



Predicción del contenido de níquel metálico en el polvo químico mediante la susceptibilidad magnética

Tesis en opción al título de máster en Metalurgia

AUTOR(S): Ing. Sandy Fabré Fonseca

TUTOR(ES): Dr. C. Antonio Ramón Chang Cardona
Ms. C. Orleidy Loyola Breffe

CONSULTANTE(ES): Ms. C. Jorge Luis Miranda López



Predicción del contenido de níquel metálico en el polvo químico mediante la susceptibilidad magnética

Tesis en opción al título de máster en Metalurgia

AUTOR(S): Ing. Sandy Fabré Fonseca

TUTOR(ES): Dr. C. Antonio Ramón Chang Cardona
Ms. C. Orleidy Loyola Breffe

CONSULTANTE(ES): Ms. C. Jorge Luis Miranda López

Moa, 2020

Dedicatoria

A mis padres

A mi hija

Agradecimientos

Agradezco sinceramente:

A mis tutores Dr. Antonio Ramón Chang Cardona y MsC Orleidy Loyola Breffe por su constancia a pesar de los contra tiempos.

A Jorge Miranda López por haber sido la fuente de donde surgió este trabajo y por la confianza que ha depositado en mí para la realización del mismo.

A los profesores del departamento por su apoyo y confianza depositada en mí, y en especial al Dr. C Amaury de los Milagros Palacios Rodríguez, Dr. C Roger Samuel Almenares Reyes, MsC Evangelia García Peña, por su ayuda desinteresada, y su preocupación por la culminación de la investigación con la mayor calidad.

A mis padres, a mis hermanos, a mi tío. A mi gran familia.

A mis amigos Hector Benoy y Victor Daniel por su ayuda siempre desinteresada, por privarse de comodidades para ayudarme a resolver mis problemas.

A alguien muy especial, a mi hija y mi esposa, por ser la fuerza motriz de las cosas buenas. Por la orientación y apoyo que me brindaron.

A todos aquellos que han hecho posible la culminación de este trabajo.

Muchas gracias.

Resumen

En la Planta de Calcinación y Sínter de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se envasa constantemente polvo químico fuera de especificaciones, debido al extenso tiempo de valoración de la calidad del producto. Por lo que esta investigación pretende predecir cuantitativamente el contenido de níquel metálico en el polvo químico mediante un modelo estadístico matemático, empleando la susceptibilidad magnética como propiedad de análisis. En el estudio se aplicaron técnicas estadísticas a 121 muestras de óxido de níquel en polvo, correspondientes al primer trimestre del año 2019, con el uso del programa *STATGRAPHICS Centurion XV*, y *apoyados de Microsoft Excel*. Donde se tuvieron en cuenta las variables de operación del horno y la susceptibilidad magnética; esta última se determinó con un *Kappameter* tipo KT-9. El contenido de níquel metálico se determinó por el método de espectrofotometría de absorción atómica. Como resultado se obtuvo un modelo matemático que determina el contenido de níquel metálico a partir del valor de la susceptibilidad magnética, con una correlación del 98,67 %, lo que permite predecir con 95 % de confiabilidad. Se pudo concluir que la disminución del tiempo de predicción del níquel metálico, a partir del modelo matemático, permite ahorrar entre 235 185,67 USD/año por concepto de envase de este producto fuera de especificaciones.

Palabras clave: análisis estadístico, modelo matemático, níquel metálico, polvo químico, susceptibilidad magnética.

Abstract

In the Calcination and Sinter Plant of the company "Comandante Ernesto Che Guevara" chemical powder is constantly packaged out of specifications, due to the long evaluation time of the product quality. Therefore, this research aims to quantitatively predict the content of metallic nickel in chemical powder using a mathematical statistical model, using magnetic susceptibility as the property of analysis. In the study, statistical techniques were applied to 121 samples of nickel oxide powder, corresponding to the first quarter of 2019, with the use of the STATGRAPHICS Centurion XV program, and supported by Microsoft Excel. Where the oven operating variables and magnetic susceptibility were taken into account; The latter was determined with a Kappameter type KT-9. The nickel metal content was determined by the atomic absorption spectrophotometry method. As a result, a mathematical model was obtained that determines the nickel metal content from the magnetic susceptibility value, with a correlation of 98.67%, which allows predicting with 95% reliability. It could be concluded that the decrease in the prediction time of metallic nickel, based on the mathematical model, saves between 235,185.67 USD / year for the packaging of this product out of specifications.

Key words: statistical analysis, mathematical model, metallic nickel, chemical powder, magnetic susceptibility.

Glosario de Términos

UBP: Unidad básica de producción

Ni: Níquel

Co: Cobalto

Fe: Hierro

Zn: Zinc

CBNi: Carbonato básico de níquel.

NiO: Óxido de níquel.

UDP: Unidad demostrativa de producción

MAE: Error absoluto medio

NC: Norma cubana

km: Kilometro.

Big-Bag: Saco para envase de producto

PQ: óxido de níquel en polvo químico

ECG: Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

SI: Sistema internacional de unidades

A: Amperio

ISO:

μm : Micrones

nm: Nanómetro

ml: Mililitro.

HC: Hornos Calcinadores.

KT-9: *Kappameter* de campo

Índice	Pág.
Introducción.....	1
1. Marco Teórico – Conceptual	6
1.1. Descripción del proceso tecnológico	6
1.2. Aspectos generales de la magnetización.....	9
1.2.1. Diamagnetismo.....	10
1.2.2. Paramagnetismo.....	10
1.2.3. Ferromagnetismo.....	12
1.2.4. Otros tipos de magnetismo.....	13
1.2.5. Teoría de dominios	13
1.3. Antecedentes de la investigación.....	15
Conclusiones del capítulo 1	20
2. Materiales y Métodos	21
2.1. Métodos de investigación	21
2.2. Materiales y equipamiento.....	22
2.2.1. Materiales.....	22
2.2.2 Equipamiento.....	23
2.3 Procedimiento o metodología de experimentación	24
2.3.1 Determinación del tamaño de la muestra.....	24
2.3.2 Toma y preparación de la muestra.....	24
2.3.3. Procedimiento para el análisis estadístico	27
2.4. Técnicas de análisis.....	34
2.4.1. Determinación de la composición química.....	34
2.4.2. Determinación de la composición granulométrica.....	35
2.4.3. Determinación de la susceptibilidad magnética	36

2.5. Valoración económica.....	37
Conclusiones parciales	38
3. Análisis y Discusión de los Resultados	39
3.1. Análisis de la composición química	39
3.1.1. Análisis del contenido de azufre y carbono en el polvo químico	40
3.2. Análisis de la composición granulométrica	41
3.3. Análisis de la susceptibilidad magnética.....	41
3.4. Análisis estadístico	42
3.4.1. Análisis descriptivo a través de una correlación lineal de matriz.....	43
3.4.2. Regresión simple del níquel metálico vs la susceptibilidad magnética.....	44
3.4.3. Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste.....	46
3.4.4. Residuos Atípicos.....	46
3.4.5. Puntos Influyentes.....	47
3.4.6. Comparación de Modelos Alternos	48
3.4.7. Modelo ajustado.....	48
3.5. Validación del procedimiento de determinación de susceptibilidad magnética.	52
3.6. Condiciones óptimas de las variables de operaciones del horno calcinador ..	54
3.7. Valoración económica.....	54
3.7.1. Determinación del costo de cada análisis químico.....	55
Conclusiones parciales	60
Conclusiones.....	61
Recomendaciones.....	62
Referencias Bibliográficas	63
ANEXOS	1

INTRODUCCIÓN

Las propiedades magnéticas de los materiales facilitan información acerca de la composición, contenido y propiedades de los minerales que permite caracterizar las rocas, sedimentos y la susceptibilidad magnética, siendo una de las propiedades que se pueden medir fácilmente. El resultado de esta medida depende del contenido de los minerales magnéticos presentes en el material. La susceptibilidad magnética ha sido utilizada en diferentes campos de las Geociencias, estudio de las mineralogías, minería, geología estructural, cambio climático, estudios ambientales y de suelos.

En la tecnología carbonato amoniacal es empleada en la electro-coagulación, también ha sido utilizado con el objetivo de mejorar la calidad del producto finales. En sus inicios todas las industrias procesadoras de laterita utilizaron originalmente la precipitación del carbonato básico de níquel, como un medio para concentrar el níquel. Actualmente, la empresa Queensland utiliza la extracción por solvente y las de NONOC y TOCANTINS utilizan procesos de refinación para la producción de los productos de níquel a través de la extracción electrolítica.

Solo la empresa Comandante Ernesto Che Guevara utiliza el proceso original (CARON), o sea el óxido de níquel es producido utilizando el proceso de calcinación. La empresa se localiza en el municipio Moa, en Cuba. En la región se ubica una de las mayores reservas minerales de níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico, local y regional. La tecnología que se lleva a cabo en las instalaciones industriales de dicha empresa es la de lixiviación carbonato amoniacal, en la cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. La decisión de utilizar este proceso se explica por las ventajas propias de la tecnología, siendo un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos, características que favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización.

La tecnología permite la elaboración de las mezclas de los minerales laterítico y serpentinitico. El complejo minero metalúrgico de níquel comprende varias entidades, iniciando con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos

de níquel de Punta Gorda. La UBP Mina: Suministra el mineral a la fábrica; está situada entre 1 y 1,5 km al Suroeste del área industrial. El mineral de la capa superior está compuesto de limonita y el cuerpo de laterita y serpentina (blanda). Los componentes fundamentales del mineral son el níquel, el cobalto y como acompañante en cantidades considerables el hierro. La transportación se realiza directamente desde las excavaciones hasta el área de recepción por camiones volquetas. Incorporado al flujo tecnológico, por la UBP Planta de Preparación de Mineral: En la planta el mineral se somete a un proceso de secado y molienda y luego se suministra a los silos de almacenaje, de donde se bombea hacia los hornos de reducción. A partir de ese momento el material comienza a circular por las diferentes etapas del proceso entre las que se encuentran, la UBP Planta de Hornos de Reducción: En esa planta ocurre el proceso de reducción del níquel y cobalto contenidos en el mineral. Está constituida por 24 hornos de soleras múltiples los cuales descargan el mineral a los enfriadores (12), de donde pasa a la UBP Planta de Lixiviación y Lavado. La pulpa formada con el mineral reducido pasa por 3 sistemas paralelos de tres etapas de lixiviación a contracorriente con el licor carbonato-amoniaco, la lixiviación se realiza con el licor carbonato – amoniaco en los espesadores por medio de la aireación de la pulpa con aire (en los turboareadores). Luego de la lixiviación la pulpa se envía al sistema de lavado (dos en paralelo). El licor enriquecido en níquel y cobalto es enviado al proceso de separación de cobalto, la pulpa de desecho es enviada a la UBP Planta Recuperación de Amoniaco. El licor enriquecido en níquel y cobalto se somete a una inyección de hidrosulfuro de amonio para precipitar el cobalto en forma de sulfuro, producto que se envasa en Big-Bag y se comercializa. El licor descobaltizado se envía a la planta de Recuperación de Amoniaco. El licor carbonato amoniaco enriquecido en níquel recibe un tratamiento con vapor en las torres de destilación para obtener el carbonato básico de níquel. La pulpa de carbonato básico de níquel es enviada a la planta de Calcinación y Sinter. Por último, la UBP de Calcinación y Sinter, donde culmina la tecnología CARON con la filtración del carbonato básico de níquel que es alimentado a los hornos de calcinación para la obtención del óxido de

níquel, que es utilizado en el proceso de sinterización en la máquina destinada para ese fin; obteniendo los óxidos de níquel en polvos y óxidos de níquel sinterizado.

En los últimos años la comercialización del óxido de níquel en el mercado internacional en forma de polvo químico lo convierte en un producto exportable por excelencia. Los clientes del producto a raíz del injusto bloqueo aplicado al país, se han estado valiendo para utilizar condiciones más exquisitas hacia los productos exportables de la empresa, y el óxido de níquel en polvo químico (PQ) no escapa de ello, al imponer condiciones de especificaciones más distinguidas de lo establecido por la norma cubana NC 859 (NC 859 2019)

Para cumplir con las exigencias de los clientes se inició una búsqueda de procedimientos de control de la calidad de los ensayos analíticos con mayor rapidez y efectividad. Estas acciones tributan básicamente a la solución y detección de deficiencias que no comprometan la producción, no impliquen grandes pérdidas económicas, financieras, de productos y de tiempo durante su caracterización analítica, y se reviertan positivamente en el proceso metalúrgico acorde a las exigencias actuales, al garantizar la calidad del óxido de níquel en polvo químico, considerado un producto final con mayor cotización que los restantes que se obtienen en la ECG.

En el período comprendido entre los años 2010 y 2019 se llevaron a cabo múltiples investigaciones que contribuyeron a atenuar el problema. Dichos trabajos estuvieron dedicados a evaluar las operaciones de los hornos calcinadores en cuanto a productividad, la descomposición térmica de carbonatos básicos de níquel, los parámetros a controlar en la operación, así como el estudio de factores mecánicos del horno de calcinación. A pesar de haberse implementado la mayoría de las conclusiones y recomendaciones de los trabajos técnicos evaluados, mensualmente se reportan como promedio cinco lotes fuera de especificaciones por alto grado de metalización, que afectan la calidad del óxido de níquel en polvo químico, lo que demuestra que aún no ha erradicado el problema existente.

Aparejado a ello, los clientes exigen que se cuantifique el contenido total del níquel metálico a través de su caracterización magnética, evaluar la calidad del producto por las propiedades magnéticas que puedan tener. Actualmente el 24 % de los lotes

formados salen fuera de especificación por alto contenido de níquel metálico, trayendo consigo el aumento en los costos de producción de la planta por reciclo al calcinador del óxido de níquel fuera de norma, la disminución de la productividad del NiO descargado, al incurrir en gastos considerables de materiales de operación, reactivo e incumplimiento del plan de exportación. Siendo esta la **situación problemática**. Teniendo como **problema científico**: La no existencia de una predicción cuantitativa del contenido de níquel metálico en el polvo químico que se obtiene en la planta de Calcinación y sinter de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Por lo que se establece el objeto de estudio.

Objeto de estudio:

Óxido de níquel en polvo químico (PQ).

Campo de acción:

Susceptibilidad magnética del óxido de níquel en polvo químico (PQ).

Se plantea como **Objetivo general**:

Predecir cuantitativamente el contenido de níquel metálico en el polvo químico mediante un modelo estadístico matemático empleando la susceptibilidad magnética como propiedad de análisis.

Objetivos específicos:

Para dar solución al objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1) Realizar un análisis estadístico de las variables de operación del horno de calcinación del carbonato básico de níquel, para determinar sus valores ideales.
- 2) Obtener un modelo matemático para predecir la calidad del polvo químico en función del valor de la susceptibilidad magnética.
- 3) Realizar una valoración económica para determinar el ahorro por concepto de gastos de materiales de operación.

Hipótesis de la investigación:

Si se predice cuantitativamente el contenido de níquel metálico en el polvo químico mediante un modelo estadístico matemático empleando la susceptibilidad magnética

como propiedad de contraste, permitirá estabilizar la calidad del producto, reducción de costos de materiales y reactivos.

Tareas de la investigación:

- Recopilación y análisis del estado del arte.
- Toma y preparación de la muestra.
- Caracterización de la materia prima (óxido de níquel en polvo químico).
- Determinación de la susceptibilidad magnética.
- Análisis estadístico de los resultados obtenidos.
- Evaluación del impacto económico.

Consecuentemente con el cumplimiento de los objetivos propuestos y la hipótesis planteada, constituyen **aportes del trabajo** lo siguiente:

En lo científico metodológico: La metodología para obtener un modelo matemático predictivo para determinar el níquel metálico por vía magnética en el óxido de níquel en polvo químico, en las condiciones de operación a escala industrial, a partir de los lotes finales para garantizar una calidad estable del producto en cuanto a níquel metálico.

En lo tecnológico: El diagnóstico al obtener un procedimiento técnico y rápido dentro del proceso, en función del contenido de níquel metálico en dicho producto, el establecimiento de nuevos indicadores en las operaciones de envase del producto que garantizará la estabilidad de la calidad del óxido de níquel en polvo químico, y contribuirán al ahorro de materiales de operación, reactivo químicos e incremento de la productividad.

En lo económico: Realizado el estudio se podrá disminuir los índices de consumo de materiales de operación, reactivos químicos, costos e incrementar de la producción del surtido.

1. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

En el capítulo se realiza un análisis sobre los aspectos que se encuentran relacionados con los temas discutidos en la bibliografía consultada, con el objetivo de disponer de los elementos básicos para la realización del trabajo. Se expone el estado del arte, la conceptualización y consideraciones teóricas sobre el magnetismo y la susceptibilidad magnética, su importancia y tecnológica.

1.1. Descripción del proceso tecnológico

La UBP de calcinación y Sinter está compuesta por tres áreas fundamentales; sedimentación-filtración, calcinación y sinterización. En el área de filtración el proceso comienza una vez que los alambiques de licor descargan el Carbonato Básico de Níquel ($x\text{NiCO}_3 \cdot y\text{Ni(OH)}_2 \cdot z\text{NiSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) a los sedimentadores a una temperatura de entre 90 y 102 °C aproximadamente, con una concentración de Amoníaco menor a 2 g/L. El Carbonato Básico de Níquel es descargado a los sedimentadores de 25 m de diámetro y con una profundidad nominal en el centro de 3,6 m; donde ocurre la separación de dos fases la líquida y la sólida, sedimentando el Carbonato Básico del Níquel. Es un material amorfo compuesto por partículas muy finas, se obtiene producto de la filtración de la pulpa. Con las siguientes características:

- Material de color verde claro
- Humedad: $\leq 70 \%$
- Densidad: $0,39 \text{ t/m}^3$
- Contenido de Ni: $\geq 48 \%$
- Contenido de Co: $<1 \%$

El licor de reboso, producto de la separación de dos fases, cuya concentración de níquel disuelto es menor o igual a 0,12 g/L y el total menor o igual a 0,20 g/L, sale por la canal de reboso del sedimentador hacia el tanque de reboso; este licor es bombeado hacia el sedimentador clarificador, pasando previamente por un reactor tubular donde se adiciona Hidrosulfuro de Amonio (NH_4HS) recuperándose el níquel disuelto y en suspensión mediante la adición de floculante a la entrada del sedimentador clarificador. El licor de reboso limpio del sedimentador clarificador es

enviado al dique de cola y la pulpa sedimentada con una densidad por encima de 1040 g/L es bombeada hacia la Planta de Recuperación de Amoníaco y Cobalto para ser filtrada como Sulfuro de Níquel, el mismo es secado y almacenado como producto final.

La pulpa de Carbonato Básico de Níquel es descargada por el cono del sedimentador y bombeada hacia los filtros al vacío (rotatorios), los cuales son filtros de trabajo continuo.

El carbonato se adhiere a la superficie del disco por la acción del vacío que se realiza con las bombas. Esta torta es desprendida de la superficie del sector del filtro con ayuda del soplado con aire y cuchillas raspadoras.

El líquido filtrado, conjuntamente con el vapor y gases van a las trampas de filtrado, el agua precipita y las partículas sólidas que la acompañan, caen por gravedad a un tanque sello, desde donde se envía hacia el sedimentador por medio de una bomba. Los vapores de agua van al condensador barométrico, donde son condensados y descargados por gravedad a un tanque sello, de aquí el líquido pasa por gravedad al tanque de desecho, y luego enviado hacia las torres de enfriamiento, por medio de las bombas.

El carbonato básico de níquel en forma de torta cae libremente entre los bolsillos del filtro hasta el transportador de banda, y luego se descarga a las romanas para el control y registro de la carga del horno. Este carbonato continúa su recorrido y es alimentado a los hornos de calcinación a través del sinfín alimentador de carbonato. Los hornos rotatorios de calcinación con un diámetro interior de 3,15 m, una longitud de 50,5 m y una productividad por encima de 2,25 t/h de óxido de níquel.

El carbonato después de filtrado es calcinado en los hornos rotatorios. A medida que el carbonato desciende va sufriendo variaciones en su composición debido a la descomposición, producto de las temperaturas existentes en las diferentes zonas del horno, obteniéndose como producto intermedio el óxido de níquel calcinado, con las siguientes características

Físicas:

- Es de color gris verdoso.
- Tiene una densidad aproximadamente entre 2,50 y 3,00 g/cm³

Granulométrica:

- 4 mm: (30 a 48) %
- 2,5 mm: (25 a 33) %
- 0,149 mm: (20 a 25) %
- 0,074 mm: < 2 %

Características químicas:

- Contenido de Ni: ≥ 76 %
- Contenido de Co: $\leq 1,3$ %
- Contenido de Fe: $\leq 0,7$ %
- Contenido de S: $\leq 0,03$ %
- Contenido de C: $\leq 0,01$ %

El polvo de óxido de níquel que es arrastrado en los calcinadores por los gases se recupera, una parte en la batería de ciclones, la otra parte que continúa con el recorrido de los gases es recolectado en los electrofiltros.

El polvo recuperado tanto en la batería de ciclones como en los electrofiltros es alimentado al horno por medio de transportadores sinfines. Los gases producto de la combustión son expulsados a la atmósfera a través de la chimenea.

El óxido de níquel antes de salir del horno, es previamente enfriado en una doble pared (enfriador) en la zona de combustión, mediante duchas exteriores que lo bañan con agua a temperatura ambiente y la piscina donde se encuentra sumergida parte de la superficie del enfriador. Existiendo contacto indirecto entre el óxido de níquel calcinado y el agua.

El óxido de níquel es descargado después de enfriado a los transportadores, los cuales alimentan el óxido de níquel a las trituradoras de martillos, triturado hasta una granulometría de 2,5 mm. Este óxido es alimentado al elevador de cangilones, el cual suministra a la tolva del alimentador del Sínter.

El polvillo que se obtiene producto de la degradación del óxido del níquel durante su transporte y trituración, es recolectado en una batería de ciclones, el producto óxido de níquel en polvo, cuya granulometría es de 0,074 mm en un 98, con color gris verdoso y características químicas:

- Contenido de Ni: ≥ 75 %

- Contenido de Co: $\leq 1,45 \%$
- Contenido de Fe: $\leq 0,5 \%$
- Contenido de S: $\leq 0,05 \%$
- Contenido de C: $\leq 0,01 \%$

1.2. Aspectos generales de la magnetización.

El magnetismo es un efecto cuántico de la materia que podemos observar a simple vista y cuyo origen reside en los momentos magnéticos permanentes e inducidos de los átomos. Los momentos magnéticos permanentes son una consecuencia directa de los movimientos que experimenta el electrón en el átomo: el movimiento alrededor del núcleo conocido como momento angular orbital, y el movimiento alrededor de su propio eje llamado momento de espín. Los momentos inducidos son el resultado del par magnético que experimenta el eje de rotación del átomo cuando es sometido a un campo magnético externo. Supongamos ahora que en lugar de un átomo libre, tenemos un conjunto de átomos que ocupan un cierto volumen V . El promedio de todos los momentos magnéticos atómicos (μ) del material dará lugar a una propiedad macroscópica conocida como magnetización (M), $M = N \cdot \mu$, donde N es el número total de momentos por unidad de volumen. En ausencia de un campo magnético aplicado, esta magnetización puede ser nula por varias razones. Pero, ¿qué ocurre cuando la muestra es sometida a un campo externo. En estos casos, en el interior de la muestra se produce un campo conocido como inducción magnética B , resultado del campo aplicado y de la magnetización inducida.

$$B = H + 4 \cdot \pi \cdot M \quad (1)$$

La relación entre la magnetización y el campo magnético aplicado es lo que se conoce como susceptibilidad magnética, k .

$$M = k \cdot H \quad (2)$$

La susceptibilidad es una propiedad magnética fácil de medir, que nos permite determinar la capacidad con que los momentos magnéticos de una muestra, inducidos o permanentes, pueden alinearse en la dirección del campo aplicado. Conocer la susceptibilidad de un material permite clasificarlo según su

comportamiento magnético diferenciando entre diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo.

1.2.1. Diamagnetismo

Todos los materiales sometidos a un campo magnético tienen una componente diamagnética como resultado del movimiento de sus orbitales. El diamagnetismo es el comportamiento dominante cuando todos los cationes de la red cristalina tienen sus orbitales completos. En estos casos los momentos magnéticos que dominan son inducidos. Pero este componente se ve enmascarado por otros comportamientos si la muestra posee momentos magnéticos permanentes.

