



República de Cuba

Ministerio de Educación Superior

Instituto Superior Minero Metalúrgico

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

DISOLUCIÓN DEL CARBONATO BÁSICO DE NÍQUEL

**Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico**

RAFAEL LAMBERT GÁMEZ

Moa

2012



República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

DISOLUCIÓN DEL CARBONATO BÁSICO DE NÍQUEL

**Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero
Metalúrgico**

AUTOR: Rafael Lambert Gámez

TUTORES: Prof. Instructor, Ing. Ismael Rondón Contrera, M. Sc
Prof. Titular, Ing. Eulicer Fernández Maresma, Dr. C

Moa
2012



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo Rafael Lambert Gámez:

Autor de este trabajo de Diploma y los tutores Ms.C Ismael Rondón el Dr.C Eulicer Fernández Maresma declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Tutores: Ing. Ismael Rondón Contrera, Ms. C

Ing. Eulicer Fernandez Maresma Dr. C



PENSAMIENTO

“En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana.”

Che



AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Maria Julia Rodríguez Marisma, a mi hija Roxana Lambert Rodríguez por darme su apoyo en los momentos difíciles.

A mis tutores Msc: Ismael Rondón y al Dr.C Eulicer Fernández Maresma, y en especial al Dr.C Amaury Palacios Rodríguez por la ayuda y la confianza depositada en mí para la realización de este trabajo.

A todos los profesores que a lo largo de estos años de una forma u otra contribuyeron al éxito.

A los compañeros de trabajo, que ocuparon mí puesto de trabajo para que pudiera asistir a clases, a los diferentes compañeros que me ayudaron y apoyaron en la realización de los experimentos.

A la revolución cubana por brindarme la oportunidad de obtener el título de Ingeniero Metalúrgico.



DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo:

A mis padres Evarista y Alfonso por brindarme una educación basada en valores y principios. A mi hija Roxi, que le sirva de fuente de inspiración en su nueva carrera y a mi esposa Maria Julia Rodríguez por su apoyo, y a mi familia que me han inculcado el deseo de luchar para que tenga un futuro mejor.

Gracias.

Rafael



RESUMEN

En la investigación se determinó la influencia de los principales parámetros en el proceso de disolución del Carbonato Básico en un reactor, basado en la caracterización termodinámica y la modelación estadística y se establecieron las tendencias de variables como la temperatura y concentración de reactivo. El desarrollo de la investigación tiene amplia base experimental a escala de laboratorio, que indican la regularidad de cada variables analizada, quedando demostrada que la temperatura y la concentración de reactivo fueron las variables que incidieron en la disolución del carbonato básico de níquel con una alta concentración de níquel de 45,36 g/L en la Planta de calcinación de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, dando solución a una de las limitantes que han existido en los estudios precedentes.



ABSTRACT

In the investigation the influence of the main parameters was determined in the process of breakup of the Basic Carbonate in a reactor, based on the thermodynamic characterization and modeling statistic and the tendencies of factors settled down as the temperature and reagent concentration. The development of the investigation has wide experimental base to scale of laboratory that they indicate the regularity of each analyzed variables, being demonstrated that the temperature and the reagent concentration were the factors that impacted in the breakup of the basic carbonate of nickel with a high concentration of nickel of 45.36 g/l in the Plant of calcination of the company "Major Ernesto Che Guevara", giving solution to one of the restrictive ones that have existed in the precedent studies.



INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Trabajos Precedentes	4
1.1.1. Reactor para la disolución del carbonato básico de Níquel	5
1.2. Factores que influyen en la lixiviación	8
1.2.1. Descripción del flujo tecnológico de la planta	10
Conclusiones del capítulo 1	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1. Introducción	14
2.2. Métodos empleados en la investigación	17
2.3. Metodología termodinámica del proceso	
2.4 Características de la materia prima (Carbonato Básico Níquel)	
2.4.1. Composición química	
2.4.2. Granulometría	
2.5. Reactivos	
2.6 Materiales	
2.7 Instalación empleada en el proceso de investigación	
2.8. Estudio de los principales factores que influyen en la disolución de níquel contenido en el carbonato básico, por medio de la disolución con ácidos	
2.9. Metodología para la modelación estadística- matemático.	
2.10. Técnica experimental	
2.10.1. Análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica.	
2.10.2. Análisis por Espectrofotómetro por plasma inducido (ICP)	
Conclusiones del capítulo 2	31
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	32
3.1. Análisis termodinámico	32



3.2. Análisis estadístico

3.3. Análisis experimentales.

3.3.1. Comportamiento en la variación del contenido de níquel en la solución con respecto al tiempo.

3.3.2. Efecto de la temperatura

3.3.3. Efecto de la cantidad inicial de reactivo disolvente

3.3.4. Evaluación económica

Conclusiones del capítulo 3

CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51



INTRODUCCIÓN

El objetivo de la industria del níquel cubana, es el incremento de la producción de los productos del níquel más cobalto, trabajando en el perfeccionamiento del proceso tecnológico para lograr una mayor eficiencia técnico – económica que permita conquistar un espacio en el mercado mundial de ese importante renglón.

Para hacer cumplir este objetivo de trabajo se hace necesario introducir de forma acelerada nuevos métodos de estudio del proceso, que permitan una mayor confiabilidad en las operaciones de la industria, que puedan poner a la misma en los niveles de producción con eficiencia, disminuyendo los costos por concepto de operaciones erróneas a la hora de determinar los parámetros específicos del proceso.

La tecnología de lixiviación básica, se caracteriza por ser una tecnología que por su complejidad genera desechos gaseosos, sólidos y líquidos, entre los que se encuentran metales de formas libres y sales, producto del proceso de la destilación, como uno de los pilares de las direcciones técnicas que dirigen el proceso son la búsqueda de alternativas tecnológicas que ayuden a sustentar la tecnología carbonato amoniacal dentro de los parámetros internacionales de vertimientos ambientales, cumplimiento de normas de consumo, mitigar las pérdidas por derrame e incrementar la eficiencia de la industria, también tiene como objetivo la búsqueda y diseño de nuevos productos como son briquetas de níquel, sales de sulfuros de níquel entre otras.

Dentro de las alternativas está la búsqueda de níquel por medio de la disolución del carbonato básico de níquel por una parte y por otra la búsqueda de nuevos productos con el objetivo de aprovechar todos. Por el incremento de las pérdidas de níquel el país se vio en la necesidad de buscar alternativa que pueda apalancar



está necesidad. La modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas de procesos, ofreciendo un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivados de la modelación de toda una planta o parte del proceso de producción.

Fundamento de la investigación

El objetivo de la industria del níquel cubana, es el incremento de la producción de los productos de níquel más cobalto, trabajando en el perfeccionamiento del proceso tecnológico para lograr una mayor eficiencia técnico – económica que permita conquistar un espacio en el mercado mundial de ese importante renglón. La planta de Calcinación y Sínter es la encargada de obtener como producto final Sínter de Níquel con pequeños contenidos de Cobalto, Zinc, Cobre y otros elementos que constituyen impurezas.

Problema: Insuficiente conocimiento de los métodos para la disolución del carbonato básico de níquel y cobalto a partir del carbonato básico de Níquel para la obtención de nuevos productos de níquel.

El **objeto de estudio:** Torta de carbonato básico de níquel.

Como **objetivo de la investigación se plantea:** Determinar la influencia de los principales parámetros en el proceso de disolución del Carbonato Básico de Níquel de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar la materia prima (carbonato básico de níquel).
2. Experimentar empleando el diseño factorial completo para describir el comportamiento de las variables.
3. Obtener el modelo estadístico matemático que caracteriza el proceso de disolución del carbonato básico de níquel.



Hipótesis: Si se determinan los parámetros operacionales del proceso de disolución del carbonato básico de níquel, se podrán obtener soluciones adecuadas para la obtención de otros productos derivados.

Metodología de la investigación:

Obtenida la información bibliográfica, se aplica el diseño factorial completo de las principales variables que intervienen en el proceso de disolución del carbonato básico de níquel. El análisis estadístico de correlación y regresión, auxiliados por métodos computacionales como el EXCEL, para analizar la influencia de las principales variables en el proceso de lixiviación ácida para la extracción del cobalto.

En lo científico el carbonato básico níquel.

- Comportamiento de los principales parámetros tecnológicos del proceso de disolución del carbonato básico de níquel.

En lo económico el carbonato básico níquel.

- Obtención de mayores ingresos por concepto de variedad del producto final.



