UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Ingeniería Química

CÓDIGO DEL TFG: 220-001-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Diseño de una planta industrial para la producción de sulfato de sodio a partir de yeso

Descripción general (resumen y metodología):

El proceso industrial para la obtención de sulfato de sodio a partir de yeso comienza con el acondicionamiento de la materia prima. El yeso, que se recibe en estado sólido, debe someterse a una etapa de molienda mecánica para reducir significativamente su tamaño de partícula, aumentando así el área superficial disponible para que la reacción química sea eficiente. Una vez triturado, este sólido se dispersa en agua dentro de tanques de mezcla para formar una suspensión o lodo homogéneo, lo que facilita su bombeo y manejo continuo hacia la zona principal de la planta.

En el núcleo de la instalación, este lodo rico en sulfato de calcio entra en contacto continuo con una disolución acuosa concentrada de carbonato de sodio dentro de un reactor agitado. En este equipo se produce la reacción de doble descomposición, un proceso heterogéneo. A medida que avanza la conversión, el sulfato del yeso se intercambia con el carbonato, formándose gradualmente una costra de carbonato de calcio sólido alrededor de las partículas mientras el sulfato de sodio pasa a la disolución. Para superar las barreras cinéticas inherentes a esta fase sólido-líquido, el reactor se opera bajo un estricto control de temperatura (generalmente moderada para no disparar el consumo energético) y mantiene un nivel de agitación vigoroso que rompe las capas de producto formado y renueva constantemente la superficie activa de las partículas que aún no han reaccionado.

A la salida del reactor, se obtiene una mezcla compleja que requiere un diseño exhaustivo de las operaciones de separación. La corriente se bombea hacia una unidad de filtración industrial de gran capacidad, como puede ser un filtro rotatorio a vacío. En esta etapa, el carbonato de calcio sólido precipitado queda retenido en el medio filtrante formando una torta, mientras que el líquido transparente o salmuera, que ahora alberga el sulfato de sodio disuelto, atraviesa las mallas.

Durante esta fase de lavado, el objetivo principal es desplazar la máxima cantidad de salmuera atrapada en los intersticios de la torta de filtración. Dimensionar adecuadamente los caudales en esta etapa garantiza una recuperación óptima del producto de interés y asegura la pureza del carbonato de calcio resultante.

Posteriormente, la salmuera filtrada atraviesa una fase de purificación química, ya que habitualmente arrastra impurezas solubles procedentes de la matriz del yeso original (como magnesio o ciertos metales). Mediante un ajuste controlado del pH y la adición de reactivos floculantes en un clarificador, se logra la precipitación y decantación de estas trazas indeseadas.

Una vez que la disolución está completamente clarificada y limpia, entra en la etapa térmica de cristalización y secado. Dependiendo de la presión y la temperatura aplicadas en el cristalizador evaporativo, se induce la nucleación y el crecimiento de los cristales de sulfato de sodio. El control de estas variables termodinámicas es absoluto para evitar la formación de hidratos no deseados si el objetivo comercial es comercializar el producto en su forma anhidra. Finalmente, el magma de cristales se separa del licor madre remanente mediante centrifugación y se introduce en un secador rotatorio, donde se elimina la humedad residual mediante una corriente de aire caliente, obteniendo así un sulfato de sodio de alta pureza listo para su ensacado y expedición.

Tipología: Elaboración de un informe o un proyecto de naturaleza profesional.

Objetivos planteados:

El objetivo general es diseñar una planta industrial para la producción de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y la obtención simultánea de carbonato de calcio ($CaCO_3$) a partir de la conversión química de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), evaluando su viabilidad técnica, económica y su impacto medioambiental en el marco de la economía circular.

Para alcanzar la meta principal, el proyecto contempla inicialmente un estudio termodinámico y cinético detallado que permita establecer las condiciones operativas óptimas del reactor, garantizando así una alta conversión en la reacción heterogénea sólido-líquido. A partir de estas bases, se desarrollará la ingeniería conceptual del proceso mediante la definición de las corrientes y la elaboración del diagrama de flujo. Esta fase conducirá al dimensionamiento de los equipos principales, lo que exigirá la resolución exhaustiva de los balances de materia y energía.