El momento inducido en un material diamagnético tiene sentido opuesto al campo aplicado lo que significa que la susceptibilidad de estos minerales es negativa (Figura. 1.1). Otra característica de estos materiales es que la susceptibilidad es constante, independiente de la temperatura y de la intensidad del campo aplicado. El orden de magnitud de la susceptibilidad, k es de $10^{-5} - 10^{-6}$ [SI]. Elementos como el cobre, el oro, la plata y el bismuto son diamagnéticos, así como los minerales cuarzo, calcita y feldespato.

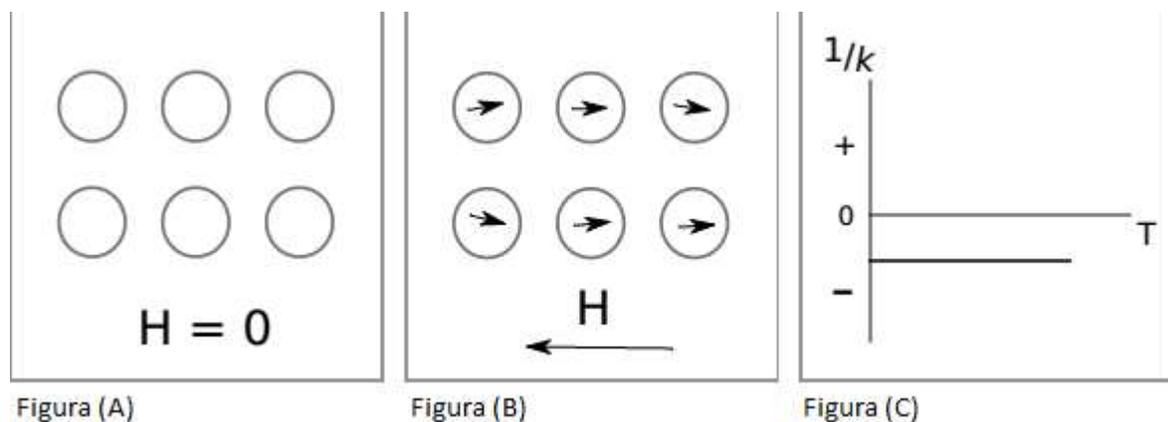


Figura 1.1: Ejemplo de diamagnetismo, Figura A comportamiento diamagnético en ausencia de campo externo, Figura B comportamiento diamagnético en presencia de campo externo y Figura C comportamiento del inverso de la susceptibilidad diamagnética en función de la temperatura.

1.2.2. Paramagnetismo

La primera característica que tiene que tener un material paramagnético es que los átomos que lo constituyan tengan capas electrónicas incompletas y que por tanto sus

orbitales posean un momento magnético de espín no nulo (Jiles 1991). En ausencia de campo magnético aplicado, los momentos de espín de un material paramagnético se encuentran distribuidos de manera aleatoria, lo que implica que no existe una magnetización espontánea, pero cuando son sometidos a campos magnéticos, estos momentos permanentes se alinean estadísticamente en la dirección del campo aplicado. Como consecuencia de esta alineación, la susceptibilidad paramagnética se define como una variable positiva (Figura.1.2). Pero al contrario que en el diamagnetismo, esta propiedad depende de la temperatura y de la intensidad del campo aplicado cuando ésta es muy elevada. La susceptibilidad paramagnética se rige por la conocida Ley de Curie:

$$k = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot M_0}{k_B} \frac{1}{T} = \frac{C}{T} \quad (3)$$

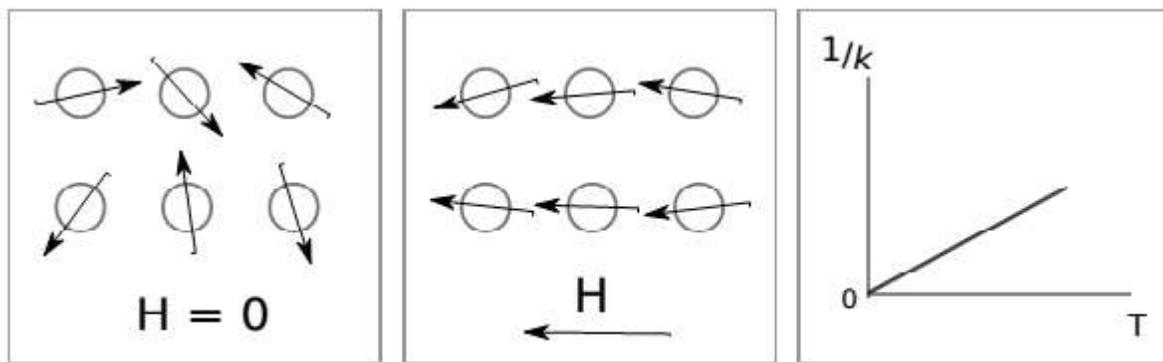


Figura (A)

Figura (B)

Figura (C)

Figura 1.2: Ejemplo de paramagnetismo. Figura A comportamiento paramagnético en ausencia de campo externo, Figura B comportamiento paramagnético en presencia de un campo externo, Figura C comportamiento del inverso de la susceptibilidad paramagnética en función de la temperatura.

donde: $M_0 = \frac{N \cdot \mu}{\Delta V}$, es el máximo valor de magnetización posible, obtenido cuando

todos los momentos están perfectamente alineados con el campo, conocida como magnetización de saturación y k_B es la constante de Boltzmann.

El valor de la susceptibilidad paramagnética es varios órdenes superior al de la diamagnética, con valores comprendidos entre $10^{-3} - 10^{-5}$ [SI]. Elementos como el aluminio y el platino y minerales como la pirita, la serpentinita y la biotita son algunos ejemplos de minerales paramagnéticos.

- La magnetización de saturación (M_s). Este parámetro indica el máximo valor de magnetización que puede alcanzar el material, es decir, cuando todos los momentos están alineados con el campo aplicado.
- La magnetización remanente (M_R). Es el valor de la magnetización que permanece una vez que se anula el campo magnético externo.
- El campo coercitivo o coercitividad (H_c). Es la intensidad del campo aplicado necesario para hacer nula la magnetización de la muestra.

Para un cierto rango de temperatura, inferior a una temperatura crítica T_c que depende de cada mineral, el comportamiento magnético de cada muestra dependerá del subtipo de ferromagnetismo que posea, todos ellos muy distintos al diamagnetismo y al paramagnetismo. Pero una vez superada esta T_c , el mineral volverá a comportarse como un paramagnético, se produce una transición de fase en la que la agitación térmica destruye la interacción magnética.

1.2.4. Otros tipos de magnetismo.

Además de los tipos de magnetismo nombrados existen otros como son el helimagnetismo o el vidrio de espín. El helimagnetismo es un caso especial de ferromagnetismo en el que la orientación de las distintas subredes no forma un ángulo de 0 (o ferromagnetismo) ni de 180 (o antiferromagnetismo) y ni siquiera se mantiene constante a lo largo de todas las subredes. Este fenómeno se conoce como helimagnetismo debido a que la orientación de los momentos a lo largo del eje perpendicular a todas las subredes muestra un efecto hélice. Es el caso de algunas tierras raras como el holmio o el $MnAu_2$. En el vidrio de espín, se dan a la vez acoplamientos ferromagnéticos y antiferromagnéticos, pero de forma aleatoria, lo que implica un alto grado de frustración en las muestras. Se han registrado estados magnéticos de vidrios de espín en compuestos de Fe en meteoritos.

1.2.5. Teoría de dominios

Los minerales ferromagnéticos se definen como materiales que a escala atómica se caracterizan por tener una magnetización espontánea. Pero, ¿qué ocurre a escala macroscópica, por qué una muestra de hierro no muestra magnetización?. A medida que un cristal crece, los momentos magnéticos del material se van agrupando en

pequeñas regiones de magnetización constante llamadas dominios magnéticos, tal y como propuso (Weiss y Gerasimowicz 1996). Cada uno de estos dominios se caracteriza por tener una magnetización uniforme e igual a la magnetización de saturación, pero con dirección distinta a la de los dominios adyacentes, de tal forma que a escala macroscópica la magnetización total se verá minimizada o incluso anulada, disminuyendo la energía magnética almacenada en el material (Cullity y Graham 2011). El cambio en la dirección de dos dominios adyacentes se produce de forma continua (Figura 1.4), lo que da lugar a una pequeña región de almacenamiento de energía conocida como pared de dominio (Bertotti 1998). Se definen dos tipos extremos de paredes de dominios, paredes de Bloch, en las que la imanación cambia desde la dirección de un dominio a la dirección del dominio adyacente en el plano de la pared y paredes de Néel, en las que la rotación de la imanación se produce en el plano perpendicular al plano de la pared (Jiles 1991).

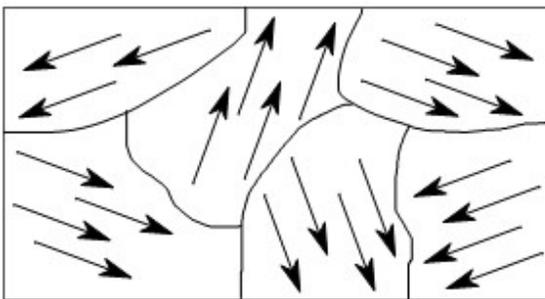


Figura A

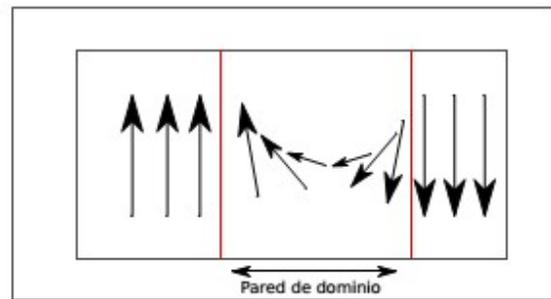


Figura A

Figura 1.4: Figura A ejemplo de estructura de dominios. Figura B representación de una pared de dominio.

Hemos mencionado que la estructura de dominios puede ocasionar que la magnetización de una muestra no sea homogénea en todo su volumen, pero los dominios no son la única razón por la que puede diferir la magnetización dentro de un material. A esta falta de homogeneidad espacial de las propiedades magnéticas de cualquier material/minerales lo que se conoce como anisotropía magnética. La anisotropía es la consecuencia directa de la ruptura de simetría de la energía almacenada en la muestra. Independientemente del mecanismo o mecanismos que ocasionen la anisotropía de cualquier propiedad (susceptibilidad, remanencia), el resultado macroscópico observado, es que la magnitud de dicha propiedad varía en

función de la dirección, siendo favorecidas aquellas direcciones que satisfacen la condición de equilibrio energético.

El origen microscópico, desarrollo matemático y términos que contribuyen a la anisotropía magnética pueden encontrarse en textos dedicados al magnetismo de la materia (Coey 2010; Bozorth 1993). Estudios específicos orientados al magnetismo de rocas se incluirían en los textos de Collinson (Collinson 2013), Banerjee y Stacey (Banerjee y Stacey 2013), O'reilly (O'reilly 2012), Dunlop y Özdemir (Dunlop y Özdemir 2001).

1.3. Antecedentes de la investigación

En la UBP de Calcinación y Sínter, se obtienen cuatros de los cinco productos finales de la empresa, teniendo como producto líder el óxido de níquel sinterizado SG, el sulfuro de níquel ZC, el óxido de níquel en polvo SP y el óxido de níquel en polvo químico PQ, producto al cual está dedicada la presente investigación. Varios investigadores de plantas metalúrgicas durante años, han realizado investigaciones dirigidas al mejoramiento de la calidad de sus productos intermedios, por presentar problemas en sus productos finales relacionado con la granulometría y el alto grado de metalización en el óxido descargado por los hornos calcinadores, entre ellos, la automatización, el comportamiento cinético del proceso de calcinación, sus propiedades físicas-química, el control de las variables relacionadas con el proceso y la separación magnética del polvo de NiO.

DAUBENSPECK J.(Daubenspeck 1955), relata las pruebas de laboratorio, reportadas por la compañía Freeport, donde evalúan un régimen de temperatura en ascenso, observan los cambios de color en el óxido obtenido de negro a gris y finalmente a verde-amarillo, así como el incremento de la densidad, decrece el contenido de azufre y que la solubilidad en ácido sulfúrico a 80 °C también descende. En este interesante reporte indican que el problema sería incluido en la lista de problemas del proceso de Nicaro.

DOMÍNGUEZ et al (Domínguez y Selva 1977), investigaron sobre la automatización del horno de calcinación buscando mejorar la operación para garantizar que los parámetros y variables del proceso sean precisos, no abordaron la composición físico-química del óxido de níquel.

RODRÍGUEZ-CABRERA (Rodríguez Cabrera 2013), realiza una investigación con el fin de identificar el óxido de níquel en cuanto a algunas de sus propiedades físicas y su composición química; sin embargo, no se hizo un trabajo independiente para cada corriente identificada, sino un compósito de las mismas, no se pudo determinar el contenido de níquel en los polvos de recirculación. Concluye que no existe relación aparente entre los contenidos de níquel, cobalto, hierro y azufre con la fracción magnética y solubilidad en el óxido o el polvillo.

CASANOVA (Casanova 1998), realiza pruebas tomando muestras de óxido a la salida del horno de calcinación cada una hora, para determinar la densidad y la granulometría. La autora llega a encontrar una ecuación que permite predecir la densidad del óxido, si se conocen las diferentes granulometrías, concluye que para una alta densidad se obtiene una mayor cantidad de la fracción gruesa, aunque no resulta definitorio. Plantea una posibilidad de predicción que facilita el trabajo operativo.

ESTÉVEZ et al. (Estévez 1990), trabaja con el propósito de mejorar la calidad del óxido de níquel, afectado por los valores de níquel metálico, demostrando que en la calcinación oxidante del óxido de níquel en polvo (polvillo) disminuye el contenido de níquel metálico a valores inferiores de uno por ciento a la exigida por el mercado en ese momento.

ROMERO (Romero Ramírez 1991), describe el comportamiento cinético del proceso de calcinación y determina a la misma vez el calor de disociación del carbonato básico de níquel, los resultados se emplearon para calcular el calor útil consumido en el horno de tambor rotatorio con mayor precisión en la eficiencia energética (EFE) del horno.

MARTÍN (Martín 1973), estudia los factores temperatura, tiempo de retención, contenido de O₂ en los gases y el contacto entre el óxido y los gases, como elementos que influyen en la reacción química de formación del óxido de níquel.

ROMERO (Romero-Ramírez y Llópiz-Yurel 1996), determina los modelos cinéticos más probables para las diferentes etapas de la descomposición térmica de la muestra, y también analiza la influencia de la velocidad de calentamiento en la composición térmica.

COLUMBIÉ (Columbié Navarro 2000), recoge los resultados de los autores en lo relacionado con la modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Se exponen las ecuaciones que conforman el modelo y la fundamentación científica sobre la cual fueron obtenidas. La modelación se basa principalmente en el planteamiento del balance material y energético en forma dinámica, que lleva a la obtención de un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, las cuales se complementan con otras algebraicas que establecen la relación entre los diferentes coeficientes y parámetros físicos.

COLUMBIÉ (Columbié Navarro 2001), estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno de tambor rotatorio, quedando representado por nueve ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico, determina la dirección del proceso, los modelos aportan ecuaciones importantes para el análisis de la transferencia de calor de gran complejidad.

CHANG CARDONA, et al (Chang Cardona et al. 2003), introdujo una modificación en la operación del horno, por lo que se realizó una investigación a escala industrial para establecer una metodología de balance energético que permitiera determinar la nueva norma de consumo de combustible, verificar la relación de masa carbonato básico de níquel y sulfuro de níquel previamente establecida y diagnosticó el proceso energético en el horno de tambor rotatorio industrial.

FUENTES (Fuentes Díaz 2009), estudió la separación magnética con el objetivo de mejorar sus características para su utilización como pigmento. Trabajó a tres distancias, entre los polos del separador magnético (2,50; 3,125 y 3,75 mm), variando la intensidad de corriente (0,50; 1,00; 2,00; 2,50 y 3,50 A). Obtuvo, que las fracciones donde los rendimientos en pesos son inferiores al 20,6%, los esmaltes toman las coloraciones más oscuras, valores que se obtienen cuando se trabaja con intensidad de corriente entre 0,90 y 1,20 A y distancia entre los polos del separador magnético entre 3,00 y 5,00 mm.

ROMERO et al (Ramírez y Yurell 2010), determinaron por espectrometría de masa y termogravimetría convencional, los parámetros y modelos cinéticos de los procesos de salida de agua y dióxido de carbono en la descomposición térmica de carbonatos básicos de níquel y de cobalto. Se demostró la ventaja de la espectrometría de masa para individualizar la cinética de procesos complejos de descomposición térmica, cuando las reacciones ocurren simultáneamente en un intervalo de la temperatura.

DURÁN (Durán Santí 2013), determinó la influencia de la carga (carbonato básico de níquel) en el producto final a partir de los principales parámetros tecnológicos del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel. Para lograr este objetivo se empleó, la metodología de la modelación estadística, realizó, un análisis de los diferentes parámetros operativos del proceso con respecto a la carga alimentada al calcinador uno, en la empresa René Ramos Latour.

SÁNCHEZ (Sánchez Samé 2013), analizó las causas que provocan las no conformidades en la calidad del producto final de la sección de calcinación en la Planta de calcinación y Sinter, basado en la caracterización del proceso de obtención de óxido de níquel y la identificación de las causas que inciden sobre la calidad del óxido de níquel, durante el período comprendido entre enero y diciembre de 2011, en la empresa Comandante René Ramos Latour.

YARNANGORÉ (Yarnagore 2014), desarrolló una herramienta para realizar los balances de masa y energía del proceso de calcinación que permita evaluar el índice de consumo del fuel oil y las pérdidas de calor ante diferentes condiciones operacionales, estableció los modelos matemáticos del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio de la planta de calcinación. Fundamentó el lenguaje de programación mediante diagramas de bloque para la creación del software para los cálculos de los balances metalúrgicos. Estableció la validación de los resultados de las velocidades medias de los gases salientes en cada zona de trabajo y la temperatura máxima del producto calcinado y planteó algunas propuestas técnicas para disminuir las pérdidas de calor y el índice de consumo de fuel oil.

MAJENDIÉ (Majendié-Cemitiere et al. 2015) tuvo como propósito validar la representatividad del muestreo de uno de los productos exportables de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, con la finalidad de cumplir con los requisitos para elevar la categoría de la norma cubana (NC). Utilizaron para ello normas estandarizadas sobre muestreo, preparación de muestras y aplicaron técnicas estadísticas con el empleo del programa STATGRAPHICS Centurion XV. Comprobaron los parámetros de muestreo y se estimó su precisión total; fue determinada además la variabilidad del óxido de níquel en polvo químico, encontrando que el elemento químico fundamental (níquel total) tiene una media de 77,12 % y una desviación estándar de 0,323. Se determinó igualmente el sesgo conforme a los estándares internacionales y se concluyó que el método de muestreo aplicado actualmente a los lotes de óxido de níquel en polvo químico puede ser usado como método de rutina, sin detrimento de los principales índices de calidad del producto.

MIRANDA at al (Miranda López et al. 2015) trabajó con la finalidad de encontrar un procedimiento que caracterice las propiedades magnéticas del producto óxido de níquel en polvo químico, a escala de laboratorio. Para ello estudio primeramente un total de 30 muestras (lotes). Validando la susceptibilidad magnética como nueva técnica de análisis en dicho producto, teniendo en cuentas varias muestras de óxido de níquel en polvo durante varios años de producción (2011, 2012, 2013 y 2014). Concluyó que el procedimiento desarrollado con la caracterización a través de la susceptibilidad magnética con ayuda de un *kappameter* de campo tipo KT-9, puede ser utilizado como procedimiento de rutina para caracterizar de forma rápida las propiedades magnéticas en el producto, además de caracterizar semi-cuantitativamente la metalización del níquel en el producto final, basado en una curva de calibración desarrollada para rangos de medición analítica estimadas. Teniendo en cuenta la medición de cada muestra en la conformación de una curva de calibración, obtiene finalmente el resultado de níquel metálico aproximado por vía magnética.

CHINCHAY (CHINCHAY M. 2018) estudió la utilización del polvo de sinter o arenilla, con el fin de evaluar el comportamiento de la calidad del polvo químico obtenido, sin afectar la calidad del óxido de níquel descargado del horno de tambor rotatorio.

Las investigaciones citadas se enfocan al estudio de la automatización, modelación, balance de masa y energía del horno de tambor rotatorio, así como, al comportamiento cinético de las principales transformaciones físico-químicas que se llevan a cabo en el proceso de calcinación. También se hace referencia a algunos trabajos orientados a elevar la calidad del óxido de níquel y caracterizar magnéticamente el producto. En la investigación de MIRANDA se caracterizó el material desde el punto de vista magnético, aunque no se logró desarrollar la implementación de dicho procedimiento de análisis en aquel periodo, debido a dificultades técnicas el equipo utilizado para su caracterización, la cantidad de muestras analizadas fue limitada y las mismas fueron tamizadas a una granulometría de 100 mallas. Además, la escala en la que desarrolló la investigación fue inferior a la presente. Sin embargo, no se reportan trabajos encaminados a obtener un modelo matemático que permita predecir el contenido de níquel metálico en el óxido de níquel en polvo químico a escala industrial, permitiendo estabilizar la calidad del producto, reducción de costos de materiales y reactivos.

Conclusiones del capítulo 1

- Existe un insuficiente conocimiento sobre el fenómeno de influencia de la susceptibilidad magnética en el níquel metálico del óxido de níquel en el polvo químico.
- Se identificó que a escala industrial no se han realizado estudios que correlacionen el níquel metálico en el óxido de níquel en el polvo químico y la susceptibilidad magnética.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo fundamentar los elementos de la investigación y exponer los métodos, procedimientos y condiciones experimentales establecidas en el análisis y solución del problema.

2.1. Métodos de investigación

En el desarrollo de la investigación se utilizan dos grandes grupos de métodos: los teóricos y los empíricos.

Los métodos teóricos permiten estudiar las tendencias actuales relacionadas con la predicción de procesos, facilitan la construcción de los modelos e hipótesis de la investigación, crean las condiciones para, además de tener en cuenta las características fenomenológicas, contribuir al desarrollo de las teorías científicas.

Dentro de los métodos teóricos los más empleados son:

- Análisis y síntesis: división y unión abstracta de las variables empleadas en el trabajo, el comportamiento de las variables en sus relaciones y componentes para facilitar su estudio.
- Inducción y deducción: la inducción permite arribar a proposiciones generales a partir de hechos aislados y la deducción posibilita, a partir del estudio de conocimientos generales de los métodos estadísticos, inferir particularidades para un razonamiento lógico.
- El método histórico: posibilita el estudio detallado de los antecedentes, causas y condiciones históricas en que surgió el problema.
- El método lógico: se basa en el estudio secuencial y lógico del fenómeno, en objetos de la ingeniería metalúrgica.
- El método empírico: explica las características observables y presupone determinadas operaciones prácticas, tanto con los objetivos, como con los medios materiales del conocimiento utilizado. El método se expresa a través de las técnicas de la observación, documentación, la comunicación personal e impersonal y la experimentación.

- El método experimental: Implica alteración controlada de las condiciones naturales, de tal forma que el investigador creará modelos, reproducirá condiciones, abstraerá rasgos distintivos del objeto o del problema.

La experimentación depende del grado de conocimiento del investigador, a la naturaleza, a las circunstancias del objeto y al problema de investigación, es decir no siempre se podrá realizar experimentación. La experimentación debe seguir ciertas reglas:

- a. El fenómeno de que se trate debe aislarse para estudiarlo mejor.
- b. El experimento debe repetirse en las mismas circunstancias para comprobar si siempre es el mismo.
- c. Las condiciones del experimento deben alterarse para investigar en qué grado modifican al fenómeno.
- d. El experimento debe durar el tiempo suficiente para que se produzca el fenómeno deseado.

2.2. Materiales y equipamiento

2.2.1. Materiales

El óxido de níquel en polvo químico es un producto que se obtiene a partir del óxido de níquel de la planta de Calcinación y sinter posterior a un proceso de clasificación dinámica y desmagnetización. Las principales características físicas se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características físicas del óxido de níquel en polvo químico

Índice	Característica
Color	gris verdoso
Densidad (g/cm ³)	6,67
Granulometría 99 %	-0,044 mm
1 %	+0,044 -0,074

En la tabla 2.2 se muestran las principales características químicas del óxido de níquel en polvo químico.

