sodio como fase mayoritaria en el polvo cerámico procesado a partir de isopropóxido de aluminio, fue la cantidad insuficiente de sodio en el polvo precipitado final.

3.1.3 Estudio de la concentración inicial del precursor nitrato de aluminio

Se procedió a variar la concentración del nitrato de aluminio en la solución inicial hasta valores de 1 M y 2 M, manteniendo el tratamiento térmico óptimo previamente determinado. Se espera que la cristalización del compuesto sea similar a la obtenida con la concentración inicial de 0,1 M pues el proceso de calcinación involucra, en forma general, la salida del agua y la formación del nuevo compuesto; ambos factores no dependen de la masa tratada sino del sistema total.

Experimento PTC1

Para preparar 50 mL de solución 1,0 M de nitrato de aluminio se pesaron 18,75 g. Las condiciones del experimento se mantuvieron iguales a las de los anteriores experimentos, excepto la velocidad de adición que se aumentó a 10 mL/min para aumentar la productividad por lotes y disminuir la cantidad de solvente a separar del polvo precipitado.

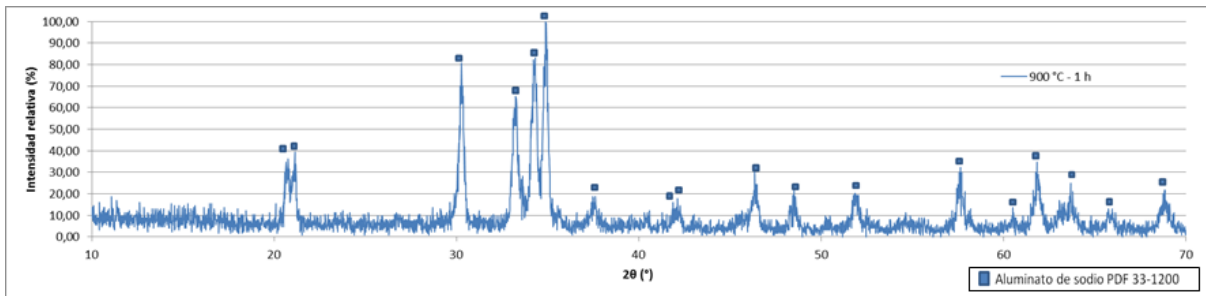


Figura 4. Difractograma del polvo cerámico sintetizado a partir de nitrato de aluminio

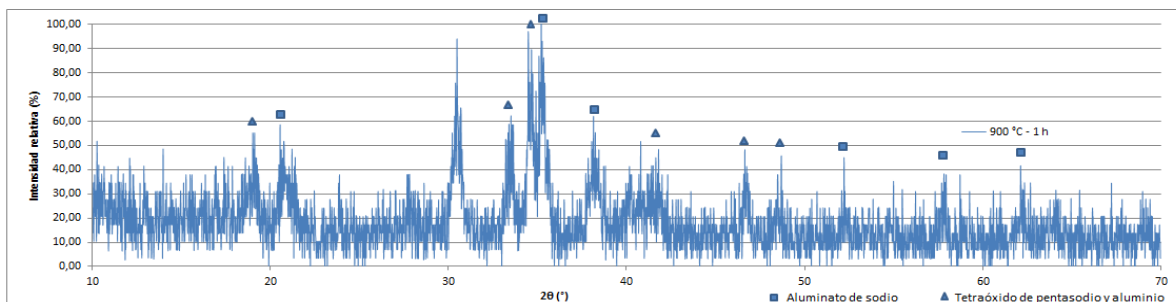


Figura 5. Difractograma del polvo cerámico sintetizado a partir de isopropóxido de aluminio

Experimento PTC2

Para preparar 50 mL de solución 2,0 M de nitrato de aluminio se pesaron 37,50 g. La curva potenciométrica se muestra en la Figura 6. El pH inicial en este caso fue de 2,3, y la región de estabilización y sobresaturación se alcanzó a un pH de 11,26.

