



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO METALURGIA - QUÍMICA

INFLUENCIA DE LA CARGA EN EL HORNO DE CALCINACIÓN UNO EN LA EMPRESA “RENÉ RAMOS LATOUR”

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Daniel Quirino Durán Santí

MOA

2013



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO METALURGIA - QUÍMICA

INFLUENCIA DE LA CARGA EN EL HORNO DE CALCINACIÓN UNO EN LA EMPRESA “RENÉ RAMOS LATOUR”

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Autor: Daniel Quirino Durán Santí

Tutores: Ing. Aurelio Adolfo Acosta Chacón

Prof. Asist. Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr

Prof.Aux. Ing. Jorge Arce Molina, Mcs

MOA

2013

Pensamiento

Lo importante de cada día es que hagamos algo que supere la obra del día anterior.

Ernesto Che Guevara

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración de todos los que han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

A la revolución cubana por darme la oportunidad de cursar mis estudios y alcanzar el título de Ingeniero.

A mis padres por su apoyo e insistencias.

A mi esposa por su apoyo siempre oportuno.

Un agradecimiento muy especial a mis tutores y a Marcia Mastrapa por su dedicación, para que esta investigación se realizara.

A mi profesora Ana Roque por constar siempre con su colaboración.

A mis compañeros por su muestras de hermandad.

A todas las personas que de una u otra forma me apoyaron y ayudaron.

Gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, cuya educación y ejemplo, me han permitido lograr esta meta.

. A mi esposa por su apoyo, comprensión y amor

. A mis tutores, Aurelio Acosta, Amaury Palacios y Jorge Arce por su ayuda incondicional, dedicación y por toda lo que hicieron por mí.

.. A mis hermanos(a), Jordiel, Guancho, Mirthica y Ernesto.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la influencia de la carga en el producto final a partir de los principales parámetros tecnológicos del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel. Para lo cual se empleó, la metodología de la modelación estadística, realizándose, un análisis de los diferentes parámetros operativos del proceso con respecto a la carga alimentada al calcinador uno. Se creó una base de datos del período analizado, comprendido entre los meses de noviembre del 2011 hasta febrero del 2012, se organizaron los valores de la carga en orden descendiente, para lo que se calcularon los promedios de los datos. Se utilizó como herramienta el Microsoft Excel, el Origin Pro para la representación gráfica y el programa Statgraphics, para la obtención de los modelos. Para identificar los parámetros que influyen en la variación de la carga de carbonato de níquel alimentada al horno de calcinación, se utilizó el diagrama de causa –efecto o de Ishikawa. Se obtuvo como resultados, la incidencia de la carga en los parámetros operativos del horno de calcinación y en las características del óxido de níquel calcinado, se estableció un modelo de regresión lineal, encontrándose que la zona óptima de carga es de 6,0 a 8,0 t/h, donde se logran los mejores resultados en la operación del calcinador.

Palabras Clave: Influencia de la carga, parámetros tecnológicos, zona óptima de carga

ABSTRACT

The research aims to determine the influence of load on the final product from the main technological parameters of the process of calcination of basic nickel carbonate; was used performing an analysis of the different operating parameters of the process with respect to one load supplied to the calciner. For the survey is a database reporting period. From November 2011 to February 2012, load values in descending order, calculating data averages. Were organized the tool Origin Pro Microsoft Excel for graphing and Staffgraphics program for obtaining models were used. Identifying the parameters which influence the load variation of nickel carbonate fed to calcination oven was used causal diagram or Ishikawa. The following results are obtained; Incidence of low load operating parameters kiln and characteristics of calcined nickel oxide, a linear regression model whit zone load between 6.0 to 8.0 t / h where the best results are achieved in the operation of the calciner.

Key words: Influence of is load, technological parameters, the optimal load

ÍNDICE	pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Antecedentes históricos.....	5
1.3 Descripción del flujo tecnológico de la Planta de Calcinación.....	6
1.4 Variables que inciden sobre el proceso de Calcinación.....	9
1.5 Trabajos precedentes.....	9
2 Materiales y Métodos.....	14
2.1 Introducción.....	14
2.2 Materiales.....	14
Para el estudio se utilizó el óxido de níquel calcinado obtenido del horno de calcinación uno de la empresa Comandante René Ramos Latour, con el cual se realizaron las evaluaciones correspondientes.....	14
2.3 Equipo.....	15
2.4 Descripción y especificaciones de los equipos e instrumentos.....	16
2.5 Estado actual de la automatización del proceso de calcinación.....	17
2.5.1 Carta Tecnológica del Proceso Calcinador uno.....	18
2.5.2 Medidas para garantizar un producto dentro de especificación.....	19
2.5.3 Definición del modelo teórico para el proceso de calcinación.....	20
2.6 Metodología empleada.....	20
2.7 Identificación de la influencia de los parámetros en la variación de la Carga.....	22
2.8 Influencia de la Carga de Carbonato de Níquel alimentada al Horno con respecto a las variables del proceso.....	24
2.8.1 Influencia de la Humedad del Carbonato de Níquel con respecto a la carga.....	24
2.8.2 Influencia de la Densidad del carbonato básico de níquel con respecto al óxido obtenido.....	24
2.8.3 Influencia de la Carga en el Tiro inducido por el ventilador.....	24
2.8.4 Influencia de la Carga en la variación del contenido de gases dentro del horno.....	25
2.8.5 Influencia de la Carga en la densidad del óxido que se produce.....	25
2.8.6 Influencia de la Carga en las temperaturas del horno.....	26
2.9 Método de muestreo y análisis.....	26
2.9.1 Método de muestreo y análisis del carbonato básico de níquel húmedo, muestra (N – 65).....	26
2.9.2 Norma de muestreo del óxido de níquel calcinado NEIB 03-07-11.....	27
2.9.3 Método para la determinación de los componentes del óxido de Níquel.....	28
2.9.4 Método de determinación de Cobalto, Hierro, Zinc, y Manganeso.....	28
2.9.5 Método para la determinación de azufre combustible.....	28
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
3.1 Contenido relativo de los metales en función de la carga.....	30
3.2 Consumo de petróleo en correspondencia de la carga.....	33
3.3 Relación petróleo – aire con los contenidos relativos de Níquel, cobalto, hierro y azufre.....	34
3.4 Relación Densidad del carbonato- Humedad-Temperaturas con respecto a la carga.....	36
3.5 Relación del tiro, el contenido de Dióxido de Carbono y Oxígeno en los gases con respecto a la carga.....	38
CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Cuba, posee uno de los mayores yacimientos de menas lateríticas y utiliza para la extracción de níquel y cobalto, la tecnología carbonato amoniacal representada por las empresas “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, “Comandante Ernesto Che Guevara”, en Moa y la de lixiviación ácida a elevadas temperaturas en la empresa “Comandante Pedro Soto Alba- Moa Níquel S.A.” en Moa. Como producto final o semielaborado se obtiene sínter de níquel y sulfuro de níquel más cobalto.

El orden económico mundial exige de los países, un incremento en la eficiencia de su economía con el objetivo esencial de elevar su nivel competitivo y con ello conquistar un espacio en el mercado mundial.

En Cuba la industria metalúrgica del níquel desempeña una ardua labor, debido a que su objetivo específico es elevar en cada una de sus empresas la productividad, y la eficiencia.