Tabla 2.2 Características químicas del óxido de níquel en polvo químico

Índice	U/M	Parámetros	
Contenido por elementos	%	Ni	75 mín.
		Co	0,80 máx.
		Fe	0,50 máx.
		S	0,04 máx.
		C	0,01 máx.
		Ni metálico	0,7 máx.

2.2.2 Equipamiento

La experimentación se realiza en una unidad demostrativa de producción, instalación de clasificación y envase del polvo químico, como se observa en la figura 2.1.

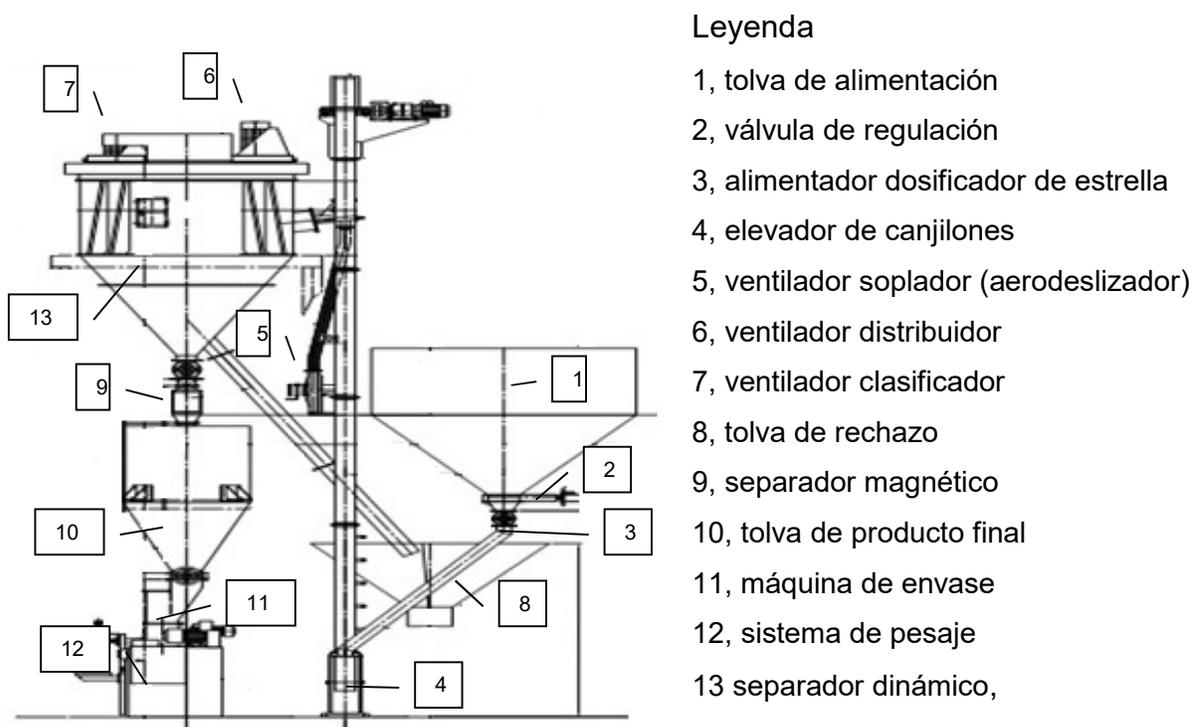


Figura 2.1 Esquema de la planta de beneficio del polvo

2.3 Procedimiento o metodología de experimentación

2.3.1 Determinación del tamaño de la muestra

En ocasiones es necesario calcular el tamaño de muestra (n) para lograr que la estimación de una media poblacional (m) tenga como error máximo a un número E . En este caso, como el error de estimación está dado por $E = t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)} \cdot S \cdot \sqrt{n}$, entonces despejando n obtenemos que

$$n = \frac{t_{(\frac{\alpha}{2}, n-1)}^2 \cdot S^2}{E^2}$$

Como $t(\alpha/2, n - 1)$ depende de n y ésta es la incógnita, entonces para propósitos prácticos y con tamaños de muestra mayores que 30, el valor de $t(\alpha/2, n - 1)$ puede tomarse como:

$$n = \frac{4 \cdot S^2}{E^2}$$

donde S^2 es un estimador de la varianza.

2.3.2 Toma y preparación de la muestra

El método de muestreo seleccionado es la toma de muestras por puntos. Para caracterizar el material las muestras se pulverizan y se procesan en el laboratorio de análisis químico de la empresa metalúrgica Ernesto Che Guevara, que cuenta con las técnicas certificadas por las normas ISO. A continuación se detallan las características de los equipos empleados y las técnicas utilizadas en cada caso.

Para la investigación se analizan muestras de los lotes de producto final, de la instalación de envase de polvo químico en la planta de Calcinación y Sinter.

Para determinar la cantidad de material utilizado en cada caso se tiene en cuenta la norma cubana (NC 929 2014), la misma establece el método de muestreo (por puntos) del óxido de níquel en polvo químico con el propósito de obtener una muestra representativa del lote, mediante la cual se determinan las características del producto.

En la figura 2.2 se muestra la representación esquemática del muestreo en bolsas de 25 kg, donde se realizan seis tomas elementales (0,2 a 0,3 kg) en cada bolso que conforma el lote.

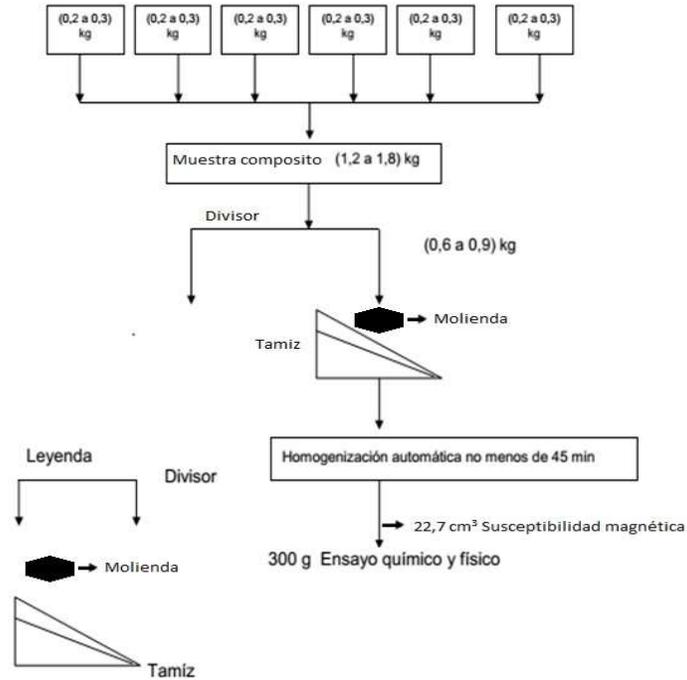


Figura 2.2 Representación esquemática del muestreo

La toma de muestra se realiza a uno de cada diez bolsas de producto envasado, con la introducción del toma muestra, el que se observa en la figura 2.3. Se realiza de forma perpendicular por la parte superior del bolso, manteniendo este de forma vertical, para facilitar el llenado de la cámara del tubo. Luego se gira la camisa del toma muestra para permitir la entrada del material, una vez el material dentro se gira el dispositivo de la camisa, de esta forma se cerrará la ranura para evitar la caída del producto introducido en la misma y finalmente se extrae del bolso.



Figura 2.3 Toma muestra

La toma elemental estuvo entre 0,2 y 0,3 kg y luego se deposita en un recipiente colector. Del conjunto de las tomas elementales se formó una muestra compósito (correspondiente a cada lote) que contó con una masa total entre 1,2 y 1,8 kg, la que se divide en un divisor de 8 ranuras, de entre 6 y 10 mm de ancho, ilustrado en la figura 2.4, hasta lograr 2 muestras preparadas que contienen entre 0,60 y 0,90 kg para su posterior análisis químico y granulométrico.



Figura 2.4 Divisor

La muestra a ser analizada químicamente, se pulveriza hasta que todo el material pase por el tamiz de 0,149 mm. Una vez tamizada se homogeneiza con el homogeneizador mecánico mostrado en la figura 2.5 por un período no menor de 45 min.



Figura 2.5 Homogeneizador

2.3.3. Procedimiento para el análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizan los datos del período comprendido entre enero y agosto del año 2019, valores que se toman del registro de software Citect.

Limpieza de datos

Comprende un control de homogeneidad de los valores muestreados, utilizando el estadístico de distribución normal “t de student”:

- a) Se separan los valores dudosos, por apreciación (y^*).
- b) Se determina el valor promedio (sin tener en cuenta el (los) error(es)) por medio de la expresión:

$$\bar{y}_1 = \frac{y_a + y_b + \dots + y_n}{n - 1}$$

donde:

n: cantidad de muestras analizadas

- c) Se determina la desviación cuadrática (sin incluir el (los) dudoso(s))

$$Dc = \sqrt{\frac{\left(\bar{y}_1 - y_a\right)^2 + \left(\bar{y}_1 - y_b\right)^2 + \dots + \left(\bar{y}_1 - y_n\right)^2}{n - 1}}$$

- d) Se calcula el valor del criterio t student (t calculado).

$$t_{calc} = \frac{y^* - \bar{y}_1}{Dc}$$

- e) Se busca en tabla el valor de t student – grados de libertad $f = n - 1$, nivel de significación $\alpha = 0,05$.
- f) Finalmente se comparan los criterios de t calculada y t tabulada.

Si $t_{calc} < t_{tab}$, el valor se corresponde con los otros valores de la serie y participa en el resto de los cálculos. Si $t_{calc} > t_{tab}$, el valor no se corresponde con los otros valores de la serie y no participa en el resto de los cálculos (hay que eliminarlo del sistema).

El análisis estadístico representa de forma resumida, la información más importante de un conjunto de datos. Para ello se realizan cálculos de medidas de tendencia central como:

Media muestral:

La media muestral es una variable aleatoria, ya que depende de la muestra, si bien es una variable aleatoria en general con una varianza menor que las variables

originales usadas en su cálculo. Si la muestra es grande y está bien escogida, puede tratarse la media muestral como un valor numérico que aproxima con precisión la media poblacional, que caracteriza una propiedad objetiva de la población. Se define como sigue, si se tiene una muestra estadística de valores $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ de valores para una variable aleatoria; se define la media muestral n-ésima como:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Mediana:

En el ámbito de la estadística, la **mediana** representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

Para el cálculo de la mediana con datos sin agrupar:

a) Si n es impar, la mediana es el valor que ocupa la posición $(n+1)/2$ una vez que los datos han sido ordenados (en orden creciente o decreciente), porque éste es el valor central. Es decir: $M = \frac{x_{n+1}}{2}$

b) Si n es par, la mediana es la media aritmética de los dos valores centrales. Cuando n es par, los dos datos que están en el centro de la muestra ocupan las posiciones $\frac{n}{2}$ y $\frac{n}{2} + 1$. Es decir: $M = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$

Las **medidas de dispersión**, también llamadas medidas de variabilidad, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos.

Varianza

En teoría de probabilidad, la **varianza** (que suele representarse como σ^2) de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Está medida en la unidad de medida de la variable al cuadrado. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros, la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades de los datos de la variable objeto de estudio. La varianza tiene como valor mínimo 0. Se determina por:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Desviación típica

La **desviación típica** o **desviación estándar** (denotada con el símbolo σ o s , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones. Matemáticamente se describe como:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$
$$S(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Rango

Es el intervalo entre el valor máximo y el valor mínimo; por ello, comparte unidades con los datos. Permite obtener una idea de la dispersión de los datos, cuanto mayor es el rango, más dispersos están los datos de un conjunto.

Igualmente se hace un análisis descriptivo para correlacionar y observar cuales variables presentan correlaciones directas o inversas, a través de una correlación lineal de matriz. Se dispondrá de una representación de los datos en forma de

gráficos, de forma que sea posible detectar valores atípicos, tendencias o agrupaciones.

Correlación

En probabilidad y estadística, la **correlación** indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

Fuerza, sentido y forma de la correlación

La relación entre dos variables cuantitativas queda representada mediante la línea de mejor ajuste, trazada a partir de la nube de puntos. Los principales componentes elementales de una línea de ajuste y, por lo tanto, de una correlación, son la fuerza, el sentido y la forma:

- La **fuerza** extrema según el caso, mide el grado en que la línea representa a la nube de puntos: si la nube es estrecha y alargada, se representa por una línea recta, lo que indica que la relación es fuerte; si la nube de puntos tiene una tendencia elíptica o circular, la relación es débil.
- El **sentido** mide la variación de los valores de B con respecto a A: si al crecer los valores de A lo hacen los de B, la relación es directa (pendiente positiva); si al crecer los valores de A disminuyen los de B, la relación es inversa (pendiente negativa).
- La **forma** establece el tipo de línea que define el mejor ajuste: la línea recta, la curva monótonica o la curva no monótonica

Coefficientes de correlación

Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación, adaptados a la naturaleza de los datos. El más conocido es el coeficiente de correlación de Pearson, que se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables entre el producto de sus desviaciones estándar, es decir:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$
$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Donde:

σ_{xy} es la covarianza de (x,y)

σ_x es la desviación típica de la variable x

σ_y es la desviación típica de la variable y

Interpretación de la covarianza

- Si $S_{xy} > 0$ hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de x corresponden grandes valores de y.
- Si $S_{xy} = 0$ Una covarianza 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.
- Si $S_{xy} < 0$ hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de x corresponden pequeños valores de y.

Igual interpretaciones se aplican al parámetro σ_{xy}

En estadística, el **coeficiente de correlación de Pearson** es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. En la figura 2.6 se muestra un ejemplo con diferentes valores del coeficiente de correlación.

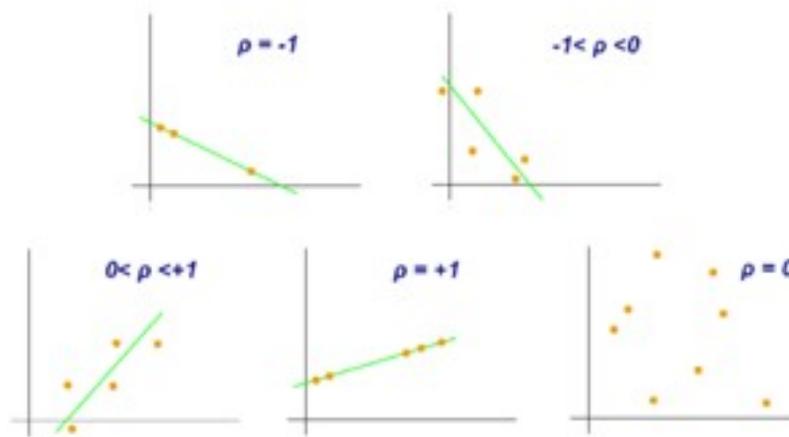


Figura 2.6 Diagramas de dispersión con diferentes valores del coeficiente de correlación (ρ)

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

Interpretación

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$:

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

Ejemplos se muestran en la figura 2.7.

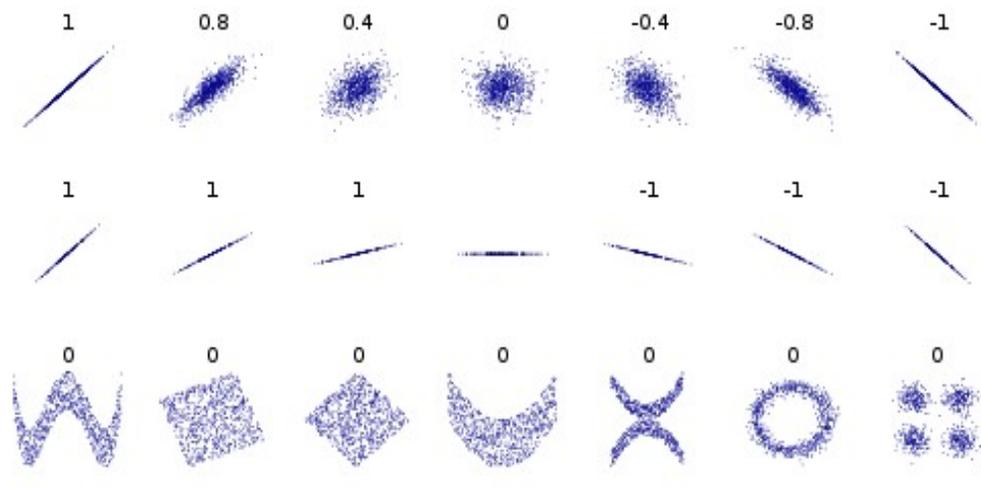


Figura 2.7 Grupos de puntos (x, y) , con el coeficiente de correlación para cada grupo.

Nótese que la correlación refleja la no linealidad y la dirección de la relación lineal.

En la figura del centro, la varianza de y es nula, por lo que la correlación es indeterminada.

Para facilitar los cálculos se utiliza el software Microsoft Excel («Microsoft EXCEL» 2007) y el programa Statgraphics («STATGRAPHICS CENTURION XV» 2007), mediante su aplicación es posible realizar unos análisis descriptivos de varias variables, utilizando gráficos que explican su distribución o calculando sus medidas características. Entre sus muchas prestaciones, también figura el cálculo de intervalos de confianza, análisis de regresión.

Regresión lineal

La **regresión lineal** o **ajuste lineal** es un modelo matemático usado para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente Y , las variables independientes X_i y un término aleatorio ε . En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de regresión lineal.

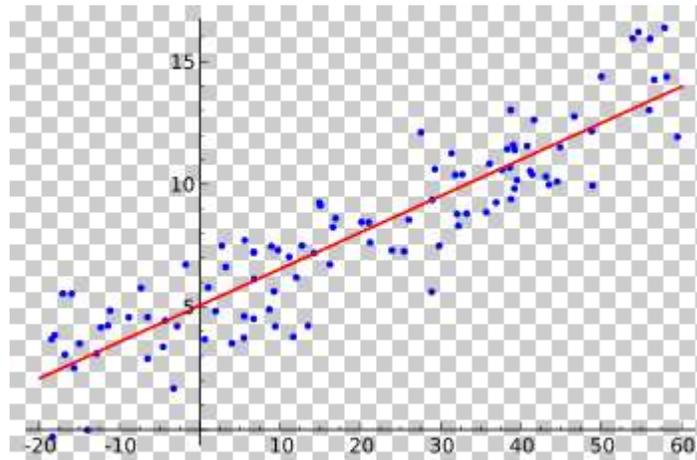


Figura 2.8 Ejemplo de una regresión lineal con una variable dependiente y una variable independiente.

Este modelo puede ser expresado como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

donde:

Y : variable dependiente.

X_1, X_2, \dots, X_p : variables independientes.

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: parámetros, miden la influencia que las variables independientes tienen sobre la variable dependiente.

donde β_0 es la intersección o término "constante", las β_i ($i > 0$) son los parámetros respectivos a cada variable independiente, y p es el número de parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión. La regresión lineal puede ser contrastada con la regresión no lineal.

2.4. Técnicas de análisis

2.4.1. Determinación de la composición química

La composición química cualitativa y cuantitativa de las muestras de óxido de níquel en polvo químico utilizadas en los experimentos, se realiza por el método de Espectrofotometría de absorción atómica, en un equipo de marca Analytik Jena, modelo nov AA 350, de procedencia alemana, el que se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9 Equipo de Espectrofotometría de absorción atómica EAA, Analytik Jena

Es un método de química analítica cuantificable, basado en la atomización del analito en matriz líquida, que utiliza comúnmente un nebulizador prequemador (o cámara de nebulización) para crear una niebla de la muestra, y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga. La niebla atómica queda desolvatada y expuesta a una energía a determinada longitud de onda, emitida por una lámpara de cátodo hueco construida con el mismo analito a determinar, o una lámpara de descarga sin electrodo. Apoyado en las NC 621-1 (NC 621-1 2019), NC 621-2 (NC 621-2 2019) y NC 1061 (NC 1061 2019) para determinar el níquel total, impurezas y níquel metálico respectivamente.

Determinación del contenido de azufre y carbono

Para la determinación del contenido de azufre y carbono según la NC 621-3 (NC 621-3 2019), se utiliza el Analizador infrarrojo automático, el cual se ilustra en la figura 2.10.



Figura 2.10 Analizador infrarrojo automático, HORIBA

Está basado en la combustión de la muestra en presencia de oxígeno, en un horno de alta frecuencia, dando lugar a la formación de dióxido de carbono y dióxido de azufre, para lograr la determinación cuantitativa de estos componentes a través del analizador infrarrojo, en correspondencia con el peso de la muestra y los factores de calibración.

2.4.2. Determinación de la composición granulométrica

Para determinar la composición granulométrica contenida en el óxido de níquel en polvo químico, incluyendo la fracción de mayor tamaño y diámetro medio de las partículas, se utilizó el equipo Analisset 22 compact de procedencia alemana, el que se observa en la figura 2.11.

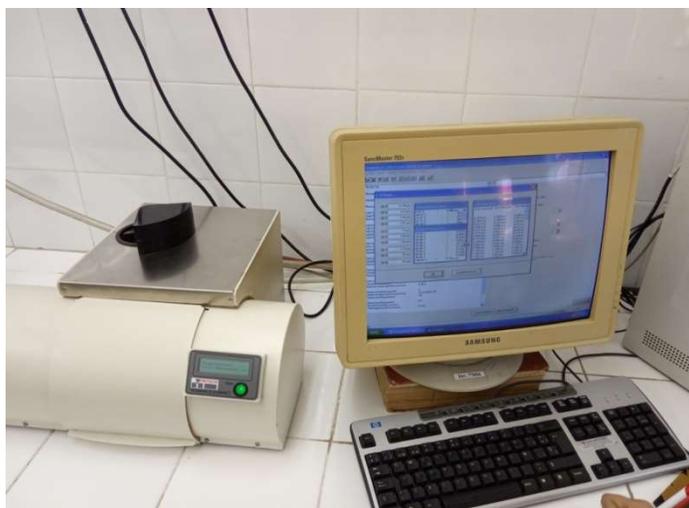


Figura 2.11 Equipo analizador de tamaño de partículas

Esta es una técnica usada a nivel mundial que da la posibilidad de hacer mediciones en el rango entre $0,023$ y $300 \mu\text{m} \pm 3$, utilizando 62 canales. Se emplea para medir polvos, pulpas, suspensiones y coloides con gran afinidad. La muestra una vez homogeneizada se somete al proceso de análisis.

El método se basa en la difracción de rayos láser para determinar la distribución de tamaño de partículas a través de un rayo láser convergente, emitido por un diodo con una longitud de onda de 634 nm , el cual al incidir sobre las partículas describe ángulos sólidos que llegan al detector, brinda la información del grado de opacidad reflejado, y mediante modelos matemáticos que posee el software se obtienen los resultados de los por cientos de distribución de la cantidad de partículas agrupadas en función del tamaño. Durante el análisis se utiliza solamente agua destilada o desmineralizada y muestra patrón de referencia.

La muestra de laboratorio, la que ha sido previamente homogeneizada, es absorbida al tomar una porción equivalente entre 2 y 3 ml necesarios para lograr la absorción recomendada por el fabricante. Limpia y llena la celda de medición se realiza el alineamiento del rayo láser.

2.4.3. Determinación de la susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética es medida con el *kappameter* de campo KT 9 (UNIDAD KT-9 2014), el que se muestra en la figura 2.12.



Figura 2.12 *Kappameter* de campo KT 9

El método está basado en conectar una fuente de corriente directa con intensidad constante, es decir, un voltaje constante y que no disminuya su valor en el KT-9, aspecto que influye en los resultados del campo electromagnético que genera el equipo, siendo la relación de la intensidad de la magnetización al campo magnético la responsable de la magnetización.

Para realizar las mediciones se procede de acuerdo a las recomendaciones del fabricante que recomienda realizar de 6 a 15 réplicas de una misma muestra en diferentes posiciones para tener una mayor confiabilidad del resultado.

Con el objetivo de caracterizar las muestras, se toma un volumen de $22,7 \text{ cm}^3$ y se adiciona directamente al porta-muestra, se realizan 15 réplicas de mediciones, rotando la muestra encima del KT-9 en posiciones diferentes en dirección del campo aplicado, para un total de 1815 mediciones. Tal procedimiento se realiza según la norma ramal UPL-PT-V-14 (UPL-PT-V-14 2018), vigente en la empresa Geominera Oriente del Grupo Geominsal, perteneciente al Ministerio de Energía y Minas.

2.5. Valoración económica

La valoración económica está desarrollada para la determinación de formación del costo de los análisis, así como una valoración y comparación de cada análisis químico, determinado lo gastos directos y los indirectos, realizando una comparación económica de la realización del análisis por ambos métodos.