Dicho cálculo se apoyará en el modelado matemático del sistema empleando entornos de programación como Python o Scilab, prestando especial atención al rigor analítico en las operaciones de separación de fases, donde será crucial el manejo preciso de las razones molares para evaluar correctamente la recuperación del producto. Finalmente, el diseño técnico se complementará con un análisis del beneficio medioambiental asociado a la revalorización del yeso, así como con una evaluación de viabilidad económica que estime los costes operativos y de inversión para justificar la rentabilidad de la planta proyectada.

Bibliografía básica:

- Austin, G. T. (1984). Shreve's chemical process industries (5th ed.). McGraw-Hill. (Manual clásico de la industria química que detalla las rutas de producción de químicos inorgánicos pesados, incluyendo el sulfato de sodio y el manejo de yeso).
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2007). Perry's chemical engineers' handbook (8th ed.). McGraw- Hill. (La referencia técnica obligatoria para fundamentar las ecuaciones de los balances de materia, el diseño del filtro a vacío y los principios de la cristalización evaporativa).
- Towler, G., & Sinnott, R. (2012). Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. (Fuente esencial para justificar la elaboración del diagrama de flujo (PFD), la heurística del diseño de la planta y el dimensionamiento del reactor agitado continuo).
- Msila, X., Billing, D. G., & Barnard, W. (2016). Capture and storage of CO2 into waste phosphogypsum: The modified Merseburg process. Clean Technologies and Environmental Policy, 18(9), 2709–2715. https://doi.org/10.1007/s10098-016-1157-4
- Temirov, U., Reymov, A., Namazov, S., & Usanbaev, N. (2020). Product investigation based on technical gypsum reaction with sodium carbonate: Chemical and physicochemical analyses. Universum: Chemistry and Biology, 11(77).
- Zoubir El Ouazzani, Y. (2023). Techno-economic evaluation of the production of new sources of sodium sulphate from secondary sources [Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: MARÍA CARMEN ALMECIJA RODRÍGUEZ

Ámbito de conocimiento/Departamento: INGENIERÍA QUÍMICA

Correo electrónico: mcalmeci@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos:

Ámbito de conocimiento/Departamento:

Correo electrónico:

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos: LUCIA BRIÑAS MALAGON

Correo electrónico: luciabri04@correo.ugr.es

PROPUESTA DE TRABAJO DE FIN DE GRADO

TÍTULO DEL TEMA

Diseño de una planta industrial para la producción de sulfato de sodio a partir de yeso

DATOS PERSONALES

NOMBRE: Lucía Briñas Malagón
DNI: 74533220H
CORREO UGR: luciabri04@correo.ugr.es

OBJETIVO

El objetivo general es diseñar una planta industrial para la producción de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y la obtención simultánea de carbonato de calcio ($CaCO_3$) a partir de la conversión química de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), evaluando su viabilidad técnica, económica y su impacto medioambiental en el marco de la economía circular.

Para alcanzar la meta principal, el proyecto contempla inicialmente un estudio termodinámico y cinético detallado que permita establecer las condiciones operativas óptimas del reactor, garantizando así una alta conversión en la reacción heterogénea sólido-líquido. A partir de estas bases, se desarrollará la ingeniería conceptual del proceso mediante la definición de las corrientes y la elaboración del diagrama de flujo. Esta fase conducirá al dimensionamiento de los equipos principales, lo que exigirá la resolución exhaustiva de los balances de materia y energía. Dicho cálculo se apoyará en el modelado matemático del sistema empleando entornos de programación como Python o Scilab, prestando especial atención al rigor analítico en las operaciones de separación de fases, donde será crucial el manejo preciso de las razones molares para evaluar correctamente la recuperación del producto. Finalmente, el diseño técnico se complementará con un análisis del beneficio medioambiental asociado a la revalorización del yeso, así como con una evaluación de viabilidad económica que estime los costes operativos y de inversión para justificar la rentabilidad de la planta proyectada.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