Las menas lateríticas son tratadas por vías piro metalúrgicas e hidrometalúrgicas, las primeras recuperan aproximadamente el 70 % del níquel contenido en la mena y la mayor parte del cobalto se pierde en la escoria. En la tecnología hidrometalúrgica de lixiviación carbonato amoniacal se logran extracciones de níquel de hasta un 80 % y se recupera no más de 40 % de cobalto, sin embargo con la utilización de la tecnología de lixiviación ácida, se extrae el 95 % de níquel y más del 90 % de cobalto.

La industria del níquel en Cuba, comenzó con la puesta en marcha en 1943 de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, seguida en 1959 con el inicio de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” - Moa Níquel S.A. y posteriormente en 1986 con la arrancada de la fábrica “Comandante Ernesto Che Guevara”, En la actualidad, se presentan resultados acerca de la obtención de níquel mediante la tecnología CARON.

En los últimos años la industria minero metalúrgica ha enfrentado serios problemas, referidos fundamentalmente a los costos de los procesos extractivos de la minería, que continuamente se han incrementado. Cada día la situación se hace más difícil al considerar la baja ley de los metales valiosos en las menas, la disminución de las reservas de minerales, el incremento de los costos de amortización y de la energía eléctrica además de las afectaciones en la calidad de los productos finales.

Debido a los problemas técnicos presentados en la planta de sinter de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, por decisión gubernamental se traslada la producción de óxido de níquel sinterizado a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” por lo se producen cambios en los procesos relacionados con el cliente, ya que el óxido de níquel calcinado que constituía un producto en proceso de la planta de calcinación, inicia a ser su producto final; de esta forma fue necesario definir los requisitos del producto con el cliente, presentándose incumplimientos o no conformidades con este.

El proceso de calcinación de níquel constituye una importante etapa dentro de la planta niquelífera René Ramos Latour, la cual utiliza como materia prima mineral laterítico y la tecnología de lixiviación amoniacal. En este proceso se obtiene óxido de níquel a partir de carbonato básico de níquel en un horno rotatorio (kiln). La calcinación consiste en la descomposición del mineral en sus óxidos formadores por la acción del calor; es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, pero por debajo de su punto de fusión, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química, se efectúa en un horno rotatorio donde se obtiene óxido de níquel a partir de carbonato básico de níquel. Este proceso se caracteriza por una gran complejidad, atendiendo a su naturaleza no lineal, distribuida y variable en el tiempo, lo que hace imposible la obtención de un modelo matemático preciso por lo cual se plantea como **Situación problemática**: Tomando en consideración los incumplimientos de los requisitos de calidad en el óxido de níquel calcinado y las mejoras realizadas en los parámetros mecánicos y operativos, se hace necesario el estudio de la incidencia de la carga, en el proceso de calcinación del carbonato de níquel en la empresa “Comandante René Ramos Latour”, su determinación

permitirá recomendar la carga óptima a procesar para lograr un producto con la calidad pactada.

Problema de investigación: Desconocimiento del comportamiento de la carga en el producto de calcinación en la empresa “Comandante René Ramos Latour”.

El Objeto de estudio: El proceso de calcinación en la empresa “Comandante René Ramos Latour”.

Como **Hipótesis** se plantea: Si se determina la influencia de la carga en las características físicas y químicas del óxido de níquel en el área de calcinación en la empresa Comandante René Ramos Latour, entonces se podrá mejorar la calidad del producto final.

Se propone como **Objetivo:** Determinar la influencia de la carga en el producto final de la planta de calcinación de la empresa René Ramos Latour.

Objetivos específicos:

1- Caracterizar el proceso de calcinación.

2- Obtener el modelo estadístico.

3-Determinar la influencia de los parámetros tecnológicos del proceso de calcinación.

Metodología de la investigación:

Obtenida la información bibliográfica, se aplica el análisis estadístico donde intervienen las principales variables y parámetros en el proceso de calcinación. Para la obtención del óxido de níquel, donde estamos auxiliados por métodos computacionales como el EXCEL y el STATGRAPHICS, para la evaluación del proceso de calcinación. Ya que se crea una base de datos del período analizado, determinando el comportamiento de los parámetros de operación que inciden en el proceso de calcinación, se tomó como referencia los meses de noviembre del 2011 hasta febrero del 2012.

Los aportes de la investigación son:

En lo científico:

Contribución al conocimiento del comportamiento de los principales parámetros tecnológicos del proceso de calcinación.

En lo económico:

Obtención de mayores ingresos por concepto de la mejora de la calidad del producto final.

En lo social:

- Disminución de la contaminación ambiental.
- Aprovechamiento racional e integral de los recursos minerales.

1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

El contenido del capítulo va dirigido a la búsqueda de información sobre la obtención del óxido de níquel calcinado, la influencia de los diferentes parámetros en el proceso de calcinación y las propuestas de solución con vistas a la mejora de la calidad del producto.

1.2 Antecedentes históricos

El proceso de producción del níquel se inició en Cuba con la arrancada en 1943 de la fábrica René Ramos Latour de Nicaro y posteriormente en 1986 de la empresa Ernesto Che Guevara de Moa, se tienen como productos finales los óxidos y sulfuros de níquel y cobalto aplicando la tecnología CARON o proceso carbonato amoniacal (PCA) a partir del mineral laterítico. La misma está formada por 6 plantas que trabajan de forma continua, las cuales son:

- Preparación del Mineral
- Hornos de Reducción
- Lixiviación y Lavado
- Precipitación de sulfuro de cobalto
- Recuperación de amoníaco
- Calcinación y Sinterización

La Empresa del Níquel “Comandante René Ramos Latour” se encuentra ubicada al noreste de la provincia Holguín, en las costas de la Bahía de Nipe en el poblado de Nicaro, en el municipio Mayarí. El mineral que es explotado en dicha empresa es laterítico y el cual se presenta en dos formas: Serpentina y Limonita.

El esquema tecnológico de la fábrica está basado en el esquema de la lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido o proceso Caron. Con este esquema tecnológico funcionan otras fábricas de níquel en Australia, en la República Checa

y en Cuba la Planta “Comandante Ernesto Che Guevara.” ubicada en Moa, provincia Holguín.

En Marzo de 1942 comenzó la construcción en Nicaro de la primera planta de obtención de Níquel a partir de las lateritas. El motivo de la construcción de la fábrica fue el aumento de la demanda del Níquel como metal estratégico para la Segunda Guerra Mundial. La puesta en marcha y la primera producción de óxido de Níquel se produjo en diciembre de 1943. Los depósitos minerales de Nicaro fueron parcialmente explotados por el gobierno de Estados Unidos y por La Freeport Sulphur Company y otros. La fábrica fue explotada para el gobierno norteamericano entre los años 1943 - 1947. En 1951, ésta fue rehabilitada y operada por La Nickel Processing Corporation con La National Lead Company y Fomento de Minerales Cubanos, S.A. La producción aumentó hasta 20 186,11 t de níquel más cobalto y una eficiencia metalúrgica de 75,62 % para el níquel en el año 1957.

En 1960 la planta fue nacionalizada pasando a ser una de las fuentes principales de divisa para nuestro país, la producción más alta de la empresa fue en el año 1983 con 21135 t de Ni + Co. En diciembre de 1972 se acordó entre los gobiernos de la antigua URSS y la República de Cuba la colaboración técnica para la rehabilitación de la fábrica niquelífera de Nicaro.