Conclusiones parciales

1. Las técnicas analíticas de tecnología avanzada y los métodos empleados, garantizan la confiabilidad de los resultados de la caracterización físico-química del material y a su vez, facilitan la selección adecuada de las características necesarias para ser evaluadas en el proceso.
2. Se demostró que la instalación experimental escogida y los materiales utilizados tienen las suficientes condiciones para garantizar resultados veraces de las pruebas planificadas.
3. La metodología de toma y preparación de la muestra explicada, garantiza representatividad y confiabilidad en los resultados de la evaluación, con comprobación de la hipótesis planteada.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, y se establece un conjunto de criterios postulados, que sustentan la teoría que corroboran la veracidad de la hipótesis planteada y el procesamiento de la información obtenida a través de la observación o la realización de los experimentos, análisis estadísticos y simulaciones. Se realiza además una valoración económica comparativa por ambos métodos (química y susceptibilidad magnética), así como el impacto medioambiental que trae consigo la recirculación del óxido de níquel en polvo químico al proceso de calcinación.

3.1. Análisis de la composición química

Para la identificación de la composición química de las muestras analizadas de óxido de níquel en polvo químico, se siguió la metodología establecida en el epígrafe 2.4. En la tabla 3.1 se muestra un resumen de la media de los elementos químicos analizados en cada muestra, donde se observa que el elemento de mayor porcentaje es el níquel total, seguido por el níquel metálico, cobalto, manganeso, hierro, zinc y cobre en orden descendente.

Tabla 3.1 Media y desviación estándar de los elementos metálicos.

	<i>Media %</i>	<i>desviación Estándar.</i>
Níquel Total (Ni)	77,174	0,03926
Ni metálico (Ni ⁰)	0,6474	0,09911
Cobalto (Co)	0,3938	0,00768
Manganeso (Mn)	0,3538	0,01067
Hierro (Fe)	0,1178	0,00733
Zinc (Zn)	0,0951	0,00280
Cobre (Cu)	0,0030	0,00014

La desviación estándar de los elementos químicos, representa la desviación de cada elemento de las muestras analizadas, en la que se observa un mayor valor para el níquel metálico de 0,09911. En el anexo 1 se muestra de forma íntegra la composición química de todas las muestras analizadas. En el que se refleja que la

variabilidad de este elemento es superior a la de los demás. Tal resultado confirma la necesidad de la realización de la investigación, ya que esto provoca la variación de la calidad del polvo químico, y por tanto se incrementan los costos de análisis químico y de producción al tener que reprocesarlo. Por lo que si es posible predecir en breve tiempo la composición química del polvo químico, se reducirían en un elevado porcentaje tales costos. Un aspecto importante lo representan el resto de los elementos, donde no existe prácticamente variabilidad, por lo que no afectan la calidad de este producto, ya que se mantienen en el rango que establece la norma cubana NC 958 (NC 958 2015).

3.1.1. Análisis del contenido de azufre y carbono en el polvo químico

La composición química cualitativa y cuantitativa de azufre y carbono correspondientes a las muestras utilizadas en los experimentos, se realizó por el método expresado en el epígrafe 2.4. En la tabla 3.2 se muestra un resumen de la media y la desviación estándar de tales elementos analizados para cada muestra.

Tabla 3.2 Medias con intervalos de la desviación estándar para los contenidos de azufre y carbono.

	Media %	Desviación Estándar.
Azufre (S)	0,0058	0,00080
Carbón (C)	0,0025	0,00026

El contenido de azufre y carbón en el proceso no es significativo, ya que la media y la desviación estándar es pequeña, y su influencia no es representativa para alterar el contenido de níquel metálico en el producto final. En el anexo 1 se puede observar de forma íntegra los porcentajes de los elementos en cuestión, los que se encuentran en el rango que establece la norma.

3.2. Análisis de la composición granulométrica

Para evaluar la calidad del óxido de níquel en el polvo químico se tiene en cuenta dos clases de tamaño (-0,074 mm y -0,044 mm). En la tabla 3.3 se muestra el resumen estadístico para cada una de ellas.

Tabla 3.3 Resumen Estadístico.

	-0,074 mm	-0,044 mm
Promedio	100,0	99,9464
Desviación Estándar	0,0	0,150044
Coefficiente de Variación (%)	0,0	0,150125
Mínimo	100,0	99,12
Máximo	100,0	100,0

Al observar las clases de tamaño analizadas se aprecia que la diferencia estadística es despreciable, siendo la de -0,044 mm la clase de mayor variabilidad. En el anexo 1 se puede apreciar de forma íntegra la composición granulométrica de las muestras analizadas.

3.3. Análisis de la susceptibilidad magnética

En la tabla 3.4 se observan los resultados de la susceptibilidad magnética de las muestras analizadas, obtenido una vez realizadas 15 réplicas por muestra, de la que se tomó el valor promedio.

Tabla 3.4 Susceptibilidad magnética promedio de las muestras analizadas.

Muestra	Níquel metálico	Promedio de la SM	Error Relativo %	Muestra	Níquel metálico	Promedio de la SM	Error Relativo %	Muestra	Níquel metálico	Promedio de la SM	Error Relativo %
PQ-001/19	0,94	7,31	0,07	PQ-041/19	0,39	3,17	0,30	PQ-081/19	0,01	0,31	0,83
PQ-002/19	0,88	6,87	1,22	PQ-042/19	0,28	2,23	0,76	PQ-082/19	2,01	15,00	0,29
PQ-003/19	0,06	0,65	0,75	PQ-043/19	0,06	0,68	0,97	PQ-083/19	4,56	35,96	0,23
PQ-004/19	0,31	2,55	0,41	PQ-044/19	0,39	2,90	0,87	PQ-084/19	0,00	0,23	1,12
PQ-005/19	0,31	2,55	0,18	PQ-045/19	1,16	8,01	0,44	PQ-085/19	1,03	8,43	0,11
PQ-006/19	0,74	5,81	0,09	PQ-046/19	1,24	5,93	0,26	PQ-086/19	2,35	15,40	0,65
PQ-007/19	0,11	1,03	0,03	PQ-047/19	0,02	0,46	0,90	PQ-087/19	5,06	38,70	0,29
PQ-008/19	0,66	5,21	0,90	PQ-048/19	0,06	0,70	0,74	PQ-088/19	0,00	0,21	1,23
PQ-009/19	0,14	1,26	0,96	PQ-049/19	0,00	2,17	0,31	PQ-089/19	0,00	0,31	0,83
PQ-010/19	0,05	0,52	0,88	PQ-050/19	0,12	0,31	0,83	PQ-090/19	0,00	0,25	1,04
PQ-011/19	0,05	0,57	0,90	PQ-051/19	0,02	0,33	0,78	PQ-091/19	0,14	0,43	1,02
PQ-012/19	0,99	7,71	0,89	PQ-052/19	0,01	0,26	0,99	PQ-092/19	0,00	0,23	1,12
PQ-013/19	0,48	3,84	0,94	PQ-053/19	0,00	0,27	0,96	PQ-093/19	0,14	0,30	0,86
PQ-014/19	0,11	1,04	0,79	PQ-054/19	0,26	1,94	0,27	PQ-094/19	0,00	0,25	1,04
PQ-015/19	0,39	3,16	0,69	PQ-055/19	0,19	1,37	0,33	PQ-095/19	0,01	0,25	0,21
PQ-016/19	0,23	1,95	0,80	PQ-056/19	0,22	1,52	0,34	PQ-096/19	0,01	0,25	0,33
PQ-017/19	0,08	0,80	1,00	PQ-057/19	0,06	0,62	0,78	PQ-097/19	0,30	0,57	0,72
PQ-018/19	0,06	0,65	0,97	PQ-058/19	0,01	0,30	0,86	PQ-098/19	0,24	0,94	0,48
PQ-019/19	0,39	3,15	0,92	PQ-059/19	1,44	5,22	0,19	PQ-099/19	0,06	0,62	0,74
PQ-020/19	0,39	3,16	0,73	PQ-060/19	0,01	0,25	0,39	PQ-100/19	0,07	0,64	0,75
PQ-021/19	0,31	2,54	0,55	PQ-061/19	0,01	0,25	0,21	PQ-101/19	0,03	0,26	0,20
PQ-022/19	0,31	2,55	0,49	PQ-062/19	0,00	0,42	0,84	PQ-102/19	0,01	0,45	1,02
PQ-023/19	0,33	2,54	0,20	PQ-063/19	0,01	0,42	0,61	PQ-103/19	0,00	0,72	0,71
PQ-024/19	0,30	2,54	0,69	PQ-064/19	0,00	0,42	0,90	PQ-104/19	4,32	30,20	0,25
PQ-025/19	0,29	2,39	0,34	PQ-065/19	0,00	0,55	0,73	PQ-105/19	4,14	28,80	0,03
PQ-026/19	0,56	4,45	0,90	PQ-066/19	0,15	0,57	0,80	PQ-106/19	5,04	39,10	0,26
PQ-027/19	0,94	7,33	0,62	PQ-067/19	0,05	0,57	0,88	PQ-107/19	3,91	27,10	0,28
PQ-028/19	0,88	6,87	0,71	PQ-068/19	0,01	0,35	0,72	PQ-108/19	2,15	19,00	0,39
PQ-029/19	0,37	3,01	0,16	PQ-069/19	0,02	0,42	1,17	PQ-109/19	0,55	4,97	0,29
PQ-030/19	0,33	2,70	0,62	PQ-070/19	0,10	0,42	0,84	PQ-110/19	0,93	5,68	0,11
PQ-031/19	0,30	2,47	0,69	PQ-071/19	0,02	0,31	1,13	PQ-111/19	1,36	8,06	0,15
PQ-032/19	0,29	2,39	0,69	PQ-072/19	0,08	0,78	0,63	PQ-112/19	1,10	7,18	0,17
PQ-033/19	0,10	1,31	0,75	PQ-073/19	0,02	0,38	0,99	PQ-113/19	0,95	6,35	0,30
PQ-034/19	0,14	1,34	0,76	PQ-074/19	0,05	0,63	0,56	PQ-114/19	1,00	6,18	0,08
PQ-035/19	1,04	7,37	0,66	PQ-075/19	0,06	0,70	0,81	PQ-115/19	0,69	4,81	0,21
PQ-036/19	1,12	7,70	0,70	PQ-076/19	0,13	1,39	0,47	PQ-116/19	1,27	8,70	0,78
PQ-037/19	0,74	5,20	0,44	PQ-077/19	0,01	0,26	0,93	PQ-117/19	1,90	11,51	0,16
PQ-038/19	1,25	7,80	0,82	PQ-078/19	0,01	0,31	0,83	PQ-118/19	2,67	15,75	0,13
PQ-039/19	4,00	18,20	0,46	PQ-079/19	0,01	0,30	0,87	PQ-119/19	0,00	0,22	0,88
PQ-040/19	1,21	8,60	0,65	PQ-080/19	0,96	6,32	0,23	PQ-120/19	0,17	1,15	0,94
								PQ-121/19	0,35	2,43	0,14

En la tabla se puede observar que existe una variabilidad de la susceptibilidad magnética de las muestras. Tales resultados tienen correspondencia con la variación del contenido de níquel metálico. Dado el bajo error relativo del ensayo analítico de la susceptibilidad magnética de las muestras analizadas (ver anexo 3), se concluye que el procedimiento de análisis es confiable como método de ensayo analítico para predecir el contenido de níquel metálico en el óxido de níquel del polvo químico.

3.4. Análisis estadístico

La obtención de modelos matemáticos exige de la realización de experimentos para lograr la adecuación del modelo a escala industrial en la UDP. La experimentación,

permitió la obtención de las características estáticas y dinámicas principales del proceso, para lo cual todos los experimentos fueron realizados en el proceso industrial, o sea en la instalación de beneficio y envase del polvo químico, interrelacionado con las operaciones del horno de tambor rotatorio. La realización de experimentos en la cadena de producción no admite la introducción de perturbaciones que afecten la estabilidad de las operaciones desde el punto de vista de la obtención de un producto final dentro de las especificaciones comerciales establecidas. No obstante, la presencia en el horno de medios técnicos adecuados permitió llevar a cabo el seguimiento de los principales parámetros influyentes en el proceso de calcinación. En todos los casos los parámetros de medición continua y las acciones sobre el proceso introducidas fueron recogidas por el software Citect instalado en los ordenadores que monitorean el proceso.

3.4.1. Análisis descriptivo a través de una correlación lineal de matriz

En la correlación lineal de matriz se observa la dependencia lineal entre cada una de las variables monitoreadas (temperatura en las diferentes zonas (T-2, T-3 y T4), flujo de petróleo, flujos de aire primario y secundario, revoluciones del motor principal del horno, presión de vacío dentro del horno y la relación de petróleo/aire) en las operaciones del horno calcinador, los contenidos químicos de las muestras (níquel total, cobalto, hierro, cobre, zinc, manganeso, azufre, carbón y níquel metálico) y las características granulométricas en la cual están representadas las clases. En la figura 3.1 se observa que hay correlación fuerte entre la variable del níquel metálico y la susceptibilidad magnética, siendo estas las de mayor interés al mostrar una relación directa con un $R=0,9841$.

	% Ni	% Co	% Cu	% Zn	% Fe	% Mn	% S	% C	% Ni°	-0.074 mm	-0.044 mm	SM	RELACION P/A total	RELACION P/A prim	Temperatura de T-2 (°C)	Temperatura de T-3 (°C)	Temperatura de T-4 (°C)	Flujo de fue-Oil (kg/h)	Flujo de Aire Primario (m3/h)	Flujo de Aire Secundario (m3/h)	Revoluciones (rpm)	Presión de Vacío (mmH2O)	
% Ni	1								1														
% Co	-0,228	1																					
% Cu	-0,053	-0,020	1																				
% Zn	-0,290	0,144	0,044	1																			
% Fe	-0,483	0,029	-0,048	0,151	1																		
% Mn	-0,445	-0,049	-0,299	0,160	0,439	1																	
% S	0,383	-0,032	0,039	-0,098	-0,085	-0,183	1																
% C	-0,019	-0,001	-0,059	0,066	0,127	0,018	0,371	1															
% Ni°	0,690	-0,110	-0,185	-0,112	-0,054	-0,080	0,460	0,101	1														
-0.074 mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1													
-0.044 mm	0,032	-0,118	0,053	-0,116	-0,138	-0,052	-0,073	-0,104	0,025	0,000	1												
Susceptibilidad Magnética	0,659	-0,056	-0,166	-0,093	-0,023	-0,083	0,461	0,078	0,984	0,000	0,007	1											
RELACION P/A total	0,324	-0,036	-0,237	0,003	-0,049	-0,044	0,274	0,213	0,483	0,000	-0,061	0,453	1										
RELACION P/A prim	0,164	-0,030	-0,225	0,058	0,055	0,014	0,216	0,166	0,321	0,000	0,040	0,311	0,779	1									
Temperatura de T-2 (°C)	0,102	-0,113	-0,092	-0,089	-0,130	-0,002	-0,098	-0,022	-0,061	0,000	0,061	-0,091	0,064	0,088	1								
Temperatura de T-3 (°C)	0,177	-0,162	-0,131	-0,146	-0,024	0,016	0,007	-0,072	0,135	0,000	0,014	0,125	0,079	-0,020	0,706	1							
Temperatura de T-4 (°C)	0,191	-0,204	-0,161	-0,031	0,151	0,098	0,161	-0,070	0,290	0,000	0,009	0,317	0,122	0,040	-0,134	0,406	1						
Flujo de fue-Oil (kg/h)	0,142	-0,048	-0,224	0,028	0,061	0,017	0,188	0,109	0,264	0,000	0,026	0,259	0,738	0,972	0,231	0,131	0,075	1					
Flujo de Aire Primario (m3/h)	0,033	-0,083	-0,125	-0,116	0,044	0,014	0,004	-0,078	-0,029	0,000	-0,034	-0,021	0,235	0,356	0,640	0,638	0,174	0,561	1				
Flujo de Aire Secundario (m3/h)	-0,210	-0,012	-0,002	0,058	0,156	0,083	-0,050	-0,068	-0,217	0,000	0,144	-0,190	-0,257	0,396	0,152	-0,045	-0,094	0,445	0,334	1			
Revoluciones (rpm)	-0,106	-0,174	-0,142	0,002	0,071	0,064	-0,010	0,081	-0,099	0,000	0,107	-0,125	0,388	0,678	0,358	0,083	-0,166	0,719	0,462	0,495	1		
Presión de Vacío (mmH2O)	0,179	0,078	0,109	-0,123	-0,065	-0,038	-0,025	-0,073	0,133	0,000	-0,037	0,133	-0,346	-0,677	0,082	0,157	0,058	-0,678	-0,289	-0,512	-0,680	1	

Figura 3.1 Correlación lineal de matriz, con los elementos químicos y variables de operación del horno.

Los elementos químicos y variables de operación presentes en la matriz de correlación arrojan una influencia directa o inversa, lo cuales no son considerados como relaciones fuertes, ya que no superan el 70 % de influencia. Por tanto, teniendo en cuenta los resultados mostrados en la figura 3.1, se considera que para predecir el contenido de níquel metálico en el óxido de níquel del polvo químico, la variable definitoria que debe contener el modelo matemático a obtener es la susceptibilidad magnética. Ya que posee una correlación lineal elevada, por encima del 98 %. Se considera, además, que ninguno de los restantes parámetros influye significativamente sobre el contenido de níquel metálico por su bajo valor de correlación.

3.4.2. Regresión simple del níquel metálico vs la susceptibilidad magnética

Para la determinación de la regresión simple se tuvo en cuenta como variable dependiente el níquel metálico (Ni°), variable independiente la susceptibilidad magnética (SM) y el modelo lineal obtenido $Y = a + b \cdot X$.

Coeficiente de Correlación = 0,984138

R-cuadrada = 96,8528 %

R-cuadrado (ajustado) = 96,8264 %

Error estándar del est. = 0,194222

Error absoluto medio = 0,0949521

Estadístico Durbin-Watson = 1,82714 (P=0,1719)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0857009

Los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre el contenido de níquel metálico y la susceptibilidad magnética, se muestran en la ecuación del modelo según la representación de la figura 3.2:

$$\text{Ni}^\circ = 0,00108607 + 0,139322 \cdot \text{SM}$$

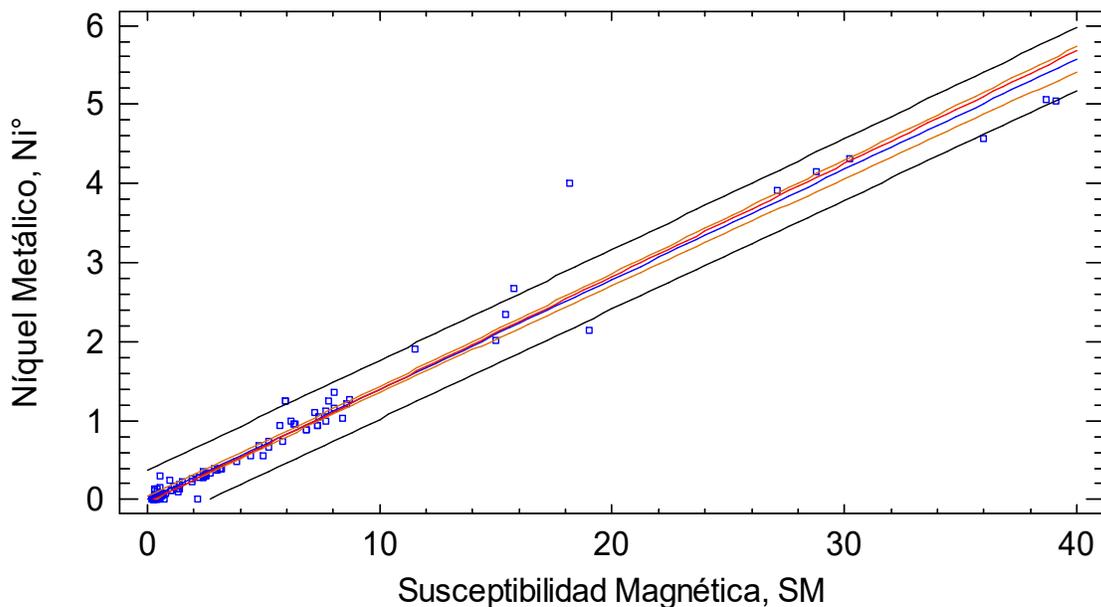


Figura 3.2 Correlación lineal y sus corredores de probabilidad.

En el gráfico se observan varios puntos alejados de los límites de confianza de predicción del modelo, los cuales pueden influir negativamente en el proceso, al modificar los resultados. Lo que significa que es necesario realizar una limpieza de los datos para poder obtener un modelo matemático más ajustado, que permita reducir el error de predicción.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 96,8528 % de la variabilidad del níquel metálico. El coeficiente de correlación lineal es igual a 0,984138, lo que indica una relación relativamente fuerte entre las variables. La desviación estándar de los residuos es 0,194222. Este valor es usado para construir límites de predicción para nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de

0,0949521 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

3.4.3. Análisis de Varianza con Carencia de Ajuste

La prueba de falta de ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados, o si se debería utilizar un modelo más complicado. La prueba se realiza comparando la variabilidad de los residuos del modelo actual con la variabilidad entre observaciones hechas en valores repetidos de la variable independiente X. Puesto que el valor-P es igual a 0,0000 para la carencia de ajuste es menor que 0,05, existe una carencia de ajuste estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0%. Siendo necesario reconsiderar seleccionar un modelo diferente, para ello analizamos los residuos atípicos y los puntos influyentes, al tener un modelo influenciado por valores atípicos.

3.4.4. Residuos Atípicos

La tabla 3.5 de residuos atípicos enlista todas las observaciones que tienen residuos estudentizados mayores a 2, en valor absoluto. Miden cuántas desviaciones estándar se desvía de cada valor observado de níquel metálico del modelo ajustado, utilizando todos los datos excepto esa observación. En tal caso, como se muestra en la tabla, hay 7 residuos estudentizados mayores que 2 y, 2 mayores que 3. Es conveniente examinar detenidamente las observaciones con residuos mayores a 3 para determinar si son valores aberrantes que debieran ser eliminados del modelo y tratados por separado.

Tabla 3.5 Residuos Atípicos.

			Predicciones	Residuos
Fila	X	Y	Y	Studentizados
39	18,20	4,00	2,536	10,73
46	5,93	1,24	0,828	2,16
59	5,22	1,44	0,729	3,89
83	35,96	4,56	5,011	-2,57
106	39,10	5,04	5,449	-2,36
108	19,00	2,15	2,649	-2,68
118	15,75	2,67	2,195	2,53

En la observación se concluye que los datos de las muestras pertenecientes a los lotes PQ-039/19 y PQ-059/19 son considerados datos aberrantes y serán retirados del modelo.

3.4.5. Puntos Influyentes

En la tabla 3.6 se muestran los puntos influyentes, en la que se enlista todas las observaciones que tienen valores de influencia mayores que 3 veces la de un punto promedio de los datos. Tal aspecto es un estadístico que mide que tan influyente es cada observación en la determinación de los coeficientes del modelo estimado.

Tabla 3.6 Puntos Influyentes.

			Predicciones	
Fila	X	Y	Y	Influencia
83	35,96	4,56	5,011	0,146
87	38,70	5,06	5,393	0,171
104	30,20	4,32	4,209	0,100
105	28,79	4,14	4,013	0,090
106	39,10	5,04	5,449	0,175
107	27,10	3,91	3,777	0,079

En este caso, un punto promedio de los datos (obtenido en el Statgraphics) tendría un valor de influencia igual a 0,0165289. Hay 6 puntos mayor que 3 veces el valor de influencia promedio, 5 de ellos mayor que 5 veces. Una vez examinada cuidadosamente aquellos puntos con más de 5 veces el valor de influencia promedio, para determinar que tanto podría cambiar el modelo si no estuvieran presentes, se

consideran que el modelo no está siendo alterado drásticamente por la influencia de los puntos con más de cinco veces el valor medio de influencia.

3.4.6. Comparación de Modelos Alternos

En la tabla 3.7 se muestran los resultados al ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. Se observa que, de los 27 modelos evaluados, 6 de ellos tienen grado de correlación nula, 4 poseen grado de ajuste negativos y 9 con grado de ajuste superior a los 91,13 %. De ellos hay tres modelos con grado de correlación y R-Cuadrada superior a los 97,02 %, que son caracterizados como modelos con alto grado de transcendencia.

Tabla 3.7. Comparación de modelos alternos.