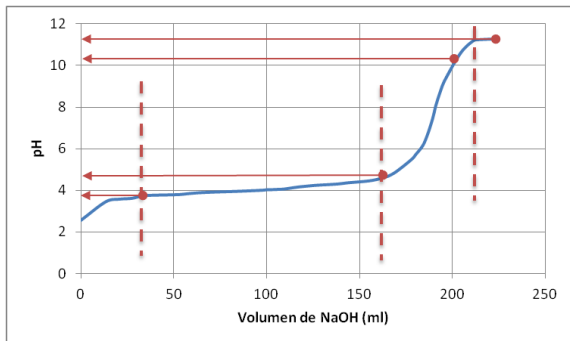


Figura 6. Curva potenciométrica del sistema $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 2 M- NaOH 2,0 M

3.1.4 Caracterización de las fases presentes

En la Figura 7 se presenta el difractograma de rayos X correspondiente a la muestra PTC2. La coincidencia de picos con los de aluminato de sodio en las muestras con una concentración inicial de 1,0 M y 2,0 M es similar a la encontrada con una concentración inicial 0,1 M de precursor. En este caso, la condición experimental óptima es a partir de nitrato de aluminio con una concentración inicial de 2,0 M, que se somete a un tratamiento térmico que está conformado de una rampa de 10 °C/min, hasta los 900 °C y una meseta de una hora.

3.2. Microestructura del material sintetizado

Para determinar el tamaño promedio de partícula se midió el diámetro de 20 partículas en cuatro micrografías obtenidas por MEB, una de ellas se muestra en la Figura 8. Los resultados proporcionan un tamaño de partícula promedio de 9 µm, con una desviación estándar de 2 µm, es decir, existe una dispersión significativa que expresa la heterogeneidad del tamaño de partícula.

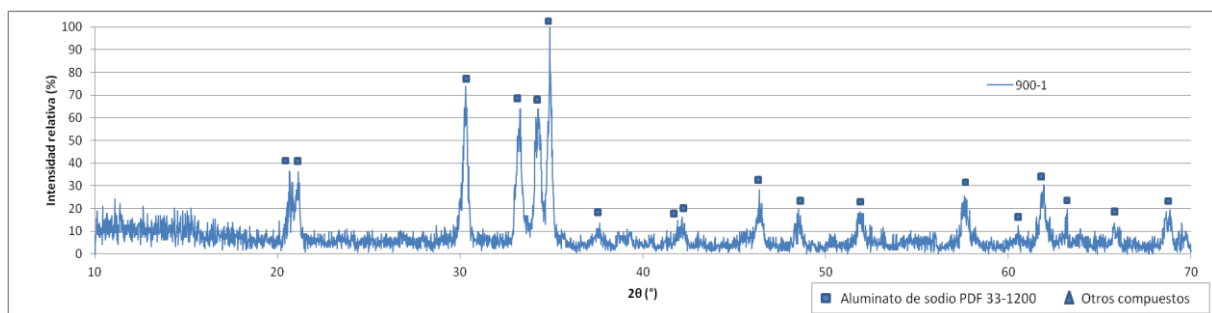


Figura 7. Difractograma de la muestra obtenida en el experimento PTC2

Se analizan dos escenarios económicos. En el primero, el objetivo es encontrar un valor del producto terminado que genere una rentabilidad en la empresa, si los costos de la

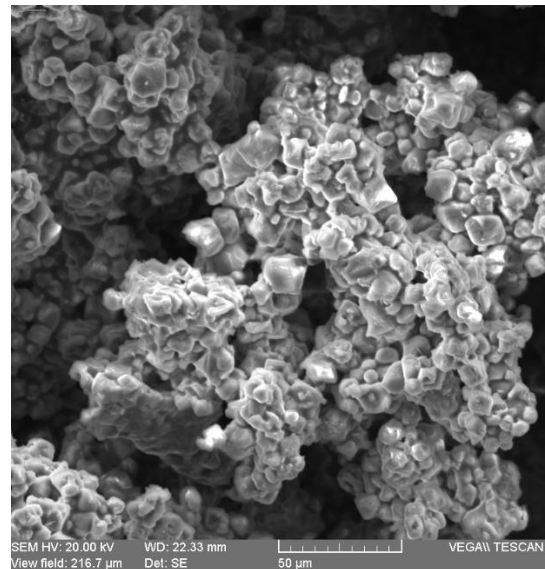


Figura 8. Micrografía de polvo de aluminato de sodio sintetizado a partir de nitrato de aluminio a 900 °C y 1 h