1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

El reactor para la disolución del carbonato básico de níquel es de importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel, porque es donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los reactores (donde ocurre el proceso de lixiviación del mineral laterítico reducido), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de lixiviación. En tal sentido el objetivo del capítulo es: establecer el estado del arte del proceso de los reactores convencionales del mineral mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.1 Trabajos Precedentes

Para el desarrollo del trabajo se consultaron diferentes materiales e informes de investigaciones realizadas con anterioridad, la revisión bibliográfica se basó en la búsqueda de información relacionada con la temática de la disolución y temas a fines, que desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado.

1.1.1 Reactor para la disolución del carbonato básico de níquel

En los trabajos de M. H. Caron fue establecido que bajo determinadas condiciones de la destilación fraccionada de las soluciones carbonato amoniacales se puede obtener carbonato básico de níquel con un contenido pequeño de cobalto. Una de las principales condiciones para la eficiencia de la separación entre estos metales, es la formación de complejos estables de pentammin cobalto que limitadamente pasan al precipitado con descomposición posterior de los complejos de níquel (Caron, 1967).

Este método permite la obtención de carbonato de níquel con un a relación de Ni: Co = 700:1 y el carbonato de cobalto con una relación de Ni: Co de 170:1, en



soluciones que contienen 12-13 g·L⁻¹ de níquel y 0,5-0,6 g·L⁻¹ de cobalto.

Rodríguez (1970; 1978) y Gángara (1980), aportaron información valiosa sobre los mecanismos de reactores que provocan la lixiviación del mineral cuando se introduce un reactivo. A pesar de que ya no se le introduce agua en ninguna de las formas mencionadas sus trabajos no dejan de ser de interés para la investigación.

Osseo, Asare y Asihene (1980) describen desde el punto de vista químico el fenómeno de disolución y precipitación asociado con la recuperación de níquel y cobalto en las incrustaciones de magnesio, en el contexto de los diagramas de pH-⁰E en el sistema de lixiviación carbonato amoniacal-mineral laterítico, así como los fundamentos básicos del proceso CARON.

Fiffe y Granda (1985) realizaron un estudio sistemático a nivel de laboratorio sobre el comportamiento del níquel y el cobalto en soluciones carbonatos amoniacales reportando datos cinéticos de dicho proceso, así como aspectos del mecanismo de disolución.

Chang, et al (1980,85,90,93,94,2007) también realizaron estudios sobre la influencia del régimen de aereación sobre las extracciones de cobalto en la primera etapa de la lixiviación carbonato-amoniacal de los minerales reducidos de Ni, estudios experimentales de la hidrólisis de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato-amoniacal de los minerales oxidados de Níquel previamente reducidos y metodologías perfeccionadas para determinar extractables de Ni y Co en la lixiviación carbonato-amoniacal, con buenos resultados, aplicables a nuestra empresa.

Ramírez, Ivett M., et al. Realizan una caracterización de la pulpa de carbonato de níquel sedimentada, obtenida de la destilación de la solución producto de la lixiviación carbonato-amoniacal, donde solo utilizaron como punto de partida la densidad de la pulpa.

Romero. María M. (2005) Realiza una investigación sobre la cinética del carbonato básico de níquel donde determinan que, con la aplicación de la ecuación generalizada de Kissinger permite el cálculo del factor pre-exponencial



para cada velocidad de calentamiento, por lo que se excluye la influencia de esta en los resultados del cálculo y que la determinación con exactitud de la temperatura correspondiente a la máxima velocidad de la transformación influye en los resultados aceptables de la aplicación del método de Kissinger, para el factor pre - exponencial, en este caso del mismo orden que los obtenidos por la ecuación generalizada.

Como se puede apreciar estos trabajos se referían principalmente a la búsqueda de mayores extracciones de níquel y cobalto en el proceso carbonato amoniacal variando diferentes parámetros operacionales que influyen en dicho proceso.

1.2.1 Descripción del flujo tecnológico de la planta

Para la realización de los experimentos se seleccionó un reactor a escala de laboratorio con mineral de carbonato básico de níquel de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara. La calcinación es el proceso de tostación de mineral en el cual ocurre la descomposición del mismo por el calor. Para eso se usa el horno de tambor rotatorio, donde es calcinado el carbonato básico de níquel mediante la combustión de petróleo precalentado.

El horno para la calcinación del carbonato básico de níquel es un aparato de transferencia de calor y de masa, construido en forma de un horno rotatorio con una inclinación de dos grados al horizonte, como una instalación de transporte. El carbonato llega al horno por la parte superior a partir de los filtros de vacío mediante un sistema de transportador de banda y de tornillo, se traslada a lo largo del mismo por una trayectoria compleja, atravesando cuatro zonas: secado, cadena, calcinación y enfriamiento.

La zona de la cadena es la zona del horno, en la cual se encuentra un gran número de cadena con el objetivo de aumentar la superficie de secado, ya que ellos absorben el calor de los gases y se lo transmiten al carbonato, además evitan que se formen terrones grandes del mineral.

El proceso de secado puede dividirse en tres etapas. En la primera el carbonato, en forma de pasta, eleva su temperatura hasta 80 - 90 °C y solo un pequeño



por ciento de agua es evaporado. Aquí existe cierta condensación del vapor de agua de los gases que salen, al ponerse en contacto con la pasta fría. En esta etapa la pasta mantiene su fluidez y “humedece” las cadenas, exponiendo una gran superficie de secado a los gases calientes y reteniendo polvo arrastrado por dicho gases.

En la segunda etapa la pasta es secada parcialmente y se vuelve pegajosa, se pega al revestimiento del horno y puede formar anillos de pasta, constituyendo la etapa más difícil del proceso húmedo. En la última etapa la pasta es transformada en gránulos con un contenido de agua aproximadamente de un 12 - 20 % , siendo la resistencia de los mismos muy importante para el trabajo de la zona completa, la cual depende además de la composición mineralógica del material.

En la zona de calcinación el carbonato se descompone saliendo el material con una composición química. El dióxido de carbono y el vapor de agua son evacuados con los gases productos de la combustión de (SO_4 , CO_2 , CO), con las partículas de óxido de níquel en suspensión.

Después de la calcinación el óxidos de níquel es enfriado previamente en una doble pared, enfriada mediante duchas exteriores que lo bañan con agua a temperatura ambiente y la piscina donde se encuentra sumergida parte del enfriador, garantizándose así el contacto indirecto entre el NiO y el agua. Este óxidos de níquel a una temperatura de 100 - 150 °C constituye el producto final del horno de calcinación.

En estas tres zonas es necesario mantener un régimen aerodinámico y térmico adecuado para el desarrollo exitoso del proceso, resultando el intercambio térmico algo complejo, donde el portador de calor principal son los gases productos de la combustión del petróleo. En el proceso de transferencia de calor pueden destacarse tres vías de transmisión: por radiación y convección de los gases directamente al carbonato, por radiación y conducción del refractario en la parte del horno cubierta por este y por radiación de la parte del horno no cubierta por el material a este último.



Los gases de la combustión se mueven a través del horno en sentido contrario (contracorriente) al desplazamiento del mineral, con el cual se ponen en contacto, transfiriendo su calor e este, asimismo la humedad y el dióxido de carbono desprendido por el material.

Para la regulación automática del horno de calcinación, con la técnica de modelo asociado, se requiere la simulación de su funcionamiento en una computadora. Esto se logra modelando matemáticamente las leyes rectoras del proceso.

Conclusiones del capítulo 1

- En la bibliografía consultada se observa que la problemática del reactor del mineral reducido aun no se resuelve y que pocos se han dedicado a evaluar el comportamiento de las diferentes variables que caracterizan el proceso a escala industrial, sobre la base de un diseño de experimentos.
- El estado actual de la automatización del proceso del reactor del mineral evidenció la no existencia de un sistema de control integral que garantice el monitoreo del mayor número de parámetros que caractericen el proceso.



2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Introducción

Los métodos y materiales empleados en la investigación, se describen a continuación, así como el diseño experimental aplicado al proceso de disolución. Se establecen los parámetros que caracterizan la disolución de carbonato básico de níquel y se describen las metodologías para los estudios estadísticos de dicho proceso.

2.2 Métodos empleados en la investigación

1- Método lógico deductivo.

Se aplican los principios descubiertos a casos particulares, a partir de un enlace de juicios. El papel de la deducción en la investigación es doble: Primero consiste en encontrar principios desconocidos, a partir de los conocidos, también sirve para descubrir consecuencias desconocidas, de principios conocidos.

2- Método hipotético-deductivo.

Se propone la hipótesis como consecuencia de sus inferencias del conjunto de datos empíricos o de principios y leyes más generales. En el primer caso arriba a la hipótesis mediante procedimientos inductivos y en segundo caso mediante procedimientos deductivos.