<i>Modelo</i>	<i>Correlación</i>	<i>R-Cuadrada</i>
Lineal	0,9933	98,67%
Cuadrado Doble	0,9918	98,37%
Raíz Cuadrada Doble	0,9850	97,02%
Cuadrado de Y	0,9543	91,07%
Raíz Cuadrada de X	0,9537	90,95%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9352	87,45%
Cuadrado de X	0,9201	84,65%
Raíz Cuadrada de Y	0,9191	84,48%
Multiplicativa	0,9113	83,04%
Curva S	-0,8650	74,83%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8213	67,45%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8134	66,16%
Logaritmo de X	0,7924	62,79%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,7582	57,49%
Exponencial	0,6537	42,73%
Doble Inverso	0,6123	37,49%
Cuadrado-Y Log-X	0,5928	35,14%
Inversa de X	-0,4895	23,96%
Log-Y Cuadrado-X	0,4555	20,75%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,2970	8,82%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,1514	2,29%
Inversa de Y	<sin ajuste>	
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El modelo que se utilizó para predecir la variable es el lineal, debido a que es el más adecuado para estimar variable dado a su linealidad, con alto R-Cuadrada 98,67 %,

mayor que el modelo cuadrado doble y raíz cuadrada doble, ajustado por la metodología de ajuste de los mínimos cuadrados.

3.4.7. Modelo ajustado

Al retirar los puntos aberrantes y analizar los puntos influyentes, varios modelos tienen por resultado de ajuste un modelo lineal. En los que se describe la relación entre el contenido de níquel metálico y la susceptibilidad magnética. La ecuación de la curva ajustada, obtenida a partir de la figura 3.3 queda de la manera siguiente:

$$\text{Ni}^\circ = -0,00380559 + 0,136362 \cdot \text{SM}$$

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 98,67 % de la variabilidad en el contenido de níquel metálico (tabla 3.7). El coeficiente de correlación es igual a 0,9933, lo que indica una relación relativamente fuerte entre las variables. La desviación estándar de los residuos es 0,122003. El error absoluto medio (MAE) es 0,0747121, lo que constituye el valor promedio de los residuos.

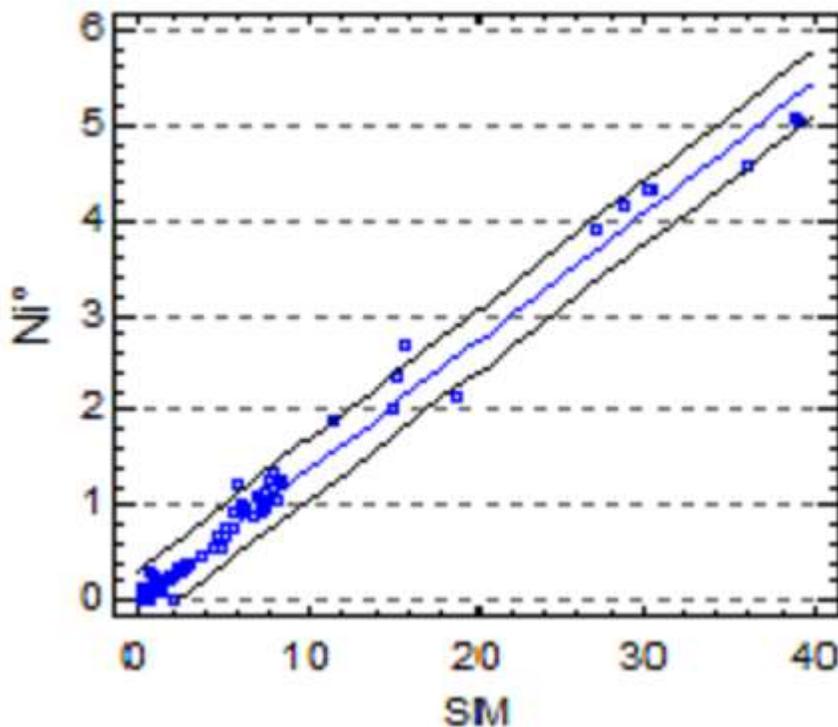


Figura 3.3 Modelo ajustado con intervalos de predicción del 99,0 %.

Los límites de confianza son válidos únicamente si el modelo es correcto. Un riesgo evidente de extrapolar el modelo fuera del rango de datos mediante el cual se ha construido, es que la relación entre las variables deje de ser lineal para garantizar

que esta aproximación sea válida. La independencia del modelo, es comprobada con el estadístico de Durbin-Watson; el que plantea que, si el resultado se encuentra entre 1,5 y 2,5, entonces se puede asumir que los residuos son independientes, como se puede apreciar en la tabla 3.8. El estadístico es de 1,801 (obtenido en el software Statgraphics), el que está comprendido dentro de las características que debe cumplir el modelo.

Tabla 3.8 Variables predictoras.

Modelo	R ²	R ² corregida	Durbin-Watson
Lineal	98,667	98,655	1,801

En la comparación de los contenidos de níquel metálico evaluados por la vía de análisis químico y los obtenidos a través del modelo, se puede observar en la tabla 3.9 que el promedio de ambas muestras presenta una alineación casi igual. En la desviación estándar no hay diferencia significativa entre las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95,0 % y un coeficiente de variación bastante parecidos. Por tal razón se considera que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las dos vías de análisis de la muestra. Con ello se concluye que se puede utilizar el modelo ajustado para predecir la concentración del níquel metálico en el óxido de níquel en polvo químico, a través de la medición de la susceptibilidad magnética, con un nivel de confianza del 95,0 %.

Tabla 3.9 Comparación de los contenidos de níquel metálico.

	<i>Ni</i> ^o	<i>Ni</i> ^o <i>Calculado</i>
Recuento	119	119
Promedio	0,612664	0,612662
Desviación Estándar	1,05213	1,04509
Coeficiente de Variación %	171,73	170,581

En la figura 3.4 se muestra una comparación entre los contenidos de níquel metálico obtenidos tanto por vía química como por vía magnética, en la que se observa que las líneas están superpuestas con una combinación casi igual, ya que a medida que incrementa el contenido de níquel metálico determinado por la vía química,

incrementa el contenido de níquel metálico calculado a través del modelo obtenido. Lo que corrobora que se puede predecir el contenido de níquel metálico mediante el modelo obtenido.

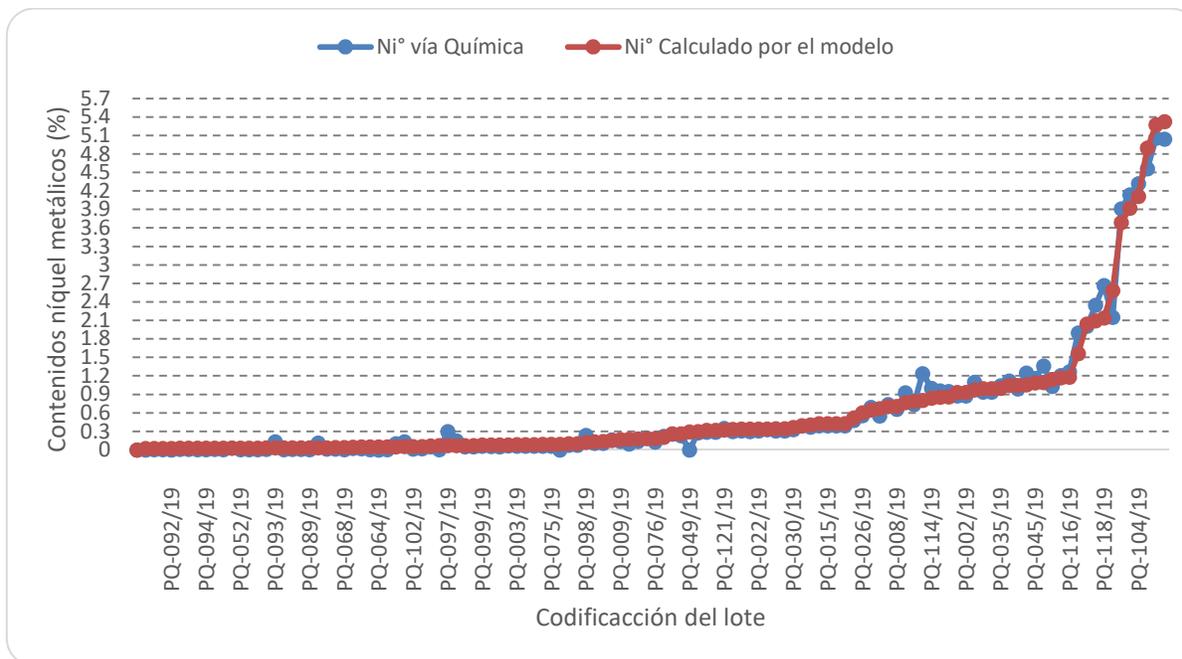


Figura 3.4 Representación gráfica de los contenidos de níquel metálicos.

La figura 3.5 muestra la dependencia directa que tiene la susceptibilidad magnética con el contenido de níquel metálico. Del cual se obtiene que los valores de susceptibilidad magnética inferiores a 5,2 garantizan los resultados de níquel metálico según los exigidos en la norma cubana NC 859: 2019 (NC 859 2019); los que deben estar por debajo de 0,7 %.

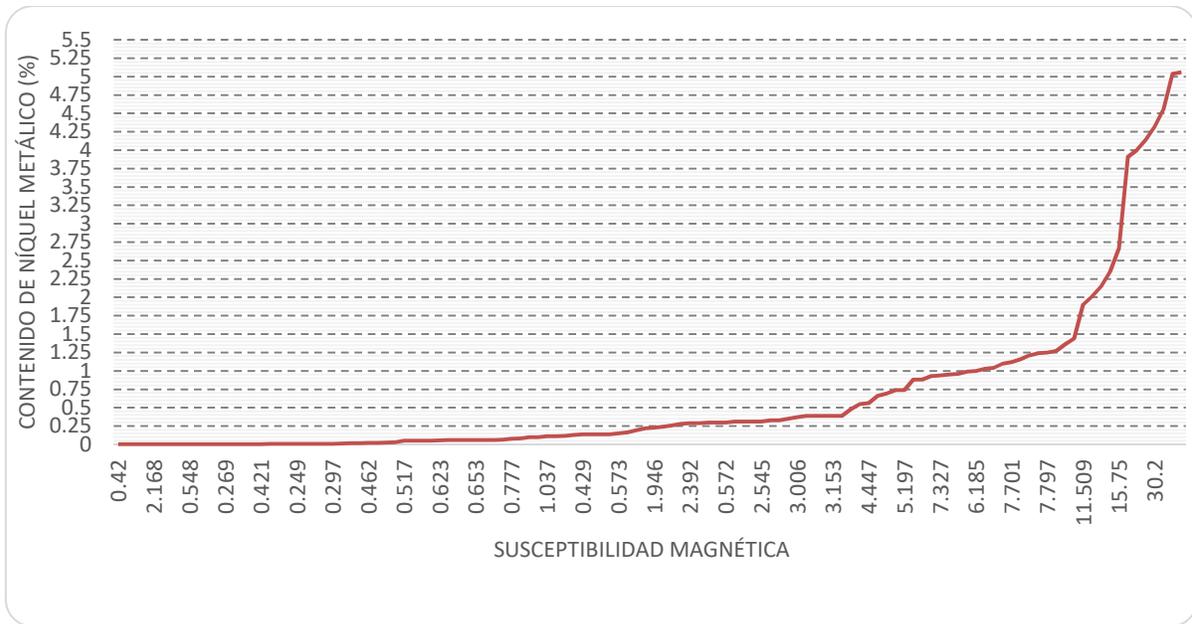


Figura 3.5 Representación gráfica de los contenidos níquel metálicos vs susceptibilidad magnética.

3.5. Validación del procedimiento de determinación de susceptibilidad magnética.

Luego de obtenido el modelo predictivo, se procedió a la validación del mismo. Para ello se tomaron cinco muestras correspondientes a diferentes años anteriores (2016, 2017 y 2018), de los lotes de óxido de níquel en polvo químico que se encuentran almacenados en el cuarto de las muestras testigos de los productos finales de la empresa. En la tabla 3.10 se puede observar la composición química de tales muestras utilizadas en la validación.

Tabla 3.10 Contenido de los elementos óxido de níquel en polvo químico para la validación

Muestra	Fecha	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni Metálico	SM	≤ 74	≤ 44	Ni Metálico Calculado	Diferencia . Ni vía Q - Ni Calculado	Grado de precisión
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	-	μ m	μ m	%		
PQ 031-1/15	29/04/2016	77,28	0,258	0,002	0,088	0,204	0,488	0,002	0,000	0,530	4,02	100	100	0,544	-0,014	97,360%
PQ 046-1/15	27/05/2016	77,03	0,27	0,002	0,119	0,206	0,424	0,004	0,002	0,500	3,90	100	100	0,528	-0,028	94,696%
PQ 049-1/15	29/05/2016	76,74	0,33	0,003	0,108	0,362	0,494	0,006	0,001	0,580	4,36	100	100	0,591	-0,011	98,183%
PQ 050-1/15	30/05/2016	77,3	0,374	0,004	0,086	0,131	0,364	0,007	0,002	0,620	4,60	100	100	0,623	-0,003	99,445%
PQ 195-1/15	9/08/2016	77,33	0,286	0,004	0,149	0,144	0,342	0,003	0,004	0,560	4,22	100	100	0,572	-0,012	97,963%
																97,53%
PQ 004-1/14	1/05/2017	77,06	0,419	0,004	0,094	0,11	0,335	0,002	0,001	0,170	1,50	100	100	0,201	-0,031	84,688%
PQ 061-1/14	2/21/2017	77,5	0,436	0,003	0,078	0,067	0,427	0,000	0,000	0,160	1,40	100	100	0,187	-0,027	85,515%
PQ 089-1/14	3/12/2017	77,14	0,464	0,004	0,088	0,119	0,454	0,002	0,005	0,190	1,70	100	99,49	0,228	-0,038	83,330%
PQ 109-1/14	14/04/2017	77,06	0,31	0,002	0,112	0,106	0,614	0,000	0,002	0,140	1,30	100	100	0,173	-0,033	80,708%
PQ 261-1/14	30/10/2017	77,39	0,262	0,002	0,084	0,074	0,324	0,000	0,002	0,110	1,11	100	100	0,148	-0,038	74,548%
																81,76%
PQ 042-1/15	22/05/2018	77,17	0,168	0,004	0,092	0,182	0,492	0,004	0,001	0,220	1,86	100	100	0,250	-0,030	88,061%
PQ 108-1/15	24/07/2018	77,37	0,246	0,002	0,082	0,073	0,4	0,001	0,002	0,268	2,20	100	100	0,296	-0,028	90,482%
PQ 136-2/15	8/11/2018	76,76	0,271	0,002	0,092	0,442	0,528	0,002	0,002	0,242	1,99	100	100	0,268	-0,026	90,449%
PQ 138-1/15	8/12/2018	76,73	0,289	0,004	0,084	0,402	0,454	0,003	0,002	0,400	3,12	100	100	0,422	-0,022	94,867%
PQ 139-1/15	8/12/2018	76,81	0,295	0,003	0,088	0,36	0,434	0,002	0,002	0,300	2,43	100	100	0,328	-0,028	91,588%
																91,09%

Los resultados comparativos demuestran la existencia de variaciones en cuanto a la identificación del elemento de interés por vía química. En comparación con el contenido de níquel metálico determinado por vía magnética, se observa que el modelo tiene un mayor grado de precisión cuando la susceptibilidad magnética es superior a los 4,02. Tal aseveración se puede observar para las muestras que corresponden al año 2016, en las que se manifiesta un mayor grado de precisión, obteniéndose un promedio para todas las muestras de ese año por encima de 97,53 %. Para el caso de las muestras del año 2017 tiene un grado de precisión promedio en la predicción del 81,76 % y para las muestras del 2018 un 91,09 %.

Dado estos resultados en el proceso de validación, se concluye que el procedimiento propuesto no identifica de forma exacta el valor del níquel metálico por vía magnética en las muestras analizadas; pero si se considera puede ser utilizado como un procedimiento para estimar el níquel metálico por vía magnética, ya que el grado de precisión está por encima del 94 %, sobre todo en las muestras con contenidos de níquel metálico más elevados. Tales resultados corroboran el grado de confianza obtenido estadísticamente para el modelo que se propone.

3.6. Condiciones óptimas de las variables de operaciones del horno calcinador

Una vez analizadas todas las variables de operación y con la composición química de conjunto, se llegó a la conclusión que para obtener un níquel metálico como lo exige la norma cubana NC 859 (NC 859 2019), con una concentración de níquel metálico residual inferior a 0,7 %, es necesario mantener las condiciones de operación en el horno entorno a las mostradas en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Variables de operación del horno calcinador y composición química del óxido de níquel en polvo químico.

Variables de operación en el horno calcinador									
Relación P/A total	Relación P/A primario	Temp. de T-2, °C	Temp. de T-3, °C	Temp. de T-4, °C	Fuel-Oil, kg/h	Aire primario, m ³ /h	Aire secundario, m ³ /h	RPM	Presión de Vacío, mmH ₂ O
0,137	0,187	950,83	636,46	440,55	1202,2	4968,53	1821,69	0,641	-1,962
Composición química del óxido de níquel en polvo químico %									
Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni°	SM
77,174	0,393	0,003	0,095	0,118	0,353	0,006	0,002	0,645	4,617

Los variables de operación que se muestran en la tabla anterior se obtuvieron al analizar los anexos uno y dos de conjunto, las cuales participan en la obtención del modelo, una vez realizada la limpieza de datos. Al obtener los promedios de las variables y la composición química, se concluye que para obtener un níquel metálico dentro de lo establecido por la norma cubana NC 859 (NC 859 2019), las operaciones en el horno calcinador estarían regidas por las variables expuestas en la tabla anterior, al garantizar un óxido de níquel con un bajo porcentaje de metalización.

3.7. Valoración económica

Atendiendo a los resultados obtenidos se establece que, si se realiza un buen control de las operaciones del horno calcinador y monitoreo del óxido de níquel en polvo químico procesado en la instalación, a partir de la susceptibilidad magnética, se puede lograr una disminución de los lotes formados que no cumplan con lo exigido por la norma cubana NC 859 (NC 859 2019). Por consiguiente, a continuación, se estimarán los indicadores económicos anuales que beneficiarán a la empresa ECG, para lo que se emplearon los datos oficiales correspondientes al año 2019,

procedentes del departamento de Contabilidad metalúrgica y Planificación, cuya fuente es el reporte anual metalúrgico de la empresa. Para tal análisis se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: costo de análisis químico, mano de obra, seguridad social, energía, combustible, amortización y otros gastos monetarios.

3.7.1. Determinación del costo de cada análisis químico

El costo de cada análisis químico, es igual a la suma de los gastos directos y los gastos indirectos. Los gastos directos están dados por, la suma de los gastos en reactivos y el salario de los analistas participantes, seguridad social, entre la cantidad de análisis realizados. Los gastos indirectos están dados por la suma de los gastos en materiales, energía, amortización y otros gastos entre la cantidad totales de análisis, obteniendo el coeficiente de gasto indirecto, que sumado a los gastos directos da el costo total.

Los datos de precios fueron obtenidos del departamento de contabilidad de la empresa ECG, la cantidad de lotes producidos del departamento de contabilidad metalúrgica y los consumos fueron facilitados por el departamento de desarrollo del laboratorio de la empresa.

En la tabla 3.12 queda desglosado de forma reducida el gasto de los análisis químicos que están involucrados en la caracterización de un lote de óxido de níquel en polvo químico.

Tabla 3.12 Gastos directo de análisis químico para un lote

Gastos directos de análisis químicos		
Reactivo para análisis de ni en oxido por electrólisis	2,604	26,31%
Azufre y Carbono	1,273	12,86%
Reactivo para análisis de Cu, Fe, Zn, Mn en oxido	5,476	55,32%
En reactivo para determinar ni metálico	0,253	2,55%
Coeficiente (salar. seg. soc. total/cant. análisis. laboratorio)	0,293	2,96%
Total de gastos directos de análisis	\$ 9,898	

Fue necesario determinar un coeficiente de gasto de análisis entre la seguridad social y cantidad de análisis, para contabilizar en el total gasto directos de análisis,

dado que esos resultados se analizan de forma general para un año. En la tabla anterior se observa que el mayor gasto está dado en reactivo de análisis para determinar los elementos cobre, hierro, zinc, magnesio, representando un 55,32 % del total de gasto de análisis directos, para un total de gastos directos de análisis químicos en \$ 9,898 USD. El anexo 6 se encuentra de forma muy detallada cada elemento de gasto analizado en la tabla 3.12.

En la tabla 3.13 se aprecia de forma detallada el total de gastos indirectos del análisis químico.

Tabla 3.13 Gastos indirectos de análisis químico

Gastos indirectos de análisis químicos		
Energía	16.278,000	3,38%
Materiales	140.513,000	29,19%
Combustible	1.313,000	0,27%
Amortización	234.487,000	48,72%
Otros gastos monetarios	88.725,000	18,43%
Total de gastos (indirectos)	\$ 481.316,00	
Coeficiente (gastos (indirectos)/cant. análisis. labort)	0,419	

Debido que los gastos indirectos de análisis químicos se analizan de forma general para un año, es necesario determinar un coeficiente de total de gastos indirectos y cantidad de análisis realizada en el laboratorio para un año, para contabilizar el resultado en el gasto general de análisis de un lote de PQ. Se puede observar en la tabla 3.13 que el mayor elemento de gasto está dado por la amortización con un 48,72 %, debido al costo elevado que tiene los equipos de análisis. Seguido del elemento materiales con un 29,19 %. Otro elemento con un gasto considerable es la partida otros gastos monetarios con un 18,43% en el cual están incluido el mantenimiento, los gastos por averías y mejoras técnicas introducidas. El total de gastos indirectos asciende a \$ 481.316,00 USD. El coeficiente de total de gasto indirectos y cantidad de análisis realizada en el laboratorio es de 0,419 USD por lote.

La tabla 3.14 se muestra un resumen de los principales gasto de operaciones en el proceso de envase del óxido de níquel en polvo químico.

Tabla 3.14 Gasto de operaciones en el proceso de envase del óxido de níquel en polvo químico

Gastos de operaciones en el proceso de envase (año)		
Total de gastos de operaciones	\$ 64.889,78	
Gastos de operaciones	34.367,527	52,96%
Coeficiente (gastos de operaciones/cant. lotes producidos)	143.198	
Gasto directo	16.091,250	24,80%
Coeficiente (salar. Seg. Soc. Total/cant. Lotes producidos)	67,047	

En análisis de los gastos de operaciones se aprecia que el mayor elemento de gastos está dado por los gastos de operaciones con un 52,96 %, el cual está considerando los materiales de operación necesario para el envase del óxido de níquel en polvo químico. El gasto directo incluye salario total, seguridad social con un 24,80 % del gastos de operaciones en el proceso de envase (año). Debido que los gastos de operaciones en el proceso de envase se muestran de forma general para un año, es necesario determinar un coeficiente, para contabilizar el resultado del gasto por lote de PQ. Se puede observar en la tabla 3.14, que el coeficiente de gastos de operaciones contra la cantidad lotes producidos es de 143,198 USD por lote y el de seguridad social más el salario total es 67,047 USD. El anexo 8 muestra de forma detallada los gastos de operaciones en el proceso de envase.

Los gastos indirecto en el proceso de envase esta mostrado en la tabla 3.15 en moneda total por partida gastada al año por ello, es necesario determinar un coeficiente, para contabilizar el resultado del gasto por lote de PQ. El coeficiente de gastos indirectos en el proceso de envase (Año), contra la cantidad lotes producidos es 3,6983.907 USD por lote. El anexo 9 muestra de forma detallada los gastos de operaciones en el proceso de envase.

Tabla 3.15 Gasto de indirectos en el proceso de envase del óxido de níquel en polvo químico

Gastos indirectos en el proceso de envase (Año)		
Total de gastos (indirectos)	\$ 887,737.60	
Energía	119,281.000	13.44%
Materiales	10,051.000	1.13%
Combustible	6,455.000	0.73%
Amortización	544,487.000	61.33%
Otros gastos monetarios	79,725.000	8.98%
Alquiler del equipo (montacargas)	127,738.600	14.39%
Coeficiente (gastos (indirectos)/cant. Lotes producidos)	3,698.907	

Dentro de los gastos indirectos en el proceso de envase, tenemos que el elemento que presenta mayor desviación está dado por la amortización con un 61,33 %, seguido de los gastos en alquiler del equipo (montacargas) al 14,39 % y para un 13,44 % la energía, el resto de los elementos de gastos están por debajo del 9 %.