A lo largo de la historia de la fábrica, se ha efectuado un trabajo de ampliación, rehabilitación y modernización, introduciéndose en sus procesos, los logros de la ciencia y la técnica.

1.3 Descripción del flujo tecnológico de la Planta de Calcinación

La pulpa de carbonato es extraída desde el fondo del sedimentador por medio de bombas las cuales envían a los filtros rotatorios de vacío (tres de tambor y uno de disco) los cuales separan el agua del carbonato hasta alrededor del 65%.

Con esta humedad el carbonato de níquel es introducido al horno de calcinación por medio de un sinfín (son dos hornos de calcinación de los cuales uno esta en operación y el otro de reserva o reparación). El carbonato de níquel se desplaza por las diferentes zonas del horno de calcinación hasta transformarse en óxido de

níquel calcinado con ayuda del calor y los gases producto de la combustión del petróleo dentro del horno.

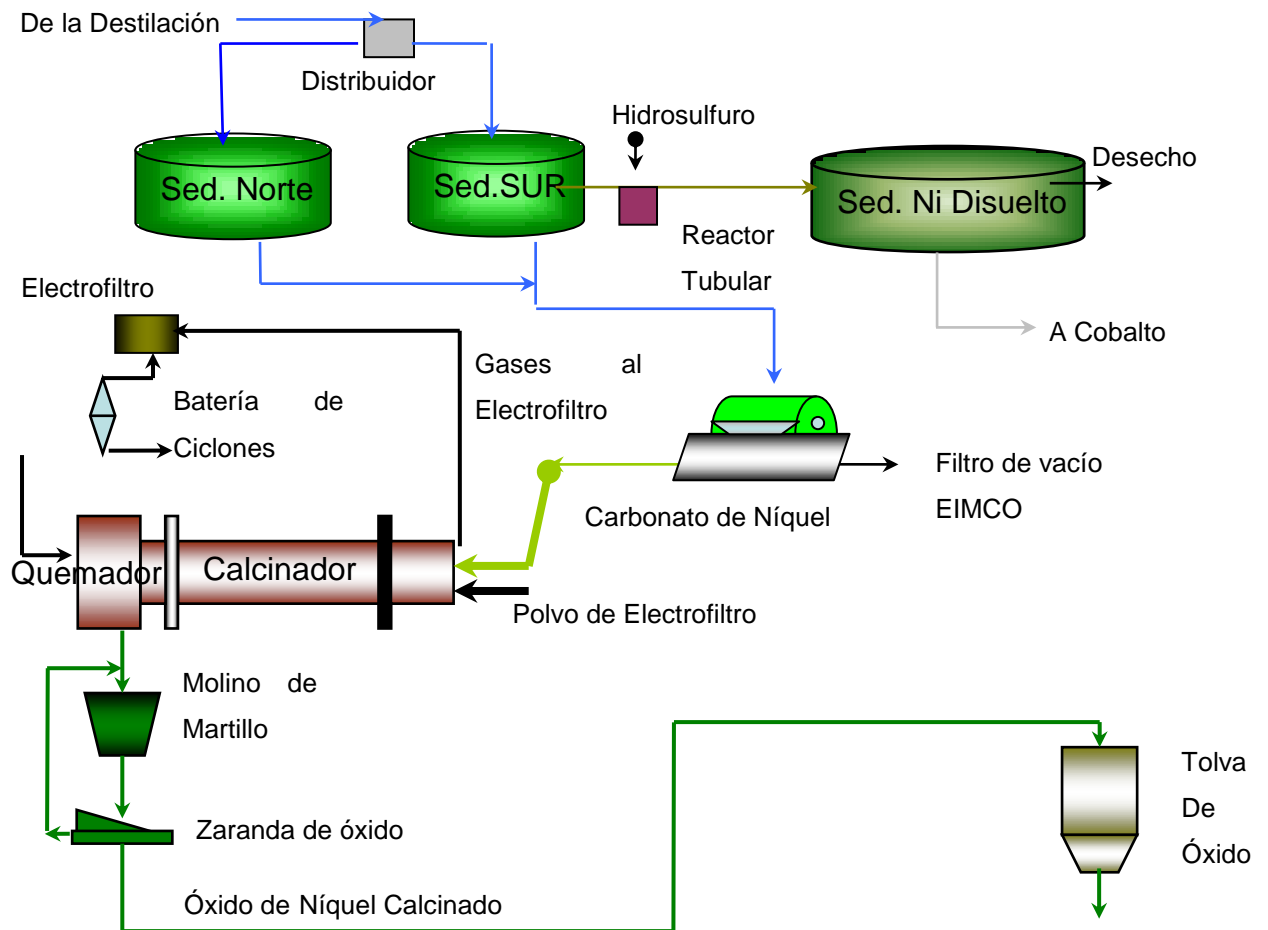


Figura 1.1 Esquema del flujo tecnológico del área de calcinación

El óxido de níquel calcinado, ya enfriado es el producto final de esta planta y el mismo constituye la materia fundamental en el proceso de sinterización.

En el sinfín alimentador el carbonato de níquel se mezcla con el polvo de recirculación proveniente del electrofiltro, existen dos electrofiltros, uno ruso y uno alemán, la mayor parte del tiempo trabaja el electrofiltro alemán por ser más eficiente y el otro permanece de reserva. Estos electrofiltros tienen la función de extraer o recuperar el polvo de níquel que arrastra los gases producto de la

combustión del petróleo dentro del horno de calcinación y reincorporarlos a dicho proceso.

Estos hornos de calcinación además de rotar tienen un pequeño ángulo de inclinación que favorece que el carbonato se desplace en su interior desde el punto de alimentación hasta la descarga pasando por las diferentes zonas del horno tales como:

Zona de los gases:

Es la zona donde el carbonato se encuentra con los gases producto de la combustión del petróleo, lo que posibilita el intercambio de calor entre ellos favoreciendo su secado. En la primera etapa dentro del horno el material se seca, eliminándose totalmente el agua libre y parcialmente la de constitución de las moléculas.

Zona de las cadenas:

En esta zona se encuentran insertadas las cadenas cuyo objetivo es romper las aglomeraciones de carbonato, aumentar el área de intercambio de calor e impulsar el mineral, con esto se evita además la formación de piedras en el horno. La zona de las cadenas consta de siete aros, los cuales soportan las cadenas y están separados entre sí a una distancia de 1020 mm. Los aros 1, 2, 6 y 7 soportan 36 cadenas cada uno y los aros 3, 4 y 5 soportan 72 cadenas cada uno. El número total de cadenas es de 180 y están constituidas por 70 eslabones cada una, las mismas están puestas de un aro a otro dejando un aro por medio.

Zona de calcinación:

Después de pasar por las cadenas el carbonato continúa descendiendo por el interior del calcinador y penetra el área de calcinación, donde concluye el secado del carbonato y se efectúa la descomposición del mismo en óxido de níquel (NiO) y dióxido de carbono (CO₂). En esta etapa tiene lugar la combustión, donde la temperatura alcanza valores entre 1 000 y 1 400 °C, aquí ya se obtiene el producto final que pasa a la zona de enfriamiento antes de su descarga.