3.3. Diagrama de flujo y distribución de equipos en planta piloto para la obtención de aluminato de sodio

La Tabla 1 presenta los valores de las corrientes para cada lote del proceso de obtención de 100 kg/semana de aluminato de sodio en la planta piloto. Para el desarrollo del trabajo se consideró la presión atmosférica de Quito igual a 0,72 atm. El diagrama de flujo que se muestra en la Figura A1 del Apéndice presenta el código, el nombre y la descripción de los equipos necesarios para el proceso.

3.4. Análisis económico preliminar

Los valores de los equipos necesarios han sido obtenidos en su totalidad de proveedores. En la Tabla A2 del Apéndice se presentan los equipos principales a instalar con sus características, la función que cumplen en el proceso y el costo en el año 2015. El valor total es parte del capital fijo a invertir, lo cual permite calcular el costo total mediante el método de los porcentajes estimados, como se indica en la tabla A3 del Apéndice.

materia prima son los que se indican en la Tabla 2. En el segundo análisis se trata de encontrar el valor unitario del precursor que genere un rendimiento sobre la inversión

inicial, si el precio de venta del aluminato de sodio y de las otras materias primas son los indicados en la Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades de las corrientes del proceso

#	Descripción	Estado de agregación	Valor de la corriente (kg/semana)	T (°C)
1	Nitrato de aluminio	Sólido	1 450,95	20
2	Agua destilada	Líquido	909,22	20
3	Sosa cáustica	Sólido	33,80	20
4	Agua destilada	Líquido	420,00	20
5	Solución 2,0 M Nitrato de aluminio	Líquido	2 360,17	20
6	Solución 2,0 M Hidróxido de sodio	Líquido	453,80	20
7	Producto reactor	Líquido	2 813,97	20
8	Líquido claro	Líquido	2 308,19	20
9	Concentrados	Líquido + Sólido	505,78	20
10	Polvo seco	Sólido	350,00	90
11	Solvente residual	Vapor	155,78	91
12	Gases de calcinación	Gas	250,00	900
13	Aluminato de sodio	Sólido	100,00	20

Tabla 2. Costos de compra y venta de materia prima y producto final

Materia prima	Nitrato de aluminio	de USD 88,27/kg
	Hidróxido de sodio	de USD 1,06/kg
	Agua destilada	USD 0,80/kg
Producto terminado	Aluminato de sodio	de USD 61,1/kg

En la Figura 9 se muestra la variación de la tasa interna de retorno (TIR) con respecto al precio de venta del aluminato de sodio manteniendo constante el precio de compra del precursor. Si se quiere que la TIR sea del 25 % se requiere un precio de venta del producto de USD 255,0/kg. En la Figura 10 se puede observar la variación de la TIR con la variación del costo del precursor si el valor de venta del aluminato de sodio es fijo. Para obtener una TIR del 25 % se requiere un costo de USD 27,4 por kilogramo de precursor. De esta figura se puede concluir también que para que exista un margen de ganancia, el valor del kg de material precursor debe encontrarse por debajo de los USD 34,3.

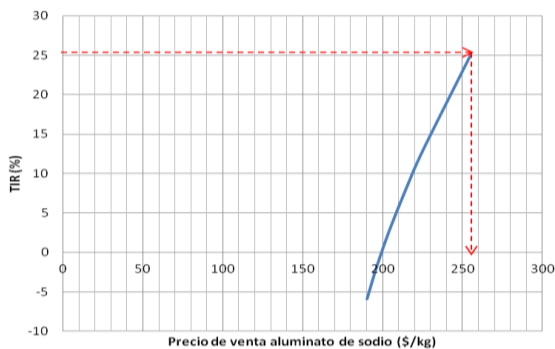


Figura 9. Variación de la TIR con respecto al precio de venta del aluminato de sodio con el precio del precursor constante