En la tabla 3.16 se muestran el costo de análisis por medio de la caracterización del óxido de níquel en polvo químico, con la susceptibilidad magnética.

Tabla 3.16 Costo de análisis por medio de la susceptibilidad magnética

Gastos directos de análisis de susceptibilidad magnética		
Total de gastos	\$ 1.676	
Energía	1.488	11.19%
Amortización	1.676	88.81%

Dentro de los elementos de gastos directos de análisis de susceptibilidad magnética tenemos el consumo de energía y la amortización. Este análisis tiene la particularidad de tener un costo bajo 1,676 USD, con elemento de mayor gasto esta la amortización con un 88,81 % y la energía con un 11,19 %. Haciéndolo muy interesante económicamente este tipo de análisis.

La tabla 3.17 es mostrado un resumen de los principales elementos de gastos que intervienen en la formación, análisis de un lote de óxido de níquel en polvo químico y también el gasto directo de análisis de susceptibilidad magnética. El costo de los análisis del óxido de níquel en polvo químico, en el laboratorio para un lote de PQ asciende a \$ 10,617 USD. Para el análisis de la susceptibilidad magnética de una muestra es \$ 1,676 USD. El gasto general de envase por lote \$ 3 909,152 USD.

Tabla 3.17 Resumen del balance económico.

Gasto general de análisis de un lotes de PQ	<u>\$10.610</u>
Gastos directos de análisis químicos	9.898
Coeficiente (salar. Seg. Soc. Total/cant. Análisis. Labort)	0.293
Coeficiente (gastos (indirectos)/cant. Análisis. Labort)	0.419
Gastos de operaciones en el proceso de envase	<u>\$3,909.152</u>
Coeficiente (gastos de operaciones/cant. Lotes producidos)	143.198
Coeficiente (alquiler del equipo/cant. Lotes producidos)	532.244
Coeficiente (salar. Seg. Soc. Total/cant. Lotes producidos)	67.047
Gastos directos de análisis de susceptibilidad magnética	<u>\$1.676</u>

En el resumen del cálculo de ahorro económico lo encontramos en la tabla 3.18 en el cual es analizado, la cantidad de lotes producidos en un año 250 año, Cantidad de lotes fuera de especificación 60 lotes/año.

Tabla 3.18 Cálculo de ahorro económico.

Análisis de gasto para un año	Gato (\$/año)
Cantidad de lotes producidos 250 (u/año)	\$ 979,940.30
Cantidad de lotes fuera de especificación 60 (u/año)	\$ 235,185.67

Con la implementación del modelo para predecir el contenido de níquel metálico se lograría un ahorro monetario considerable, al eliminar la cantidad de lotes reportados fuera de especificaciones por alto grado de metalización, lo que representan 60 lotes/año con un costo de envase más el análisis químico de \$ 235 185,67 USD/año.

Conclusiones parciales

Se demostró la hipótesis científica del trabajo mediante los siguientes resultados:

1. El modelo matemático obtenido permitió:
 - Establecer la regularidad del comportamiento de la susceptibilidad magnética al variar las concentraciones níquel metálico.
 - Determinar las condiciones óptimas de operación del horno a partir de la relación del contenido de níquel metálico y la susceptibilidad magnética.
 - Una susceptibilidad magnética inferior a los 5,2 garantiza los resultados de níquel metálico según los exigidos en la norma cubana NC 859: 2019.

CONCLUSIONES

Una vez concluida la presente investigación se arribaron a las siguientes conclusiones:

- El análisis estadístico realizado teniendo en cuenta las variables de operación del horno de calcinación del carbonato básico de níquel, correspondiente a las muestras estudiadas, permitió determinar sus valores ideales, los que garantizan una calidad estable del producto final óxido de níquel en polvo químico, con contenido de níquel metálico de 0,645 %, valor que está por debajo del 0,70 % exigido por la Norma.
- El modelo matemático obtenido $Ni^{\circ} = -0,00380559 + 0,136362 \cdot SM$, permite predecir el contenido de níquel metálico presente en el polvo químico a partir del valor de la susceptibilidad magnética, con una correlación significativa de 98,67 %, y un nivel de confianza de 95 %, corroborado en la validación del modelo. Con lo que se logra mejorar la producción continua, a través de un control más eficiente del proceso, y se evita el envase de producto fuera de especificaciones.
- La predicción del níquel metálico contenido en el polvo químico a partir del modelo matemático obtenido, permite ahorrar entre 235 185,67 USD/año, por concepto de envase de este producto fuera de especificaciones.

RECOMENDACIONES

- Implementar los parámetros de operaciones obtenidos, para garantizar una calidad estable, por concepto de níquel metálico, del producto final óxido de níquel en polvo químico.
- Implementar el modelo matemático obtenido, para evitar gastos que pueden ser innecesarios en el proceso de envase del óxido de níquel en polvo químico.
- Generalizar los resultados obtenidos de esta investigación al resto de los hornos calcinadores en operación, y evaluar su efecto en la calidad del óxido descargado por los Calcinadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANERJEE, S.K. y STACEY, F.D., 2013. The high-field torque-meter method of measuring magnetic anisotropy of rocks. *Developments in Solid Earth Geophysics*. S.I.: Elsevier, pp. 470-476. ISBN 0419-0297.
- BERTOTTI, G., 1998. *Hysteresis in magnetism: for physicists, materials scientists, and engineers*. S.I.: Academic press. ISBN 0080534376.
- BOZORTH, R.M., 1993. *Ferromagnetism*. S.I.: Wiley-VCH.
- CASANOVA, G., 1998. Determinación de la relación existente entre la densidad y la granulometría del óxido de níquel. *Informe Técnico en Biblioteca de la empresa René Ramos Latour*. S.I.:
- CHANG CARDONA, A.R., REYNALDO MOLINA, H., ERNESTO VEGA, R. y RIVAS, M., 2003. Balance energético del calcinador de Carbonato Básico de Níquel con adición de sulfuro de níquel. *Minería y Geología*, vol. 3, no. 4.
- CHINCHAY M., R.M., 2018. *Evaluación de la calidad del polvo químico dosificando arenilla o polvo de sinter, sin afectar el producto calcinado*. S.I.: s.n.
- COEY, J.M.D., 2010. *Magnetism and magnetic materials*. S.I.: Cambridge university press. ISBN 1139486926.
- COLLINSON, D., 2013. *Methods in rock magnetism and palaeomagnetism: techniques and instrumentation*. S.I.: Springer Science & Business Media. ISBN 9401539790.
- COLUMBIÉ NAVARRO, A.O., 2000. Modelación matemática del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno de tambor rotatorio. *Minería y Geología*, vol. 27, no. 2.
- COLUMBIÉ NAVARRO, A.O., 2001. *Modelación matemática del proceso de calcinación del CBNi en el horno tambor rotatorio*. S.I.: s.n.
- CULLITY, B.D. y GRAHAM, C.D., 2011. *Introduction to magnetic materials*. S.I.: John Wiley & Sons. ISBN 1118211499.
- DAUBENSPECK, J., 1955. Study of NiO calcination requirement. *Informe Técnico. Biblioteca de la Empresa René Ramos Latour*. S.I.:
- DOMÍNGUEZ, H. y SELVA, A., 1977. Informe parcial del trabajo de automatización del horno de calcinación. *Informe Técnico. Empresa Comandante René Ramos*

Latour. S.l.:

DUNLOP, D.J. y ÖZDEMİR, Ö., 2001. *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. S.l.: Cambridge university press. ISBN 052100098X.

DURÁN SANTÍ, D.Q., 2013. Influencia de la carga en el horno de calcinación uno de la empresa René Ramos Latour. *Empresa René Ramos Latour. S.l.:*

ESTÉVEZ, O., 1990. Mejoras en la calidad del óxido de níquel. *Informe en Técnico. Empresa René Ramos Latour. S.l.:*

FUENTES DÍAZ, Y., 2009. *Empleo de la separación magnética para mejorar las características del polvo de NiO de la planta de la "Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, para su empleo como pigmento cerámico*. S.l.: s.n.

JILES, D., 1991. Soft magnetic materials. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. S.l.: Springer, pp. 269-298. ISBN 0412386402.

MAJENDIÉ-CEMITIERE, R., ROBINSON-AGRAMONTE, G., LINARES-BONG, A., PRATS, R.V.-, RODRÍGUEZ-TERRERO, A. y GARBEY-BELL, N., 2015. Diagnóstico al sistema de control de la calidad del muestreo en la EMPRESA "CMDTE ERNESTO CHE GUEVARA". Antesala para una norma cubana. VI CONVENCIÓN CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA. La Habana, Cuba: Red de Ciencias,

MARTÍN, Y., 1973. Prueba operativa de horno de calcinación No 2". Informe Técnico. . Nicaro, Cuba:

Microsoft EXCEL, 2007. 2007. S.l.: s.n.

MIRANDA LÓPEZ, L., QUINTERO TOIRAC, L., MOLINA MATOS, L. y PEÑA TORRENTE, L., 2015. Determinación magnética del Contenido de Níquel metálico presente en el óxido de níquel en Polvo Químico de la Empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara". . Moa, Cuba:

NC 1061, 2019. Minerales — Óxidos de níquel — Determinación de níquel metálico—Método de Espectrofotometría de Absorción Atómica. . La Habana, Cuba.

NC 621-1, 2019. Minerales - Óxido de Níquel – Parte 1: Determinación de Níquel y Cobalto total. . La Habana, Cuba.

NC 621-2, 2019. Minerales - Óxido de Níquel – Parte 2: Determinación de Cobalto,

- Hierro, Cobre, Zinc y Manganeso. . La Habana, Cuba.
- NC 621-3, 2019. Minerales — Óxidos de Níquel — Parte 3: Determinación de Azufre y Carbono. . La Habana, Cuba.
- NC 859, 2019. Minerales — Óxido de Níquel en Polvo — Especificaciones. . La Habana, Cuba.
- NC 929, 2014. Determinación de níquel metálico por Espectroscopia de Absorción Atómica. . La Habana.
- NC 958, 2015. Especificaciones Óxido de Níquel en polvo Químico. . La Habana, Cuba.
- O'REILLY, W., 2012. *Rock and mineral magnetism*. S.l.: Springer Science & Business Media. ISBN 1468484680.
- RAMÍREZ, M.M.R. y YURELL, J.C.L., 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, no. 2, pp. 35-54. ISSN 1993-8012.
- RODRÍGUEZ CABRERA, N., 2013. *Comportamiento del proceso de calcinación en la «Empresa René Ramos Latour»*. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- ROMERO-RAMÍREZ, M.M. y LLÓPIZ-YUREL, J.C., 1996. Cinética de la descomposición térmica del carbonato básico de níquel industrial impurificado. *Minería y Geología*, vol. 13, no. 3, pp. 61-67. ISSN 1993-8012.
- ROMERO RAMÍREZ, M., 1991. *Cinética de reacciones topoquímicas y la caracterización de productos intermedios de la industria niquelífera*. Tesis Doctoral. La Habana, Cuba: Universidad de la Habana.
- SÁNCHEZ SAMÉ, J., 2013. *Análisis de las no conformidades en la calidad del óxido de níquel de la «Empresa Comandante René Ramos Latour»*. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- STATGRAPHICS CENTURION XV, 2007. 2007. S.l.: s.n. 5.0.
- UNIDAD KT-9, 2014. *Manual de explotación del Kapámetro KT-9*. 2014. Chech Republic: s.n.
- UPL-PT-V-14, 2018. Procedimiento técnico de determinación de la susceptibilidad

magnética. . Santiago de Cuba, Cuba.

WEISS, J.C.A. y GERASIMOWICZ, W. V, 1996. Interaction of water with clay minerals as studied by ²H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [en línea], vol. 60, no. 2, pp. 265-275. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V66-3Y0RSF8-4B/2/9035109d98d20a59505bc16be4f9ba32>.

YARNAGORE, B., 2014. *Balance de masa y energía del horno de calcinación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

ANEXOS

Anexo. 1 Composición química de las muestras.

Lote	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni°	-0.074	-0.044	SM
										mm	mm	
PQ-001/19	77.21	0.462	0.002	0.108	0.133	0.402	0.016	0.020	0.940	100.00	99.87	7.315
PQ-002/19	77.12	0.496	0.001	0.102	0.144	0.420	0.014	0.012	0.880	100.00	99.62	6.871
PQ-003/19	76.99	0.424	0.002	0.124	0.178	0.410	0.002	0.002	0.060	100.00	99.14	0.653
PQ-004/19	76.77	0.478	0.002	0.108	0.250	0.502	0.004	0.002	0.310	100.00	99.60	2.547
PQ-005/19	76.75	0.488	0.001	0.108	0.255	0.502	0.002	0.001	0.310	100.00	100.00	2.553
PQ-006/19	77.23	0.462	0.002	0.096	0.162	0.434	0.000	0.002	0.740	100.00	100.00	5.806
PQ-007/19	77.24	0.354	0.002	0.106	0.093	0.367	0.002	0.001	0.110	100.00	100.00	1.030
PQ-008/19	77.18	0.468	0.002	0.096	0.162	0.426	0.000	0.002	0.660	100.00	100.00	5.205
PQ-009/19	77.30	0.368	0.002	0.106	0.090	0.370	0.004	0.004	0.140	100.00	100.00	1.262
PQ-010/19	77.08	0.430	0.001	0.109	0.102	0.372	0.011	0.001	0.050	100.00	100.00	0.517
PQ-011/19	77.05	0.410	0.002	0.110	0.104	0.416	0.012	0.001	0.050	100.00	99.12	0.575
PQ-012/19	77.21	0.402	0.001	0.078	0.115	0.440	0.002	0.002	0.990	100.00	100.00	7.708
PQ-013/19	77.07	0.392	0.002	0.090	0.144	0.425	0.002	0.002	0.480	100.00	100.00	3.837
PQ-014/19	76.70	0.408	0.003	0.131	0.218	0.378	0.003	0.002	0.110	100.00	100.00	1.037
PQ-015/19	77.07	0.392	0.002	0.090	0.144	0.425	0.002	0.002	0.390	100.00	100.00	3.159
PQ-016/19	76.71	0.442	0.003	0.126	0.222	0.404	0.005	0.003	0.230	100.00	100.00	1.946
PQ-017/19	76.63	0.400	0.002	0.128	0.206	0.379	0.003	0.003	0.080	100.00	100.00	0.799
PQ-018/19	76.62	0.396	0.002	0.130	0.204	0.384	0.004	0.004	0.060	100.00	99.92	0.654
PQ-019/19	76.65	0.399	0.003	0.106	0.223	0.374	0.003	0.004	0.390	100.00	100.00	3.153
PQ-020/19	76.67	0.400	0.003	0.106	0.220	0.384	0.003	0.004	0.390	100.00	100.00	3.159
PQ-021/19	76.06	0.382	0.001	0.095	0.298	0.747	0.002	0.002	0.310	100.00	100.00	2.543
PQ-022/19	76.33	0.330	0.006	0.064	0.068	0.189	0.001	0.000	0.310	100.00	100.00	2.545
PQ-023/19	76.99	0.354	0.006	0.087	0.178	0.246	0.002	0.007	0.330	100.00	100.00	2.545
PQ-024/19	76.02	0.386	0.001	0.096	0.302	0.738	0.002	0.003	0.300	100.00	100.00	2.543
PQ-025/19	76.14	0.388	0.001	0.096	0.304	0.732	0.002	0.002	0.290	100.00	100.00	2.393
PQ-026/19	76.62	0.396	0.004	0.118	0.350	0.394	0.012	0.014	0.560	100.00	99.74	4.447
PQ-027/19	77.01	0.385	0.004	0.105	0.240	0.358	0.014	0.004	0.940	100.00	99.81	7.327
PQ-028/19	76.81	0.391	0.004	0.118	0.314	0.372	0.014	0.002	0.880	100.00	100.00	6.867
PQ-029/19	77.12	0.390	0.005	0.114	0.198	0.296	0.006	0.002	0.370	100.00	99.42	3.006
PQ-030/19	77.12	0.388	0.005	0.110	0.186	0.286	0.004	0.002	0.330	100.00	100.00	2.697
PQ-031/19	77.14	0.386	0.004	0.110	0.192	0.278	0.004	0.002	0.300	100.00	100.00	2.473
PQ-032/19	77.22	0.378	0.003	0.104	0.194	0.312	0.006	0.002	0.290	100.00	99.63	2.392
PQ-033/19	77.47	0.290	0.001	0.120	0.050	0.360	0.016	0.003	0.100	100.00	99.92	1.307
PQ-034/19	76.96	0.430	0.002	0.122	0.185	0.454	0.002	0.002	0.140	100.00	100.00	1.338
PQ-035/19	77.61	0.330	0.004	0.100	0.070	0.434	0.005	0.001	1.040	100.00	100.00	7.367
PQ-036/19	77.55	0.322	0.003	0.096	0.062	0.413	0.004	0.000	1.120	100.00	100.00	7.701
PQ-037/19	77.23	0.462	0.002	0.096	0.162	0.434	0.000	0.002	0.740	100.00	100.00	5.197
PQ-038/19	77.44	0.218	0.002	0.079	0.078	0.400	0.001	0.002	1.250	100.00	99.84	7.797
PQ-039/19	78.13	0.373	0.001	0.069	0.065	0.438	0.001	0.000	4.000	100.00	100.00	18.200
PQ-040/19	77.31	0.423	0.002	0.080	0.148	0.444	0.000	0.001	1.210	100.00	100.00	8.603
PQ-041/19	77.39	0.354	0.002	0.084	0.074	0.134	0.000	0.000	0.390	100.00	100.00	3.173
PQ-042/19	77.21	0.512	0.005	0.091	0.102	0.388	0.000	0.000	0.280	100.00	100.00	2.225
PQ-043/19	77.20	0.388	0.002	0.111	0.058	0.158	0.000	0.000	0.060	100.00	100.00	0.675
PQ-044/19	76.96	0.706	0.002	0.095	0.100	0.521	0.000	0.002	0.390	100.00	100.00	2.895
PQ-045/19	78.19	0.214	0.004	0.090	0.070	0.398	0.008	0.000	1.160	100.00	100.00	8.014
PQ-046/19	77.39	0.255	0.003	0.100	0.062	0.425	0.006	0.004	1.240	100.00	100.00	5.934
PQ-047/19	77.23	0.324	0.002	0.084	0.108	0.556	0.000	0.002	0.020	100.00	99.75	0.462
PQ-048/19	76.29	0.360	0.002	0.104	0.202	0.842	0.002	0.006	0.060	100.00	100.00	0.695
PQ-049/19	77.38	0.329	0.004	0.084	0.090	0.384	0.000	0.000	0.002	100.00	100.00	2.168
PQ-050/19	76.80	0.405	0.003	0.060	0.416	0.383	0.000	0.002	0.116	100.00	100.00	0.311
PQ-051/19	77.10	0.437	0.004	0.078	0.127	0.414	0.000	0.002	0.016	100.00	100.00	0.329
PQ-052/19	77.23	0.396	0.004	0.087	0.074	0.342	0.000	0.002	0.006	100.00	100.00	0.261
PQ-053/19	77.23	0.394	0.004	0.088	0.075	0.342	0.000	0.002	0.004	100.00	100.00	0.269
PQ-054/19	77.48	0.337	0.005	0.100	0.073	0.322	0.000	0.002	0.260	100.00	99.95	1.945
PQ-055/19	77.25	0.358	0.005	0.088	0.077	0.318	0.004	0.002	0.194	100.00	100.00	1.373
PQ-056/19	77.14	0.360	0.006	0.096	0.083	0.354	0.001	0.002	0.220	100.00	100.00	1.525
PQ-057/19	77.32	0.332	0.003	0.083	0.052	0.341	0.000	0.002	0.058	100.00	100.00	0.623
PQ-058/19	77.09	0.366	0.006	0.082	0.054	0.310	0.000	0.002	0.007	100.00	100.00	0.301
PQ-059/19	77.44	0.260	0.006	0.120	0.070	0.330	0.042	0.013	1.440	100.00	99.99	5.223
PQ-060/19	77.06	0.387	0.005	0.088	0.042	0.324	0.006	0.002	0.008	100.00	100.00	0.249

Anexo. 1 Continuación

Lote	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni°	-0.074	-0.044	SM
										mm	mm	
PQ-061/19	77.21	0.367	0.005	0.079	0.038	0.278	0.002	0.003	0.008	100.00	99.99	0.249
PQ-062/19	76.92	0.394	0.004	0.008	0.118	0.406	0.002	0.002	0.004	100.00	100.00	0.419
PQ-063/19	76.85	0.360	0.004	0.084	0.136	0.420	0.004	0.002	0.006	100.00	99.94	0.421
PQ-064/19	76.99	0.362	0.004	0.086	0.148	0.392	0.004	0.002	0.002	100.00	100.00	0.420
PQ-065/19	76.90	0.360	0.004	0.086	0.118	0.378	0.005	0.002	0.004	100.00	99.89	0.548
PQ-066/19	77.17	0.524	0.002	0.085	0.042	0.244	0.002	0.002	0.150	100.00	99.69	0.573
PQ-067/19	77.07	0.548	0.002	0.082	0.046	0.245	0.004	0.002	0.052	100.00	100.00	0.574
PQ-068/19	77.07	0.536	0.002	0.088	0.046	0.251	0.001	0.002	0.007	100.00	99.58	0.348
PQ-069/19	77.00	0.416	0.005	0.081	0.113	0.366	0.002	0.002	0.020	100.00	100.00	0.417
PQ-070/19	77.00	0.416	0.002	0.081	0.113	0.366	0.002	0.002	0.101	100.00	100.00	0.421
PQ-071/19	77.03	0.593	0.002	0.096	0.052	0.280	0.000	0.001	0.016	100.00	100.00	0.311
PQ-072/19	77.16	0.478	0.002	0.072	0.046	0.276	0.001	0.002	0.076	100.00	100.00	0.777
PQ-073/19	77.27	0.577	0.004	0.093	0.048	0.093	0.000	0.003	0.024	100.00	100.00	0.382
PQ-074/19	77.10	0.558	0.002	0.107	0.057	0.294	0.005	0.002	0.051	100.00	100.00	0.629
PQ-075/19	77.16	0.532	0.001	0.102	0.049	0.282	0.000	0.002	0.062	100.00	100.00	0.696
PQ-076/19	77.16	0.348	0.003	0.094	0.050	0.462	0.017	0.001	0.130	100.00	100.00	1.385
PQ-077/19	76.79	0.458	0.004	0.331	0.062	0.331	0.000	0.002	0.006	100.00	100.00	0.261
PQ-078/19	77.05	0.381	0.005	0.090	0.084	0.349	0.000	0.002	0.010	100.00	99.83	0.309
PQ-079/19	76.43	0.466	0.004	0.180	0.116	0.356	0.000	0.002	0.010	100.00	100.00	0.297
PQ-080/19	77.25	0.291	0.002	0.104	0.094	0.484	0.000	0.001	0.960	100.00	99.95	6.325
PQ-081/19	76.69	0.461	0.006	0.141	0.086	0.344	0.002	0.001	0.009	100.00	99.98	0.309
PQ-082/19	77.63	0.448	0.005	0.097	0.152	0.286	0.005	0.001	2.010	100.00	99.64	15.003
PQ-083/19	78.17	0.454	0.004	0.102	0.112	0.310	0.038	0.002	4.560	100.00	99.71	35.960
PQ-084/19	76.71	0.460	0.006	0.125	0.079	0.343	0.001	0.000	0.004	100.00	100.00	0.231
PQ-085/19	77.55	0.380	0.004	0.102	0.140	0.276	0.011	0.001	1.030	100.00	100.00	8.429
PQ-086/19	77.56	0.442	0.004	0.091	0.146	0.292	0.004	0.003	2.350	100.00	100.00	15.400
PQ-087/19	78.37	0.452	0.004	0.098	0.106	0.303	0.036	0.002	5.060	100.00	100.00	38.700
PQ-088/19	77.02	0.408	0.005	0.112	0.161	0.285	0.003	0.000	0.002	100.00	100.00	0.211
PQ-089/19	76.68	0.462	0.004	0.154	0.152	0.340	0.000	0.002	0.003	100.00	100.00	0.309
PQ-090/19	76.95	0.430	0.005	0.074	0.072	0.270	0.000	0.000	0.003	100.00	100.00	0.249
PQ-091/19	77.18	0.346	0.004	0.072	0.058	0.267	0.023	0.004	0.136	100.00	100.00	0.429
PQ-092/19	77.48	0.318	0.003	0.064	0.038	0.244	0.000	0.001	0.002	100.00	100.00	0.231
PQ-093/19	77.28	0.448	0.002	0.074	0.038	0.244	0.016	0.004	0.136	100.00	100.00	0.299
PQ-094/19	77.35	0.370	0.003	0.061	0.036	0.245	0.020	0.000	0.004	100.00	100.00	0.249
PQ-095/19	77.26	0.478	0.002	0.065	0.030	0.350	0.020	0.001	0.008	100.00	100.00	0.249
PQ-096/19	77.31	0.465	0.003	0.066	0.032	0.254	0.001	0.000	0.006	100.00	100.00	0.249
PQ-097/19	77.19	0.476	0.002	0.056	0.046	0.254	0.038	0.007	0.300	100.00	100.00	0.572
PQ-098/19	77.25	0.364	0.004	0.059	0.049	0.284	0.032	0.005	0.240	100.00	100.00	0.943
PQ-099/19	77.28	0.426	0.007	0.072	0.062	0.252	0.004	0.006	0.062	100.00	100.00	0.619
PQ-100/19	77.28	0.440	0.008	0.076	0.045	0.238	0.004	0.000	0.065	100.00	100.00	0.643
PQ-101/19	77.06	0.267	0.004	0.092	0.046	0.308	0.004	0.000	0.032	100.00	100.00	0.260
PQ-102/19	77.43	0.236	0.002	0.096	0.060	0.274	0.001	0.000	0.014	100.00	100.00	0.451
PQ-103/19	76.92	0.242	0.004	0.072	0.443	0.259	0.004	0.000	0.002	100.00	100.00	0.716
PQ-104/19	78.34	0.330	0.001	0.074	0.033	0.330	0.005	0.002	4.320	100.00	100.00	30.200
PQ-105/19	77.99	0.332	0.001	0.070	0.034	0.311	0.009	0.002	4.140	100.00	100.00	28.797
PQ-106/19	78.07	0.444	0.003	0.064	0.159	0.254	0.027	0.001	5.040	100.00	100.00	39.100
PQ-107/19	78.24	0.398	0.002	0.096	0.110	0.225	0.032	0.003	3.910	100.00	100.00	27.100
PQ-108/19	77.22	0.572	0.001	0.110	0.088	0.254	0.004	0.007	2.150	100.00	100.00	19.004
PQ-109/19	77.07	0.399	0.004	0.101	0.130	0.330	0.003	0.000	0.550	100.00	100.00	4.967
PQ-110/19	77.54	0.212	0.001	0.092	0.054	0.366	0.000	0.004	0.930	100.00	100.00	5.676
PQ-111/19	77.70	0.258	0.001	0.099	0.050	0.294	0.010	0.004	1.360	100.00	100.00	8.065
PQ-112/19	76.62	0.248	0.000	0.090	0.076	0.351	0.002	0.002	1.100	100.00	100.00	7.181
PQ-113/19	77.26	0.289	0.002	0.102	0.095	0.456	0.000	0.002	0.950	100.00	100.00	6.355
PQ-114/19	77.25	0.291	0.002	0.104	0.094	0.484	0.000	0.001	1.000	100.00	100.00	6.185
PQ-115/19	77.26	0.324	0.001	0.099	0.084	0.378	0.000	0.002	0.690	100.00	100.00	4.811
PQ-116/19	77.28	0.386	0.002	0.088	0.147	0.602	0.004	0.000	1.270	100.00	100.00	8.700
PQ-117/19	77.98	0.236	0.002	0.064	0.088	0.162	0.007	0.008	1.900	100.00	100.00	11.509
PQ-118/19	78.15	0.232	0.002	0.064	0.090	0.155	0.012	0.008	2.670	100.00	100.00	15.750
PQ-119/19	77.61	0.422	0.002	0.030	0.046	0.078	0.002	0.000	0.004	100.00	100.00	0.219
PQ-120/19	77.18	0.314	0.004	0.082	0.059	0.336	0.001	0.002	0.165	100.00	100.00	1.153
PQ-121/19	77.25	0.384	0.003	0.079	0.038	0.252	0.014	0.003	0.350	100.00	99.99	2.431