Zona de enfriamiento:

El óxido de níquel continua desplazándose hacia la cámara de enfriamiento, la cual esta formada por una doble pared con duchas exteriores a temperatura ambiente (no hay contacto directo del agua con el óxido). Al llegar a la descarga

del horno el óxido de níquel se ha enfriado, hasta una temperatura que oscila entre 30 a 60°C. Ya este producto es molido y clasificado para luego ser transportado hasta las tolvas de almacenaje para su posterior utilización.

Una correcta operación de los filtros rotatorios al vacío garantiza una buena operación del horno de calcinación, determinando las densidades del sedimentador cada una hora así como la presión de vacío y secado en cada filtro y el amperaje de los sedimentadores. No obstante el operador del horno mantiene el control visual de los parámetros de operación a través del sistema de supervisión de procesos EROS, manteniéndoles dentro de la norma.

1.4 Variables que inciden sobre el proceso de Calcinación

- Carga de Carbonato de Níquel alimentada al Horno.
- Humedad del Carbonato de Níquel alimentado.
- Temperatura en las diferentes zonas del horno.
- Flujo de petróleo.
- Presión del aire primario.
- Presión del vapor que entra al quemador.
- Perfil Gaseoso en % de (CO₂, O₂ y CO)
- Presión de salida del petróleo.
- Temperatura de salida del petróleo.
- Presión de entrada del petróleo al quemador. ≤
- Amperaje del motor de horno
- Temperatura de la cámara enfriamiento del horno.

1.5 TRABAJOS PRECEDENTES

Se han realizado varias investigaciones con la finalidad de mejorar el proceso de calcinación durante la obtención del óxido de níquel calcinado por cuanto se relacionan a continuación algunos de estos estudios:

Rodríguez (1970) investiga sobre la modelación matemática del horno de calcinación con el objetivo de determinar y mejorar la influencia de las distintas variables del proceso sobre la calidad del óxido de níquel, pero el avance técnico y práctico del momento no le brinda muchas posibilidades dejando sin definir un modelo práctico para la operación de los calcinadores.

Milanés (1973) desarrolla una investigación sobre la influencia de la relación petróleo aire en la calidad del óxido de níquel, en las pruebas realizadas se demuestra como influyen las variaciones de estos parámetros y la importancia de esta relación, pero no se analizaron la influencia de los demás parámetros de operación en la calidad del óxido de níquel.

Font (1975) realiza una investigación donde analiza los parámetros que influyen de forma negativa sobre la calidad del óxido de níquel, hace una recopilación de los datos de la operación del período de la investigación, el trabajo aporta una serie de datos e informaciones que sirven de base para establecer las normas de operación en el calcinador 1 en la empresa René Ramos Latour. En el trabajo solo se hace un análisis de los factores que influyen de forma negativa sobre la calidad del óxido pero la información que se brinda sirve para tomar decisiones por parte de la planta de calcinación que permite mejorar la calidad de dicho óxido.

Domínguez (1977) en su investigación sobre la automatización del horno de calcinación buscando mejorar la operación para garantizar que los parámetros y variables del proceso sean precisos, no aborda sobre la composición físico-química del óxido de níquel.

Falcón (1977) realiza un estudio sobre la automatización de los calcinadores para lograr la confiabilidad en las mediciones de las variables y mejorar la operación del proceso, pero deja la calidad del óxido de níquel en segundo plano desde el punto de vista de la descripción matemática de procesos semejantes al de calcinación del carbonato básico de níquel.

Davinson (1981) realiza investigación sobre la descripción matemática de procesos semejantes al de calcinación del carbonato básico de níquel, donde no tienen en cuenta la dependencia de los parámetros y variables del horno, tanto del tiempo como de la posición, lo que hipotéticamente puede responder con más acierto a la realidad de los hornos rotatorios, los cuales en su mayoría poseen altas relaciones largo por diámetro.

Romero en (1991) realiza una investigación donde determina el calor de disociación del carbonato básico de níquel en el proceso de calcinación, en este caso los resultados sirven para determinar la calidad del óxido ya que este es un

parámetro que se mide en los calcinadores y en dependencia del cual el producto que se obtiene puede ser más o menos granulado, aunque los resultados son satisfactorios solo se hizo el estudio para evaluar el calor de disociación.

Columbié (1992) realiza una investigación donde se muestra la clasificación de los parámetros que intervienen en el proceso desde el punto de vista del control automático, se incluye además la modelación matemática y los resultados obtenidos en el estudio realizado, aunque no profundiza en la influencia de la operación en la calidad del producto y se limita a esta parte del proceso.

Chang (1997) realizó una investigación a escala industrial para establecer una metodología de balance energético, que permitió determinar la nueva norma de consumo de combustible, verificar la relación de masa CBN/NiS previamente establecida y diagnosticar el proceso energético en el horno de tambor rotatorio, con los resultados demuestra que la metodología de balance empleada es válida y que la relación másica de CBN/NiS = 3/1 es óptima, el estudio se limitó a la parte energética del proceso, que fueron satisfactorias pero estos resultados no se ajustan al proceso de Nicaro, pues no se adiciona sulfuro de níquel al calcinador.

Eich en investigaciones realizadas en 1997 señala que la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas químicas, ofreciendo un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivadas de la modelación de una planta de producción, pero es un modelo general y no profundiza en el proceso de calcinación en particular.

Columbié (2000) en la investigación recoge los resultados 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 base científica sobre la cual fueron obtenidas, la modelación se basa principalmente en el planteamiento de las ecuaciones 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 ecuaciones algebraicas. Aunque establecen la relación entre los diferentes coeficientes y parámetros físicos no profundiza en la calidad del producto final.

Columbié Navarro (2001) en la investigación realizada es basada en la concepción del modelo que tuvo en cuenta la técnica de los parámetros distribuidos, lo que significa el análisis de las variables en el dominio del tiempo y a lo largo del horno. En el horno rotatorio los procesos físico-químicos se efectúan acorde con la variación del tiempo de sometimiento y en correspondencia con el avance del carbonato en el interior del mismo. Es precisamente esta cualidad específica la reflejada en el carácter parcial de las ecuaciones diferenciales que lo modelan. Pero no aborda sobre la afectación que provoca la baja carga al calcinador y al producto final.

Chang (2003) En la investigación se realiza la calcinación del Carbonato Básico de Níquel (CBN) con adición del NiS, que se recupera del efluente generado en la destilación del licor producto (LP) de la lixiviación. Esta nueva situación 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 CBN/NiS previamente establecida y diagnosticar el proceso energético en el horno de tambor rotatorio industrial. Pero se demuestra que la metodología de balance empleada es válida.

Ramírez (2005) el trabajo tiene como objetivo hacer la caracterización de la pulpa de carbonato de níquel sedimentada obtenida de la destilación de la solución producto de la lixiviación carbonato amoniacal.

Para el cumplimiento del mismo se probaron tres métodos diferentes de poder establecer su contenido de sólidos por unidad de volumen, pero no tiene en cuenta el proceso de calcinación.