3- Método lógico inductivo.

Es el razonamiento que, partiendo de casos particulares, se eleva a conocimientos generales. Este método permite la formación de hipótesis, investigación de leyes científicas, y las demostraciones.



4- Método histórico.

Está vinculado al conocimiento de las distintas etapas de los objetos en su sucesión cronológica, para conocer la evolución y desarrollo del objeto o fenómeno de investigación.

5- Método sintético.

Es un proceso mediante el cual se relacionan hechos aparentemente aislados y se formula una teoría que unifica los diversos elementos. Consiste en la reunión racional de varios elementos dispersos en una nueva totalidad.

6- Método analítico.

Se distinguen los elementos de un fenómeno y se procede a revisar ordenadamente cada uno de ellos por separado; a partir de la experimentación y el análisis de gran número de casos se establece leyes universales.

7- Método experimental

Implica alteración controlada de las condiciones naturales, de tal forma que el investigador creara modelos, reproducirá condiciones, abstraerá rasgos distintivos del objeto o del problema.

2.3 Metodología termodinámica del proceso

- 1.- A partir de la reacción química determinar la constante de equilibrio (literalmente).
- 2.- Por cualquiera de los métodos conocidos determinar el valor del potencial isobárico isotérmico de la reacción.
- 3.- Obtener literalmente el valor de la constante de equilibrio a partir de la expresión integrada del potencial isobárico isotérmico.
- 4.- Sustituir en la expresión obtenida la constante de equilibrio y obtener el modelo literalmente que describa el comportamiento de la temperatura para cada reacción.



5.- Evaluar la expresión para las condiciones deseadas. Tabulación y graficado de los resultados obtenidos.

2.4 Características de la materia prima (Carbonato Básico Níquel)

El carbonato básico de níquel es una pulpa de color verde que constituye el producto de la planta de Recuperación de Amoniaco, la cual se somete a calcinación y sinterización para la obtención del producto final de la empresa. Posee una densidad específica entre 2,0 y 2,5 g/cm³;

2.4.1. Composición química

La composición química cuantitativa promedio del carbonato básico de níquel, varía en dependencia de las características del mineral alimentado a la planta de extracción de níquel y de su eficiencia, se ha podido determinar que esta oscila en un amplio rango como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química promedio del carbonato básico de níquel.

Elementos (%)						
Ni	Co	Fe	Mg	Cu	Zn	Mn
50,84	0,079	0,034	0,0048	0,0002	0,063	0,221
50,68	0,083	0,030	0,0031	0,0001	0,062	0,218

De acuerdo a la composición química que se muestra en la tabla, el carbonato básico es una materia prima contenedora de más del 50 % de níquel contenido en su seno en forma de hidróxido y carbonato esencialmente, y posee un bajo contenido de otras especies metálicas.

2.4.2. Granulometría

En la tabla 2.2, se ofrece la composición granulométrica de una muestra de carbonato básico de níquel.



Tabla 2.2 Composición granulométrica del carbonato básico de níquel

Pruebas	Tamaño de partículas (micrones)				
	- 100 + 64	- 64 + 45	-45 + 32	-32 + 22	- 22 + 00
Muestra 1 (%)	6,88	3,36	30,48	55,95	3,35
Muestra 2 (%)	5,46	4,35	28,33	58,36	3,5

Nota. Tomado de Informe técnico del CEDINNIQ

Como se muestra en la tabla, existe una variación significativa en la composición granulométrica en el carbonato básico.

Los resultados mostrados en la tabla reflejan que más del 85 % del carbonato básico de níquel se encuentran en la fracción -45 +32 y -32 + 22 micrones.

2.5. Reactivos

- Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Ácido clorhídrico concentrado (HCl).
- Ácido nítrico concentrado (HNO_3).
- Carbonato básico de níquel.

2.6 Materiales

Los materiales y herramientas utilizados son los siguientes:

- Reactor de 1,0 L de capacidad
- Agitador magnético.
- Balanza analítica.
- Embudos.
- Papel de filtro.
- Termómetro de referencia.

- Volumétricos.
- Otra cristalería de laboratorio

2.7 Instalación empleada en el proceso de investigación

Con el fin de lograr los objetivos propuestos, la parte experimental estuvo dirigida a simular a escala de laboratorio el proceso de disolución ácida del carbonato básico de níquel, para lo que se empleó la instalación que se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1. Instalación experimental empleada en la investigación

2.8. Estudio de los principales factores que influyen en la disolución de níquel contenido en el carbonato básico, por medio de la disolución con ácidos.

Las investigaciones sobre el proceso de disolución ácida del carbonato han estado dirigidas a estudiar los factores que influyen en el proceso de manera independiente o la combinación de algunos de ellos, sin establecer relaciones que permitan indicar el comportamiento del material durante la disolución. Mucho



menos se ha realizado un estudio integrador y exhaustivo para la disolución del carbonato básico.

Los parámetros de estudio son:

- Concentración inicial del ácido.
- Temperatura del proceso.

Se tuvo en cuenta las características de la materia prima (carbonato básico de níquel), las posibles transformaciones químicas durante el proceso y las características de los productos de la lixiviación.

Se utilizó una muestra representativa del carbonato básico de la planta de calcinación para conocer el comportamiento durante la disolución.

La metodología utilizada para la realización de los experimentos es la siguiente:

- 1.- Se tomó una muestra representativa del carbonato básico de níquel el que se sometió a un proceso de lavado.
- 3.- Posteriormente fue filtrado para eliminar los residuos de solución amoniacal contenido en su seno y facilitar el balance de masa del proceso.
- 2.- El producto obtenido se sometió a análisis químico por fluorescencia de rayos X, para determinar la composición química de la materia prima a tratar.
- 3.- La investigación se llevó a cabo a escala de laboratorio en la instalación propuesta para tal objetivo (Figura 2.1), donde se realizó el cálculo y análisis de la capacidad del reactor a utilizar, teniendo en cuenta que posee un volumen total de 1 L. De ahí que el volumen de trabajo, para un coeficiente de utilización (α) del 85 % sería:

$$V_{\text{trabajo}} = V_{\text{total}} \cdot \alpha$$

$$V_{\text{trabajo}} = 1 \cdot 0,85$$

$$V_{\text{trabajo}} = 0,85 \text{ L}$$



4.- A partir del conocimiento de la información obtenida y de la matriz de experimentación codificada que se muestra en la tabla 2.3, se determinaron las cantidades de reactivos involucradas en las pruebas.

Para el diseño de la matriz de experimentación se utilizó el método factorial completo, que está basado en todas las posibles combinaciones entre las variables de estudio y los niveles escogidos.

Se estudiaron cuatro factores en dos niveles, quedando la cantidad de pruebas a realizar de la manera siguiente: $2^2 = 4$ pruebas.

Tabla 2.3 Matriz de experimentación codificada

Pruebas	X ₁	X ₂
1	+	+
2	-	+
3	+	-
4	-	-

5.- Teniendo en cuenta el diseño, se procede al cálculo y determinación de los factores y niveles de experimentación mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Factores y niveles de experimentación

Factores Niveles	T (°C)	cH ₂ SO ₄ (g/L)	cHCl (g/L)	cHNO ₃ (g/L)
Mínimo	40	0,5	20	16
Básico	50	0,75	30	20
Máximo	60	1	40	24

Y posteriormente se realiza la matriz experimental real, la que se muestra en la tabla 2.5.



Tabla 2.5 Matriz real de experimentación

Factores Pruebas	T (°C)	H ₂ SO ₄ (mL)	HCl (mL)	HNO ₃ (mL)
1	40	148	-	-
2	60	148	-	-
3	40	223	-	-
4	60	223	-	-
5	40	-	70	-
6	60	-	70	-
7	40	-	105	-
8	60	-	105	-
9	40	-	-	121
10	60	-	-	121
11	40	-	-	182
12	60	-	-	182

Considerando que la densidad de la materia prima empleada es de 1,10 kg/L.

Se parte de la expresión siguiente:

$$\frac{1}{\rho_{\text{pulpa}}} = \frac{x_{\text{sólido}}}{\rho_{\text{sólido}}} + \frac{1-x_{\text{sólido}}}{\rho_{\text{líquido}}}$$

donde:

ρ_{pulpa} , $\rho_{\text{sólido}}$, $\rho_{\text{líquido}}$ densidad de la pulpa, densidad del sólido y densidad del líquido.

$x_{\text{sólido}}$, $1 - x_{\text{sólido}}$ fracción másica del contenido de sólido y líquido.