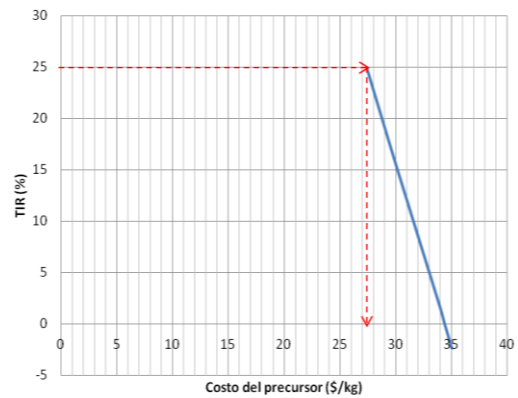


Figura 10. Variación de la TIR con respecto al costo del precursor con el precio de venta del aluminato de sodio constante

4. CONCLUSIONES

Se obtuvo una fase mayoritaria de aluminato de sodio de estructura ortorrómbica mediante el método de precipitación controlada, a partir de una solución de nitrato de aluminio 2,0 M como precursor e hidróxido de sodio 2,0 M como agente precipitante. El tratamiento térmico óptimo determinado en este trabajo consta de una rampa de calentamiento de 10 °C/min, con una temperatura máxima de 900 °C por una hora.

El tamaño de partícula promedio obtenido es de 9 micras según la caracterización por microscopía electrónica de barrido, aceptable en el mercado por comparación con el tamaño de partícula de otros coagulantes, como el sulfato de aluminio, que es de 150 micras.

La variación de concentración inicial de la solución de nitrato de aluminio en el rango estudiado en el presente trabajo, de 0,1 a 2,0 M, no influyó en las fases presentes en el polvo final. Al parecer, esto se debe a que el proceso de obtención del aluminato de sodio depende en mayor medida del tratamiento térmico.

Se ha realizado un diseño preliminar de una planta productora de aluminato de sodio, que trabaje con el método de síntesis de Precipitación Controlada. El costo total de los equipos necesarios para la producción de 100 kg/semana de aluminato de sodio, y que se cotizaron directamente con proveedores nacionales e internacionales, es de USD 28 504,70, y el costo total estimado de forma preliminar de la planta piloto es de USD 95 015,67, al año 2015.

El proyecto no es rentable económicamente con los precios de las materias primas y producto terminado actuales, pues el precio de venta del aluminato de sodio no es mayor que el costo de compra de la materia prima necesaria. Por esta razón, si se mantiene constante el precio del precursor en USD 88,27/kg, el precio de venta necesario para que exista utilidad sería de USD 199,1/kg, y para que exista una TIR del 25 % debería ser de USD 255. Por otra parte, si el precio de venta se considera invariable en USD 61,1/kg el costo del precursor por kilogramo debe costar a lo máximo USD 34,3 y para una TIR igual o mayor que el 25 % el costo debe ser menor que USD 27,4/kg.

REFERENCIAS

- Berrones, M. & Lascano, L. (2012). Síntesis de nanopartículas de hematita por el método de precipitación controlada. *Revista Politécnica*, 30(1), 91-99.
- Cao, S., Zhang, Y. & Zhang, Y. (2009). Preparation of sodium aluminate from the leach liquor of diasporic bauxite in concentrated NaOH solution. *Hydrometallurgy*, 98, 298-303.
- Campo, D., & Rodríguez, J. (2011). ZrO₂ tetragonal obtenido por el método de precipitación controlada. *Dyna*, 78(165), 224-233.
- Contreras, C., Sugita, S., & Ramos, E. (2006). Preparation of Sodium Aluminate from Basic Aluminium Sulfate. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal*, 8(2), 122-129.
- Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L., & Andersen, L. (2000). *Principios de Operaciones Unitarias*. (2da.ed.), (F. Torres, Trad.) México D. F., México: Grupo Patria Cultural S. A.
- Herrera, E., Cadena, F. & Lascano, L. (2012). Estudio de la influencia del número de lavados y del tiempo de envejecimiento en la síntesis de nanopartículas de óxido de cinc por el método de Precipitación Controlada. *Revista Politécnica*, 31(2), 41-50.
- López, C., Sazo, V., Pérez, P., Buhman, S., Urbina, C., & García, A. (2011). Generación de mesoporosidad en zeolitas ZSM-5 sintetizadas en medio orgánico. *Avances en Química*, 6(2), 29-37.
- Nonhebel, G., & Moss, A. (2002). *El secado de los sólidos en la industria química*. (M. Terrizzano, Trad.) Barcelona, España: Reverté.
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant Design and Economics* (Quinta ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Rai, S., Wasewar, K. L., Mukhopadhyay, J., Kyoo, C., & Uslu, H. (2012). Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. *Archives of Environmental Science*, 6, 13-33.
- Rodríguez, J. (2001). Síntesis de polvos cerámicos por el método de precipitación. *Bol.Soc.Esp.Cerám.Vidrio* 40 (3), 173-184.
- Ruiz, C., & Rodríguez, J. (2010). Aluminatos de sodio obtenidos del sistema Al(NO₃)₃ • 9H₂O — NaOH a través del método de precipitación controlada. *Ingeniería e Investigación* 30(2), 16-24.
- Segal, D. (1997). Chemical synthesis of ceramic materials. *Journal of Materials Chemistry*, 7(8), 1297-1305.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2008). *Principles, practice and economics of plant and process design* (Primera ed.). San Diego, California, Estados Unidos de Norteamérica: Butterworth-Heineman.