Peña (2006) investigan sobre la necesidad de conocer la influencia, que sobre la granulometría del óxido tiene la composición química de los productos y los parámetros en la operación de los procesos antes de la calcinación. En el trabajo se realiza un estudio estadístico con el fin de determinar la influencia, de la composición físico-química del carbonato básico de Níquel, de los parámetros de operación en la planta de Recuperación de Amoniac y del horno de calcinación, sobre la granulometría del óxido de Níquel. En el estudio se pretendió además clasificar granulometría de dicho óxido en clases de comportamientos y caracterizarla por sus variables.

García en el 2012 realiza una investigación encaminada a determinar la eficiencia de la planta de calcinación y sinterización donde tuvo en cuenta los parámetros de operación de cada una de las áreas y la influencia del carbonato básico de níquel que se obtiene en el área de calcinación en la calidad del óxido y de este en el producto final, a pesar de determinar la eficiencia de la planta, el trabajo no contempló los factores mecánicos que afectan la calidad de dicho óxido.

Conclusiones parciales

Mediante el estudio de la información consultada, se logra actualizar el contenido de la temática estudiada y su relación con las teóricas existentes, y se dio a conocer las variables que inciden sobre el proceso.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

En el capítulo se presentan los materiales, métodos y procedimientos experimentales utilizados para la calcinación del carbonato básico de níquel del proceso carbonato amoniacal, con el objetivo de caracterizar el proceso, así como la descripción del mismo.

2.2 Materiales

Para el estudio se utilizó el óxido de níquel calcinado obtenido del horno de calcinación uno de la empresa Comandante René Ramos Latour, con el cual se realizaron las evaluaciones correspondientes.

El proceso de calcinación de níquel constituye una importante etapa dentro de esta planta niquelífera, la cual usa como materia prima mineral laterítico y lixiviación amoniacal. En este proceso se obtiene óxido de níquel a partir de carbonato básico de níquel en un horno rotatorio (kiln). En la primera etapa dentro del horno el material se seca, eliminándose totalmente el agua libre y parcialmente de la constitución de las moléculas. En la segunda etapa ocurre la calcinación consistente en la descomposición del carbonato, En la etapa final (la 3ra.) tiene lugar la combustión, donde la temperatura alcanza valores entre 1 000 y 1 400 °C, aquí ya se obtiene el producto final que pasa a la zona de enfriamiento antes de su descarga.

Existe, invariablemente, incertidumbre en las características del material procesado, que pueden atribuirse al contenido de humedad variable y a la naturaleza también variable de su composición química. El proceso de calcinación es, por tanto, no lineal y no estacionario por naturaleza. El horno que analizamos consiste en este caso concreto en un cilindro rotatorio de acero, éste posee una ligera inclinación con respecto a la horizontal y está revestido interiormente con aislante refractario, dicho cilindro rota a una velocidad constante y el material es alimentado por el extremo superior. La inclinación del cilindro y su rotación

permiten que el material se desplace a través de las distintas zonas (etapas antes descritas).

El calor en el horno se provee mediante la combustión de petróleo atomizado con vapor y mezclado con aire en un quemador situado en la parte inferior. Los gases que se producen durante el proceso son extraídos continuamente mediante un ventilador de tiro inducido, por la parte superior; mientras que el polvo arrastrado por éstos se recupera en un ciclón y un precipitador electrostático dispuestos en serie y se devuelve al horno a través de transportadores sin fin.

2.3 Equipo

El estudio se realizó en el calcinador número uno, el cual se encontraba en operación debido al procesamiento de bajos tonelajes de mineral en la empresa; este es de menor capacidad, por lo que para estas condiciones operativas, propicia mejor ajuste de los parámetros de operación.

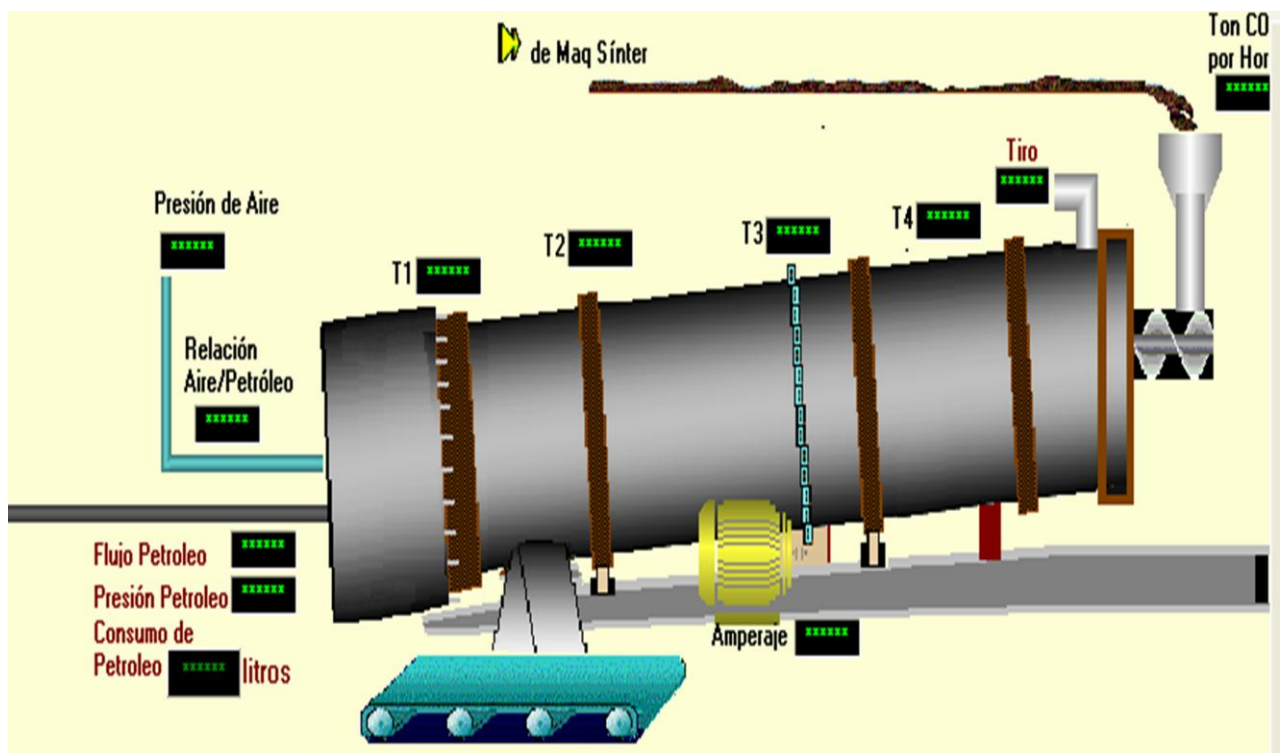


Figura 2.1 Esquema del horno de calcinación uno

Tabla 2.1 Características del Horno de calcinación uno

Características	Dimensiones
Largo	40,2 m
Diámetro interior	3,1 m
Espesor del material	19,0 mm
Velocidad de trabajo 0,079 rad/kg.	(45rph)
Número de ventiladores	2
Número de bomba	2
Número de rodillos verticales	2
Diámetro de los rodillos verticales	520,7 mm
Alto de los rodillos verticales	108 mm
Número de rodillos horizontales	4
Diámetro de los rodillos horizontales	1067 mm
Largo de los rodillos	1200 mm
Número de quemadores	1
Voltaje	220/240 volt
Consumo de petróleo	430Kg /ton de óxido producido
Consumo de aceite	378 litros /año

Además de sus características este equipo trabaja en posición horizontal, con un ángulo de inclinación de 1,8°. Está montado sobre base de concreto, sujeto con pernos de acero.

2.4 Descripción y especificaciones de los equipos e instrumentos

Tabla 2.2 Equipos anexos

Equipos	Función
Motor eléctrico	Rotar el horno de calcinación.
Motor diesel	Rotar el horno de calcinación, en casos de emergencias.
Ventilador de aire primario con su motor.	Suministrar aire para la combustión que lleva a efecto en el horno de calcinación.

Bombas de petróleo con su motor.	Bombear el petróleo para el Horno de Calcinación
Calentadores de petróleo.	Calentar el petróleo que se alimenta al quemador del horno de calcinación.
Ventilador de tiro con su motor	Arrastrar los gases producidos por la combustión y el polvo por las diferentes zonas del horno.
Sinfín de carbonato con su motor.	Introducir en el horno de calcinación el carbonato de níquel que descargan los filtros rotatorios al vacío y el polvo de recirculación del sistema de colección de polvo.
Termopares.	Detectar y registrar las temperaturas en las distintas zonas del Horno de calcinación. Son cuatro en total del tipo cromel-alumel (Aleación cromo-níquel en proporción 29 a 9 respectivamente). Trabajan en posición vertical. Están situados para determinar las siguientes temperaturas.
Quemadores.	Producir la mezcla de petróleo y vapor automatizado para que se produzca una buena combustión
Válvula (Dámper)	Regulación del tiro en el horno.
Pizarra y panel de control.	Control de la operación.

2.5 Estado actual de la automatización del proceso de calcinación

Este es uno de los aspectos más importante para el control de las operaciones, actualmente la planta se encuentra desde el punto de vista de su automatización y control, en una etapa avanzada donde se contempla la medición y registro de todos los parámetros del proceso, para ello se utiliza el sistema de supervisión y control de procesos EROS. El sistema de control del proceso de calcinación está formado por un panel general de control, desde donde el operador controla y ajusta la operación. El operador cuenta además con una computadora con un sistema de control informativo que es la encargada de realizar los reportes por turnos así como de registrar el comportamiento de las distintas variables del

proceso, incluyendo uno de los parámetros más importantes para obtener una buena calidad del óxido el perfil de temperatura de las diferentes zonas del horno, por medio de termopares. Además del perfil de temperatura en el horno de calcinación se controlan otros parámetros, que están en la carta tecnológica del proceso.

2.5.1 Carta Tecnológica del Proceso Calcinador uno

Se utilizó la nueva carta tecnológica, de los parámetros de operación implementada, para cumplir con los nuevos requisitos pactados con el cliente.

Tabla 2.3 Carta Tecnológica del Calcinador uno

Parámetros	Rango
Temperatura No 3	750 a 850 °C
Temperatura No 4	600 a 700 °C
Temperatura No 5	300 a 380 °C
Flujo de petróleo	70L/t carbonato
Presión del aire primario	0 a 160 mm en H ₂ O
Relación petróleo/aire	11 a 13
Tiro inducido	0,0 a -18,5mm H ₂ O
Presión del vapor con respecto a la presión de petróleo en quemador	1,0 a 1,5 kg /cm ²
Contenido de oxígeno en los gases	1,0 a 1,2 %
Amperaje del motor del horno	14 a 19 A
Alimentación de Carbonato de Níquel al Horno (carga)	6 a 10 ton/h
Velocidad de rotación revolución por hora del horno	45 rpm
Densidad del óxido producido	2,75 a 2,85 g/cm ³
Contenido de humedad y hierro del carbonato	H ₂ O ≤ 66,0 % Fe ≤ 0,15 %
Características del óxido de níquel calcinado	Ni-75,5 a 77,5 % Co ≤ 0,70 % Fe ≤ 0,50 % S ≤ 0,03 %

2.5.2 Medidas para garantizar un producto dentro de especificación

El proceso de intercambio calórico tiene como fuerza motriz el gradiente de temperatura dentro del horno, y es el principal factor en la obtención de un producto con la calidad requerida. Por esto es importante mantener el perfil de temperaturas dentro del horno. A su vez, en la práctica, este perfil está regido por la temperatura en la zona de secado.

Para operar con un consumo mínimo posible de petróleo, es decir, de forma eficiente, se debe lograr una combustión adecuada. Esto se consigue manteniendo una relación correcta petróleo-aire vapor de atomización. Una combustión adecuada garantiza, además, una atmósfera favorable dentro del horno para la reacción química y evita la presencia de azufre en el producto calcinado. Entre 20 y 40 % del aire necesario para la combustión (aire primario), se introduce en el horno junto con el combustible, la otra parte del aire necesario (aire secundario), se obtiene mediante el tiro inducido y penetra al horno a través del sistema de descarga del producto final, contribuyendo a su enfriamiento, por tanto, entra caliente al horno. Por otra parte, el tiro inducido modifica la forma de la llama, lo que permite transportar calor de una zona a otra del horno.

Producir la mayor cantidad posible de óxido se logra manteniendo un flujo alto y estable de material dentro del horno, lo que depende básicamente de la operación de los equipos precedentes, así como de los otros subprocesos de la Planta.

La operación del horno debe cumplir los siguientes objetivos:

- Obtener un producto con calidad, lo que se expresa a través de las especificaciones siguientes: (níquel 75,5 a 77,5 %, azufre 0,03 %, hierro 0,50 %, cobalto 0,70 %, densidad 2,75 a 2,85 g/cm³)
- Obtener la mayor cantidad posible de producto en la unidad de tiempo.
- Consumir la menor cantidad posible de petróleo.

Según la experiencia acumulada durante años por el personal encargado del trabajo del horno para obtener un producto, dentro de las especificaciones dadas, se deben tener en cuenta los tres aspectos principales siguientes:

- Mantener cierto perfil dado de temperaturas dentro del horno.
- Lograr una buena combustión.
- Mantener una alimentación estable.

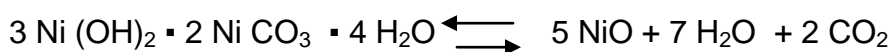
2.5.3 Definición del modelo teórico para el proceso de calcinación

Para definir el modelo teórico del proceso de calcinación se establecen las variables de entrada, de salida y las perturbaciones propias del proceso, se exponen las ecuaciones generales que rigen el balance de materiales del área de calcinación y se obtiene el modelo siguiente:

$$Ni = (t \text{ CBN alimentado} \cdot \%Ni \text{ CBN}) - (100 - \%H_2O \text{ CBN}) / 100$$

El carbonato básico de níquel entra al horno con una humedad de 66,0 % de agua aproximadamente, y una masa total de carbonato básico de níquel de 49,6 %.

El producto del carbonato básico de níquel se determina por la reacción de su descomposición.