Anexo 2 Variables de operación del horno calcinador

Muestra	Relación	Relación	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Fuel-Oil	Aire	Aire	RPM	Pres. Vacío
	P/A total	P/A primario	de T-2 oC	de T-3 oC	de T-4 oC	kg/h	primario m3/h	secundario m3/h		
PQ-001/19	0.143	0.190	855	586	445	1121	4564	1527	0.54	-1.72
PQ-002/19	0.137	0.188	952	626	440	1210	5000	1823	0.63	-2.13
PQ-003/19	0.145	0.198	938	627	430	1275	5000	1821	0.59	-2.51
PQ-004/19	0.147	0.202	941	631	439	1305	5000	1861	0.62	-2.51
PQ-005/19	0.144	0.198	968	655	472	1276	5000	1846	0.73	-2.36
PQ-006/19	0.150	0.206	885	608	448	1327	5000	1865	0.66	-2.59
PQ-007/19	0.142	0.196	930	640	453	1266	5000	1906	0.73	-2.26
PQ-008/19	0.134	0.170	897	669	453	1052	4805	1299	0.58	-1.6
PQ-009/19	0.144	0.198	968	665	476	1280	5000	1894	0.68	-2.25
PQ-010/19	0.137	0.189	950	652	464	1218	5000	1912	0.72	-2.03
PQ-011/19	0.151	0.179	971	654	419	1156	5000	949	0.63	-1.55
PQ-012/19	0.140	0.197	993	660	449	1270	5000	2024	0.72	-2.71
PQ-013/19	0.136	0.176	846	624	437	1089	4807	1409	0.59	-2.07
PQ-014/19	0.142	0.203	905	627	466	1307	5000	2118	0.67	-2.73
PQ-015/19	0.143	0.199	904	616	450	1283	5000	1960	0.74	-2.79
PQ-016/19	0.148	0.204	920	618	448	1314	5000	1900	0.74	-3.19
PQ-017/19	0.149	0.206	926	636	455	1328	5000	1899	0.69	-2.9
PQ-018/19	0.149	0.206	910	625	450	1328	5000	1921	0.73	-3.16
PQ-019/19	0.148	0.207	921	623	448	1332	5000	1972	0.72	-2.5
PQ-020/19	0.138	0.195	980	653	474	1258	5000	2081	0.67	-2.4
PQ-021/19	0.136	0.187	972	653	434	1209	5000	1902	0.73	-2.09
PQ-022/19	0.139	0.191	916	626	444	1229	5000	1861	0.74	-2.06
PQ-023/19	0.145	0.201	908	633	452	1294	5000	1909	0.72	-2.93
PQ-024/19	0.122	0.172	953	629	472	1108	5000	2038	0.67	-1.95
PQ-025/19	0.117	0.165	974	654	449	1061	5000	2049	0.56	-1.33
PQ-026/19	0.138	0.195	886	617	408	1259	5000	2050	0.67	-2.13
PQ-027/19	0.145	0.203	910	630	439	1312	5000	2004	0.67	-2.27
PQ-028/19	0.124	0.177	998	649	441	1139	5000	2123	0.67	-1.73
PQ-029/19	0.123	0.176	959	629	425	1135	5000	2163	0.69	-1.54
PQ-030/19	0.123	0.176	1035	660	444	1136	5000	2139	0.67	-1.25
PQ-031/19	0.135	0.192	947	618	448	1236	5000	2079	0.69	-2.02
PQ-032/19	0.142	0.202	968	651	460	1301	5000	2090	0.73	-2.3
PQ-033/19	0.138	0.196	979	646	456	1264	5000	2099	0.76	-2.29
PQ-034/19	0.134	0.192	969	642	437	1240	5000	2180	0.69	-2.16
PQ-035/19	0.140	0.195	992	640	467	1260	5000	1986	0.68	-1.19
PQ-036/19	0.144	0.194	1007	665	452	1252	5000	1736	0.68	-1.57
PQ-037/19	0.127	0.172	1047	674	460	1085	4894	1729	0.61	-0.68
PQ-038/19	0.141	0.191	997	658	471	1234	5000	1775	0.6	-1.51
PQ-039/19	0.166	0.204	914	628	442	1269	4825	1111	0.66	-1.47
PQ-040/19	0.142	0.191	924	624	441	1233	5000	1717	0.63	-1.51
PQ-041/19	0.134	0.194	958	649	459	1249	5000	2231	0.63	-1.87
PQ-042/19	0.140	0.188	979	640	442	1210	5000	1688	0.61	-1.37
PQ-043/19	0.143	0.187	972	641	445	1207	5000	1533	0.55	-0.57
PQ-044/19	0.143	0.199	996	662	453	1281	5000	1939	0.63	-1.47
PQ-045/19	0.131	0.190	976	640	450	1225	5000	2275	0.6	-1.19
PQ-046/19	0.166	0.199	991	642	435	1284	5000	991	0.63	-1.45
PQ-047/19	0.129	0.185	977	648	453	1196	5000	2186	0.63	-1.72
PQ-048/19	0.135	0.191	937	630	443	1234	5000	2064	0.61	-1.51
PQ-049/19	0.121	0.166	950	651	465	1071	5000	1872	0.53	-0.62
PQ-050/19	0.116	0.159	922	634	466	1025	5000	1841	0.56	-0.46
PQ-051/19	0.137	0.188	951	634	437	1210	5000	1861	0.65	-1.54
PQ-052/19	0.143	0.194	958	641	438	1252	5000	1770	0.67	-3.03
PQ-053/19	0.142	0.197	987	645	444	1273	5000	1965	0.72	-3.09
PQ-054/19	0.132	0.182	1038	650	419	1174	5000	1900	0.74	-2.65
PQ-055/19	0.136	0.185	950	628	401	1191	5000	1792	0.65	-2.5
PQ-056/19	0.131	0.175	979	640	421	1130	5000	1696	0.67	-2.18
PQ-057/19	0.120	0.159	990	641	407	1027	5000	1644	0.55	-1.27
PQ-058/19	0.131	0.170	935	643	394	1094	5000	1484	0.54	-1.59
PQ-059/19	0.164	0.205	991	638	427	1293	4892	1222	0.69	-2.22
PQ-060/19	0.136	0.173	1002	633	429	1116	5000	1384	0.7	-1.32

Anexo 2 Continuación

Muestra	Relación	Relación	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Fuel-Oil	Aire	Aire	RPM	Pres. Vacío
	P/A total	P/A primario	de T-2 oC	de T-3 oC	de T-4 oC	kg/h	primario m3/h	secundario m3/h		
PQ-061/19	0.126	0.180	1028	650	422	1159	5000	2120	0.66	-1.8
PQ-062/19	0.132	0.189	973	624	437	1216	5000	2124	0.72	-2.04
PQ-063/19	0.142	0.189	920	612	428	1217	5000	1618	0.63	-2.63
PQ-064/19	0.124	0.180	944	641	434	1160	5000	2225	0.6	-2.25
PQ-065/19	0.131	0.184	929	617	415	1180	4981	2013	0.58	-1.9
PQ-066/19	0.138	0.183	934	615	380	1177	5000	1619	0.58	-1.75
PQ-067/19	0.153	0.191	982	632	411	1233	5000	1247	0.69	-2.19
PQ-068/19	0.127	0.165	1003	622	414	1067	5000	1517	0.67	-0.93
PQ-069/19	0.144	0.162	1050	658	410	1047	5000	616	0.56	-0.71
PQ-070/19	0.140	0.163	1046	712	444	1051	5000	808	0.52	-0.98
PQ-071/19	0.120	0.165	964	648	418	1066	5000	1871	0.51	-1.02
PQ-072/19	0.118	0.165	1002	623	403	1062	5000	1957	0.5	-1.29
PQ-073/19	0.124	0.170	952	599	381	1097	5000	1852	0.5	-1.47
PQ-074/19	0.140	0.197	890	570	384	1270	5000	2009	0.66	-2.47
PQ-075/19	0.121	0.177	1001	611	383	1139	5000	2300	0.59	-1.63
PQ-076/19	0.135	0.195	969	604	404	1260	5000	2230	0.63	-2.11
PQ-077/19	0.139	0.194	985	620	413	1250	5000	1973	0.69	-2.52
PQ-078/19	0.151	0.207	945	608	430	1333	5000	1861	0.73	-3.32
PQ-079/19	0.145	0.202	939	607	413	1305	5000	1998	0.74	-3.07
PQ-080/19	0.130	0.184	973	619	426	1184	5000	2076	0.63	-2.37
PQ-081/19	0.092	0.112	538	424	374	409	2832	621	0.23	0.12
PQ-082/19	0.115	0.140	916	692	463	902	5000	1066	0.43	-1.11
PQ-083/19	0.167	0.185	751	635	627	1194	5000	538	0.32	-0.92
PQ-084/19	0.111	0.157	999	698	473	1011	5000	2073	0.49	-1.14
PQ-085/19	0.111	0.159	1019	671	456	1025	5000	2135	0.5	-0.77
PQ-086/19	0.155	0.213	981	683	502	1349	4905	1856	0.54	-1.76
PQ-087/19	0.165	0.206	988	644	423	1298	4888	1200	0.55	-1.23
PQ-088/19	0.131	0.192	943	611	411	1241	5000	2344	0.69	-2.45
PQ-089/19	0.139	0.203	940	616	424	1308	5000	2312	0.66	-2.66
PQ-090/19	0.146	0.209	909	603	411	1342	4981	2170	0.71	-2.88
PQ-091/19	0.142	0.205	924	624	423	1322	5000	2223	0.7	-2.83
PQ-092/19	0.143	0.204	961	643	458	1313	5000	2129	0.69	-2.67
PQ-093/19	0.140	0.207	895	620	447	1336	5000	2376	0.72	-3.46
PQ-094/19	0.139	0.204	900	614	451	1314	5000	2337	0.72	-2.98
PQ-095/19	0.142	0.204	913	632	438	1317	5000	2185	0.69	-3.34
PQ-096/19	0.130	0.177	975	650	445	1141	5000	1801	0.6	-2.39
PQ-097/19	0.122	0.171	973	654	440	1105	5000	2039	0.62	-1.79
PQ-098/19	0.123	0.177	983	645	437	1144	5000	2191	0.68	-2.1
PQ-099/19	0.120	0.173	952	625	413	1119	5000	2245	0.68	-1.43
PQ-100/19	0.119	0.148	943	684	433	953	5000	1206	0.53	-0.75
PQ-101/19	0.120	0.176	997	659	453	1133	5000	2325	0.68	-1.74
PQ-102/19	0.112	0.136	846	673	623	878	5000	1065	0.44	-1.17
PQ-103/19	0.138	0.197	873	597	445	1268	5000	2136	0.65	-3.02
PQ-104/19	0.153	0.221	912	613	452	1394	4899	2143	0.72	-3.31
PQ-105/19	0.149	0.213	964	655	464	1371	5000	2123	0.65	-2.06
PQ-106/19	0.153	0.215	897	621	446	1384	5000	2027	0.67	-1.64
PQ-107/19	0.152	0.216	952	656	459	1390	5000	2110	0.7	-2.12
PQ-108/19	0.168	0.220	937	649	448	1391	4903	1504	0.68	-1.82
PQ-109/19	0.130	0.203	907	630	450	1312	5000	2851	0.71	-2.8
PQ-110/19	0.148	0.173	966	645	460	1116	5000	848	0.64	-1.76
PQ-111/19	0.136	0.183	953	643	433	1182	5000	1743	0.65	-2.13
PQ-112/19	0.133	0.175	960	683	430	1126	5000	1556	0.6	-2.06
PQ-113/19	0.142	0.198	923	620	446	1264	4945	1961	0.69	-2.68
PQ-114/19	0.134	0.189	941	639	442	1214	4968	2053	0.64	-2.31
PQ-115/19	0.131	0.184	1012	660	454	1185	5000	2013	0.68	-2.36
PQ-116/19	0.140	0.178	960	624	410	1146	5000	1341	0.7	-1.46
PQ-117/19	0.134	0.185	1024	658	426	1193	5000	1878	0.73	-1.81
PQ-118/19	0.169	0.199	1072	680	432	1245	4851	848	0.66	-0.78
PQ-119/19	0.150	0.173	962	628	410	1081	4847	733	0.62	-1.08
PQ-120/19	0.138	0.190	914	613	412	1227	5000	1896	0.65	-2.11
PQ-121/19	0.145	0.198	896	604	431	1276	5000	1830	0.71	-2.37

Anexo 4 Correlación lineal de matriz, con los elementos químicos y variables de operación del horno.

	% Ni	% Co	% Cu	% Zn	% Fe	% Mn	% S	% C	% Ni*	-0.074 mm	-0.044 mm	SM	RELACION P/A total	RELACION P/A prim	Temperatura de T-2 (°C)	Temperatura de T-3 (°C)	Temperatura de T-4 (°C)	Flujo de fue-Oil (kg/h)	Flujo de Aire Primario (m3/h)	Flujo de Aire Secundario (m3/h)	Revoluciones (rpm)	Presión de Vació (mmH2O)	
% Ni	1								1	0.000	0.000	0.007	0.453	0.779	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
% Co	-0.228	1							0.483	0.000	-0.061	0.453	1	0.779	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
% Cu	-0.053	-0.020	1						0.321	0.000	0.040	0.311	0.779	1	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
% Zn	-0.290	0.144	0.044	1					0.290	0.000	0.009	0.317	0.122	0.040	-0.134	0.406	1	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
% Fe	-0.483	0.029	-0.048	0.151	1				0.264	0.000	0.026	0.259	0.738	0.972	0.231	0.131	0.075	1	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
% Mn	-0.445	-0.049	-0.299	0.160	0.439	1			-0.029	0.000	-0.034	-0.021	0.235	0.356	0.640	0.638	0.174	0.561	1	0.061	0.061	0.061	0.061
% S	0.383	-0.032	0.039	-0.098	-0.085	-0.183	1		-0.029	0.000	-0.034	-0.021	0.235	0.356	0.640	0.638	0.174	0.561	1	0.061	0.061	0.061	0.061
% C	-0.019	-0.001	-0.059	0.066	0.127	0.018	0.371	1	-0.089	0.000	0.107	-0.125	0.388	0.678	0.358	0.083	-0.166	0.719	0.462	0.495	1	0.061	0.061
% Ni*	0.690	-0.110	-0.185	-0.112	-0.054	-0.080	0.460	0.101	1	0.000	-0.037	0.133	-0.346	-0.677	0.082	0.157	0.058	-0.678	-0.289	-0.512	-0.680	1	0.061
-0.074 mm	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1													
-0.044 mm	0.032	-0.118	0.053	-0.116	-0.138	-0.052	-0.073	-0.104	0.025	0.000	1												
Susceptibilidad Magnética	0.659	-0.056	-0.166	-0.093	-0.023	-0.083	0.461	0.078	0.984	0.000	0.007	1											
RELACION P/A total	0.324	-0.036	-0.237	0.003	-0.049	-0.044	0.274	0.213	0.483	0.000	-0.061	0.453	1										
RELACION P/A prim	0.164	-0.030	-0.225	0.058	0.055	0.014	0.216	0.166	0.321	0.000	0.040	0.311	0.779	1									
Temperatura de T-2 (°C)	0.102	-0.113	-0.092	-0.089	-0.130	-0.002	-0.098	-0.022	-0.061	0.000	0.061	-0.091	0.064	0.088	1								
Temperatura de T-3 (°C)	0.177	-0.162	-0.131	-0.146	-0.024	0.016	0.007	-0.072	0.135	0.000	0.014	0.125	0.079	-0.020	0.706	1							
Temperatura de T-4 (°C)	0.191	-0.204	-0.161	-0.031	0.151	0.098	0.161	-0.070	0.290	0.000	0.009	0.317	0.122	0.040	-0.134	0.406	1						
Flujo de fue-Oil (kg/h)	0.142	-0.048	-0.224	0.028	0.061	0.017	0.188	0.109	0.264	0.000	0.026	0.259	0.738	0.972	0.231	0.131	0.075	1					
Flujo de Aire Primario (m3/h)	0.033	-0.083	-0.125	-0.116	0.044	0.014	0.004	-0.078	-0.029	0.000	-0.034	-0.021	0.235	0.356	0.640	0.638	0.174	0.561	1				
Flujo de Aire Secundario (m3/h)	-0.210	-0.012	-0.002	0.058	0.156	0.083	-0.050	-0.068	-0.217	0.000	0.144	-0.190	-0.257	0.396	0.152	-0.045	-0.094	0.445	0.334	1			
Revoluciones (rpm)	-0.106	-0.174	-0.142	0.002	0.071	0.064	-0.010	0.081	-0.089	0.000	0.107	-0.125	0.388	0.678	0.358	0.083	-0.166	0.719	0.462	0.495	1		
Presión de Vació (mmH2O)	0.179	0.078	0.109	-0.123	-0.065	-0.038	-0.025	-0.073	0.133	0.000	-0.037	0.133	-0.346	-0.677	0.082	0.157	0.058	-0.678	-0.289	-0.512	-0.680	1	

Anexo 5 Resumen de variables de operación en el horno calcinador y composición química del Oxido de níquel en polvo químico.