Apéndice A.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA PILOTO DE ALUMINATO DE SODIO

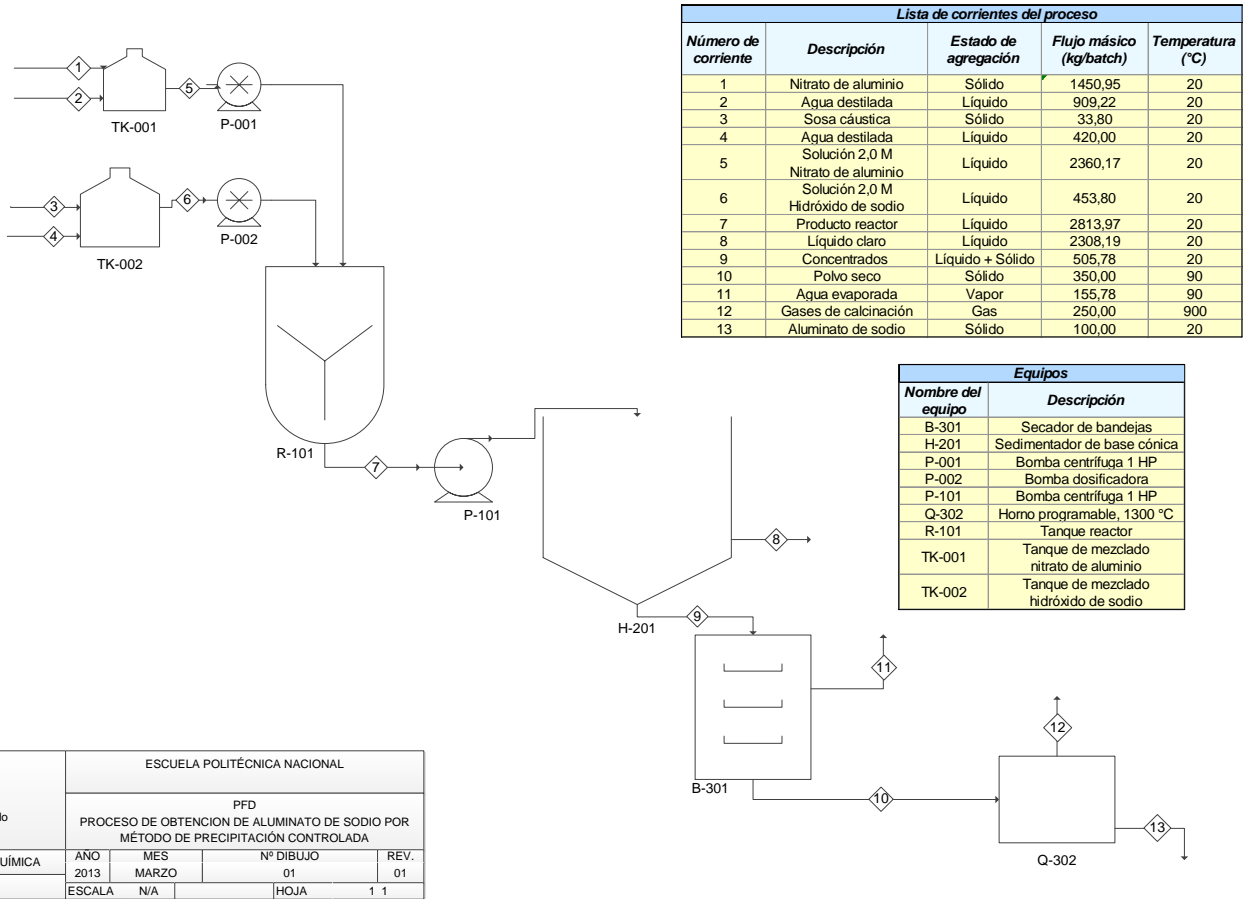


Figura A1. Diagrama de flujo de la planta piloto de producción de aluminato de sodio

Tabla A1. Costos de equipos de la planta piloto, año 2013

Equipo	Descripción	Capacidad	Uso en planta	Costo (USD)
Tanques de almacenamiento y premezcla	Tanques tipos botella de PE con tapa con seguro giratorio	2500 L 500 L	Preparación y almacenamiento de solución de nitrato de aluminio	203,98
			Preparación y almacenamiento de solución de hidróxido de sodio	68,79
Agitador para tanques de almacenamiento y premezcla	Motor con bridas	1 HP 3320 RPM	Mezcla y homogenización de soluciones en tanques de almacenamiento	551,60
Bomba de transporte de fluidos	Alta resistencia química recubierta de teflón	1,5 HP 20 GPM	Transporte de la solución de nitrato de aluminio desde el tanque premezclador al reactor	777,03
Bomba dosificadora	Bomba apta para el bombeo de químicos con control automático de flujo	8 GPH 50 PSI	Alimentación de soluciones desde tanque de almacenamiento hasta tanque reactor	1871,30
Tanque reactor	Tanque tipo botella de PE con tapa con seguro giratorio	1100 L	Reactor	116,87
Bomba	Bomba para el transporte de líquidos con sólidos	1 HP 3500 RPM	Transporte del producto del reactor al sedimentador	3372,99
Agitador para tanque reactor	Motor con bridas	1 HP 3320 RPM	Mezcla y homogenización en tanque reactor	551,60
Tanque sedimentador	Tanque tipo botella de PE con tapa con seguro giratorio	2500 L	Coagulación, floculación y sedimentación	203,98
Secador de bandejas	Secador por convección de bandas horizontal continuo Modelo TM/TL-125	Potencia 8 kW	Secado final del precipitado	10 025,00
Horno programable (incluye dos bandejas de cerámica esmaltada)	Control de temperatura digital	127 L T _{máx} : 1300 °C	Calcinación del precipitado	9 077,00
TOTAL				28 504,70

Tabla A2. Capital a invertir estimado a partir del costo de los equipos adquiridos, año 2013

COSTO	Detalle	Porcentaje típico (%)	Porcentaje estimado	Capital
DIRECTOS	Equipos adquiridos	15-40	30 %	USD 28 504,70
	Instalación de equipos adquiridos	6-14	10 %	USD 9 501,57
	Instrumentación y control instalados	2-8	5 %	USD 4 750,78
	Tuberías instaladas	3-20	4 %	USD 3 800,63
	Conexiones eléctricas	2-10	3 %	USD 2 850,47
	Trabajos civiles incluyendo servicios	3-18	6 %	USD 5 700,94
	Mejoras de terreno	2-5	2 %	USD 1 900,31
	Instalación de servicios auxiliares	8-20	7 %	USD 6 651,10
	Terreno		1-2	2 %
INDIRECTOS	Ingeniería y supervisión	4-21	12 %	USD 11 401,88
	Supervisión y mantenimiento de la construcción	4-16	5 %	USD 4 750,78
	Gastos contratista	2-6	5 %	USD 4 750,78
	Contingencias	5-15	9 %	USD 8 551,41
TOTAL			100 %	USD 95 015,67