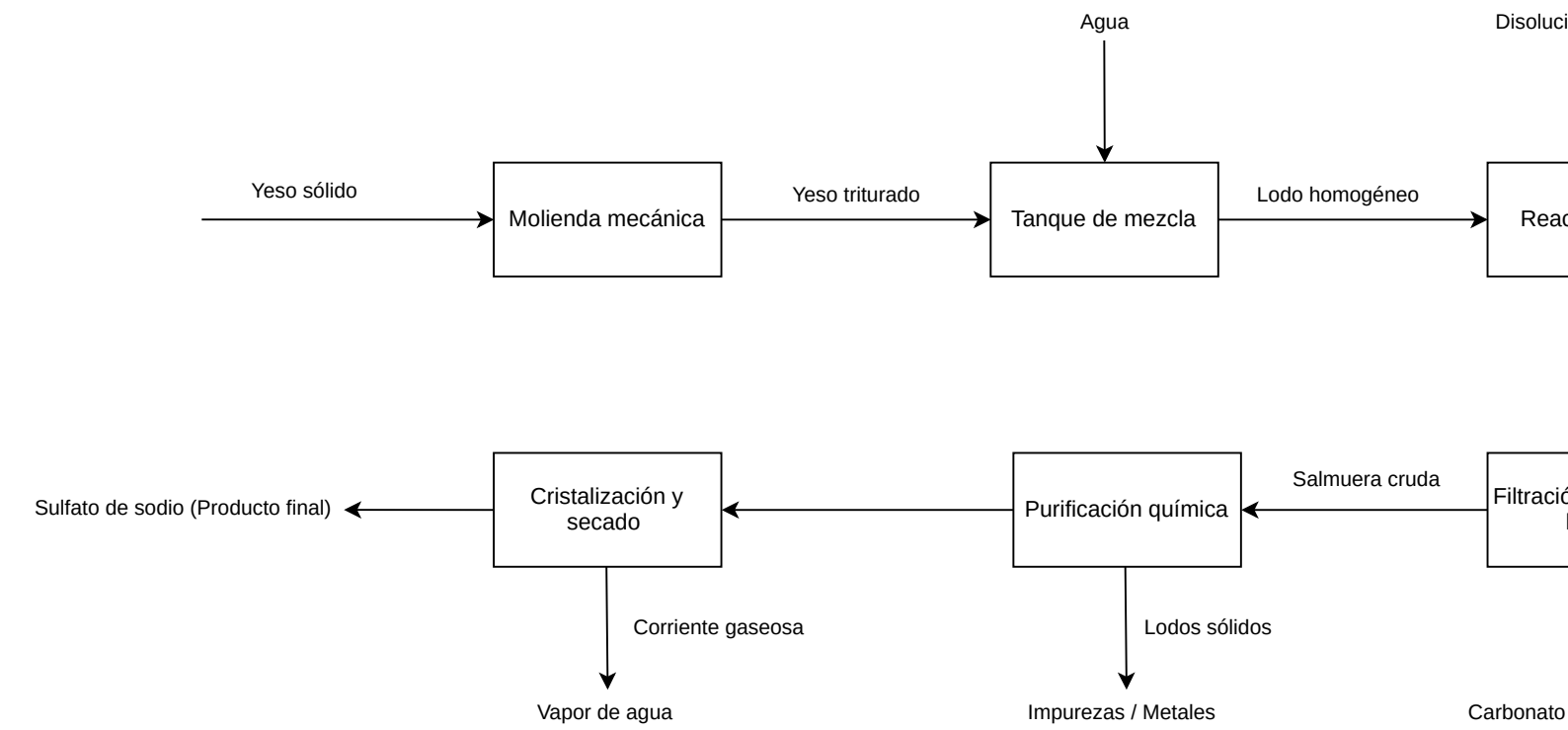
El proceso industrial para la obtención de sulfato de sodio a partir de yeso comienza con el acondicionamiento de la materia prima. El yeso, que se recibe en estado sólido, debe someterse a una etapa de molienda mecánica para reducir significativamente su tamaño de partícula, aumentando así el área superficial disponible para que la reacción química sea eficiente. Una vez triturado, este sólido se dispersa en agua dentro de tanques de mezcla para formar una suspensión o lodo homogéneo, lo que facilita su bombeo y manejo continuo hacia la zona principal de la planta.