Muestra	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni ^o	SM	Relación P/A total	Relación P/A primario	Temp. de T-2 °C	Temp. de T-3 °C	Temp. de T-4 °C	Fuel-Oil kg/h	Aire primario m3/h	Aire secundario m3/h	RPM	Presión de Vacío
PQ-064/19	76.99	0.362	0.004	0.086	0.148	0.392	0.004	0.002	0.002	0.42	0.124	0.18	944	641	434	1160	5000	2225	0.6	-2.25
PQ-103/19	76.92	0.242	0.004	0.072	0.443	0.259	0.004	0	0.002	0.716	0.138	0.197	873	597	445	1268	5000	2136	0.65	-3.02
PQ-088/19	77.02	0.408	0.005	0.112	0.161	0.285	0.003	0	0.002	0.211	0.131	0.192	943	611	411	1241	5000	2344	0.69	-2.45
PQ-092/19	77.48	0.318	0.003	0.064	0.038	0.244	0	0.001	0.002	0.231	0.143	0.204	961	643	458	1313	5000	2129	0.69	-2.67
PQ-049/19	77.38	0.329	0.004	0.084	0.09	0.384	0	0	0.002	2.168	0.121	0.166	950	651	465	1071	5000	1872	0.53	-0.62
PQ-090/19	76.95	0.43	0.005	0.074	0.072	0.27	0	0	0.003	0.249	0.146	0.209	909	603	411	1342	4981	2170	0.71	-2.88
PQ-089/19	76.68	0.462	0.004	0.154	0.152	0.34	0	0.002	0.003	0.309	0.139	0.203	940	616	424	1308	5000	2312	0.66	-2.66
PQ-062/19	76.92	0.394	0.004	0.008	0.118	0.406	0.002	0.002	0.004	0.419	0.132	0.189	973	624	437	1216	5000	2124	0.72	-2.04
PQ-065/19	76.9	0.36	0.004	0.086	0.118	0.378	0.005	0.002	0.004	0.548	0.131	0.184	929	617	415	1180	4981	2013	0.58	-1.9
PQ-094/19	77.35	0.37	0.003	0.061	0.036	0.245	0.02	0	0.004	0.249	0.139	0.204	900	614	451	1314	5000	2337	0.72	-2.98
PQ-119/19	77.61	0.422	0.002	0.03	0.046	0.078	0.002	0	0.004	0.219	0.15	0.173	962	628	410	1081	4847	733	0.62	-1.08
PQ-084/19	76.71	0.46	0.006	0.125	0.079	0.343	0.001	0	0.004	0.231	0.111	0.157	999	698	473	1011	5000	2073	0.49	-1.14
PQ-053/19	77.23	0.394	0.004	0.088	0.075	0.342	0	0.002	0.004	0.269	0.142	0.197	987	645	444	1273	5000	1965	0.72	-3.09
PQ-077/19	76.79	0.458	0.004	0.331	0.062	0.331	0	0.002	0.006	0.261	0.139	0.194	985	620	413	1250	5000	1973	0.69	-2.52
PQ-052/19	77.23	0.396	0.004	0.087	0.074	0.342	0	0.002	0.006	0.261	0.143	0.194	958	641	438	1252	5000	1770	0.67	-3.03
PQ-096/19	77.31	0.465	0.003	0.066	0.032	0.254	0.001	0	0.006	0.249	0.13	0.177	975	650	445	1141	5000	1801	0.6	-2.39
PQ-063/19	76.85	0.36	0.004	0.084	0.136	0.42	0.004	0.002	0.006	0.421	0.142	0.189	920	612	428	1217	5000	1618	0.63	-2.63
PQ-058/19	77.09	0.366	0.006	0.082	0.054	0.31	0	0.002	0.007	0.301	0.131	0.17	935	643	394	1094	5000	1484	0.54	-1.59
PQ-068/19	77.07	0.536	0.002	0.088	0.046	0.251	0.001	0.002	0.007	0.348	0.127	0.165	1003	622	414	1067	5000	1517	0.67	-0.93
PQ-060/19	77.06	0.387	0.005	0.088	0.042	0.324	0.006	0.002	0.008	0.249	0.136	0.173	1002	633	429	1116	5000	1384	0.7	-1.32
PQ-061/19	77.21	0.367	0.005	0.079	0.038	0.278	0.002	0.003	0.008	0.249	0.126	0.18	1028	650	422	1159	5000	2120	0.66	-1.8
PQ-095/19	77.26	0.478	0.002	0.065	0.03	0.35	0.02	0.001	0.008	0.249	0.142	0.204	913	632	438	1317	5000	2185	0.69	-3.34
PQ-081/19	76.69	0.461	0.006	0.141	0.086	0.344	0.002	0.001	0.009	0.309	0.092	0.112	538	424	374	409	2832	621	0.23	0.12
PQ-078/19	77.05	0.381	0.005	0.09	0.084	0.349	0	0.002	0.01	0.309	0.151	0.207	945	608	430	1333	5000	1861	0.73	-3.32
PQ-079/19	76.43	0.466	0.004	0.18	0.116	0.356	0	0.002	0.01	0.297	0.145	0.202	939	607	413	1305	5000	1998	0.74	-3.07
PQ-102/19	77.43	0.236	0.002	0.096	0.06	0.274	0.001	0	0.014	0.451	0.112	0.136	846	673	623	878	5000	1065	0.44	-1.17
PQ-071/19	77.03	0.593	0.002	0.096	0.052	0.28	0	0.001	0.016	0.311	0.12	0.165	964	648	418	1066	5000	1871	0.51	-1.02
PQ-051/19	77.1	0.437	0.004	0.078	0.127	0.414	0	0.002	0.016	0.329	0.137	0.188	951	634	437	1210	5000	1861	0.65	-1.54
PQ-047/19	77.23	0.324	0.002	0.084	0.108	0.556	0	0.002	0.02	0.462	0.129	0.185	977	648	453	1196	5000	2186	0.63	-1.72
PQ-069/19	77	0.416	0.005	0.081	0.113	0.366	0.002	0.002	0.02	0.417	0.144	0.162	1050	658	410	1047	5000	616	0.56	-0.71
PQ-073/19	77.27	0.577	0.004	0.093	0.048	0.093	0	0.003	0.024	0.382	0.124	0.17	952	599	381	1097	5000	1852	0.5	-1.47
PQ-101/19	77.06	0.267	0.004	0.092	0.046	0.308	0.004	0	0.032	0.26	0.12	0.176	997	659	453	1133	5000	2325	0.68	-1.74
PQ-010/19	77.08	0.43	0.001	0.109	0.102	0.372	0.011	0.001	0.05	0.517	0.137	0.189	950	652	464	1218	5000	1912	0.72	-2.03
PQ-011/19	77.05	0.41	0.002	0.11	0.104	0.416	0.012	0.001	0.05	0.575	0.151	0.179	971	654	419	1156	5000	949	0.63	-1.55
PQ-074/19	77.1	0.558	0.002	0.107	0.057	0.294	0.005	0.002	0.051	0.629	0.14	0.197	890	570	384	1270	5000	2009	0.66	-2.47
PQ-067/19	77.07	0.548	0.002	0.082	0.046	0.245	0.004	0.002	0.052	0.574	0.153	0.191	982	632	411	1233	5000	1247	0.69	-2.19
PQ-057/19	77.32	0.332	0.003	0.083	0.052	0.341	0	0.002	0.058	0.623	0.12	0.159	990	641	407	1027	5000	1644	0.55	-1.27
PQ-043/19	77.2	0.388	0.002	0.111	0.058	0.158	0	0	0.06	0.675	0.143	0.187	972	641	445	1207	5000	1533	0.55	-0.57
PQ-018/19	76.62	0.396	0.002	0.13	0.204	0.384	0.004	0.004	0.06	0.654	0.149	0.206	910	625	450	1328	5000	1921	0.73	-3.16
PQ-048/19	76.29	0.36	0.002	0.104	0.202	0.842	0.002	0.006	0.06	0.695	0.135	0.191	937	630	443	1234	5000	2064	0.61	-1.51
PQ-003/19	76.99	0.424	0.002	0.124	0.178	0.41	0.002	0.002	0.06	0.653	0.145	0.198	938	627	430	1275	5000	1821	0.59	-2.51
PQ-099/19	77.28	0.426	0.007	0.072	0.062	0.252	0.004	0.006	0.062	0.619	0.12	0.173	952	625	413	1119	5000	2245	0.68	-1.43
PQ-075/19	77.16	0.532	0.001	0.102	0.049	0.282	0	0.002	0.062	0.696	0.121	0.177	1001	611	383	1139	5000	2300	0.59	-1.63
PQ-100/19	77.28	0.44	0.008	0.076	0.045	0.238	0.004	0	0.065	0.643	0.119	0.148	943	684	433	953	5000	1206	0.53	-0.75
PQ-072/19	77.16	0.478	0.002	0.072	0.046	0.276	0.001	0.002	0.076	0.777	0.118	0.165	1002	623	403	1062	5000	1957	0.5	-1.29
PQ-017/19	76.63	0.4	0.002	0.128	0.206	0.379	0.003	0.003	0.08	0.799	0.149	0.206	926	636	455	1328	5000	1899	0.69	-2.9
PQ-033/19	77.47	0.29	0.001	0.12	0.05	0.36	0.016	0.003	0.1	1.307	0.138	0.196	979	646	456	1264	5000	2099	0.76	-2.29
PQ-070/19	77	0.416	0.002	0.081	0.113	0.366	0.002	0.002	0.101	0.421	0.14	0.163	1046	712	444	1051	5000	808	0.52	-0.98
PQ-014/19	76.7	0.408	0.003	0.131	0.218	0.378	0.003	0.002	0.11	1.037	0.142	0.203	905	627	466	1307	5000	2118	0.67	-2.73
PQ-007/19	77.24	0.354	0.002	0.106	0.093	0.367	0.002	0.001	0.11	1.03	0.142	0.196	930	640	453	1266	5000	1906	0.73	-2.26
PQ-050/19	76.8	0.405	0.003	0.06	0.416	0.383	0	0.002	0.116	0.311	0.116	0.159	922	634	466	1025	5000	1841	0.56	-0.46
PQ-076/19	77.16	0.348	0.003	0.094	0.05	0.462	0.017	0.001	0.13	1.385	0.135	0.195	969	604	404	1260	5000	2230	0.63	-2.11
PQ-091/19	77.18	0.346	0.004	0.072	0.058	0.267	0.023	0.004	0.136	0.429	0.142	0.205	924	624	423	1322	5000	2223	0.7	-2.83
PQ-093/19	77.28	0.448	0.002	0.074	0.038	0.244	0.016	0.004	0.136	0.299	0.14	0.207	895	620	447	1336	5000	2376	0.72	-3.46
PQ-009/19	77.3	0.368	0.002	0.106	0.09	0.37	0.004	0.004	0.14	1.262	0.144	0.198	968	665	476	1280	5000	1894	0.68	-2.25
PQ-034/19	76.96	0.43	0.002	0.122	0.185	0.454	0.002	0.002	0.14	1.338	0.134	0.192	969	642	437	1240	5000	2180	0.69	-2.16
PQ-066/19	77.17	0.524	0.002	0.085	0.042	0.244	0.002	0.002	0.15	0.573	0.138	0.183	934	615	380	1177	5000	1619	0.58	-1.75
PQ-120/19	77.18	0.314	0.004	0.082	0.059	0.336	0.001	0.002	0.165	1.153	0.138	0.19	914	613	412	1227	5000	1896	0.65	-2.11

Anexo 5 Continuación

Muestra	Ni	Co	Cu	Zn	Fe	Mn	S	C	Ni ^a	SM	Relación P/A total	Relación P/A primario	Temp. de T-2 °C	Temp. de T-3 °C	Temp. de T-4 °C	Fuel-Oil kg/h	Aire primario m ³ /h	Aire secundario m ³ /h	RPM	Presión de Vacío
PQ-055/19	77.25	0.358	0.005	0.088	0.077	0.318	0.004	0.002	0.194	1.373	0.136	0.185	950	628	401	1191	5000	1792	0.65	-2.5
PQ-056/19	77.14	0.36	0.006	0.096	0.083	0.354	0.001	0.002	0.22	1.525	0.131	0.175	979	640	421	1130	5000	1696	0.67	-2.18
PQ-016/19	76.71	0.442	0.003	0.126	0.222	0.404	0.005	0.003	0.23	1.946	0.148	0.204	920	618	448	1314	5000	1900	0.74	-3.19
PQ-098/19	77.25	0.364	0.004	0.059	0.049	0.284	0.032	0.005	0.24	0.943	0.123	0.177	983	645	437	1144	5000	2191	0.68	-2.1
PQ-054/19	77.48	0.337	0.005	0.1	0.073	0.322	0	0.002	0.26	1.945	0.132	0.182	1038	650	419	1174	5000	1900	0.74	-2.65
PQ-042/19	77.21	0.512	0.005	0.091	0.102	0.388	0	0	0.28	2.225	0.14	0.188	979	640	442	1210	5000	1688	0.61	-1.37
PQ-032/19	77.22	0.378	0.003	0.104	0.194	0.312	0.006	0.002	0.29	2.392	0.142	0.202	968	651	460	1301	5000	2090	0.73	-2.3
PQ-025/19	76.14	0.388	0.001	0.096	0.304	0.732	0.002	0.002	0.29	2.393	0.117	0.165	974	654	449	1061	5000	2049	0.56	-1.33
PQ-031/19	77.14	0.386	0.004	0.11	0.192	0.278	0.004	0.002	0.3	2.473	0.135	0.192	947	618	448	1236	5000	2079	0.69	-2.02
PQ-024/19	76.02	0.386	0.001	0.096	0.302	0.738	0.002	0.003	0.3	2.543	0.122	0.172	953	629	472	1108	5000	2038	0.67	-1.95
PQ-097/19	77.19	0.476	0.002	0.056	0.046	0.254	0.038	0.007	0.3	0.572	0.122	0.171	973	654	440	1105	5000	2039	0.62	-1.79
PQ-004/19	76.77	0.478	0.002	0.108	0.25	0.502	0.004	0.002	0.31	2.547	0.147	0.202	941	631	439	1305	5000	1861	0.62	-2.51
PQ-021/19	76.06	0.382	0.001	0.095	0.298	0.747	0.002	0.002	0.31	2.543	0.136	0.187	972	653	434	1209	5000	1902	0.73	-2.09
PQ-005/19	76.75	0.488	0.001	0.108	0.255	0.502	0.002	0.001	0.31	2.553	0.144	0.198	968	655	472	1276	5000	1846	0.73	-2.36
PQ-022/19	76.33	0.33	0.006	0.064	0.068	0.189	0.001	0	0.31	2.545	0.139	0.191	916	626	444	1229	5000	1861	0.74	-2.06
PQ-030/19	77.12	0.388	0.005	0.11	0.186	0.286	0.004	0.002	0.33	2.697	0.123	0.176	1035	660	444	1136	5000	2139	0.67	-1.25
PQ-023/19	76.99	0.354	0.006	0.087	0.178	0.246	0.002	0.007	0.33	2.545	0.145	0.201	908	633	452	1294	5000	1909	0.72	-2.93
PQ-121/19	77.25	0.384	0.003	0.079	0.038	0.252	0.014	0.003	0.35	2.431	0.145	0.198	896	604	431	1276	5000	1830	0.71	-2.37
PQ-029/19	77.12	0.39	0.005	0.114	0.198	0.296	0.006	0.002	0.37	3.006	0.123	0.176	959	629	425	1135	5000	2163	0.69	-1.54
PQ-020/19	76.67	0.4	0.003	0.106	0.22	0.384	0.003	0.004	0.39	3.159	0.138	0.195	980	653	474	1258	5000	2081	0.67	-2.4
PQ-015/19	77.07	0.392	0.002	0.09	0.144	0.425	0.002	0.002	0.39	3.159	0.143	0.199	904	616	450	1283	5000	1960	0.74	-2.79
PQ-041/19	77.39	0.354	0.002	0.084	0.074	0.134	0	0	0.39	3.173	0.134	0.194	958	649	459	1249	5000	2231	0.63	-1.87
PQ-019/19	76.65	0.399	0.003	0.106	0.223	0.374	0.003	0.004	0.39	3.153	0.148	0.207	921	623	448	1332	5000	1972	0.72	-2.5
PQ-044/19	76.96	0.706	0.002	0.095	0.1	0.521	0	0.002	0.39	2.895	0.143	0.199	996	662	453	1281	5000	1939	0.63	-1.47
PQ-013/19	77.07	0.392	0.002	0.09	0.144	0.425	0.002	0.002	0.48	3.837	0.136	0.176	846	624	437	1089	4807	1409	0.59	-2.07
PQ-109/19	77.07	0.399	0.004	0.101	0.13	0.33	0.003	0	0.55	4.967	0.13	0.203	907	630	450	1312	5000	2851	0.71	-2.8
PQ-026/19	76.62	0.396	0.004	0.118	0.35	0.394	0.012	0.014	0.56	4.447	0.138	0.195	886	617	408	1259	5000	2050	0.67	-2.13
PQ-008/19	77.18	0.468	0.002	0.096	0.162	0.426	0	0.002	0.66	5.205	0.134	0.17	897	669	453	1052	4805	1299	0.58	-1.6
PQ-115/19	77.26	0.324	0.001	0.099	0.084	0.378	0	0.002	0.69	4.811	0.131	0.184	1012	660	454	1185	5000	2013	0.68	-2.36
PQ-006/19	77.23	0.462	0.002	0.096	0.162	0.434	0	0.002	0.74	5.806	0.15	0.206	885	608	448	1327	5000	1865	0.66	-2.59
PQ-037/19	77.23	0.462	0.002	0.096	0.162	0.434	0	0.002	0.74	5.197	0.127	0.172	1047	674	460	1085	4894	1729	0.61	-0.68
PQ-002/19	77.12	0.496	0.001	0.102	0.144	0.42	0.014	0.012	0.88	6.871	0.137	0.188	952	626	440	1210	5000	1823	0.63	-2.13
PQ-028/19	76.81	0.391	0.004	0.118	0.314	0.372	0.014	0.002	0.88	6.867	0.124	0.177	998	649	441	1139	5000	2123	0.67	-1.73
PQ-110/19	77.54	0.212	0.001	0.092	0.054	0.366	0	0.004	0.93	5.676	0.148	0.173	966	645	460	1116	5000	848	0.64	-1.76
PQ-027/19	77.01	0.385	0.004	0.105	0.24	0.358	0.014	0.004	0.94	7.327	0.145	0.203	910	630	439	1312	5000	2004	0.67	-2.27
PQ-113/19	77.26	0.289	0.002	0.102	0.095	0.456	0	0.002	0.95	6.355	0.142	0.198	923	620	446	1264	4945	1961	0.69	-2.68
PQ-080/19	77.25	0.291	0.002	0.104	0.094	0.484	0	0.001	0.96	6.325	0.13	0.184	973	619	426	1184	5000	2076	0.63	-2.37
PQ-012/19	77.21	0.402	0.001	0.078	0.115	0.44	0.002	0.002	0.99	7.708	0.14	0.197	993	660	449	1270	5000	2024	0.72	-2.71
PQ-114/19	77.25	0.291	0.002	0.104	0.094	0.484	0	0.001	1	6.185	0.134	0.189	941	639	442	1214	4968	2053	0.64	-2.31
PQ-085/19	77.55	0.38	0.004	0.102	0.14	0.276	0.011	0.001	1.03	8.429	0.111	0.159	1019	671	456	1025	5000	2135	0.5	-0.77
PQ-035/19	77.61	0.33	0.004	0.1	0.07	0.434	0.005	0.001	1.04	7.367	0.14	0.195	992	640	467	1260	5000	1986	0.68	-1.19
PQ-112/19	76.62	0.248	0	0.09	0.076	0.351	0.002	0.002	1.1	7.781	0.133	0.175	960	683	430	1126	5000	1556	0.6	-2.06
PQ-036/19	77.55	0.322	0.003	0.096	0.062	0.413	0.004	0	1.12	7.701	0.144	0.194	1007	665	452	1252	5000	1736	0.68	-1.57
PQ-045/19	78.19	0.214	0.004	0.09	0.07	0.398	0.008	0	1.16	8.014	0.131	0.19	976	640	450	1225	5000	2275	0.6	-1.19
PQ-040/19	77.31	0.423	0.002	0.08	0.148	0.444	0	0.001	1.21	8.603	0.142	0.191	924	624	441	1233	5000	1717	0.63	-1.51
PQ-046/19	77.39	0.255	0.003	0.1	0.062	0.425	0.006	0.004	1.24	5.934	0.166	0.199	991	642	435	1284	5000	991	0.63	-1.45
PQ-038/19	77.44	0.218	0.002	0.079	0.078	0.4	0.001	0.002	1.25	7.797	0.141	0.191	997	658	471	1234	5000	1775	0.6	-1.51
PQ-116/19	77.28	0.386	0.002	0.088	0.147	0.602	0.004	0	1.27	8.7	0.14	0.178	960	624	410	1146	5000	1341	0.7	-1.46
PQ-111/19	77.7	0.258	0.001	0.099	0.05	0.294	0.01	0.004	1.36	8.065	0.136	0.183	953	643	433	1182	5000	1743	0.65	-2.13
PQ-059/19	77.44	0.26	0.006	0.12	0.07	0.33	0.042	0.013	1.44	5.223	0.164	0.205	991	638	427	1293	4892	1222	0.69	-2.22
PQ-117/19	77.98	0.236	0.002	0.064	0.088	0.162	0.007	0.008	1.9	11.51	0.134	0.185	1024	658	426	1193	5000	1878	0.73	-1.81
PQ-082/19	77.63	0.448	0.005	0.097	0.152	0.286	0.005	0.001	2.01	15	0.115	0.14	916	692	463	902	5000	1066	0.43	-1.11
PQ-108/19	77.22	0.572	0.001	0.11	0.088	0.254	0.004	0.007	2.15	19	0.168	0.22	937	649	448	1391	4903	1504	0.68	-1.82
PQ-086/19	77.56	0.442	0.004	0.091	0.146	0.292	0.004	0.003	2.35	15.4	0.155	0.213	981	683	502	1349	4905	1856	0.54	-1.76
PQ-118/19	78.15	0.232	0.002	0.064	0.09	0.155	0.012	0.008	2.67	15.75	0.169	0.199	1072	680	432	1245	4851	848	0.66	-0.78
PQ-107/19	78.24	0.398	0.002	0.096	0.11	0.225	0.032	0.003	3.91	27.1	0.152	0.216	952	656	459	1390	5000	2110	0.7	-2.12
PQ-039/19	78.13	0.373	0.001	0.069	0.065	0.438	0.001	0	4	18.2	0.166	0.204	914	628	442	1269	4825	1111	0.66	-1.47
PQ-105/19	77.99	0.332	0.001	0.07	0.034	0.311	0.009	0.002	4.14	28.8	0.149	0.213	964	655	464	1371	5000	2123	0.65	-2.06
PQ-104/19	78.34	0.33	0.001	0.074	0.033	0.33	0.005	0.002	4.32	30.2	0.153	0.221	912	613	452	1394	4899	2143	0.72	-3.31
PQ-083/19	78.17	0.454	0.004	0.102	0.112	0.31														

Anexo 6 Gastos directos de análisis químicos

Gastos directos de análisis químicos		
Total de gastos directos de análisis	\$ 9,61	
Reactivo para análisis de ni en oxido por electrólisis	2,604	
Níquel electrodepositado	1,624	
25 ml ácido sulfúrico (1:1), 0.0125l	0,099	6,07%
25 ml solución saturada de clorato de potasio (2g)= 0.002 kg	0,090	5,55%
115 ml hidróxido de amonio = 0.115 l	1,044	64,27%
persulfato de amonio (1 gramo) = 0.001 kg	0,109	6,70%
1 papel de filtro/de una caja con 100 papeles	0,283	17,41%
Níquel residual por absorción atómica	0,980	
10 ml de ácido clorhídrico (1:1)	0,036	3,70%
Estándar de Ni	0,009	0,93%
metro cúbico acetileno = (2balx6.5m3/bal)x(30días/2días durac.)	0,935	95,37%
Azufre y Carbono	1,273	
Crisol cerámica	0,177	13,89%
Hierro chip 0.4 g	0,043	3,41%
Wolframio 1 g	0,168	13,22%
metro cúbico oxígeno en un año 8x30 días/2550 muestra mes	0,885	69,49%
Reactivo para análisis De Cu,Fe,Zn,Mn en Oxido	5,476	
Ácido nítrico 15 ml (0.02 l)	0,181	3,31%
Ácido perclórico 10 ml (0.01l)	0,760	13,88%
Ácido clorhídrico(1:1) 10 ml corresponde a 0.005 l	0,073	1,32%
Estándar (Fe 0.00002 l)	3,522	64,32%
Estándar (Fe, Co)	0,001	0,02%
Estándar (Zn)	0,002	0,03%
Metro cúbico acetileno	0,002	0,04%
Consumo de Acetileno	0,935	17,07%
En reactivo para determinar Ni metálico	0,253	
Solución cloruro de hierro (III) al 8 %;(25 ml x 8/100)x1000	0,015	5,89%
Cloruro de hierro (III)	0,074	29,46%
Níquel metálico para análisis 0.015 g/cant. Muestr, 0.000015 kg	0,000	0,06%
Ácido nítrico 0.0047259 l en la semana/cantidad muestra	0,083	32,72%
1 papel de filtro/de una caja con 100 papeles	0,030	12,04%
Metro cúbico acetileno	0,050	19,83%
Gasto directo	336.225,000	
Salario total (\$/año)	244.497,000	72,72%
Seguridad social (\$/año)	91.728,000	27,28%
Salario. Seguridad. Social, total	336.225,000	
Cantidad. Análisis. Laboratorio	1.149.384,000	
Coeficiente (salar. Seg. Soc. Total/cant. Análisis. Labort)	0,293	

Anexo 7 Gastos directos de análisis químicos

Gastos indirectos de análisis químicos		
Total de gastos (Indirectos)	\$ 481.316,00	
Energía	16.278,000	3,38%
Materiales	140.513,000	29,19%
Combustible	1.313,000	0,27%
Amortización	234.487,000	48,72%
Otros gastos monetarios	88.725,000	18,43%
Coeficiente (gastos (indirectos)/cant. Análisis. Labort)	0,419	

Anexo 8 Gastos de operaciones en el proceso de envase (año).

Gastos de operaciones en el proceso de envase (año)		
Total de gastos de operaciones	\$ 609.376,78	
Gastos de operaciones	<u>34.367,527</u>	
Sacos refia blanco 60g/m ² 29×59 cm	12.529,442	36,46%
Big Bag polvo químico	6.587,560	19,17%
Hilo para el cosido de los sacos	662,725	1,93%
Etiquetas de identificación	156,800	0,46%
Otros gastos monetarios	14.431,000	41,99%
Coeficiente (gastos de operaciones/cant. Lotes producidos)	143,198	
Gasto directo	<u>16.091,250</u>	
Salario total (\$/año)	15.325,000	4,56%
Seguridad social (\$/año)	766,250	0,23%
Salario. Seguridad. Social, total	16.091,250	
Cantidad. Lotes. Producidos	240,000	
Coeficiente (salar. Seg. Soc. Total/cant. Lotes producidos)	67,047	

Anexo 9 Gastos indirectos en el proceso de envase (año)

Gastos indirectos en el proceso de envase (año)		
Total de gastos (indirectos)	\$ 887.737,60	
Energía	119.281,000	13,44%
Materiales	10.051,000	1,13%
Combustible	6.455,000	0,73%
Amortización	544.487,000	61,33%
Otros gastos monetarios	79.725,000	8,98%
Alquiler del equipo (montacargas)	127.738,600	14,39%
Horas trabajadas	116.920,000	91,53%
Consumo de diésel	10.818,600	9,25%
Coeficiente (gastos (indirectos)/cant. Lotes producidos)	3.698,907	