Sustituyendo:



$$\frac{1}{\rho_{\text{pulpa}}} = \frac{0,40}{1,10} + \frac{1-0,40}{1,0} = 0,96$$

Por tanto:

$$\rho_{\text{pulpa}} = \frac{1}{0,895} = 1,041 \text{ kg/L}$$

De ahí que la masa total de pulpa se calcula por medio de:

$$m_{\text{pulpa}} = \rho_{\text{pulpa}} V$$

Sustituyendo:

$$m = 1,041 \text{ kg/L} \cdot 0,85 \text{ L} = 0,88 \text{ kg}$$

A partir del resultado se determina la masa de sólido y líquido inicial.

$$m_{\text{sólido}} = m_{x\%} \cdot \% \text{ sól}$$

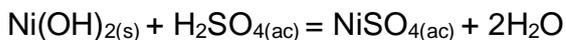
Sustituyendo:

$$m_{\text{sólido}} = 0,88 \text{ kg} \cdot 0,4 = 0,352 \text{ kg}$$

$$m_{\text{líquido}} = 0,88 \cdot 0,6 = 0,528 \text{ kg}$$

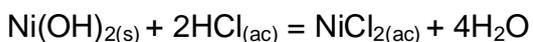
La concentración inicial de ácido se determinó por cálculos estequiométricos, basados en la composición química del carbonato básico de níquel.

Masa de ácido sulfúrico:



Partiendo de una masa de 0,353 kg carbonato básico con una ley de 20 %, la cantidad de níquel es de 0,07 kg, y considerando que se disuelva totalmente el níquel, la masa de ácido estequiométrico es de 0,118 kg.

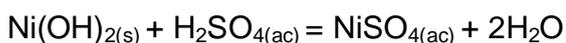
Masa de ácido clorhídrico:





Partiendo de una masa de 0,353 kg carbonato básico con una ley de 20 %, la cantidad de níquel es de 0,07 kg, y considerando que se disuelva totalmente el níquel, la masa de ácido estequiométrico es de 0,088 kg.

Masa de ácido nítrico:



Partiendo de una masa de 0,353 kg carbonato básico con una ley de 20 %, la cantidad de níquel es de 0,07 kg, y considerando que se disuelva totalmente el níquel, la masa de ácido estequiométrico es de 0,152 kg.

7.- Se realizaron las pesadas de la muestra y reactivos y se introdujeron en el reactor en dependencia de cada condición.

8- Luego de preparada la instalación, se realizaron las pruebas según el diseño planteado, durante el tiempo de tratamiento de 20 min, se tomaron las muestras.

9.- Posteriormente el producto lixiviado se sometió a un proceso de separación líquido – sólido. El licor filtrado se envió al laboratorio para análisis químico.

10.- El sólido se lavó con agua caliente y se secó en estufa a 65 °C, el que se envió al laboratorio analítico para análisis químico.

2.9. Metodología para la modelación estadística- matemático.

Para determinar la veracidad de los resultados experimentales y comprobar el comportamiento de los diferentes factores, se realiza el estudio estadístico- Matemático, utilizando como herramienta la metodología descrita.

Control de homogeneidad de los valores (según filas)

1. Por cada una de las filas se toman los valores dudosos, por apreciación del investigador (y^*).
2. Se determina el valor promedio (sin tener en cuenta el error).
3. Determinación de la desviación cuadrática (sin incluir el dudoso).



4. Cálculo del valor del criterio t student.
5. Determinación de t_{tab} – grados de libertad $f = n - 1$, nivel de significación $\alpha=0,05$.
6. Comparación de los criterios $t_{calc}-t_{tab}$.

Cálculo de la dispersión por fila y control de su homogeneidad

1. Se determina la dispersión por cada una de las filas.
2. Luego la suma de las dispersiones.
3. Cálculo del criterio de Cochran (G) para cada fila.

Cálculo de la dispersión de reproducibilidad

1. Error de reproducibilidad.
2. Cálculo del criterio t student
3. Determinar t_{tab} ; $f = N (n-1)$; $\alpha = 0,05$.
4. Comprobación de los criterios $t_{calc} - t_{tab}$.

Cálculo del valor medio de respuesta y control del significado de su diferencia

1. Valor del criterio de student
2. Determinación de t_{tab} ; $f = n_{max} + n_{min}$.
3. Comprobación del criterio $t_{cal} - t_{tab}$

Determinación de los coeficientes de la ecuación de regresión.

Este cálculo se realiza tomando los signos verticales de la matriz de experimentación.

Control estadístico del significado de los coeficientes de la ecuación de regresión

1. Error de la prueba.
2. Cálculo del criterio t student.



3. Determinar t_{tab} ; $f = N (n-1)$; $\alpha = 0,05$.
4. Comprobación de los criterios $t_{\text{calc}} - t_{\text{tab}}$.

Control de la adecuación de la ecuación de regresión

1. Se realiza el cálculo para cada punto del plano por medio de la ecuación
Este cálculo se realiza tomando los signos horizontales de la matriz de experimentación.
 2. Dispersión de adecuación.
 3. Se calcula el criterio de Fisher.
 4. Determinar F_{tab} : $f_1 = N - (n - 1)$; $f_2 = N (n - 1)$; $\alpha = 0,05$.
 5. Comprobación del criterio $F_{\text{calc}} - F_{\text{tab}}$.
- Si $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$; el modelo es adecuado al objeto investigado.

Cálculo del coeficiente de correlación

Los coeficientes de correlación pueden tomar los siguientes significados.

$R=0$, No hay correlación.

$R=1$, Relación positiva.

$R= -1$, Relación negativa.

2.10. Técnica experimental

2.10.1. Análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Se basa en la excitación de los electrones de un elemento determinado mediante la acción de una llama de oxígeno y acetileno también conocida llama de oxidación, posteriormente se emplea una lámpara de cátodo hueco del mismo elemento a analizar. No es más que la absorción selectiva de radiaciones electromagnéticas de diversas regiones del espectro por el sistema homogéneo. El análisis por espectrofotometría se empleó para determinar las concentraciones

de níquel total y níquel disuelto en el licor clarificado, además de la composición de los sulfuros precipitados. De acuerdo a la norma NEIB 300-01:2001 para análisis químicos de sulfuros de níquel y cobalto. (Ver figura 2.2)



Figura 2.2 Espectrofotómetro por absorción atómica

2.10.2. Análisis por Espectrofotómetro por plasma inducido (ICP)

La técnica de ICP es un método de alta eficiencia, el cual permite la determinación de elementos químicos con gran cantidad de energía y la utilización de pequeños volúmenes de muestras y en corto tiempo, en tales condiciones los átomos en los niveles excitados, se ionizan generando un plasma que se conduce a un analizador para la determinación de concentraciones de los elementos que se encuentren en el orden de los nanogramos por litros. (ver figura 2.3)



Figura 2.3 Espectrofotómetro por plasma inducido (ICP)



Conclusiones del Capítulo 2

- 1- Se establecieron los procedimientos para la disolución del níquel en el carbonato de níquel en el reactor.
- 2- Se seleccionó el método de diseño factorial completo para la planificación matemática de los experimentos en la disolución del níquel.
- 3- Se seleccionó la metodología para la modelación estadístico – matemático para la investigación , que posibilita determinar los modelos que caracterizan los procesos de disolución carbonato básico de níquel.



3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los principales resultados de la investigación, así como el análisis realizado a cada una de las variables de estudio.

3.1. Análisis termodinámico

Las principales reacciones que tienen posibilidad de ocurrir durante el proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico se muestran a continuación:

1. $\text{NiCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{NiSO}_4(\text{ac}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
2. $\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac}) = \text{NiSO}_4(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O}$
3. $\text{NiCO}_3(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{ac}) = \text{NiCl}_2(\text{ac}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
4. $\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{ac}) = \text{NiCl}_2(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O}$
5. $\text{NiCO}_3(\text{s}) + 2\text{HNO}_3(\text{ac}) = \text{Ni}(\text{NO}_3)_2(\text{ac}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
6. $\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{HNO}_3(\text{ac}) = \text{Ni}(\text{NO}_3)_2(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O}$

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra la posibilidad termodinámica de ocurrencia de las transformaciones físico - químicas de estudio.

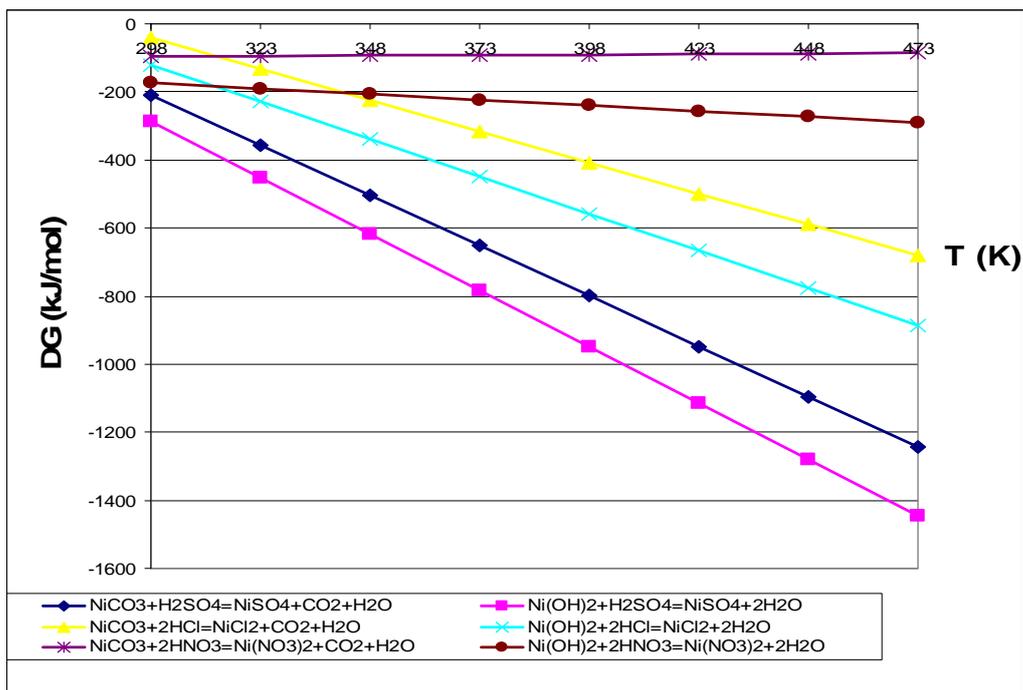


Figura 3.1. Posibilidad termodinámica de las reacciones de disolución

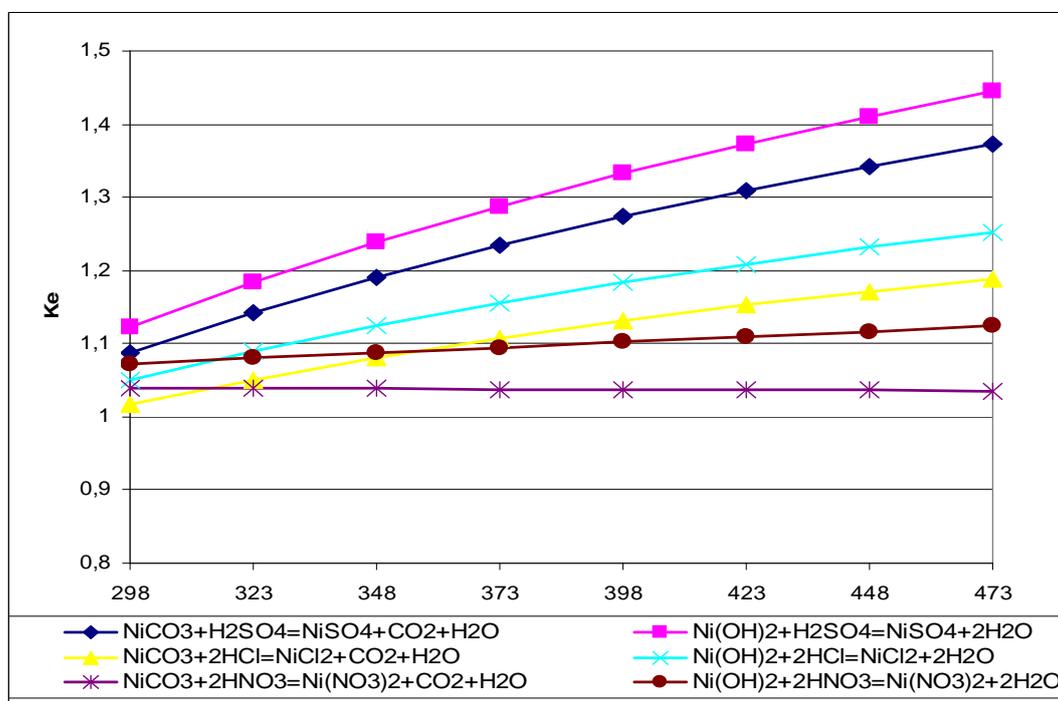


Figura 3.2. Valores de las constantes de equilibrio de las reacciones de disolución



Analizando las figuras 3.1 y 3.2 la reacción con mayor espontaneidad es la interacción del hidróxido de níquel con el ácido sulfúrico, seguida la del propio reactivo con el carbonato de níquel, con tendencia similar pero en una menor cuantía se encuentran las reacciones con el ácido clorhídrico. Una tendencia estable (poca variabilidad con el aumento de la temperatura) tienen las reacciones con el ácido nítrico, además de ser las de menores valores de constantes de equilibrio.

3.2. Análisis estadístico

El análisis estadístico, se realizó con el fin de obtener un modelo de regresión que se adecuara a los parámetros de estudio.

Los resultados de laboratorio obtenidos fueron sometidos en primer orden a un control de homogeneidad y luego se determinó los valores de extracción, para el caso de la influencia de los principales parámetros sobre la disolución del carbonato básico de níquel. Los valores de contenido de níquel en solución se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Contenido de níquel en solución

No	H ₂ SO ₄			HCl			HNO ₃		
	1	2	promedio	1	2	promedio	1	2	promedio
1	40,38	40,41	40,40	45,09	45,36	45,23	40,96	41,06	41,01
2	44,35	44,44	44,40	43,10	43,06	43,08	41,35	40,62	40,99
3	38,99	39,60	39,30	42,86	42,24	42,55	42,84	42,76	42,80
4	42,24	42,68	42,46	39,51	40,20	39,86	38,76	39,09	38,93

Posteriormente los datos fueron sometidos a la determinación de la dispersión por filas y control de la homogeneidad basada en el criterio de Cochran como se muestra en la tabla 3.2.



Tabla 3.2 Dispersión por filas

H ₂ SO ₄			HCl			HNO ₃		
	Dispersión	Cochran		Dispersión	Cochran		Dispersión	Cochran
1	0,00	0,00	1	0,04	0,127	1	0,01	0,017
2	0,00	0,014	2	0,00	0,003	2	0,17	0,640
3	0,18	0,647	3	0,19	0,669	3	0,05	0,011
4	0,09	0,337	4	0,14	0,228	4	0,05	0,189
Cochran tabulado					0,6798			

Todos los valores calculados del criterio de Cochran son menores que el valor tabulado, por tanto existe una homogeneidad entre los valores de las diferentes filas que muestran las pruebas.

A partir del cálculo anterior se determina la dispersión de reproducibilidad y el error de reproducibilidad, los que son empleados para demostrar la reproducibilidad del proceso en cuestión (Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Dispersión y error de reproducibilidad

	Dispersión de Reproducibilidad,	Error de Reproducibilidad,	t_{cal}	t_{tab}
H ₂ SO ₄	0,07	0,27	3,73	1,86
HCl	0,12	0,34	2,93	
HNO ₃	0,08	0,29	3,49	

En el caso de estudio los valores calculados son mayores que el valor tabulado, por lo que es reproducible el proceso de disolución del carbonato básico de níquel en los ácidos considerados.

El error de la prueba. $S_p_{H_2SO_4} = 0,07$ $S_p_{HCl} = 0,09$ $S_p_{HNO_3} = 0,07$



El control estadístico de los valores de los coeficientes de la ecuación de regresión por medio de la comparación con los valores del criterio de la t de student se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Significación de los coeficientes de la ecuación de regresión

Coeficientes	H ₂ SO ₄		HCl		HNO ₃	
	Valor	t _{calc}	Valor	t _{calc}	Valor	t _{calc}
b₀	41,64	621,38	42,68	636,92	40,93	610,84
b₁	-1,79	-26,73	1,21	18,06	0,98	14,55
b₂	0,76	11,32	1,48	22,01	0,07	1,01
b₁₂	-0,21	-3,12	-0,14	-2,05	-0,96	-14,36
t _{tabulado} = 1,86						

A excepción del valor b₂ del ácido nítrico todos los demás valores calculados son significativos por lo que quedan dentro del modelo de regresión.

Y determinado la dispersión de adecuación de cada uno de los puntos del plano de investigación y comparando con el valor del criterio de Fisher, se obtiene que la dispersión de adecuación es:

$S^2_{adec} = 0,00$ y el valor del criterio Fisher tabulado es 2,31.

Como el F_{cal} es menor que el F_{tab} , el modelo es adecuado al objeto investigado en los parámetros de estudio.

Y los modelos de regresión de los casos de estudio son:

Para el **H₂SO₄**

$$\% \text{Ni}_{\text{solución}} = 41,64 - 1,79 \cdot T + 0,76 \cdot A - 0,21 \cdot T \cdot A$$

Para el **HCl**



$$\% \text{Ni}_{\text{solución}} = 42,62 + 1,21 \cdot T + 1,48 \cdot A - 0,14 \cdot T \cdot A$$

Para el HNO_3

$$\% \text{Ni}_{\text{solución}} = 40,93 + 0,98 \cdot T - 2,05 \cdot T \cdot A$$

Según los modelos obtenidos para los rangos de parámetros estudiados, los valores medios de níquel en solución son de: 41,64; 42,62 y 40,93 % cuando se emplean ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico respectivamente.

A partir de los modelos estadístico matemático se muestra que no existen grandes diferencias entre los valores medios de disolución del carbonato básico de níquel (1,69 %), pudiéndose usar los tres reactivos para la disolución.

Los efectos principales bT (temperatura), bA (ácido) miden cómo afecta cada factor al proceso de disolución del carbonato básico.

Haciendo un análisis de los efectos principales en cada modelo:

Para el H_2SO_4

Se plantea que el tratamiento que provoca un mayor cambio del contenido de níquel en solución es bT, el valor bT = -1,79 indica que la disolución del carbonato aumenta en esa cantidad al disminuir la temperatura en ese rango, en segundo orden el parámetro que más influye es la cantidad de ácido bA = 0,76, es decir, al variar la concentración inicial del ácido sulfúrico de 149 a 223 mL trae consigo un crecimiento en la disolución del carbonato de 1,52 %, para optimizar el proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido sulfúrico, es necesario realizar los principales ajustes en la temperatura primeramente y luego en la cantidad de ácido sulfúrico.

Tomando en consideración solo los efectos principales, las mejores condiciones para realizar el proceso de disolución del carbonato básico de níquel es a valores de 40 °C de temperatura y cantidades iniciales de ácido sulfúrico de 223 mL.



Para el **HCl**

El tratamiento que provoca un mayor cambio del contenido de níquel en solución es bA, el valor $bA = 1,48$ indica que la disolución del carbonato aumenta en esa cantidad al incrementar la cantidad de ácido clorhídrico desde 70 a 105 mL , en segundo lugar el parámetro influyente es la temperatura $bT = 1,21$, indica que al variar la temperatura de 40 a 60 °C crece la disolución del carbonato en 2,42 %, por lo que para optimizar el proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido clorhídrico, es necesario realizar los principales ajustes en la cantidad de ácido clorhídrico y posteriormente en la temperatura.

Las mejores condiciones para realizar el proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido clorhídrico es a valores de 60 °C de temperatura y cantidades iniciales de ácido de 105 mL.

Para el **HNO₃**

Para el caso, el único efecto significativo que provoca variación del contenido de níquel en solución es la temperatura, donde el valor $bT = 0,98$ indica que la disolución del carbonato aumenta en 1,95 % al aumentar la temperatura desde 40 hasta 60 °C, los ajustes necesarios se harán en la temperatura.

Las mejores condiciones para realizar el proceso de disolución del carbonato básico de níquel es a valores de 60 °C temperatura y cantidades iniciales de ácido nítrico de 121 mL.

3.3. Análisis experimentales.

3.3.1. Comportamiento en la variación del contenido de níquel en la solución con respecto al tiempo.

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de la disolución del níquel con respecto al tiempo. Se observa que el tiempo de disolución es muy rápido y a partir de los cuatro minutos prácticamente el contenido de níquel en la solución permanece invariable.

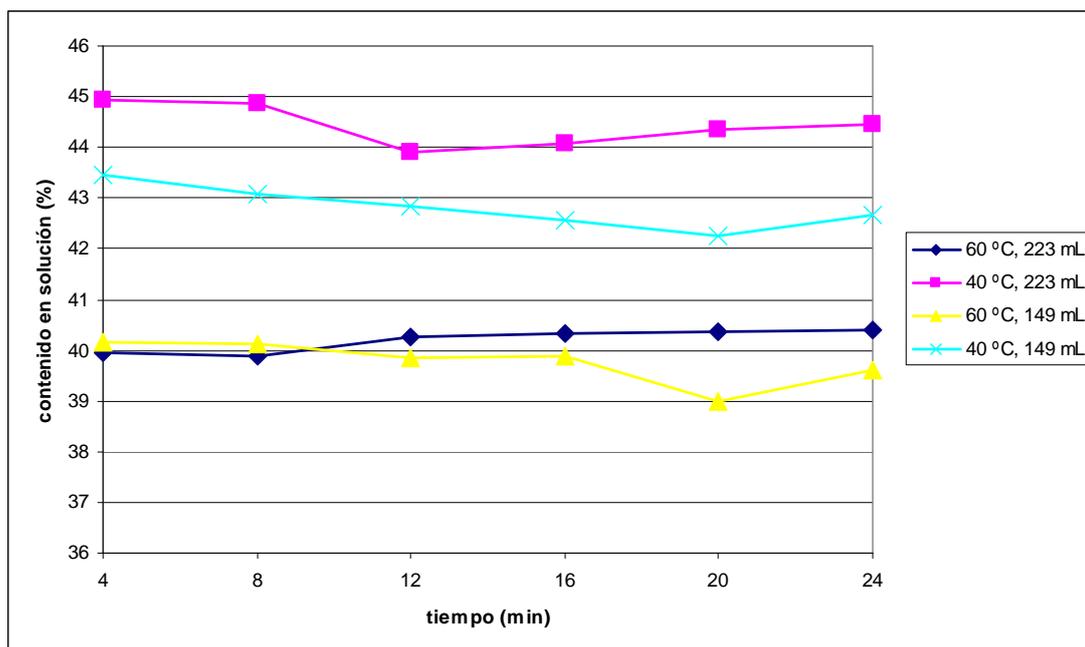


Figura 3.3. Variación del contenido de níquel en la solución en el tiempo cuando se emplea ácido sulfúrico.

Como se muestra en la figura la prueba que tuvo mayor disolución del níquel fue la que ocurrió a temperatura de 40 °C y elevadas cantidades de ácido inicialmente (223 mL), y se tuvo un comportamiento de bajas disoluciones relativa cuando las condiciones experimentales fueron de 60 °C y bajas cantidades iniciales del agente disolvente.

También se puede observar que a valores altos de temperatura (60 °C) se obtuvieron las menores disoluciones de níquel, corroborando lo planteado estadísticamente.

La disolución media del níquel está en un rango entre los 39 y 45 % de la especie metálica en la solución.

Los resultados de disolución de los compuestos de níquel con ácido clorhídrico se muestran en la figura 3.4

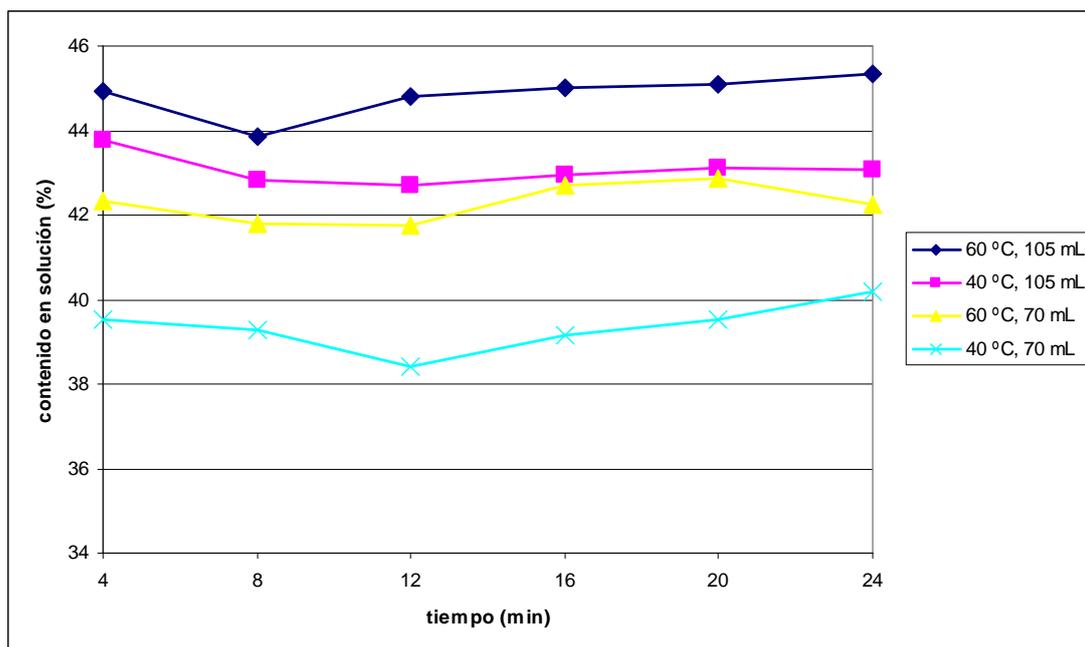


Figura 3.4. Variación del contenido de níquel en la solución en el tiempo cuando se emplea ácido clorhídrico.

En las condiciones estudiadas el rango medio de la disolución del níquel está entre 38,5 y 45,2 %. En el caso de disolución con ácido clorhídrico las mejores condiciones fueron a 60 °C y altas cantidades de reactivo disolvente (105 mL), mientras que las más bajas disoluciones se lograron cuando existían las más bajas condiciones de temperatura y ácido. Existe estabilidad en el comportamiento de la disolución de la especie química, durante el tiempo de estudio.

En la figura 3.5 se muestran los resultados de la disolución del níquel con ácido nítrico.

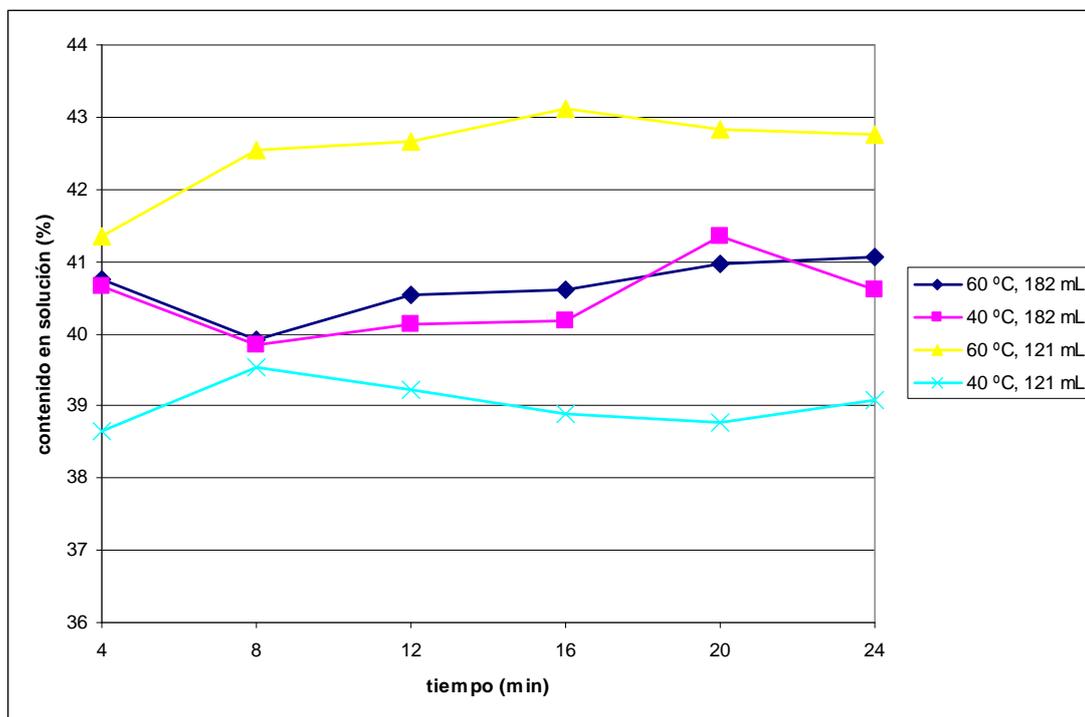


Figura 3.5. Variación del contenido de níquel en la solución en el tiempo cuando se emplea ácido nítrico.

Se muestra un ligero carácter creciente en las curvas de disolución, es decir, aun existe níquel con posibilidades de disolverse en el tiempo, situación contraria a los casos anteriores donde existe estabilidad en la disolución.

Los mayores resultados de disolución se obtuvieron en condiciones de máxima temperatura y baja cantidad de reactivo disolvente y las más bajas disoluciones se lograron en las mínimas condiciones de experimentación.

3.3.2. Efecto de la temperatura

Los resultados del estudio termodinámico y estadístico experimental del proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico indican a la temperatura como uno de los factores principales a tener en cuenta durante la disolución.



En la figura 3.6, se muestra la variabilidad del contenido de níquel que pasa a solución durante el proceso de disolución, se indican los valores promedios mínimos y máximos a diferentes valores de temperatura.

La temperatura como una de las variables del proceso de disolución ácida del carbonato básico, expone los mayores valores de disolución de 43,89 a 60 °C, cuando es empleado el ácido clorhídrico como agente disolvente, mientras que su menor valor de disolución 41,47 % es logrado a temperatura de 40 °C; la curva presenta un carácter creciente, donde se tiene una diferencia entre ambos valores de 2,42 %.

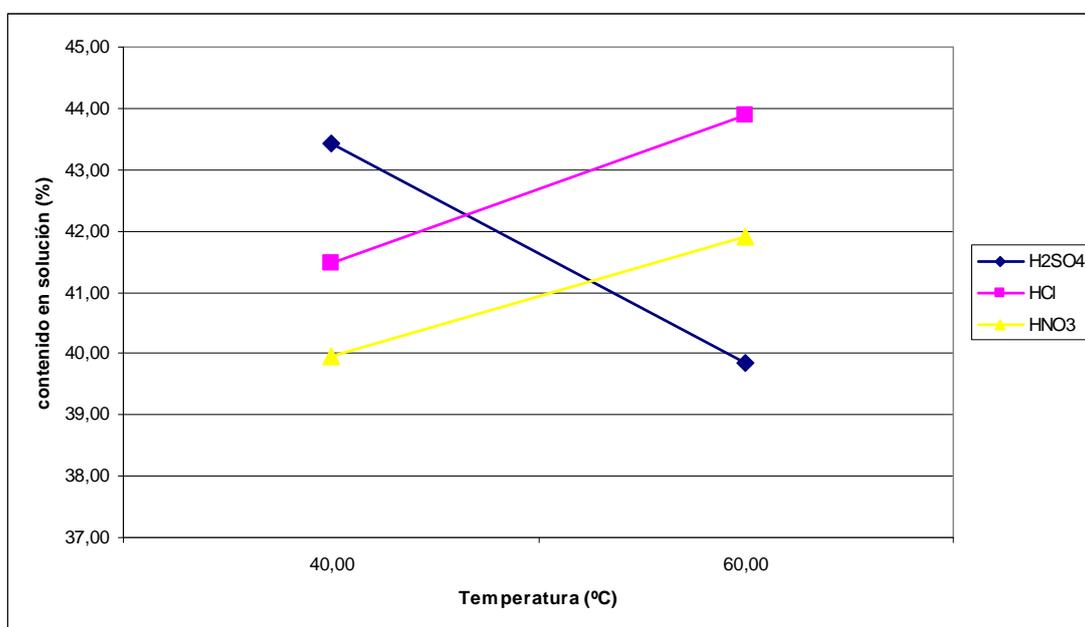


Figura 3.6. Efecto de la temperatura sobre el contenido de níquel en solución

En la propia figura se muestra que el proceso de disolución empleando el ácido nítrico como disolvente tiene un comportamiento similar al caso anterior, pero con valores de disolución inferiores (40 °C – 39,96; 60 °C – 41,91) teniendo también una menor diferencia de 1,95, lo que muestra una menor pendiente respecto al caso estudiado anteriormente.

Contradictoriamente con el estudio termodinámico el proceso de disolución del carbonato básico de níquel con ácido sulfúrico manifestó un comportamiento



inversamente proporcional al aumento de la temperatura, es decir se tienen valores más elevados de disolución (43,43 %) a temperatura de 40 °C y 39,85 % a 60 °C, con una diferencia de -3,58 %, lo que muestra una mayor pendiente que en los casos visto anteriormente, pero de manera inversa.

3.3.3. Efecto de la cantidad inicial de reactivo disolvente

En la figura 3.7 se muestra el efecto que se tiene al variar las cantidades iniciales de reactivo disolvente sobre la disolución del carbonato básico de níquel.

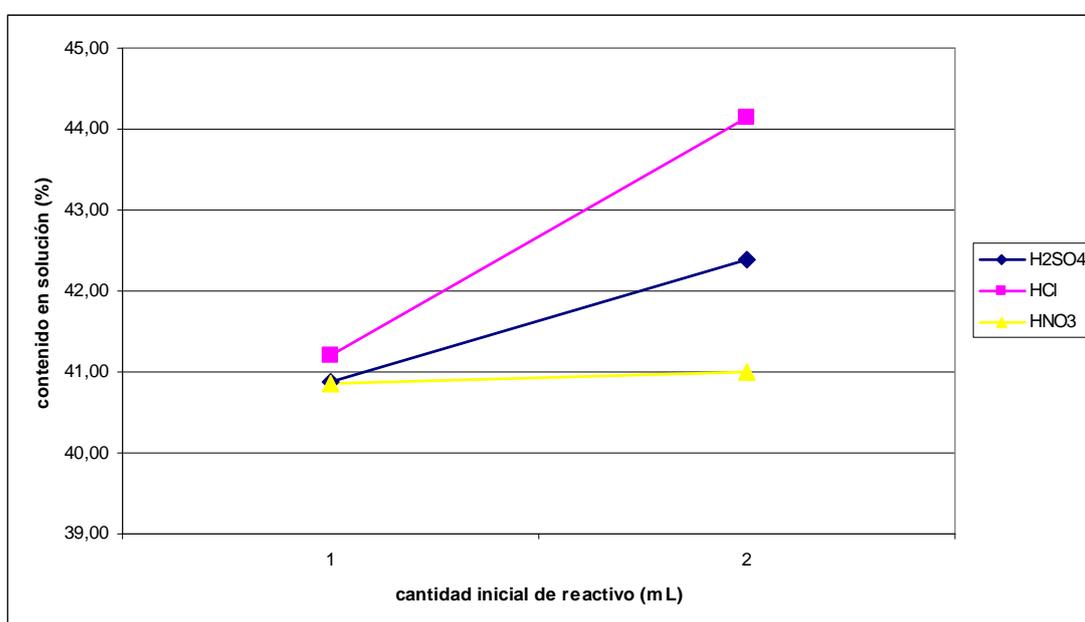


Figura 3.7. Efecto de la cantidad inicial de reactivo disolvente sobre el contenido de níquel en solución (1 y 2 – valores mínimos y máximos de cantidades de reactivo)

A partir de la figura en orden creciente el efecto del reactivo disolvente se muestra de la manera siguiente: HNO₃, H₂SO₄ y HCl, con valores de níquel en solución prácticamente coincidentes en la mínima cantidad inicial de reactivos disolventes.

El contenido en solución de níquel, empleando el ácido nítrico presenta un comportamiento estable para ambos valores del reactivo disolvente (121 y 182 mL). La diferencia de los valores del contenido de níquel en solución varía solo en 0,14 % en los dos niveles de estudio.



La variación del contenido de níquel en solución empleando ácido sulfúrico es de 1,52 %, teniendo un comportamiento directamente proporcional al incremento de la cantidad inicial de reactivo, logrando los mayores valores de 42,40 % de níquel en solución.

La mayor pendiente mostrada en la figura implica un mayor efecto del reactivo disolvente en la disolución del carbonato de níquel, tal categoría corresponde al uso del ácido clorhídrico, donde se obtienen valores máximos de disolución de níquel de 44,15 % al valor máximo de la cantidad del reactivo disolvente (105 mL).

3.3.4. Evaluación económica

Considerando que el proceso de disolución del carbonato de níquel, es un proceso intermedio dentro de un flujo tecnológico que tiene como objetivo la obtención de sales u otros productos, se toma como base de cálculo el consumo de reactivos en la disolución para procesar 1 t de carbonato básico por día.

Se hace el análisis simultáneo de los tres reactivos a emplear (ya que su uso será en función del producto que se desee obtener, sulfatos, óxidos o nitratos)

Para cada 1 t de carbonato básico de níquel que se procesa, se consumen 0,637 t de H₂SO₄, 0,3 t de HCL y 0,52 t de HNO₃.

Si el costo promedio del ácido sulfúrico es de 8312 USD/t; de ácido clorhídrico es de 6666 USD/t y de ácido nítrico 13332 USD/t, entonces el costo según el consumo es:

$$0,637 \cdot 8312 = 5296,12 \text{ USD}$$

$$0,3 \cdot 6666 = 1999,8 \text{ USD}$$

$$0,52 \cdot 13332 = 6932,64 \text{ USD}$$

Mostrando que económicamente el reactivo más conveniente a utilizar sería el ácido clorhídrico.



Conclusiones parciales

1. Termodinámicamente es posible la disolución del carbonato básico de níquel con los tres reactivos propuestos con preferencia hacia el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico.
2. Estadísticamente se mostró el comportamiento de las variables de estudio (temperatura y cantidad inicial de reactivo) y se obtuvo el modelo que se adecua al proceso en cuestión.
3. A partir de un sencillo cálculo económico la variante más factible es cuando se usa el ácido clorhídrico.



CONCLUSIONES

En la investigación se mostró el comportamiento de la disolución del carbonato básico de níquel frente a reactivos disolventes como el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico. Donde se demostró que la disolución del carbonato básico de níquel con los tres reactivos propuestos con preferencia hacia el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico son viable tecnológicamente, pero económicamente tienen sus diferencias.

Estadísticamente se demostró el comportamiento de las variables de estudio (temperatura y cantidad inicial de reactivo) y se obtuvo el modelo que se adecua al proceso en cuestión.

A partir de un sencillo cálculo económico la variante más factible es cuando se usa el ácido clorhídrico.



RECOMENDACIONES

Continuar los estudios de disolución del carbonato básico de níquel para obtener nuevos productos comercializables.

Estudiar con más detalle la cinética de disolución del carbonato básico de níquel.

Probar otros reactivos que posibiliten la disolución del carbonato básico de níquel.



BIBLIOGRAFIA

MERCÈ CORBELLA, ESTEVE CARDELLACH, CARLOS AYORA. 2007. Disolución y precipitación de carbonatos en sistemas hidrotermales. Implicaciones en la génesis de depósitos tipo MVT. BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA. TOMO LIX, NÚM. 1, P. 83-99

BARNES, H.L. 1979. Solubilities of Ore Minerals, In: Barnes, H.L. (ed.), Geochemistry of Hydrothermal ore deposits: New York, Wiley and Sons, 404-460.

CORBELLA, M., AYORA, C. 2003. Role of fluid mixing in deep dissolution of carbonates: Geological Acta, 1, 305-313 (available online at [www. geologica-acta.com](http://www.geologica-acta.com)).

GULER C. DOLLIMORE D. Y HEAL G. R. 1983. The investigation of the decomposition kinetics of calcium carbonates alone and in the presence of some clays using the rising temperature technique, Thermochemica Acta 54, 187-199.

ROMERO M. M. 1991. Cinética de reacciones topoquímicas y la caracterización de productos intermedios de la industria níquelífera, Tesis de Doctorado, Universidad de la Habana, IMRE, Ciudad de la Habana.

ROMERO M. M., LLÓPIZ J.C. JEREZ A., PICO C., VEIGA M. L. 1989. Kinetics study by mass spectrometry and the calculation of the enthalpy of decomposition of basic nickel carbonate, Thermochemica Acta 152, 329-334. ISSN 0258 5979 Minería y Geología v. 21 n. 4 , 2005

ROMERO R. MARÍA; LLÓPIZ Y. JULIO, 2010. Discriminación de reacciones simultáneas por espectrometría de masa en la descomposición térmica de carbonatos básicos de níquel y de cobalto. Minería y Geología, vol. 26, núm. 2, abril-junio, pp. 35-54

GARRIDO, M. 2003. Precipitación de sulfuros de cobalto y níquel a partir de soluciones carbonato amoniacales. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis Doctoral] 106 p.

GULER, C.; DOLLIMORE, D. & HEAL, G. R. 1982. The investigation of the decomposition kinetics of calcium carbonate alone and in the presence of some clays using rising temperature technique. Thermochemica Acta 54 :187-199.

ROMERO, M. M. 1991. Cinética de reacciones topoquímicas y la caracterización de productos intermedios de la industria níquelífera. IMRE, Universidad de La Habana, Ciudad de La Habana [Tesis Doctoral] 139 p.

ROMERO, M. M. & LLÓPIZ, J. C. 1993. Estudio de la descomposición térmica del sulfuro de níquel más cobalto industrial. Minería y GeologíaX(1) :49-52.



ROMERO, M. M. & LLÓPIZ, J. C. 1996. Cinética de la descomposición térmica del carbonato básico de níquel industrial. *Minería y Geología* XIII(3): 61-67.