En el núcleo de la instalación, este lodo rico en sulfato de calcio entra en contacto continuo con una disolución acuosa concentrada de carbonato de sodio dentro de un reactor agitado. En este equipo se produce la reacción de doble descomposición, un proceso heterogéneo. A medida que avanza la conversión, el sulfato del yeso se intercambia con el carbonato, formándose gradualmente una costra de carbonato de calcio sólido alrededor de las partículas mientras el

sulfato de sodio pasa a la disolución. Para superar las barreras cinéticas inherentes a esta fase sólido-líquido, el reactor se opera bajo un estricto control de temperatura (generalmente moderada para no disparar el consumo energético) y mantiene un nivel de agitación vigoroso que rompe las capas de producto formado y renueva constantemente la superficie activa de las partículas que aún no han reaccionado.

A la salida del reactor, se obtiene una mezcla compleja que requiere un diseño exhaustivo de las operaciones de separación. La corriente se bombea hacia una unidad de filtración industrial de gran capacidad, como puede ser un filtro rotatorio a vacío. En esta etapa, el carbonato de calcio sólido precipitado queda retenido en el medio filtrante formando una torta, mientras que el líquido transparente o salmuera, que ahora alberga el sulfato de sodio disuelto, atraviesa las mallas. Durante esta fase de lavado, el objetivo principal es desplazar la máxima cantidad de salmuera atrapada en los intersticios de la torta de filtración. Dimensionar adecuadamente los caudales en esta etapa garantiza una recuperación óptima del producto de interés y asegura la pureza del carbonato de calcio resultante.

Posteriormente, la salmuera filtrada atraviesa una fase de purificación química, ya que habitualmente arrastra impurezas solubles procedentes de la matriz del yeso original (como magnesio o ciertos metales). Mediante un ajuste controlado del pH y la adición de reactivos floculantes en un clarificador, se logra la precipitación y decantación de estas trazas indeseadas. Una vez que la disolución está completamente clarificada y limpia, entra en la etapa térmica de cristalización y secado. Dependiendo de la presión y la temperatura aplicadas en el cristalizador evaporativo, se induce la nucleación y el crecimiento de los cristales de sulfato de sodio. El control de estas variables termodinámicas es absoluto para evitar la formación de hidratos no deseados si el objetivo comercial es comercializar el producto en su forma anhidra. Finalmente, el magma de cristales se separa del licor madre remanente mediante centrifugación y se introduce en un secador rotatorio, donde se elimina la humedad residual mediante una corriente de aire caliente, obteniendo así un sulfato de sodio de alta pureza listo para su ensacado y expedición.


Agua
Disoluci
Yeso sólido
Molienda mecánica
Yeso triturado
Tanque de mezcla
Lodo homogéneo
Reac
Sulfato de sodio (Producto final)
Cristalización y secado
Purificación química
Salmuera cruda
Filtració
Corriente gaseosa
Lodos sólidos
Vapor de agua
Impurezas / Metales
Carbonato

BIBLIOGRAFÍA

- **Austin, G. T. (1984).** Shreve's chemical process industries (5th ed.). McGraw-Hill. (Manual clásico de la industria química que detalla las rutas de producción de químicos inorgánicos pesados, incluyendo el sulfato de sodio y el manejo de yeso).

- **Perry, R. H., & Green, D. W. (2007).** Perry's chemical engineers' handbook (8th ed.). McGraw-Hill. (La referencia técnica obligatoria para fundamentar las ecuaciones de los balances de materia, el diseño del filtro a vacío y los principios de la cristalización evaporativa).

- **Towler, G., & Sinnott, R. (2012).** Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. (Fuente esencial para justificar la elaboración del diagrama de flujo (PFD), la heurística del diseño de la planta y el dimensionamiento del reactor agitado continuo).

- **Msila, X., Billing, D. G., & Barnard, W. (2016).** Capture and storage of CO_2 into waste phosphogypsum: The modified Merseburg process. Clean Technologies and Environmental Policy, 18(9), 2709–2715. https://doi.org/10.1007/s10098-016-1157-4

- **Temirov, U., Reymov, A., Namazov, S., & Usanbaev, N. (2020).** Product investigation based on technical gypsum reaction with sodium carbonate: Chemical and physicochemical analyses. Universum: Chemistry and Biology, 11(77).

- **Zoubir El Ouazzani, Y. (2023).** Techno-economic evaluation of the production of new sources of sodium sulphate from secondary sources [Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons.