



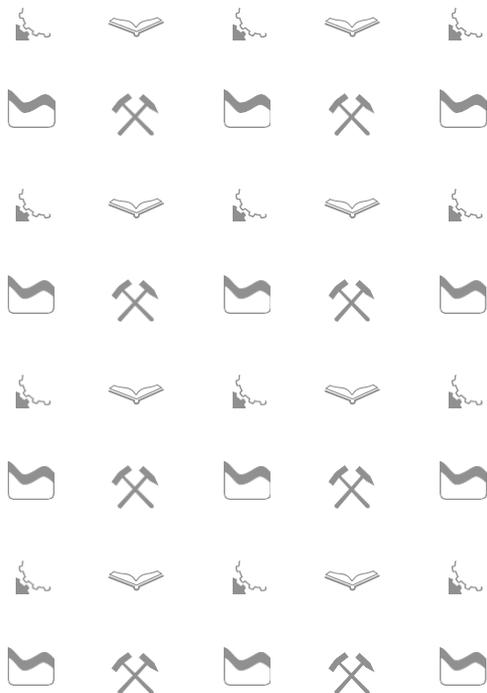
Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Tarea técnica y estudio de prefactibilidad técnico económica para la obtención de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto.

AUTOR(ES): Rolan Despaigne Morote

TUTOR(ES): Dr.C Deisy Cisneros Sánchez
Dr.C Edelio Danquillecourt Álvarez

ASESOR(ES): Ing. Elvira Leyva Navarro



Tarea técnica y estudio de prefactibilidad técnico económica para la obtención de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto.



AUTOR(ES): Rolan Despaigne Morote



TUTOR(ES): Dr.C Deisy Cisneros Sánchez, Inv. Auxiliar
Dr.C Edelio Danquillecourt Álvarez, Prof. Titular



ASESOR(ES): Ing. Elvira Leyva Navarro, Inv. Agregado



Moa, 2024



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el esfuerzo y el apoyo incondicional que siempre me brindaron.

A mis tutores y profesores por todo su esfuerzo en mi formación profesional.

A mi madre Aimara Morote Villalon y a mi padre Rolan Despaigne Arañó por su amor, dedicación en mi formación personal y profesional.

A mis amistades del barrio por siempre tener fe en mí.

A mis amigos de la universidad, Alberto Pérez Larduet, Laydel Diaz Sablón, Emilio De Jesús De La Paz Coello y Carlos Manuel Ramírez Rodríguez por estar siempre presente en los buenos y malos momentos de mi grandiosa etapa de universidad.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a mi abuela Xiomara Villalón Infante por su esfuerzo, dedicación confianza y apoyo en mi crianza desde bien pequeño. Por inculcar en mí sus disimiles valores y principios que hoy me convierten en un hombre de varias virtudes. Estoy seguro que sin ella no hubiese sido posible lograr nada de lo alcanzado hasta hoy. También le dedico este trabajo a mi abuela Gertrudis Arañó Duphil donde quiera que se encuentre siempre estará presente en mi corazón.

RESUMEN

El trabajo se centró en la tarea técnica y el estudio de prefactibilidad técnico económico para la producción de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara. Se realizó un análisis bibliográfico sobre la obtención del licor producto y de los hidróxidos de níquel y cobalto. Se caracterizó el proceso objeto de estudio a partir de resultados los de las pruebas de laboratorio. Se elaboró la Tarea Técnica para diseñar una Planta Piloto con capacidad para producir 1 t/a de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto. Se analizó la factibilidad económica y financiera preliminar para la producción de 545 t/a. Como resultado de la caracterización del proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto, se obtuvo un producto con 52,4 % de níquel y 2,32 % de cobalto y tamaños de cristalito entre 4,20 y 14,64 nm. Se definieron los criterios Técnicos de una Planta Piloto en la cual se previeron eficiencias de precipitación de níquel y cobalto iguales a 99,8 y 99,9 %, respectivamente. En el análisis preliminar de la factibilidad económica y financiera se obtuvo una rentabilidad de la inversión igual a 10,5 %, ligeramente superior al límite establecido para considerar un proyecto factible (10 %), por lo que se valoró que el resultado fue positivo con riesgo de cambiar desfavorablemente ante la variación de precios de materias primas y productos en el mercado.

Palabras clave: hidróxidos de níquel y cobalto, factibilidad técnica, económica y financiera, licor producto, nanopartículas,

SUMMARY

The work focused on the technical task and the technical-economic prefeasibility study for the production of nanoparticles of nickel and cobalt hydroxides from the liquor product of the leaching process of the Comandante Ernesto Che Guevara Nickel and Cobalt Production Company. A bibliographic analysis was carried out on the obtaining of the product liquor and the nickel and cobalt hydroxides. The process under study was characterized based on the results of the laboratory tests. The Technical Task was prepared to design a Pilot Plant with the capacity to produce 1 t/a of nickel and cobalt hydroxide nanoparticles. The preliminary economic and financial feasibility for the production of 545 t/a was analyzed. As a result of the characterization of the synthesis process of nickel and cobalt hydroxides nanoparticles, a product with 52.4% of nickel and 2.32% cobalt and crystallite sizes between 4.20 and 14.64 nm. The Technical criteria of a Pilot Plant were defined in which nickel and cobalt precipitation efficiencies equal to 99.8 and 99.9%, respectively, were anticipated. In the preliminary analysis of the economic and financial feasibility, a profitability of the investment equal to 10.5% was obtained, slightly higher than the limit established to consider a feasible project (10%), so it was assessed that the result was positive with risk of changing unfavorably due to the variation in prices of raw materials and products in the market.

Keywords: nickel and cobalt hydroxides, nanoparticles, product liquor, technical, economic and financial feasibility

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Composición química del licor producto
- Tabla 2. Composición química promedio del hidróxido de níquel y cobalto (%) (Base seca).
- Tabla 3. Valores del tamaño del cristalito (nm)
- Tabla 4. Composición química promedio del licor resultante de la precipitación, g/L
- Tabla 5. Composición química promedio del licor resultante del proceso de lavado, g/L
- Tabla 6. Consumo y costo de materias primas y materiales por cada tonelada de Ni-Co(OH)₂
- Tabla 7. Listado de los principales equipos
- Tabla 8. Balance de masas
- Tabla 9. Costos de Inversión
- Tabla 10. Consumo y costo de materias primas y materiales
- Tabla 11. Costos de Producción

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura.1. Instalación experimental.
- Figura 2. Diagrama de bloques para la determinación del consumo de las materias primas y materiales fundamentales.
- Figura 3. Diagrama de bloques para el cálculo de las características principales de los equipos
- Figura 4. Difractogramas de las muestras de hidróxido de níquel obtenidas a partir de los licores industriales.
- Figura 5. Esquema de etapas u operaciones principales para la síntesis de Ni-Co(OH)₂

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1. Metodología y ecuaciones para el cálculo de los indicadores económicos y financieros
- Anexo 2. Resultados de los indicadores económicos y financieros

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Ni- níquel

MH- metal hidruro

Ni(OH)_2 – hidróxido de níquel(II)

nm- nanómetro

Co – cobalto

Co(OH)_2 – hidróxido de cobalto

VAN – valor actual neto

TIR – tasa interna de retorno

t – toneladas

$^{\circ}\text{C}$ – grados Celsius

H_B - Altura de la bomba

ΔP - Caída de presión

μ - viscosidad

ρ - densidad

η - Eficiencia

rpm – revoluciones por minuto

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 6 |
| 1.1 Proceso de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara | 6 |
| 1.2 Estudio Bibliográfico | 7 |
| 1.2.1 Aspectos Generales sobre los hidróxidos de níquel y cobalto | 7 |
| 1.2.2 Métodos de obtención de los hidróxidos de níquel y cobalto | 8 |
| 1.2.3. Síntesis de hidróxido de níquel y cobalto, a partir de productos intermedios o residuales de procesos metalúrgicos | 10 |
| 1.2.4. Síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto..... | 11 |
| 1.2.5 Aspectos teóricos sobre la evaluación preliminar de la factibilidad técnica, económica y financiera de un proyecto de inversión..... | 12 |
| CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I | 13 |
| CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 16 |
| 2.1 Materias Primas y Reactivos..... | 16 |
| 2.2. Instalación experimental | 16 |
| 2.3 Procedimiento para ejecutar el proceso de precipitación de hidróxidos de níquel y cobalto..... | 17 |
| 2.4 Metodología para elaborar la tarea técnica | 18 |
| 2.5 Metodología para analizar la pre factibilidad económica y financiera | 20 |
| CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II | 21 |
| CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 23 |
| 3.1 Caracterización del proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante | |

| | |
|--|----|
| Ernesto Che Guevara | 23 |
| 3.2 Definición de los criterios Técnicos para la construcción de una planta de producción de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto | 25 |
| 3.2.1 Descripción del proceso tecnológico | 25 |
| 3.2.2. Materias primas y materiales principales..... | 28 |
| 3.2.3 Criterios de diseño | 28 |
| 3.2.4. Consumos..... | 32 |
| 3.2.5. Listado de los principales equipos | 32 |
| 3.2.6 Balance de masas | 33 |
| 3.3 Análisis de pre factibilidad económica, financiera | 33 |
| 3.3.1. Estimación de la inversión fija..... | 34 |
| 3.3.2. Estimación del costo de producción..... | 34 |
| CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III..... | 36 |
| CONCLUSIONES GENERALES..... | 38 |
| RECOMENDACIONES | 39 |
| BIBLIOGRAFIA | 40 |
| ANEXOS | 45 |

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se relaciona con el hidróxido de níquel y cobalto que se obtiene a partir de licores de la industria del níquel, como parte de la estrategia para fomentar el almacenamiento de la energía producida a partir de fuentes renovables en nuestro país.

El agotamiento de los combustibles fósiles y la contaminación ambiental, generada por su uso, así como el crecimiento en la industrialización y la tecnología, hace necesaria fuentes de energías alternativas, más eficientes, convenientes, no contaminantes y seguras, así como sistemas de conversión y almacenamiento energético más eficaces [1-4].

El uso de tecnologías sostenibles supone ciertos problemas, puesto que las fuentes renovables no están siempre activas para la generación de energía, sino que solo se puede usar en los momentos en que dicha fuente de energía es aprovechable (por ejemplo: los días de viento para la energía eólica o los días soleados para la energía solar), lo que representa una de las mayores desventajas porque su empleo es de forma discontinua, debido principalmente a su dependencia con los factores climáticos [2-6].

Es por ello que estos sistemas de generación de energía renovables requieren dispositivos que sean capaces de almacenar de forma eficiente la energía producida por dichas fuentes renovables en períodos de alta demanda e insuficiente disponibilidad [2, 4, 6].

La energía obtenida de las fuentes renovables puede almacenarse bien de forma química, o bien de forma física como energía potencial, cinética, térmica o eléctrica en distintos sistemas de almacenamiento. En la actualidad existen numerosos sistemas capaces de almacenar energía eléctrica en forma de energía química. Estos sistemas son denominados celdas electroquímicas, que incluyen las baterías y los condensadores electroquímicos [3, 6, 7]. Los dispositivos antes mencionados convierten la energía eléctrica en energía química y viceversa; de esta manera se consigue almacenar energía eléctrica en forma de energía química para utilizarla en el momento que falle el suministro de la red eléctrica o simplemente cuando la requieran determinadas aplicaciones que funcionen con independencia de la red. El desarrollo de nuevos materiales activos para baterías recargables y condensadores electroquímicos, que posean una alta capacidad de almacenamiento, sin sacrificar el tiempo necesario para adquirir esta energía y entregarla al sistema eléctrico, es uno de los objetivos en los cuales se encuentran enfrascados los investigadores, proponiendo y evaluando nuevos materiales con dimensiones nanométricas que presenten novedosas propiedades y aplicaciones [8-11]. Dentro de este grupo de productos se encuentra el hidróxido de níquel(II), que es un material electroquímicamente activo, con la capacidad de oxidarse

y reducirse de forma reversible [7].

Por lo general, este hidróxido se obtiene cuando reacciona una disolución de sal de níquel con una base, siendo la precipitación química con hidróxidos de sodio y amonio uno de los métodos más empleados para lograr un producto con los requisitos de calidad requeridos. Adicionando pequeñas concentraciones de diferentes especies metálicas (ej.: cobalto, cromo, manganeso, cinc, etc.), a la mezcla de la reacción, se logra incrementar la capacidad electroquímica que es una propiedad importante del hidróxido [8].

A nivel internacional se han desarrollado múltiples investigaciones encaminadas a mejorar esta propiedad. Algunos de los estudios realizados contemplan la síntesis del hidróxido de níquel a partir de reactivos químicos puros e incluyen el dopaje con otros metales, pero esta práctica es generalmente muy costosa [9].

Una alternativa cada vez más empleada para abaratar el costo de este tipo de procesos es la utilización de residuales o productos intermedios de procesos químicos industriales, que pudiera complementarse con el empleo mínimo del dopaje de algunas de las especies químicas necesarias para mejorar el rendimiento electroquímico. De todos modos, los estudios que se presentan con esta temática son relativamente pocos, la mayoría de ellos aborda el dopaje con compuestos de cobalto, hierro, aluminio, magnesio y cobre por su contribución desde el punto de vista electroquímico y por su abundancia en la naturaleza.

En la zona nororiental de Cuba, específicamente en Moa, se encuentra ubicada la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, en la cual se obtiene el licor producto de níquel y cobalto mediante el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco [8, 11].

A partir de este licor se han realizado estudios en el Centro de Investigaciones del Níquel "Capital Alberto Fernández Montes de Oca" para obtener hidróxidos de níquel con el fin de emplearlos como material activo de los electrodos de las baterías recargables alcalinas [8, 12]. En estos trabajos previos fundamentalmente se abordaron los métodos de síntesis y la caracterización fisicoquímica del hidróxido obtenido bajo diferentes condiciones, pero no se determinó la factibilidad técnica y económica de ejecutar el proceso, por lo que se plantea el siguiente problema científico:

Problema Científico

Escasa información técnica y económica para construir una Planta de producción a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.

Hipótesis

Si se determinan los indicadores técnicos, económicos y financieros de la síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir de licores industriales, se podrá definir la factibilidad de la construcción de una planta comercial para ejecutar el proceso.

Considerando todo lo expuesto, **el objeto** de la presente investigación es proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto y **el campo de acción** está relacionado con las tecnologías y la factibilidad técnico económica para la obtención de nanopartículas de hidróxidos metálicos.

Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica, económica y financiera preliminar de la producción de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.
2. Definir los criterios Técnicos de una Planta Piloto para la síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto.
3. Determinar de manera preliminar los indicadores de factibilidad económica y financiera del proceso.

Resultados e impactos esperados

Como resultado del trabajo se obtienen una Tarea técnica para la construcción de una Planta Piloto de hidróxidos de níquel y cobalto y el Estudio de factibilidad técnico económica preliminar para la implementación del proceso a escala comercial.

Los impactos que se esperan con la introducción práctica de los resultados son los siguientes:

Desde el punto de vista social con el trabajo se logra por la elevación del nivel de conocimientos de los profesionales vinculados al tema, los cuales amplían su cultura sobre los procesos y los requisitos del hidróxido de níquel(II) que se utiliza en la fabricación de las baterías recargables. También abre la posibilidad de generar nuevas fuentes de empleo.

El trabajo posee impacto ambiental porque con la utilización del hidróxido de níquel en baterías recargables contribuye a la reducción del consumo de combustible fósil y de las emanaciones de gases

tóxicos al medioambiente.

El impacto científico y metodológico se evidencia porque el conocimiento sobre los valores más favorables de los parámetros para la síntesis de hidróxido de níquel y cobalto, con el uso del licor producto de la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal, constituye una importante herramienta para generalizar este proceso a otras empresas productoras de níquel que posean una tecnología similar. Desde el punto de vista económico el impacto del trabajo se logra con la implementación práctica del proceso propuesto para convertir el licor producto en hidróxido de níquel y cobalto, lo que posibilita la diversificación de la producción de la Industria Cubana del Níquel y .el incremento de los ingresos en moneda libremente convertible a nuestro país.

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada de la manera siguiente:

Introducción: En ella se define el problema, el objeto, campo de acción, los objetivos generales y específicos, así como la hipótesis de la investigación.

Capítulo I. Fundamentación teórica de la investigación: Mediante el estudio bibliográfico se abordan los aspectos que caracterizan el proceso de obtención del licor producto de níquel y cobalto. Se hace referencia a los métodos para la producción de hidróxidos de níquel y cobalto con énfasis en la precipitación de hidróxidos metálicos a partir de residuales o productos intermedios de la procesos químicos o metalúrgicos

Capítulo II. Materiales y métodos empleados para el desarrollo de la investigación: En este capítulo se describen las características de las materias primas, materiales, la instalación experimental, técnicas de análisis empleadas, las metodologías que sustentan la ejecución del trabajo.

Capítulo III. Análisis y discusión de los resultados: Se realiza la caracterización del proceso en la cual se presentan las condiciones de operación más favorables que se obtienen a partir de las pruebas de laboratorio. Se muestran los valores de eficiencia de precipitación de metales, así como las características químicas del hidróxido y los residuales del proceso. Se presentan los criterios de diseño y los cálculos que fundamentan los principales indicadores técnicos y finalmente se presenta el análisis preliminar de factibilidad económico- financiera.

Conclusiones y Recomendaciones: Se plantean los principales resultados de acuerdo con los objetivos y los aspectos que deben tomarse en consideración para dar continuidad al tema.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El propósito de este capítulo consiste en caracterizar el proceso de obtención del licor producto en la ECG y realizar un estudio bibliográfico que aborde los aspectos relevantes sobre los temas siguientes: generalidades sobre los hidróxidos de níquel y cobalto, características del proceso de obtención de hidróxidos de níquel y cobalto, así como los aspectos teóricos sobre la evaluación económico-financiera de un proyecto de inversión.

1.1 Proceso de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara

En la empresa Productora de níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) se realiza la producción de óxido y sinter de níquel (productos principales) a partir del mineral laterítico [12-15].

El procesamiento del mineral en dicha empresa consta de las etapas básicas siguientes:

- Secado y Molienda del mineral
- Reducción
- Lixiviación y Lavado
- Destilación
- Calcinación y Sinterización

El licor producto de níquel y cobalto se obtiene, mediante el procesamiento de los minerales lateríticos con la tecnología de lixiviación carbonato-amoniacoal y se genera en la Planta de lixiviación y Lavado como se describe a continuación:

El mineral proveniente del proceso de Reducción se mezcla con solución o licor carbonato amoniacoal para formar una pulpa, que se envía desde los tanques de contacto al área de lixiviación pasando por dos etapas de lixiviación. La primera etapa cuenta con seis series de turboaeradores (reactores) y un sedimentador y la segunda etapa con dos series de turboaeradores. También existe una etapa intermedia de enfriamiento o reposo. La lixiviación se realiza con el licor carbonato-amoniacoal en los turboaeradores por medio de aireación de la pulpa.

La pulpa de fondo de los sedimentadores del área de lixiviación se dirige a dos sistemas paralelos de lavado de cinco etapas cada uno. El lavado también se realiza con el licor carbonato amoniacoal por el método de contracorriente en los espesadores.

Una parte del licor enriquecido en níquel y cobalto de la primera etapa constituye el licor producto principal de la Planta de lixiviación y se envía a la Destilación donde extrae el níquel en forma de

carbonato básico y se recupera el amoníaco [16].

El tratamiento del licor producto de la ECG hasta obtener los hidróxidos de níquel y cobalto que se utilizan en esta investigación, se realiza en el Centro de Investigaciones del Níquel.[17].

1.2 Estudio Bibliográfico

1.2.1 Aspectos Generales sobre los hidróxidos de níquel y cobalto

El hidróxido de níquel(II) es un compuesto químico insoluble que tiene propiedades redox. Su fórmula química es Ni(OH)_2 y su forma mineral se conoce como teophrastite. Tiene dos pseudopolimorfos: alfa Ni(OH)_2 y beta Ni(OH)_2 . La estructura alfa se compone de capas de Ni(OH)_2 , que tienen aniones intercalados o moléculas de agua entre ellos. La polimorfa beta, por su estabilidad es el más empleado en las baterías recargables alcalinas [18-25].

El hidróxido de níquel(II) es un material de gran interés por su aplicación potencial en las baterías recargables alcalinas tales como: níquel – cadmio (Ni-Cd), níquel – hierro (Ni-Fe) y níquel- metal hidruro (Ni-MH), entre otras. También constituye el precursor de níquel-manganeso-cobalto (NMC), de las baterías ion litio. El almacenamiento electroquímico de energía en dicho material, se basa en las características reversibles de la reacción de oxidación- reducción del Ni(OH)_2 . Otras aplicaciones del hidróxido de níquel(II) se reportan e en la producción de óxido de níquel, comúnmente utilizado en la industria cerámica o como catalizador [19, 26-28].

En general, el hidróxido de níquel(II) que se emplea en dispositivos electroquímicos (baterías, condensadores) y sistemas catalíticos debe cumplir los siguientes requisitos: uniformidad, morfología y distribución de tamaño de partículas específicas, alta densidad de empaquetamiento (aparente o compactada), calidad constante y alta capacidad para permitir el paso de fluido [22, 29-31]. Para garantizar estos requisitos, es de vital importancia seleccionar adecuadamente el método de obtención, las materias primas y los reactivos necesarios, así como las condiciones de operación del proceso.

El hidróxido de cobalto es un compuesto inorgánico con la fórmula química Co(OH)_2 . Es un sólido cristalino de color rosa pálido o malva que es insoluble en agua [32].

Propiedades:

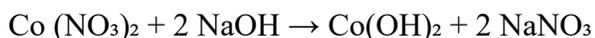
- Fórmula química: Co(OH)_2
- Masa molar: 92,906 g/mol
- Densidad: 3,6 g/cm³

- Punto de fusión: Se descompone antes de fundir
- Solubilidad en agua: Insoluble
- Color: Rosa pálido o malva
- Estructura cristalina: Hexagonal

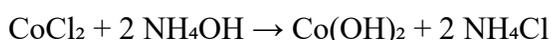
Síntesis:

El hidróxido de cobalto se puede sintetizar mediante varias rutas, que incluyen:

- Reacción de una solución de nitrato de cobalto con hidróxido de sodio:



- Reacción de una solución de cloruro de cobalto con hidróxido de amonio:



El hidróxido de cobalto tiene varias aplicaciones, que incluyen las siguientes:

- Producción de otros compuestos de cobalto: Se utiliza como precursor para la producción del óxido y el carbonato de cobalto.
- Catálisis: Se utiliza como catalizador en diversas reacciones químicas, como la deshidrogenación y la oxidación.
- Pigmentos: Se utiliza como pigmento en pinturas, tintas y cerámicas.
- Adsorbente: Se utiliza como adsorbente para eliminar impurezas de soluciones y gases.

1.2.2 Métodos de obtención de los hidróxidos de níquel y cobalto

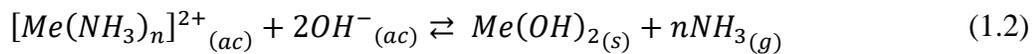
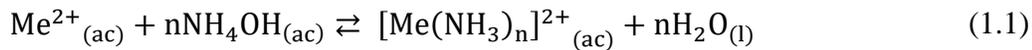
Las vías para la producción del hidróxido de níquel(II) son diversas: precipitación química, electroquímica, sol-gel, hidrotermal, solvotermal, asistida por microondas o ultrasonido. Estas pueden aplicarse de manera independiente o combinada [20, 33, 34].

El presente trabajo solo se refiere a la precipitación química, ya que es uno de los métodos más empleados para obtener el hidróxido de níquel(II) por sus bajos costos. Se realiza mediante la reacción de una sal de níquel con una base. Suelen utilizarse sales como nitrato, cloruro y sulfatos [35]. Usualmente se emplea una disolución de sulfato de níquel, porque los iones sulfato facilitan la precipitación y reducen la cantidad de impurezas absorbidas en la superficie de las partículas del sólido precipitado. Pueden usarse varios agentes precipitantes: hidróxidos de sodio y de amonio, así como la urea, entre otros [36-38].

La precipitación a partir de una disolución de sulfato de níquel con el empleo de hidróxidos de sodio y amonio, se realiza fundamentalmente en dos etapas: primero se emplea hidróxido de amonio para formar

un ion complejo amoniacal de níquel y posteriormente se adiciona hidróxido de sodio hasta alcanzar el pH de precipitación seleccionado. La función de la primera etapa es garantizar la formación del ion complejo para reducir la velocidad de formación del hidróxido de níquel(II), con el propósito de lograr las características de tamaño, forma apropiadas para su uso posterior [30, 39-41].

De manera general, las reacciones principales que se consideran en el proceso descrito anteriormente incluyen la formación del catión complejo amoniacal, precipitación de hidróxidos metálicos y regeneración del hidróxido de amonio, Ecs. (1.1), (1.2) y (1.3), [42-44].



Para aplicar el método de obtención antes mencionado varios autores combinan disoluciones de alta pureza que contienen iones de níquel, cobalto, cadmio u otros iones metálicos. También se utiliza la adición de compuestos metálicos sobre el hidróxido precipitado para mejorar sus propiedades y la vida útil en las baterías recargables, como se describe a continuación:

Shin (1996), realiza la precipitación con hidróxidos de amonio y sodio y luego adiciona cobalto, cadmio o cinc como un aditivo que coprecipita con el hidróxido, para prevenir la formación de un hidróxido de baja densidad [30]. Con el procedimiento antes descrito, se alcanzan altas densidades aparentes y compactadas, pero tiene el inconveniente del uso de dos reactores para la ejecución del proceso, con las dificultades para controlar el balance de los reactivos involucrados.

Fierro (2002) y Fierro (2007) plantea la ejecución del proceso en régimen continuo utilizando un solo reactor para evitar las dificultades antes mencionadas. Esta práctica se ha extendido a casi todos los procesos de obtención de hidróxidos para baterías recargables que se realizan por precipitación química con hidróxidos de amonio y sodio, fundamentalmente cuando se necesitan grandes volúmenes de producción [18, 41, 42, 45-50].

En general, para incrementar la capacidad y la vida útil del material activo de las baterías recargables alcalinas, se adicionan pequeñas cantidades de cobalto, cadmio, bario, litio y zinc a la mezcla de la reacción o al hidróxido ya obtenido [51-55]. Sin embargo, la adición de estos componentes puede generar

los siguientes inconvenientes: formación de una capa de recubrimiento no uniforme y dificultad para controlar las proporciones.

Para evitar algunos de estos inconvenientes se han empleado procesos de coprecipitación química, los cuales son cada vez más utilizados, con el auge de la producción de material catódico del tipo níquel-manganeso-cobalto (NMC), que reduce el costo de las baterías de ion litio.

La mayoría de los procesos de coprecipitación antes referidos, se realizan con mezclas de disoluciones de alta pureza que contienen los elementos metálicos de interés, procedentes de la disolución de cátodos, polvos, óxidos y sales grado reactivo, que son materiales costosos [47, 48, 53, 56].

Todos los aspectos antes referidos para el hidróxido de níquel(II) son válidos para la precipitación del hidróxido de cobalto [57].

1.2.3. Síntesis de hidróxido de níquel y cobalto, a partir de productos intermedios o residuales de procesos metalúrgicos

El uso de materiales generados en etapas intermedias o residuales de procesos metalúrgicos, para obtener hidróxido de níquel y cobalto con el fin de emplearlo en baterías recargables no está muy extendido, pero adquiere cada vez más importancia ante la necesidad de contar con materias primas más baratas y reducir el impacto medio ambiental de los procesos. Varios estudios reportan la obtención de hidróxido de níquel y cobalto con el uso de disoluciones generadas a partir de baterías gastadas, catalizadores agotados y residuales de procesos de electrólisis [29, 57-60].

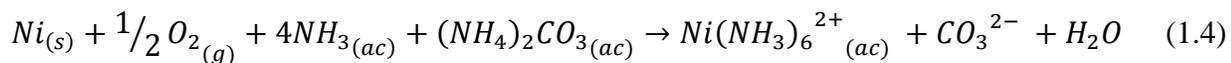
Yang y col (2015) proponen un método de síntesis directa de compuestos de níquel, cobalto y manganeso para su empleo en baterías recargables. Utilizan el método de coprecipitación a partir de disoluciones preparadas con cátodos de baterías gastadas, en el cual recomiendan el ajuste de concentraciones de los componentes de las disoluciones y del pH de lixiviación de materiales catódicos regenerados. Posteriormente precipitan los hidróxidos de Ni, Co y Mn, sin necesidad de separarlos. El material obtenido por esta vía posee rendimiento electroquímico similar al obtenido con materiales producidos con reactivos químicos puros [57, 59]. Fierro y col. (2012) realizan un tratamiento semejante al descrito anteriormente a partir de una disolución residual de un proceso de electrólisis [29].

En los estudios mencionados anteriormente, se realiza la separación de las impurezas hasta los niveles requeridos, manteniendo en la disolución hasta tres componentes metálicos. Luego se aprovechan métodos de síntesis ya establecidos, tales como: la precipitación química a partir de disoluciones de

sulfato de níquel, con la utilización de un ion donador de amonio e hidróxido de sodio [30, 39, 61].

La secuencia de síntesis descrita exige múltiples etapas, entre las que se incluyen: lixiviación, precipitación química, destilación y adición de otros reactivos, para el ajuste de concentraciones y acondicionamiento de las disoluciones, como etapas previas a la precipitación del hidróxido, propiciando pérdidas de especies metálicas e incremento de los costos. Lo anterior, requiere la definición de las condiciones de operación que favorecen el proceso, teniendo en cuenta las características específicas de las disoluciones producidas por esta vía, para cumplir los requisitos de calidad del hidróxido.

Específicamente cuando se trata del licor producto de la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal no se necesita realizar la etapa de formación del complejo amoniacal, porque como resultado del proceso de lixiviación los iones de níquel y cobalto se encuentran formando compuestos complejos con el amoniaco [62], como se muestra en la ecuación (1.4).



En trabajos recientes de Videaux y col (2023) se evaluó la precipitación de hidróxido de níquel a partir del licor producto de la lixiviación carbonato amoniacal el cual contenía contenidos de níquel y cobalto iguales a 7,83 y 0,044 g/L, respectivamente. El procedimiento consistió en la pre-destilación del licor y la posterior precipitación del níquel con hidróxido de sodio. Se obtuvo una eficiencia de precipitación de níquel igual 92,41 % con un consumo específico de 5,25 g NaOH por g Ni(OH)₂ [63].

1.2.4. Síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto

Una nanopartícula (nanopolvo, nanoracimo, o nanocristal) es una partícula que posee las tres dimensiones menores que 100 nm [64]. Los materiales nano-estructurados se están explorando extensamente desde el punto de vista científico y tecnológico en la obtención de nuevos materiales funcionales que presenten novedosas propiedades y aplicaciones [65-68].

En los últimos años se ha incrementado el interés por la síntesis de nano cristales del óxido e hidróxido de níquel, debido a sus propiedades [69]. Lei Danni y col [70], sintetizaron nanocompuestos de óxidos de níquel y hierro para su uso como ánodos y cátodos en baterías alcalinas recargables de Ni– Fe, las cuales demostraron capacidades de descarga muy altas (800 mAh g⁻¹ a 200 mA g⁻¹ densidad de corriente), que exceden al valor reportados para las pilas comerciales de Ni-Fe en casi un orden de magnitud, a densidades de corriente comparables.

Otros autores estudiaron el comportamiento de nano estructuras de hidróxido de níquel como electrodos

en supercapacitores [67, 69, 71].

Las nanopartículas pueden aumentar la superficie de contacto dentro de las baterías que absorben energía, provocando un aumento en la capacidad de carga de las mismas.

1.2.5 Aspectos teóricos sobre la evaluación preliminar de la factibilidad técnica, económica y financiera de un proyecto de inversión

La Factibilidad Técnica se refiere a los recursos necesarios como herramientas, conocimientos, habilidades, experiencia, etc., que son necesarios para efectuar las actividades o procesos que requiere el proyecto [72]. Después de una revisión cuidadosa de la necesidad social o de ingeniería y de examinar la literatura, el ingeniero de diseño frecuentemente encuentra un desafío importante al crear un nuevo proceso o mejorar significativamente un proceso existente para satisfacer esta necesidad. Esta parte del diseño del proceso implica la síntesis de varias configuraciones de operaciones de procesamiento que producirán un producto de manera confiable, segura y económica con un alto rendimiento y un mínimo de subproductos o desperdiciar.

En el proceso de sintetizar un diagrama de flujo de operaciones de proceso para convertir materias primas materiales a los productos deseados, el ingeniero de diseño primero debe seleccionar el procesamiento modo: ya sea por lotes o continuo. Luego hay que tomar una decisión sobre las materias primas, productos y subproductos involucrados en el proceso. A esto le sigue una revisión de la operaciones principales requeridas para lograr el producto deseado y luego ensamblar diferentes configuraciones de estas operaciones de proceso [73].

La evaluación económico-financiera de un proceso inversionista, se utiliza para determinar el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto, el costo total de la operación de la planta (que abarque la función de producción, administración y ventas), así como otra serie de criterios que comparan flujos de beneficios y costos. El resultado de la evaluación se mide a través de distintos criterios, dentro de los cuales se encuentra el Valor Actual Neto (VAN) la tasa interna de retorno (TIR) y la rentabilidad de la inversión (RI). Los dos primeros son los que se aplican con mayor frecuencia pero la rentabilidad de la inversión es muy útil para análisis de factibilidad preliminares [73, 74].

En todos los casos para determinar los criterios antes mencionados se determinan indicadores tales como: Inversión inicial, costo de producción, ingresos por ventas beneficios o utilidad.

La inversión inicial incluye la inversión fija y la inversión operativa: la primera se refiere al costo de instalaciones necesarias para la construcción de una nueva planta y la segunda comprende los fondos en

efectivo o en forma natural, necesarios para arrancar y mantener en operación una planta (inventarios y reservas).

El valor de la inversión fija puede estimarse por varios métodos, dentro de los cuales se encuentra el método de estudio o de los factores cuyo resultado se obtiene sobre la base del valor de los equipos principales. Con este método se comete un error aproximadamente del 30 %. La inversión operativa suele estimarse entre un 10 y un 20 % de la inversión fija [73].

El beneficio o utilidad es la cantidad de dinero que resulta de la diferencia entre los ingresos por ventas y el costo de producción. Los ingresos por venta son los montos de dinero que se obtienen de la venta de la producción obtenida a un precio dado. El costo de producción es el conjunto de gastos económicos de una planta o proceso industrial, durante un período de tiempo dado. Los costos totales del producto se calculan comúnmente sobre una de tres bases: diario, por unidad de producto o anual. El costo anual es probablemente la mejor opción para los análisis económicos [73, 75].

La rentabilidad de la inversión relaciona el beneficio de una empresa con los recursos que han sido invertidos para obtenerlo y siempre que sea superior al 10 %, el proyecto se considera económicamente factible.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I

1. La caracterización del proceso de obtención del licor producto de Ni y Co de la Empresa Ernesto Che Guevara permitió conocer que este licor se obtiene, mediante el procesamiento de los minerales lateríticos con la tecnología de lixiviación carbonato-amoniacal y se genera en la Planta de lixiviación y Lavado.
2. Los hidróxido de níquel y cobalto para baterías recargables, se pueden obtener a partir de materiales de alta pureza y productos derivados procesos químicos y metalúrgicos.
3. Se pudo establecer que cuando se trata del licor producto de la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal no se necesita realizar la etapa de formación del complejo amoniacal para la precipitación de hidróxidos, porque como resultado del proceso de lixiviación los iones de níquel y cobalto ya se encuentran formando compuestos complejos con el amoniaco.
4. Se confirmó que las nanopartículas de hidróxidos metálicos pueden beneficiar el rendimiento de las baterías recargables, ya que aumentan la superficie de contacto donde se absorbe la energía y provocan un aumento en la capacidad de carga.

5. La evaluación de la factibilidad técnica de un proceso incluye la revisión de las operaciones principales requeridas, materias primas y otros recursos necesarios para lograr el producto deseado, mientras que la evaluación de la factibilidad económica y financiera se rige por diferentes indicadores dentro de los cuales se incluye la rentabilidad de la inversión. Este indicador relaciona, el beneficio de una empresa con los recursos que han sido invertidos para obtenerlo y siempre que su valor sea superior a 10 %, el proyecto se considera factible.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

El propósito de este capítulo radica en mostrar los equipos, la metodología de cálculo, las técnicas de análisis empleadas y la descripción del procedimiento experimental a aplicar en el proceso de obtención de nanopartículas de hidróxido de níquel y cobalto. También se presentan las metodologías para realizar los cálculos de los indicadores técnicos, económicos y financieros del proceso

2.1 Materias Primas y Reactivos

Materia prima

Como materia prima se emplea el licor producto que se produce en el proceso Caron de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los licores industriales, (g/L)

| Ni | Co | Fe | Cu | Zn | Mg | Mn | Ca | Na | NH ₃ |
|------|------------------|--------|-------|-------|--------------------|-------|------|------|-----------------|
| 6,59 | 0,3 ¹ | 0,0082 | 0,021 | 0,016 | 0,092 ¹ | 0,262 | 1,02 | 0,03 | 44,18 |

¹ Dato asumido

Reactivos

El reactivo que se utiliza en todos los experimentos es el hidróxido de sodio (98 % de pureza, Merck, Alemania).

2.2. Instalación experimental

La instalación experimental se muestra en la figura 1



Figura. 1 Instalación experimental.

Donde:

1. Agitador
2. Impelente
3. Reactor encamisado
4. Bomba peristáltica 1
5. Bomba peristáltica 2
6. Termostato
7. pHmetro

Para realizar la filtración, lavado, secado y molienda del producto obtenido se emplean los utensilios y equipos siguientes: embudo Büchner (diámetros: 5; 12,5 y 15 mm), kitasatos y beakers (Volumen: 0,5; 1, 2 y 5 L), bomba de vacío, estufa eléctrica, molino de bolas.

2.3 Procedimiento para ejecutar el proceso de precipitación de hidróxidos de níquel y cobalto

El procedimiento para las pruebas de precipitación de hidróxidos de níquel y cobalto consta de los pasos siguientes:

- 1 Añadir al reactor el volumen de la solución de trabajo
- 2 Calentar a la temperatura de trabajo. Comenzar la agitación a la velocidad fijada para el experimento.
- 3 Añadir lentamente la solución de hidróxido de sodio, a la concentración definida, al reactor utilizando bombas peristálticas, manteniendo constante el flujo, hasta llegar al valor de pH establecido para la prueba.
- 4 Luego de 3 horas de alcanzado el pH de precipitación se termina la prueba, se filtra la pulpa y se separa el licor residual del sólido, hidróxido de níquel.
- 5 Se toma una muestra del sólido obtenido para caracterización químico-física.
- 6 Se prepara una pulpa utilizando el hidróxido de níquel obtenido con agua, relación L/S 2:1, se calienta a 70 °C y se ajusta pH 13 con hidróxido de sodio.
- 7 Se filtra la pulpa y se procede al lavado del sólido. El lavado se realiza en 4 etapas con una relación Líquido: Sólido (L: S) de 5 a 1 con agua a 70 °C. Se mide y se toma una muestra del licor filtrado y se caracteriza químicamente.

- 8 El licor filtrado se mide, se toma muestra para caracterizar y se desecha.
- 9 El sólido filtrado se pesa, se seca a 80 °C durante 24 h en estufa, se pesa, tritura, tamiza y se envía al laboratorio.

2.4 Metodología para elaborar la tarea técnica

Para confeccionar la tarea técnica se realiza el cálculo del consumo del licor producto y de los diferentes compuestos para la obtención de hidróxido de níquel y cobalto a través de un balance de masas con los datos suministrados de la Empresa Ernesto Che Guevara, los datos obtenidos en el laboratorio y los datos de la bibliografía y estudios previos, mostrados en el diagrama de bloque siguiente:

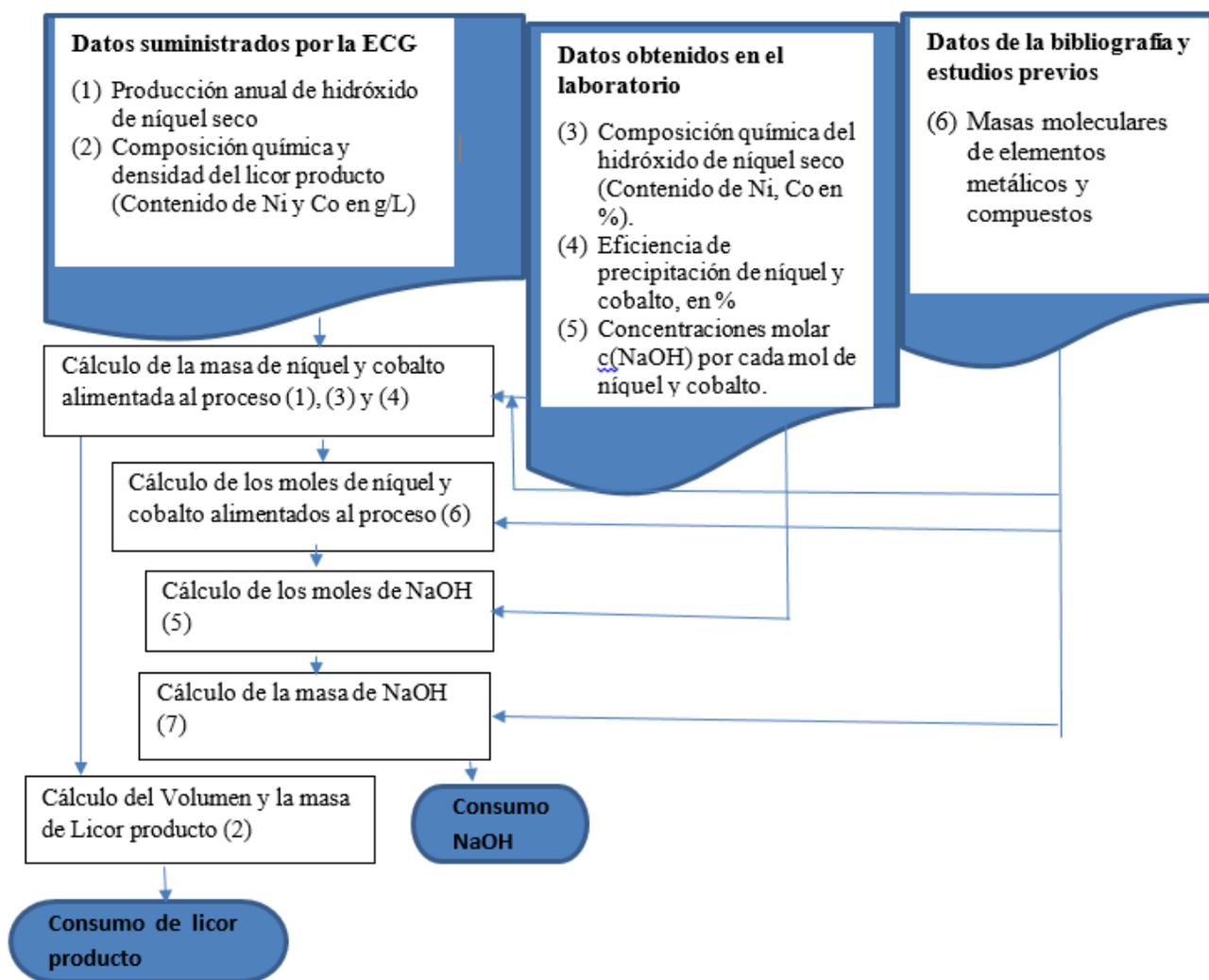


Figura 2. Diagrama de bloques para la determinación del consumo de las materias primas y materiales fundamentales

Posteriormente se procede con los cálculos técnicos que permitan determinar las dimensiones de los equipos fundamentales en la secuencia que se muestra en la figura 3:

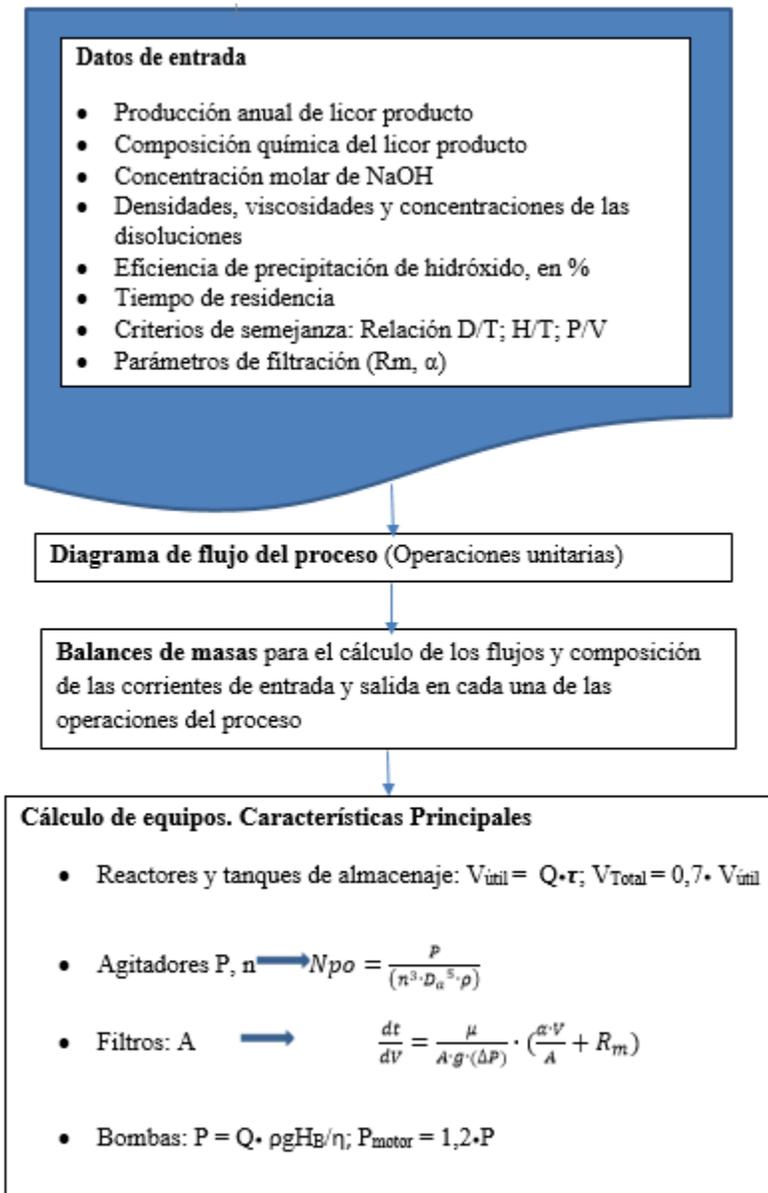


Figura 3. Diagrama de bloques para el cálculo de las características principales de los equipos

Donde:

Q-Flujo volumétrico

n- velocidad de agitación

Npo- Número de potencia

V- Volumen de Filtrado

A- área de filtración

P- Potencia

H_B - Altura de la bomba

ΔP - Caída de presión

μ - viscosidad

ρ - densidad

η - Eficiencia

2.5 Metodología para analizar la pre factibilidad económica y financiera

El análisis de la factibilidad económica y financiera tiene un alcance preliminar, teniendo en cuenta que la síntesis de los hidróxidos de níquel y cobalto del proceso se ejecuta a nivel de laboratorio. Para evaluar la factibilidad se utiliza como indicador la rentabilidad de la inversión, según los pasos que se describen a continuación [15, 73]:

1. Tomar como referencia la información sobre las características de las etapas u operaciones principales de cada uno de los procesos (Fundamentalmente los equipos necesarios y el consumo de materias primas, materiales).
2. Estimar los costos de inversión mediante el método de los factores, a partir de los precios de los equipos principales.
3. Estimar el costo total de producción por cada tonelada de producto (Incluye costos de materias primas y materiales, mano de obra, mantenimiento y servicios, entre otros).
4. Estimar el precio de venta por cada tonelada de producto.
5. Estimar el beneficio a obtener mediante el cálculo de la diferencia entre el precio de venta y el costo de producción para cada tonelada de producto.
6. Se calcula el valor de rentabilidad de la inversión por la relación de los beneficios después de impuestos entre los fondos propios. Si la rentabilidad es superior al 10 %, el proceso es factible.

Todos los resultados se estiman en CUP, según la tasa de cambio de 1 USD = 24 CUP.

Las ecuaciones para el cálculo de los indicadores económicos y financieros se presentan en el anexo 3.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II

- 1 Se presentó el procedimiento para el tratamiento del licor producto generado en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco, mediante coprecipitación con hidróxido de sodio.
- 2 Se seleccionó una metodología basada en los datos aportados por la industria, experimentales y extraídos de la literatura para determinar el consumo de materias primas, materiales y realizar los cálculos para la selección y dimensionamiento de los equipos. .
- 3 Se escogió la tasa de rentabilidad de la inversión como indicador para evaluar la pre factibilidad económica y financiera del proceso.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se muestran y evalúan los resultados de las pruebas experimentales que permiten seleccionar las mejores condiciones de operación y sobre esta base, realizar los cálculos técnicos y evaluar de forma preliminar desde el punto de vista económico y financiero, el proceso de obtención de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto de la ECG.

3.1 Caracterización del proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara

El proceso de precipitación se realizó con las condiciones y resultados siguientes:

- Temperatura: 70 °C
- pH del licor producto: 8,7
- Volumen de NaOH: 250 mL
- Concentración de NaOH: 240 g/L
- Tiempo de residencia en el reactor de precipitación: 3 h
- Volumen del licor de trabajo (licor producto): 400 mL
- Agitación: 400 rpm
- Flujo de adición del reactivo NaOH: 23 mL/min.
- pH inicial del licor producto: 8,7
- pH de trabajo en el reactor: 13
- Volumen total de pulpa de hidróxido de Ni y Co: 670 mL
- Densidad de la pulpa de hidróxido de Ni y Co : 1,088 g/mL
- Volumen final del licor residual de la precipitación: 600 ml
- pH licor residual: 13,22
- Densidad del licor residual: 1,077 mL
- Peso sólido húmedo (torta de hidróxido de Ni y Co): 17,8 g
- Peso seco del sólido (torta de hidróxido de Ni y Co): 4,94 g

Como resultado de la precipitación se obtuvo un producto fino, de color verde-gris. En la tabla 2 se muestran los valores de los elementos presentes en el hidróxido de níquel y cobalto.

Tabla 2. Composición química promedio del hidróxido de níquel y cobalto (%) (Base seca).

| Ni | Co | Fe | Cu | Zn | Mg | Mn | Na |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 52,40 | 2,32 | 0,04 | 0,17 | 0,04 | 0,30 | 0,06 | 0,08 |

En la tabla 2 observó que en el hidróxido obtenido a partir de los licores industriales, bajo las mismas condiciones de temperatura, flujo de adición de reactivos, pH, tiempo de reacción y agitación el contenido de níquel osciló entre un 51 y 53 %. El contenido de Co estuvo alrededor de un 2 %.

El contenido de cobalto en el hidróxido puede influir de forma positiva en las propiedades eléctricas y electroquímicas del material, cuando se evalúe como electrodo redox en baterías del tipo Ni/Fe. Los demás elementos presentes en la muestra constituyen impurezas, cuyo contenido total es igual o menor que 1 %.

En los valores reportados en la tabla 2 se observó que el producto obtenido es un hidróxido de níquel con un contenido de níquel menor que los valores reportados por otros autores [76, 77].

Por otro lado, en la figura 4 se pudo comprobar que todas las muestras contienen como fase principal el hidróxido de níquel en su fase beta como indican el patrón de difracción que se presenta a continuación:

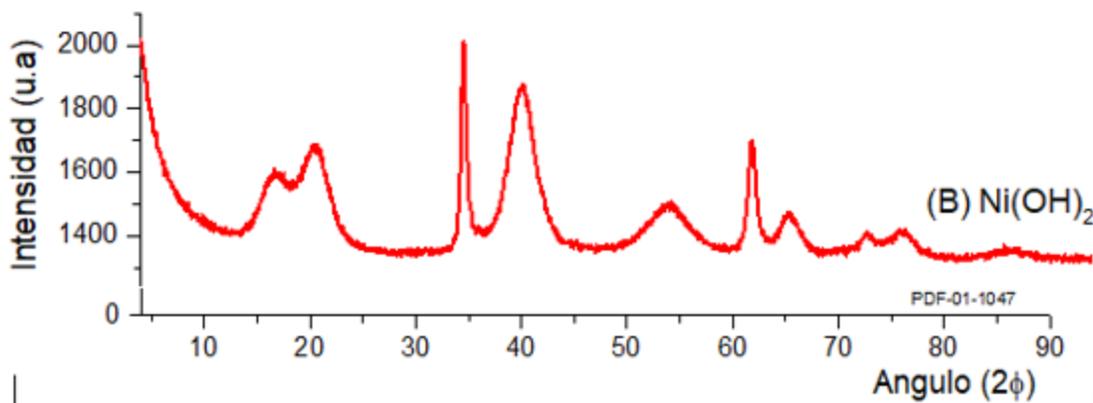


Figura 4. Difractograma de la muestra de hidróxido de níquel y cobalto obtenida a partir del licor producto de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

El tamaño del cristalito/grano de las muestras de hidróxidos obtenidas se reportan en la tabla 3, calculados para las direcciones cristalográficas (001) y (110) respectivamente.

Tabla 3. Valores del tamaño del cristalito (nm)

| Muestra | Tamaño de cristalito/grano (nm) | |
|------------------------|---------------------------------|-------|
| | (001) | (110) |
| Ni(OH) ₂ -B | 4,20 | 14,64 |

Como se puede observar de los valores reportados en la tabla 3, el tamaño de los cristalitos en la dirección del plano cristalográfico (001) de las muestras sintetizadas a partir de los licores industriales, cuando se emplea solución de hidróxido de sodio está en el orden de los nanómetros.

Las composiciones químicas del licor resultante de la precipitación y del agua final de salida de las etapas de lavado se muestran en las tablas 4 y 5

Tabla 4 Composición química promedio del licor resultante de la precipitación, g/L

| Ni | Co | Fe | Cu | Zn | Mg | Mn | Cr | Ca | Na |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,008 | 0,0002 | 0,003 | 0,002 | 0,0007 | 0,203 | 0,094 | 0,009 | 0,035 | 0,013 |

Tabla 5 Composición química promedio del licor resultante del proceso de lavado, mg/L

| Ni | Co | Fe | Cu | Zn | Mg | Mn | Cr | Ca | Na |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,009 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,0006 | 0,214 | 0,096 | 0,011 | 0,037 | 0,014 |

De los resultados que se muestran en este acápite se precisaron a partir de datos los experimentales, varios indicadores que se establecen en los criterios de diseño y en los cálculos técnicos tales como: el índice de consumo de hidróxido de sodio por masa de níquel en el licor producto, las eficiencias de precipitación de los elementos metálicos de interés, la composición del hidróxido de níquel y cobalto, así como las composiciones del licor residual resultante del proceso de precipitación y del agua de lavado.

3.2 Definición de los criterios Técnicos para la construcción de una planta de producción de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto

En este acápite se presentan los aspectos siguientes: descripción del proceso tecnológico, características de las materias primas y materiales fundamentales, criterios de diseño, consumos de materias primas y materiales, listado de equipos y balance de masas.

3.2.1 Descripción del proceso tecnológico

El proceso consta de las siguientes operaciones unitarias básicas:

- Precipitación.

- Filtración.
- Lavado.
- Secado.
- Envase del hidróxido.

A continuación, se expone una breve descripción de estas operaciones básicas, se presenta diagrama de flujo en la figura 5:

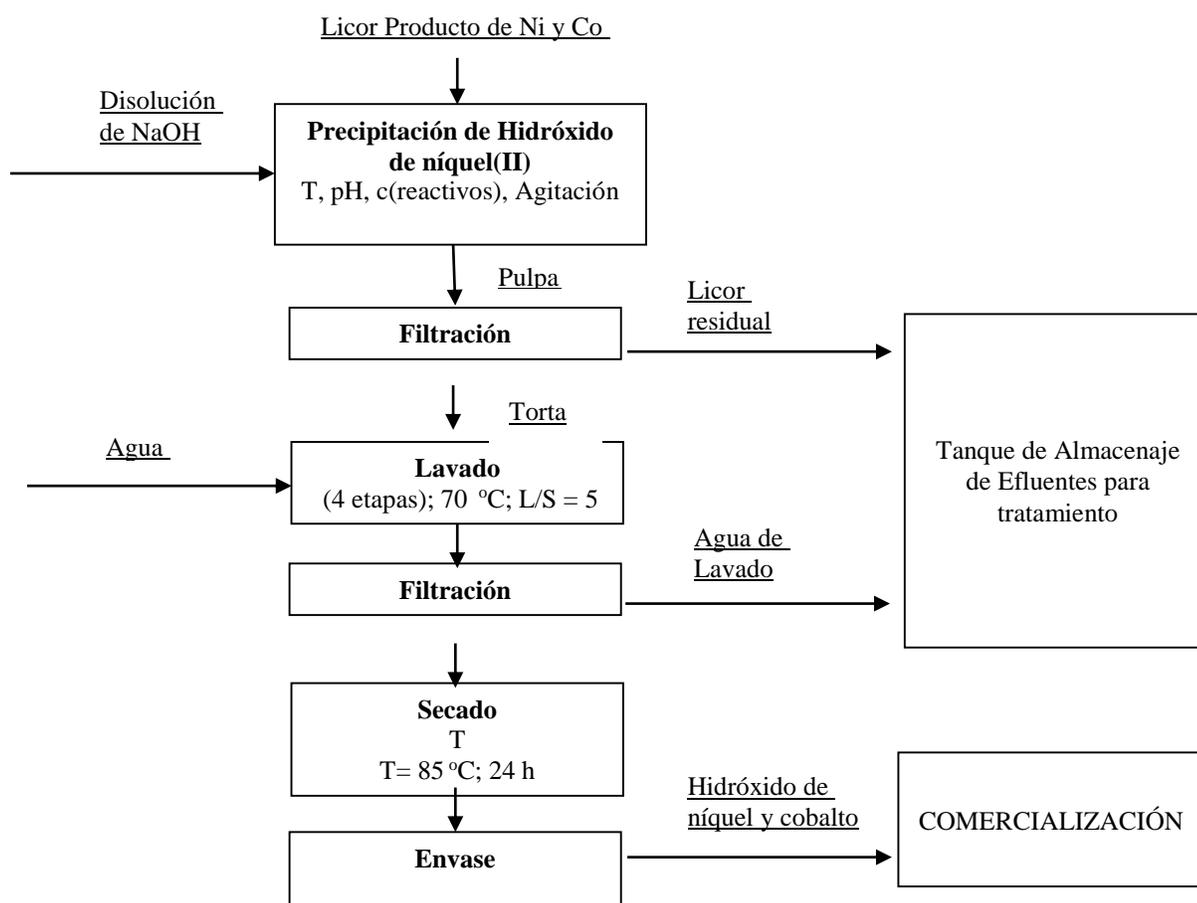


Figura 5. Esquema de etapas u operaciones principales para la síntesis de Ni-Co(OH)₂

Precipitación

El flujo tecnológico se inicia con el licor producto de níquel y cobalto del tanque de almacenaje (TA-01) y la solución de hidróxido de sodio, los cuales se bombean continuamente al tanque precipitador de hidróxido de níquel (TP-01). En este tanque precipitador se trabaja a 70 °C de temperatura y el mismo está provisto de agitación mecánica y utiliza una bomba reguladora del flujo BR-04 para el hidróxido de sodio, manteniendo constante el flujo del licor producto y variando el de hidróxido de sodio hasta alcanzar el pH de trabajo. Transcurrido el periodo de tiempo requerido para la reacción de precipitación de hidróxido de níquel y cobalto, la pulpa se envía mediante la bomba de desplazamiento positivo (BC-04) hasta el filtro prensa (FP-02). El licor residual se envía al tanque de almacenaje (TA-03). Este licor pasa al tanque de almacenaje (TA-03) para su posterior tratamiento. La torta se traslada al área de lavado.

El hidróxido de sodio es preparado en el tanque (T-2) a una concentración de 240 g/L adicionando las cantidades requeridas de hidróxido de sodio y agua.

Lavado

El hidróxido obtenido pasa al 1er tanque de lavado. Una vez terminado el lavado, la pulpa se envía mediante la bomba a presión (BC-06) hasta el filtro prensa (FP-03), la torta se traslada al 2do tanque lavador y el licor obtenido pasa a un tanque de almacenaje de efluentes (TAE-01) para su posterior tratamiento. El lavado ocurre mediante 4 etapas de lavado manteniendo una relación L:S igual a 5:1 en tanques agitados (TL-01, 02, 03, 04) y serpentín con vapor para mantener la temperatura en 70 °C.

La torta de hidróxido obtenida después de la 4ta etapa de lavado, se lleva al secador (S-01). La temperatura de secado es de 85 °C. El hidróxido de níquel se envía a caracterización y envasado.

Tratamiento de efluente

El licor residual y el agua de lavado se envían al tanque de almacenaje (TAE-02) para su reutilización en el proceso de la propia empresa.

3.2.2. Materias primas y materiales principales

Las características de las materias primas y materiales principales se muestran a continuación:

LICOR PRODUCTO DE NÍQUEL Y COBALTO

| Elementos | g/L |
|-----------------|-------|
| Ni | 6,59 |
| Co | 0,3 |
| Fe | 0,008 |
| Mn | 0,262 |
| Cu | 0,021 |
| Zn | 0,016 |
| Mg | 0,092 |
| Ca | 1,020 |
| Na | 0,030 |
| NH ₃ | 44,18 |

HIDRÓXIDO DE SODIO

| | |
|--------------------|---------|
| NaOH | 240 g/L |
| Fe, Cu, Mn, Zn, Ni | < 1 g/L |

AGUA DE PROCESO

| | |
|--------------------|---------|
| Fe, Cu, Mn, Zn, Ni | < 1 g/L |
|--------------------|---------|

3.2.3 Criterios de diseño

Los criterios que se tomaron en cuenta para el cálculo se los principales indicadores técnicos y de diseño del equipamiento tecnológico para la construcción de una Planta Piloto con capacidad de 1 t/a de nanopartículas de hidróxido de níquel y cobalto. Los mismos se definieron según la metodología que se presenta en el epígrafe 2.4 y fueron los siguientes:

- Cantidad de licor producto a procesar (t/a) 11,00
- Volumen de licor producto a procesar (m³/a): 10,20
- Concentración de Ni en el licor (g/L): 6,59
- Concentración de Co en el licor (g/L): 0,053
- Cantidad de níquel a producir (t/a): 0,52

- Cantidad de cobalto a producir (t/a): 0,02
- Eficiencia Metalúrgica para Ni (%): 99,8
- Eficiencia Metalúrgica para Co (%): 99,9

Productos recuperados (Base seca)

Hidróxido de níquel y cobalto, t/a: 1,00

Ni contenido en el producto, t/a: 0,52

Co contenido en el producto, t/a: 0,02

Tiempo de trabajo de la planta

Días por año: 330

Programa de operación de la planta

Horas por día: 24

Días por semana: 7

Precipitación de Hidróxido:

Flujo de hidróxido de sodio alimentado al reactor: 0,006 m³/h

Flujo de licor alimentado al reactor: 0,001 m³/h

Temperatura de Operación: 70 °C

pH de Operación: 13 unidades

Método de agitación: Mecánica

Método de Calentamiento: mediante
serpentín con
vapor

Tiempo de Retención: 2 h

Eficiencia de precipitación hidróxido

Metales %

Ni 99,8

Co 99,9

| | |
|----|------|
| Fe | 50,6 |
| Mn | 46,2 |
| Cu | 87,1 |
| Zn | 93,4 |
| Mg | 66,9 |
| Ca | 94,8 |

Filtración de Hidróxido

| | | |
|---|-------|-------------------|
| Flujo de pulpa: | 0,002 | m ³ /h |
| Densidad de la pulpa: | 1,14 | kg/L |
| Cont. de sól. de la pulpa alim., por peso | 5,00 | % |
| Número de filtros | 2 | unidades |
| Area de filtración | 9 | m ² |
| Relación de lavado agua/torta | 5 | veces |
| Cont. de sól. secos de la torta | 77 | % |

Proceso de lavado

| | | |
|----------------------------------|----------|-------------------|
| Torta de hidróxido de Ni a lavar | 0,0004 | kg/h |
| Flujo del agua de lavado | 0,01 | m ³ /h |
| Tiempo de retención | 2 | h |
| Agitación | Mecánica | |
| Temperatura | 70 | °C |

Filtración de la pulpa después de Lavada

| | | |
|---|-------|-------------------|
| Flujo de pulpa alimentada al filtro: | 0,008 | m ³ /h |
| Densidad de pulpa : | 1,20 | kg/L |
| Cont. de sól. de la pulpa alim., por peso | 1,38 | % |
| Número de filtros: | 4 | unidades |

| | | |
|----------------------------------|-------|----------------|
| Área de filtración: | 100,0 | m ² |
| Relación de lavado agua/torta: | 20,0 | veces |
| Cont. de sól. secos de la torta: | 50,00 | % |

Tanques

Precipitación de hidróxido de Ni

| | | |
|---------------------|------|----------------|
| Número de unidades: | 2 | unidades |
| Tiempo de retención | 2 | h |
| Volumen útil: | 0,02 | m ³ |

Preparación de la solución de NaOH

| | | |
|---------------------|-----------|----------------|
| Número de unidades | 1 | |
| Tiempo de retención | 1,0 | h |
| Volumen útil | 0,009 | m ³ |
| Agitación | Mecánica. | |

Tanque de almacenaje de solución de licor producto

| | | |
|---------------------|------|----------------|
| Número de unidades | 2 | |
| Tiempo de retención | 72,0 | h (3 días) |
| Volumen útil | 0,1 | m ³ |

Tanque de almacenaje de solución de NaOH

| | | |
|---------------------|------|----------------|
| Número de unidades | 2 | |
| Tiempo de retención | 72,0 | h (3 días) |
| Volumen útil | 0,6 | m ³ |

Tanque de almacenaje agua lavado

| | | |
|---------------------|------|----------------|
| Número de unidades | 2 | |
| Tiempo de retención | 72 | h (3 días) |
| Volumen útil | 0,75 | m ³ |

3.2.4. Consumos

Materias primas y materiales fundamentales

Las materias primas y materiales fundamentales, así como sus costos se muestran en la tabla 6:

Tabla 6 Consumo y costo de materias primas y materiales por cada tonelada de Ni-Co(OH)₂

| Elemento | Consumo (t) |
|--------------------|------------------------|
| Licor producto | 8,7 |
| Hidróxido de sodio | 11,7 |

De acuerdo con la tabla anterior se observó que el consumo de hidróxido de sodio es relativamente alto, en comparación con el reportado por Vidiaux 2023 [63], que fue igual a 5,25 g de NaOH/g de Ni(OH)₂

3.2.5. Listado de los principales equipos

Sobre la base de los resultados presentados en el acápite relacionado con los criterios de diseño, se definieron los equipos fundamentales que se necesitan para el proceso:

Tabla 7. Listado del equipamiento tecnológico

| Equipo | Cantidad |
|-----------------------|-----------------|
| Tanques de proceso | 7 |
| Tanques de almacenaje | 8 |
| Filtros | 6 |
| Balanzas | 1 |
| Tolvas | 1 |
| Secador | 1 |
| Total | 24 |

3.2.6 Balance de masas

Se presentan los resultados del balance de masas en la tabla 8

Tabla 8. Balance de masas

| Nro | Denominación de la Corriente | Flujo Másico | Flujo Volumétrico | | Densidad | Sólidos | Cantidad | Volumen |
|-----|--|--------------|-------------------|---------------------|----------|---------|----------|---------------------|
| | | (kg/h) | (L/h) | (m ³ /h) | (kg/L) | (%) | (t/a) | (m ³ /a) |
| 1. | Licor a precipitación | 1,1 | 1,0 | 0,001 | 1,07 | - | 9 | 8,2 |
| 2. | Solución de hidróxido de sodio | 1,5 | 6,2 | 0,0062 | 1,24 | - | 12 | 48,9 |
| 3. | Pulpa de Hidróxido de níquel a filtro | 2,6 | 2,3 | 0,002 | 1,14 | 5,0 | 21 | 18,2 |
| 4. | Hidróxido de níquel húmedo del filtro | 0,4 | - | - | - | - | 3 | - |
| 5. | Licor residual del filtro | 2,2 | 2,0 | 0,002 | 1,09 | - | 18 | 16,1 |
| 6. | Agua de lavado | 8,1 | 8,1 | 0,008 | 1,00 | - | 64 | 64,0 |
| 7. | Pulpa de Hidróxido de níquel lavada a filtro | 8,5 | 7,1 | 0,007 | 1,38 | 1,4 | 67 | 56,0 |
| 8. | Agua de lavado desechada | 8,4 | 8,4 | 0,008 | 1,00 | - | 66 | 66,2 |
| 9. | Hidróxido de níquel seco | 0,1 | - | - | 3,00 | - | 1 | - |

3.3 Análisis de pre factibilidad económica, financiera

Se definió que el proceso consta de las etapas básicas que se muestran en el diagrama de bloques de la figura 1 y son las siguientes: Precipitación de hidróxido de níquel y cobalto, Filtración, Lavado, Secado y Molienda.

Los resultados del cálculo de los principales indicadores económico financieros se obtuvieron bajo las consideraciones siguientes:

- Capacidad de Producción: 545 t/a
- Impuestos: 35 %

3.3.1. Estimación de la inversión fija

El equipamiento necesario en cada una de las etapas se diseñó y seleccionó, tomando como base la Tarea Técnica elaborada con datos de prueba piloto preliminar, ejecutada por Cisneros y col.(2018)[78]. Los costos de equipos se tomaron del estudio de pre factibilidad realizado por De la Cruz y col (2018) [79]. El listado de los equipos se presentó en el acápite 3.5. Estos se utilizaron para estimar los costos de inversión.

La estimación de las inversiones fija y operativa se muestra en la tabla 9 y los detalles de los elementos que la conformaron se presentan en el anexo 2.

El valor de la inversión de capital total fue igual a **122 535,6 CUP/t**.

Tabla 9. Costos de Inversión

| Elemento | Valor, CUP/t Ni-Co(OH)₂ |
|---------------------------------------|---|
| Inversión fija (IF) | 111 396,00 |
| Inversión operativa (IO) | 111 39,60 |
| Inversión de capital total (I) | 122 535,60 |

3.3.2. Estimación del costo de producción

El consumo de materia prima y materiales fundamentales se utilizó para estimar el costo total de producción. Los elementos principales del costo de producción se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Consumo y costo de materias primas y materiales

| Elemento | Consumo (t) | Costo Unitario CUP/t de Ni-Co(OH)₂ |
|--------------------|------------------------|--|
| Licor producto | 8,7 | 39 799,76 |
| Hidróxido de sodio | 11,7 | 345 368,66 |
| TOTAL | | 385 168,42 |

El costo total de producción fue igual a **111 220 668,63 CUP/t**. Los detalles del cálculo aparecen en el anexo 2.

Tabla 11. Costos de Producción

| Elemento | Valor CUP/t de Ni-Co(OH) ₂ |
|--|---|
| Costos de fabricación Directos (CFD) | 403 538,46 |
| Costos de fabricación Indirectos (CFI) | 5 055,16 |
| Depreciación (aproximadamente 10% de Cfc), D | 11 139,60 |
| Gastos generales (GG) | 32 532,50 |
| Costo Total de Producción (CT) | 452 265,73 |

3.3.3. Ingresos por venta

El precio del hidróxido de níquel y cobalto se estimó igual a 454 924,38 CUP/t, según reportado del sitio de la Plataforma Global de Comercio Alibaba.[80].

Los ingresos por ventas ascienden a **454 924,38 CUP/t**.

3.3.4. Beneficios brutos, impuestos y beneficios netos

El valor del impuesto se consideró igual al 35 % de los beneficios brutos.

| | |
|--|----------------|
| – Beneficios Brutos (B): | 2 658,65 CUP/t |
| – Impuesto sobre Ingresos (IMP): | 930,53 CUP/t |
| – Beneficios Netos descontando impuestos (BN): | 1 728,12 CUP/t |

3.3.5. Rentabilidad de la inversión (RI)

La tasa de rentabilidad de la inversión RI fue igual a 10,5 %, fue ligeramente superior al 10 %.

De acuerdo con estos resultados, el proyecto para la obtención de nanopartículas de hidróxido de níquel en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara es factible económicamente, bajo las condiciones estudiadas, pero se advierte que es una inversión de alto riesgo que puede verse afectada por el aumento del costo de materias primas o la disminución del precio del Ni-Co(OH)₂. Deberán estudiarse otras alternativas que permitan abaratar el costo de las materias primas o ejecutar la inversión cuando se tenga la certeza de que existen precios para ventajosos para el hidróxido de níquel y cobalto (por encima de los estimados en este trabajo). En correspondencia con lo anterior, se recomienda realizar la inversión solo si los costos y los precios son más favorables que los proyectados en este estudio.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III

1. En la caracterización del proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara se obtuvo un hidróxido con 52,4 % de níquel y 2,32 % de cobalto, cuya fase mineralógica fundamental fue el betahidróxido de níquel con tamaños de cristalito entre 4,2 y 14,64 nm, bajo las condiciones de precipitación siguientes: Temperatura = 70 °C, pH = 13,5, Tiempo de residencia= 3 h.
2. Se realizaron los cálculos técnicos para el escalado a nivel de Planta Piloto del proceso de síntesis de nanopartículas de oxihidróxidos de níquel y cobalto con las propiedades requeridas para su aprovechamiento como electrodo positivo en el ensamblaje de baterías recargables de la tecnología Ni/Fe, a partir del licor producto de níquel y cobalto producido industrialmente en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, con eficiencias de precipitación de níquel y cobalto iguales a 99,8 y 99,9 %, respectivamente.
3. Desde el punto de vista económico y financiero se obtuvo una rentabilidad de la inversión igual a 10,5 %, que aunque constituyó un resultado positivo, indicó que el proyecto pudiera afectarse por el aumento del costo de materias primas y materiales o por la reducción del precio de venta del hidróxido de níquel y cobalto en el mercado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES GENERALES

Como resultado del trabajo se pudo arribar a las conclusiones siguientes:

1. En la caracterización del proceso de síntesis de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto a partir del licor producto del proceso de lixiviación de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara se obtuvo un hidróxido con 52,4 % de níquel y 2,32 % de cobalto. La fase principal que se identificó fue el betahidróxido de níquel con tamaño de cristalito entre 4,20 y 14,64 nm.
2. Se definieron los criterios Técnicos de una Planta Piloto para la obtención de una tonelada por año de nanopartículas de hidróxidos de níquel y cobalto en la cual se prevén eficiencias de precipitación de níquel y cobalto iguales a 99,8 y 99,9 %, respectivamente.
3. En el análisis preliminar de la factibilidad económica y financiera se obtuvo una rentabilidad de la inversión igual a 10,5 %, ligeramente superior al límite establecido para considerar un proyecto factible (10 %), por lo que se consideró un resultado económico financiero positivo con riesgo de cambiar desfavorablemente ante la variación de precios en el mercado.

RECOMENDACIONES

Como resultado del trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Evaluar otras alternativas que permitan la reducción del consumo de hidróxido de sodio para abaratar el costo de proceso.

BIBLIOGRAFIA

1. Ortiz, M., *Desarrollo y caracterización de materiales de electrodo para dispositivos electroquímicos basados en nuevos criterios de ingeniería de diseño, aplicaciones en sistemas de baterías del tipo Níquel Hidruro metálico*. 2013.
2. Prieto Lobato, M., *Diseño de materiales de carbono bioderivados. Aplicación como electrodos en condensadores electroquímicos*. 2019, Industriales.
3. López, J.M.B. and D.E.P. Catalán, *Síntesis y caracterización de un material híbrido triple a base de óxido grafeno para su aplicación en capacitores electroquímicos*. 2015.
4. Laurencio, E., *Evaluación preliminar de las propiedades electroquímicas del hidróxido de níquel dopado con cromo para sistemas de almacenamiento de energía*. 2023, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
5. Garvín Vidanes, L., *Electrodos de carbón activo para la fabricación de supercondensadores*. 2009.
6. Gaya Jurado, C., *Fabricación de electrodos a partir de carbones en polvo*. 2010.
7. Humana, R.M., *Desarrollo y evaluación de electrodos y prototipos de baterías recargables*. 2013, Universidad Nacional de La Plata.
8. Qiu, W., et al., *A flexible rechargeable quasi-solid-state Ni-Fe battery based on surface engineering exhibits high energy and long durability*. Inorganic Chemistry Frontiers, 2018. **5**(8): p. 1805-1815.
9. Winter, M. and R.J. Brodd, *What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?* Chemical reviews, 2004. **104**(10): p. 4245-4270.
10. Liu, J., et al., *A flexible alkaline rechargeable Ni/Fe battery based on graphene foam/carbon nanotubes hybrid film*. Nano letters, 2014. **14**(12): p. 7180-7187.
11. Guan, C., et al., *High-performance flexible solid-state Ni/Fe battery consisting of metal oxides coated carbon cloth/carbon nanofiber electrodes*. Advanced Energy Materials, 2016. **6**(20): p. 1601034.
12. Sosa, M.M., C.I. Rondón, and A.F. Valenzuela, *Precipitación de sulfuros de níquel a partir del licor efluente del sedimentador de carbonato en la Empresa Ernesto Che Guevara*. Tecnología Química, 2010. **30**(1): p. 39-49.
13. Capote, N., *Caracterización del proceso de precipitación-oxidación de sulfuros mixtos obtenidos a partir de licores carbonato-amoniacaes*. 1996, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
14. Habashi, F. *The hydrometallurgy of nickel sulfides*. in *Nickel -cobalt 97 Interantional Symposium*. 1997. Sudbury, Ontario, Canadá.
15. Cisneros, S.D., *Procedimiento para la obtención de hidróxido de níquel(II) a partir de disoluciones de la lixiviación de sulfuro de la tecnología Caron*, in *Facultad de Ingeniería Química y Agronomía*. 2022, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
16. Cintra, S.V., *Manual de Operaciones UBP Lixiviación y Lavado*. 2010, Empresa Productora de Níquel y Cobalto Comandante Ernesto Che Guevara: Moa, Holguín. p. 100.
17. Lobaina, O. and M.E. Prieto, *Informe de etapa 03. Proyecto 600191. Posibilidad de obtención de sulfato de níquel en la Empresa Niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara de Moa*. 2016, Centro de Investigaciones del Níquel: Moa, Holguín, Cuba.
18. Song, Q., et al., *Structural characteristics of nickel hydroxide synthesized by a chemical precipitation route under different pH values*. Journal of Power Sources, 2002. **112**(2): p. 428-434.

19. Cabañas, S., *Síntesis asistida por ultrasonido de nanoestructuras de compuestos de níquel*, in *Instituto de Cerámica y Vidrio Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*. 2012, Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias: Madrid. p. 216.
20. Hall, D.S., et al., *Nickel hydroxides and related materials: a review of their structures, synthesis and properties*. Proceeding rspa.royalsocietypublishing.org, 2014: p. 65.
21. Kovalenko, V. and V. Kotok, *Obtaining of Ni-Al layered double hydroxide by slit diaphragm electrolyzer* Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. **2**: p. 11-17.
22. Ash, B., et al., *Perspectives on Nickel Hydroxide Electrodes Suitable for Rechargeable Batteries: Electrolytic vs. Chemical Synthesis Routes*. *Nanomaterials*, 2020. **10**(9): p. 1878.
23. Alt Cobalt and Nickel. *Nickel hydroxide*. *Alt Cobalt and Nickel Products*. 2018 [cited 2018 22-11-18 16:51]; http://www.dlalt.com/ProductDetail_en.asp?Id=20.
24. Norilsk Nickel. *Nornickel.com. Business products. Nickel Hydroxide Chemical*. 2018 [cited 2018 22-11-18, 16:45]; https://www.nornickel.com/business/products/nickel/#nickel-hydroxide_chemical.
25. Danczuk, M., *Polimorfos de Ni (OH) 2 e Materiais Mistos Eletroativos Baseados em Argilas Esmectitas: Caracterização Estrutural e Comportamento Eletroquímico*. 2014.
26. Healey, C., *A Guide to playing The Battery Materials Sector*. 2018.
27. Ryu, H.-H., et al., *Capacity fading of Ni-rich Li [Ni_x Co_y Mn_{1-x-y}] O₂ (0,6 ≤ x ≤ 0,95) cathodes for high-energy-density lithium-ion batteries: bulk or surface degradation?* *Chemistry of Materials*, 2018. **30**(3): p. 1155-1163.
28. Chen, Y., et al., *Recent Progress on Nickel-Based Oxide/(Oxy) Hydroxide Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction*. *Chemistry—A European Journal*, 2019. **25**(3): p. 703-713.
29. Fierro, C., et al., *Method of making a nickel hydroxide material in European Patent Office*. 2012, Ovonic Battery Company, Inc., Univerticalcorporation.
30. Shin, D.-Y., *Patente US 5,498,403 Method for preparing high density nickel hydroxide used for alkali rechargeable batteries*. 1996: Estados Unidos.
31. Kotok, V. and V. Kovalenko, *Optimization of nickel hydroxide electrode of the hybrid supercapacitor*. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2017(1 (6)): p. 4-9.
32. Connor, N. (2023) *Hidróxido de cobalto*. <https://material-properties.org/18-09-2023>. Revisado: 23-05-2024.
33. Rodrigues, I., J. Wontcheu, and D.D. MacNeil, *A novel coprecipitation method towards the synthesis of Ni_x Mn_x Co (1-2x)(OH)₂ for the preparation of lithium metal oxides*. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2012. **16**(3): p. 1121-1132.
34. Liu, X., et al., *Magnetic properties of nickel hydroxide nanoparticles*. *Journal of Applied Physics*, 2010. **107**(8): p. 083919.
35. Kim, K.J., et al., *Effects of inorganic salts on the morphological, structural, and electrochemical properties of prepared nickel-rich Li[Ni_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}]O₂*. *Journal of Power Sources*, 2014. **268** p. 349- 355.
36. Chen, J., et al., *Nickel Hydroxide as an Active Material for the Positive Electrode in Rechargeable Alkaline Batteries*. *Journal of The Electrochemical Society*, 1999. **146**(10): p. 3606.
37. Acharya, R., et al., *Effect of precipitating agents on the physicochemical and electrolytic characteristics of nickel hydroxide*. *Materials Letters*, 2003. **57**(20): p. 3089-3095.

38. Andrade, T.M., M. Danczuk, and F.J. Anaissi, *Effect of Precipitating Agents on the Structural, Morphological, and Colorimetric Characteristics of Nickel Hydroxide Particles*. Colloid and Interface Science Communications, 2018. **23**: p. 6-13.
39. Ito, T., et al. *Reactive crystallization of nickel hydroxide particles in continuous reactive crystallizer*. in *14th International Symposium on Industrial Crystallization*. 1999.
40. Olbrich, A., et al., *Patente US 7 563 431 B2 Nickel hydroxide and method for producing same*. 2009, H C Stark.
41. Zhang, W., et al., *Effect of nickel hydroxide composition on the electrochemical performance of spherical Ni(OH)₂ positive materials for Ni–MH batteries*. International Journal of Hydrogen Energy 2009. **34**: p. 473- 480.
42. Hua, W., et al., *Unravelling the growth mechanism of hierarchically structured Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}(OH)₂ and their application as precursors for high-power cathode materials*. Electrochimica Acta, 2017 **232**: p. 123-131.
43. Qiu, H., Y. Wang, and S. Ye, *Rationally-Directed Synthesis and Characterization of Nickel-Rich Cathode Material for Lithium Ion Battery*. Energy Technology, 2018. **6**(12): p. 2419-2428.
44. Wang, D., et al., *Synthesis of high capacity cathodes for lithium-ion batteries by morphology-tailored hydroxide co-precipitation*. Journal of Power Sources 2015. **274**(2015): p. 451- 457.
45. Fierro, C., et al., *Patente US 6 447 953 B1 Nickel hydroxide positive electrode material exhibiting improved conductivity and engineered activation energy*. 2002: Estados Unidos.
46. Fierro, C., et al., *Patente US 7 294 434 Nickel Hydroxide electrode material with improved microstructure and method for making the same* 2007: Estados Unidos.
47. Luo, X., et al., *Synthesis and characterization of high tap-density layered Li [Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}] O₂ cathode material via hydroxide co-precipitation*. Journal of Power Sources, 2006. **158**(1): p. 654-658.
48. Kosova, N., E. Devyatkina, and V. Kaichev, *Mixed layered Ni–Mn–Co hydroxides: Crystal structure, electronic state of ions, and thermal decomposition*. Journal of Power Sources, 2007. **174**(2): p. 735-740.
49. Zhang, S., *Characterization of high tap density Li[Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}]O₂ cathode material synthesized via hydroxide co-precipitation*. Electrochimica Acta 2007. **52**(25): p. 7337-7342.
50. Van Bommel, A. and J. Dahn, *Synthesis of Spherical and Dense Particles of the Pure Hydroxide Phase Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3} (OH)₂*. Journal of the Electrochemical Society, 2009. **156**(5): p. A362-A365.
51. Ovshinsky, S.R., et al., *Enhanced nickel hydroxide positive electrode material for alkaline rechargeable electrochemical cells (Material para electrodo positivo de hidróxido de níquel mejorado, para celdas electroquímicas recargables alcalinas)*. 1996.
52. Fierro, C., et al., *Patente US 6 228 535 Nickel hydroxide positive electrode material exhibiting improved conductivity and engineered activation energy* 2001: Estados Unidos.
53. Junichi, I., et al., *Patente US 6,040,007 Nickel hydroxide particles having an .alpha.- or .beta.-cobalt hydroxide coating layer for use in alkali batteries and a process for producing the nickel hydroxide* 2000: Estados Unidos.
54. Begum, S.N., V.S. Muralidharan, and C.A. Basha, *The influences of some additives on electrochemical behaviour of nickel electrodes*. International journal of hydrogen energy, 2009. **34**(3): p. 1548-1555.

55. Ravi, C.R., et al., *Influence of zinc additive and pH on the electrochemical activities of β -nickel hydroxide materials and its applications in secondary batteries*. Journal of Energy Storage, 2017. **9**: p. 12-24.
56. Jahn, M., et al., *Powdered $\text{Ni}_x\text{M}_y\text{M}_z(\text{O})_x(\text{OH})_y$ compounds, method for the production thereof and use thereof in batteries*. 2015, Google Patents.
57. Yang, Y., et al., *Synthesis and performance of spherical $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ regenerated from nickel and cobalt scraps*. Hydrometallurgy, 2015.
58. Park, S., et al., *The Effect of NH_3 Concentration during Co-precipitation of Precursors from Leachate of Lithium-ion Battery Positive Electrode Active Materials*. J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 2015. **24**(6): p. 9- 16.
59. Meng, K., et al., *A compact process to prepare $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode material from nickel-copper sulfide ore*. Hydrometallurgy, 2017. **174**: p. 1-9.
60. Chen, X., et al., *Hydrometallurgical Processes for Valuable Metals Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries*, in *Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries*. 2019, Springer. p. 93-139.
61. Nie, Z.-R., L.-W. Ma, and X.-L. Xi, "*Complexation-precipitation*" metal separation method system and its application in secondary resources. Rare Metals, 2014. **4**(33): p. 369-378.
62. Rojas, V.A., N.M.E. Trujillo, and D.Y. González, *Ammoniacal Carbonate Leaching: Effect of Dissolved Sulfur in the Distillation Operation*. Acta Chimica Slovenica, 2020. **67**(4): p. 1239-1249.
63. Vidiaux-Arcia, L., L.Á. García-Frómata, and D. Cisneros-Sánchez, *Precipitación química de Ni (OH) 2 del licor producto de lixiviación en la Tecnología Caron*. Tecnología Química, 2023. **43**(3): p. 660-675.
64. Velásquez, C.L., S.K. Khatib, and F.L. González, *Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones*. 2015: Universidad de los Andes.
65. Danguillecourt, A.E., *Nuevos materiales carbonosos para baterías de iones litio y condensadores electroquímicos*, in *Instituto de Ciencia y Tecnología de los materiales. División de materiales para la energía*. 2017, Universidad de la Habana: La Habana.
66. Danguillecourt, A.E., et al., *Electrical, thermal and electrochemical properties of disordered carbon prepared from palygorskite and cane molasses*. Journal of solid state chemistry, 2017. **246**: p. 404-411.
67. Kovalenko, V. and V. Kotok, *Investigation of characteristics of double Ni-Co and ternary Ni-Co-Al layered hydroxides for supercapacitor application*. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2019(2 (6)): p. 58-66.
68. Kovalenko, V., et al., *Investigation of Characteristics of Binary Ni-Co Oxyhydroxides for Supercapacitor Application*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020. **1**(12): p. 103.
69. Kovalenko, V. and V. Kotok, *Synthesis of Ni (OH) 2 by template homogeneous precipitation for application in the binder-free electrode of supercapacitor*. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2018(4 (12)): p. 29-35.
70. Lei, G., et al., *NiCo-layered double hydroxide with cation vacancy defects for high-performance supercapacitors*. Electrochimica Acta, 2022. **413**: p. 140143.
71. Sun, Y., et al., *Influence of electrolytic conditions on the preparation of NiOOH by catalytic electrolysis method*. Int J Electrochem Sci, 2018. **13**: p. 2718-2730.
72. Tesis y Masters (2024) *Qué es un estudio de factibilidad técnica y como realizarla?*<https://tesisymasters.cl/factibilidad-tecnica/Visitado: 27-05-24>.

73. Peters, M.S., K.D. Timmerhaus, and R.E. West, *Plant design and economics for chemical engineers*. 5ta ed. Vol. 4. 2003, New York. Estados Unidos: McGraw-Hill New York.
74. García, R.Y., *Evaluación técnica-económica del Destilador MS 2005 HPS STILMAS de la planta de Soluciones Parentelares. Laboratorio Farmacéutico Oriente, in Facultad de Ingeniería Química y Agronomía*. 2020, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba.
75. Ulrich, G., *Diseño y economía de los procesos de ingeniería química*. 1ra ed, ed. N.E. Interamericana. 1992, Mexico: Mc Graw Hill.
76. Cisneros-Sánchez, D., et al., *Síntesis del hidróxido de níquel (II) con disolución multicomponente de la lixiviación de sulfuro de la tecnología Caron*. *Revista Colombiana de Química*, 2021. **50**(2): p. 49-57.
77. Cisneros-Sánchez, D., et al., *Obtención de hidróxido de níquel(II) para baterías recargables a partir de soluciones acuosas multicomponentes: efecto de las condiciones de síntesis*. *Minería y Geología*, 2020. **36**(1): p. 65-80.
78. Cisneros, D., E. Leyva, and L.A. García, *Informe de etapa 04. Tarea Técnica. Proyecto 600302 Obtención de hidróxido de níquel para la diversificación de la producción de níquel en Cuba*. 2018, CEDINIQ: Moa- Holguín.
79. De la Cruz K. and Lafargue U., *Estudio de pre-factibilidad técnico-económica para obtención de hidróxido de níquel para la diversificación de la producción de níquel en Cuba*. 2018, CEPRONi: Moa- Holguín.
80. Alibaba. *Nickel hydroxide products*. 2021 06-04-21 [cited 2021 06-04-21]; Available from: https://www.alibaba.com/product-detail/Nickel-Hydroxide-for-Positive-Electrode-Material_62317361267.html?spm=a2700.pc_countrysearch.main07.108.3ba41cf6cfgwn3.

ANEXOS

Anexo 1. Metodología y ecuaciones para el cálculo de los indicadores económicos y financieros

Para analizar la pre factibilidad económica y financiera de la implementación del proceso se utiliza como indicador de evaluación la rentabilidad de la inversión, según los pasos que se describen a continuación:

- 1 Tomar como referencia la información sobre las características de las etapas u operaciones principales del proceso que se propone para obtener hidróxido de níquel y cobalto a partir del licor producto de la ECG.
- 2 Con esta información de referencia, definir preliminarmente los equipos y realizar los cálculos del balance de masa para determinar los consumos de materias primas y materiales necesarios para lograr un volumen de producción anual dado.

- 3 Estimar mediante el método de los factores el costo de la Inversión de capital total, según la Ec. (1):

$$I = IF + IO \quad (1)$$

Donde: I – Inversión de capital total, en \$.

IF - Inversión fija, en \$. Se estima, a partir del costo del equipamiento principal.

IO - Inversión operativa, en \$. Se estima igual al 10 % de la inversión fija

4. Estimar el costo total de producción para el volumen de producción anual de la planta, mediante la Ec (2):

$$CT = CFD + CFI + D + GG \quad (2)$$

Donde: CT- Costo total de producción, en \$/a

CFD – Costos de fabricación directos (materias primas y materiales, servicios, mano de obra de operación y supervisión, mantenimiento), \$/a

CFI – Costos de fabricación Indirectos (Almacenamiento, impuestos), \$/a

D- Depreciación, \$/a

GG- Gastos Generales, \$/a

- 5 Estimar los ingresos por ventas, mediante la Ec. (3):

$$S = PA \cdot p \quad (3)$$

Donde: S: Ingresos por ventas, \$/a

PA- Producción anual estimada, t/a

p- Precio del hidróxido de níquel (II), \$/t

- 6 Calcular los Beneficios brutos, según la Ec. (4)

$$B = S - CT \quad (4)$$

Donde: B - Beneficios Brutos; en \$/a

- 7 Calcular los Beneficios netos descontando impuestos mediante la Ec. (5)

$$BN = B - IMP \quad (5)$$

Donde: BN- Beneficios netos descontando impuestos, en \$/a

IMP- Impuestos, en \$/a

- 8 Calcular la rentabilidad de la inversión (RI)

$$RI = (BN + D) * 100/I \quad (6)$$

- 9 Dividir los indicadores que se calculan en los pasos 3 a 8 entre la capacidad de producción anual de la Planta, para que el resultado quede expresado por cada tonelada de Ni-Co(OH)₂.

Anexo 2. Resultados de los indicadores económicos y financieros

| | | | |
|--|---------------|----------------|--------------|
| Capacidad anual de Ni-Co(OH) ₂ , (t/a) | | 545,00 | |
| Capital Fijo (IF) | | 60 710 816,20 | 111395,99 |
| Capital de Trabajo (IO) | 0,10 | 6 071 081,62 | 11139,599 |
| Inversión de Capital Total (I) | | 66 781 897,82 | 122535,59 |
| Gastos de Fabricación | Factor | CUP/a | CUP/t |
| Directos | | | |
| Materias Primas | | 209 916 786,58 | 385168,42 |
| Créditos de Subproductos | | | 0,00 |
| Mano de Obra de Operación | | 2 360 004,57 | 4330,28 |
| Supervisión y mano de obra de oficina (10-20 de mano de obra de operación) | 0,10 | 236000,46 | 433,03 |
| Servicios | | | 0,00 |
| Vapor (0,119 USD/kg) | | 3 835 920,00 | 7038,39 |
| Electricidad | | 1 933 778,42 | 3548,22 |
| Agua desmineralizada (0,219 USD/m3) | | 74 334,00 | 136,39 |
| Agua de Enfriamiento (1USD/m3) | | | 0,00 |
| Agua natural (0,10USD/m3) | | | 0,00 |
| Mantenimiento y reparaciones(2-10% de IF) | 0,02 | 1 214 216,32 | 2227,92 |
| Suministro de Operaciones(10-20% de mantenimiento) | 0,10 | 121 421,63 | 222,79 |
| Cargos de laboratorios (10-20% de mano de obra de operación) | 0,10 | 236 000,46 | 433,03 |
| Suma de gastos directos menos patentes y derechos | | 219 928 462,44 | 403538,46 |
| Patentes y derechos (0-6% del gasto total) | | 0,00 | 0,00 |
| Total, Costos de fabricación Directos | | 219 928 462,44 | 403538,46 |
| Indirectos | | | |
| Generales(nómina y planta, empaçado, almacenamiento) (50-70% de la suma de mano de obra de operación, supervisión , y mano de obra de oficina y mantenimiento) | 0,50 | 1 905 110,68 | 3495,62 |
| Impuestos locales(1-2% de IF) | 0,01 | 607 108,16 | 1113,96 |
| Seguros(0,4-1 % de IF) | 4,00E-03 | 242 843,26 | 445,58 |
| Total, Costos de fabricación Indirectos | | 2 755 062,10 | 5055,16 |
| Gastos de fabricación total (no incluye depreciación), CFT-D | | 222 683 524,54 | 408593,62 |
| Depreciación (aproximadamente 10% de Cfc), D | 0,10 | 6 071 081,62 | 11139,60 |
| Gastos Generales (GG) | | | 0,00 |
| Costos administrativos(25% de los gastos generales) | 0,25 | 476 277,67 | 873,90 |
| Distribución y costos de venta(2% del gasto total) | 0,02 | 4 929 696,43 | 9045,31 |
| Investigación y desarrollo(5% del gasto total) | 0,05 | 12 324 241,07 | 22613,29 |
| Total, GG | | 17 730 215,16 | 32532,50 |
| Costo Total de Producción (CT) | | 246 484 821,33 | 452265,73 |
| Ingresos por ventas (S) | 454 924,38 | 247 933 785,79 | 454924,38 |
| Beneficios Brutos ,(B) | | 1 448 964,47 | 2658,65 |
| Impuesto sobre Ingresos, IMP | 0,35 | 507 137,56 | 930,53 |
| Beneficios Netos descontando impuestos B-IMP=BN | | 941 826,90 | 1 728,12 |
| Tasa de rentabilidad de la inversión (RI) en % | | | |
| RI=((BN+D)/I). 100 | | 10,50 | 10,50 |