Para realizar el cálculo de la carga correcta de carbonato a alimentar al calcinador y el balance de masa se parte del destilado por hora, concentración de níquel en el licor producto (LP), humedad del carbonato y dos factores numéricos que se obtienen de llevar los g/L a kg/m³, cálculo de la cantidad de carbonato base húmedo y seco.

$$(Ni \text{ m}^3/h \text{ (destilado)} \cdot [Ni] \text{ g/L (LP)} \cdot 2) / ((100 - \% H_2O) \cdot 10) = Ni \text{ t (húmeda)}$$

Cálculo de carga de carbonato básico de níquel al calcinador para obtener las toneladas de óxido de níquel:

$$((t \text{ CBN} \cdot \% Ni \text{ en CBN}) \cdot (100 - \% H_2O)) / 100 = Ni \text{ t (en el óxido)}$$

2.6 Metodología empleada

Se empleó la metodología de la modelación estadística. Donde se realiza un análisis de los diferentes parámetros operativos del proceso con respecto a la carga alimentada al calcinador uno, para el estudio se creó una base de datos del período analizado, comprendido entre los meses de noviembre del 2011 hasta febrero del 2012. Para ello se utilizó como herramienta el Microsoft Excel el

Origin Pro para la representación gráfica y el programa Statgraphics, para la obtención de los modelos.

Se aplicó el Microsoft Excel para la representación gráfica, obtención de líneas de tendencia y el StatGraphics, el cual brinda bondades tales como:

R-Cuadrado (R^2): Denominado coeficiente de determinación, es una medida del grado de asociación lineal entre la variable respuesta o dependiente (Y) y las variables predictoras o independientes. El R^2 ajustado por los grados de libertad (g.l.) tiene en cuenta el tamaño del conjunto de datos y su valor es ligeramente inferior al de su correspondiente R^2 . El rango del R-cuadrado es entre 0 % y 100 % y mide que tan bien el modelo estimado explica los datos observados de la respuesta.

Error Estándar de la Estimación: El error estándar de estimación mide la variabilidad o dispersión de los valores observados alrededor de la recta de regresión. Es la desviación estándar del error experimental.

Error absoluto de la Media: Es el intervalo de confianza con el cual probablemente encontraremos la medición ($\pm \delta x$). Es el error promedio de la predicción.

Estadístico Durbin-Watson (DW): Es una herramienta estadística que detecta si los residuales de una regresión están autocorrelacionados. La autocorrelación es un problema estadístico donde los residuales de una regresión de un período de tiempo no son al azar, sino que tienen algún tipo de patrón. Este problema no afecta los coeficientes del estimado, pero tiene un impacto en los errores estándar. Si la regresión tiene problemas de autocorrelación, puede ser que haya resultados que parezcan ser estadísticamente significativos, pero que no sea así. Cuando DW es mayor que 1,4, indica que el estadístico F garantiza buenos resultados en la hipótesis, y demuestra que el proceso que se estudia es completamente independiente y representativo de los datos.

Auto correlación residual Lag 1: Una medición de la correlación serial en los residuales, basada sobre el orden en que aparecen las corridas en la base de datos. Valores cercanos a cero corresponden a residuales.

Los datos del período estudiado se organizaron los valores de la carga en orden descendiente (anexo 5) y se elaboró la tabla 2.4 con los promedios de los datos utilizados del período evaluado los cuales son:

Tabla 2.4 Promedios de los parámetros de operación respecto a la carga

Carga CBN t/h	Densidad. CBN g/L	Humedad CBN %	Tem p4 °C	Temp 5 °C	Aire primari o mm H ₂ O	Relación [Pet./Aire]	Tiro Induc. mm H ₂ O	Gases %	
								CO ₂	O ₂
4	118	68,35	657	319	34	13	7,6	15,5	1,1
5	148	68,27	605	291	35	13	10,4	15,5	1,1
6	143	68,33	613	294	35	13	9,4	15,4	1,0
7	171	68,38	600	286	38	12	11,6	15,4	1,1
8	196	67,00	590	273	39	12	12,1	15,6	1,1
Carga CBN t/h	Consumo Fuel L/h		Densidad Oxido g/cm ³		Ni %	Co %	Fe %	S %	
4	454		2,83		77,02	0,33	0,18	0,011	
5	458		2,84		77,20	0,48	0,21	0,004	
6	452		2,84		77,14	0,48	0,20	0,006	
7	460		2,85		77,34	0,59	0,19	0,005	
8	468		2,85		78,26	0,58	0,18	0,007	

2.7 Identificación de la influencia de los parámetros en al variación de la Carga

Para identificar **los parámetros que influyen en variación de** la carga de carbonato de níquel alimentada al Horno calcinación en el proceso de calcinación, para garantizar la calidad del óxido, se utilizó el diagrama de causa –efecto o de Ishikawa, el que se muestra en la figura 2.2

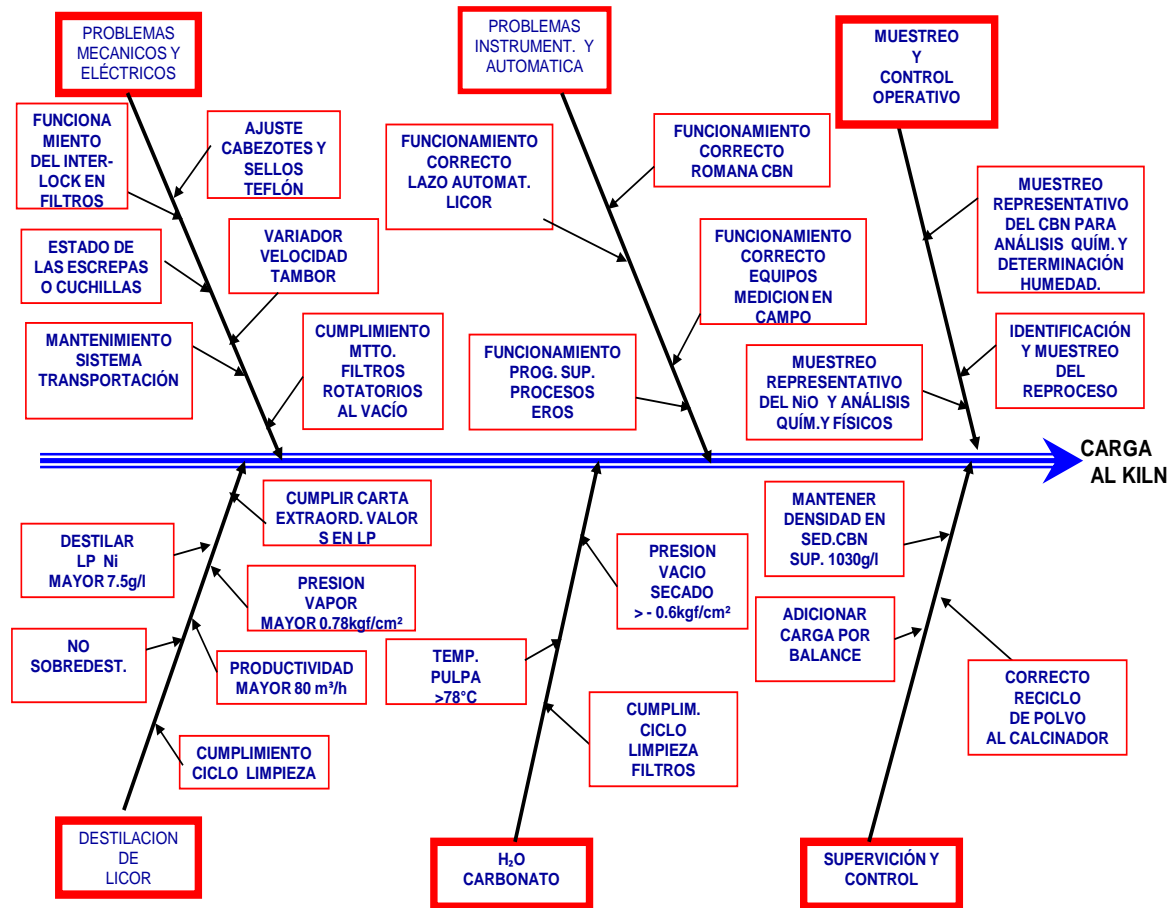


Figura 2.2 Diagrama de causa-efecto (Ishikawa)

Se utiliza la técnica gráfica para definir y encontrar las causas que provocan un problema, en este caso se refiere a la carga de carbonato de níquel alimentada al calcinador. Para la elaboración del diagrama se usó la técnica de la tormenta de ideas, basada en el trabajo en grupo.

La figura muestra una estructura similar a una espina de pescado en la cual la característica problemática de la calidad se representa en la parte derecha de la hoja y se señala mediante la espina central la carga al calcinador.

El grupo de trabajo mediante la técnica de la tormenta de ideas formula los factores principales que son las causas generales del problema que inciden en la variación de la carga se representan, en forma de flechas que parten sesgada desde la espina central:

- Destilación de licor
- Humedad del carbonato
- Supervisión del proceso
- Problemas mecánicos y eléctricos
- Problemas de instrumentación y automática
- Muestreo y control operativo

Las causas secundarias (sub-causas) se representan mediante flechas pequeñas que surgen de las causas fundamentales.

2.8 Influencia de la Carga de Carbonato de Níquel alimentada al Horno con respecto a las variables del proceso

Las variaciones en la carga de carbonato de níquel alimentado al horno traen como consecuencia variaciones en las temperaturas dentro del horno el flujo de petróleo y aire primario, así como las variaciones de las concentraciones de CO₂; O₂ y CO de los gases de salida y en la densidad del óxido producido.

2.8.1 Influencia de la Humedad del Carbonato de Níquel con respecto a la carga

La humedad de entrada está en el rango de 60 a 65 % respecto al peso de la carga alimentada, si se incrementan estos valores teóricos para una misma unidad de masa incide sobre el cumplimiento del balance de energía y los parámetros de operación.

2.8.2 Influencia de la Densidad del carbonato básico de níquel con respecto al óxido obtenido

La influencia de la densidad del carbonato sobre el óxido de níquel calcinado está relacionada directamente con la variación del níquel en el licor producto y el contenido de azufre en el licor.

2.8.3 Influencia de la Carga en el Tiro inducido por el ventilador

El tiro inducido proporciona un incremento de oxígeno que favorece a la combustión completa del petróleo a la vez que extrae los gases producidos por la combustión y los que desprenden el carbonato al ser sometido al proceso físico-químico.

Las causas que originan su variación son:

- Cambios en los flujos de petróleo y aire primario.
- Cambios en las temperaturas dentro del horno.
- Variaciones en la carga de carbonato alimentada

2.8.4 Influencia de la Carga en la variación del contenido de gases dentro del horno

Las variaciones en la carga de carbonato de níquel alimentado al horno traen como consecuencia variaciones de las concentraciones de los gases de salida, ya que el control de los mismos, permiten conocer si la combustión del petróleo es completa o incompleta y si se está trabajando en un medio reductor adecuado, ambas cuestiones inciden directamente sobre la calidad del óxido. Si se detecta la presencia de monóxido de carbono, esto indicará que la combustión del petróleo es incompleta y por tanto el óxido puede salir contaminado en azufre. Si se detectan alto contenido de oxígeno, esto indica que el medio es muy oxidante y puede producirse un óxido polvoriento de baja densidad y con la posibilidad de estar contaminado con azufre.

Composición de los gases a la salida del horno

Gases	%.
CO ₂	13,0 a 16,0
O ₂	0,6 a 1,2
CO	0,0

2.8.5 Influencia de la Carga en la densidad del óxido que se produce

Este parámetro variará de acuerdo a la carga del calcinador y afectara al régimen de temperatura y el tipo de medio que se esté operando, es decir según sea el medio oxidante o reductor. Los análisis de los gases de salida son los que permiten conocer si la combustión del petróleo es completa o incompleta y si se

está trabajando en un medio reductor adecuado, ambas cuestiones inciden directamente sobre la calidad del óxido.

2.8.6 Influencia de la Carga en las temperaturas del horno

Se hace necesario que se trabaje con las temperaturas establecidas en las diferentes zonas del horno, al mismo tiempo que se lleve un estricto control de los resultados de los análisis de los gases, para que los valores de los mismos se mantengan dentro de la norma establecida.

2.9 Método de muestreo y análisis

2.9.1 Método de muestreo y análisis del carbonato básico de níquel húmedo, muestra (N – 65)

La muestra estará ubicada al final de la correa transportadora de carbonato básico de níquel.

Se utilizará una cuchara metálica: De forma rectangular que se emplea para tomar los incrementos y que tendrá las dimensiones siguientes 0,08 m x 0,04 m x 0,02 m, se envasará en un pomo plástico con cierre hermético de 1000 mL de capacidad. Todos los utensilios utilizados en el muestreo estarán completamente limpios al iniciarse el muestreo.

La cantidad de muestra a tomar será de 0,100 kg formando un compósito de 0,600 kg. Se tomará una muestra puntual cada dos horas para formar un compósito de 12 horas.

La muestra compósito se traslada al Laboratorio Central para su análisis.

- Determinación de la humedad. Método Gravimétrico

La muestra de ensayo se seca a la temperatura de 105 a 110 °C hasta peso constante. El contenido de humedad viene dado por la diferencia entre los pesos de la muestra antes y después del secado.

Se pesan 10 g \pm 0.0002 g de la muestra en un pesa filtro de cristal con tapa esmerilada, previamente tapado y se coloca abierto en una estufa a 105 a 110 °C durante dos horas.

Se saca de la estufa, se cierra el pesa filtro y se introduce en una desecadora que contenga una sustancia higroscópica adecuada, destapándola de nuevo completamente y se deja enfriar.

Se pesa y se vuelve a colocar en la estufa por 30 minutos, repitiéndose estas operaciones hasta alcanzar peso constante.

Se extraen 1g para el análisis químico de hierro.

- Método para calcular la humedad

La humedad (H₂O) se calcula por la fórmula siguiente

$$\% \text{ H}_2\text{O} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100$$

Donde:

m₁ ----- peso de la muestra tomada en gramos

m₂ ----- peso de la muestra seca

El resultado se da aproximado hasta la centésima.

2.9.2 Norma de muestreo del óxido de níquel calcinado NEIB 03-07-11

El objetivo de la norma es establecer el método de muestreo de óxido de níquel calcinado para obtener una muestra representativa del lote, mediante la cual se determinan las características del producto.

De la muestra final se toman dos muestras de 100 g, una para análisis químico y una para el cliente.

La muestra para el cliente será envasada en un frasco plástico debidamente sellado e identificado con los siguientes datos:

- Código.
- Número del lote.
- Logotipo de la Empresa.

La muestra para el cliente es entregada por el muestrero al controlador de producto final y la muestra para análisis químico es entregada al analista en el cuarto de producto final.

2.9.3 Método para la determinación de los componentes del óxido de Níquel

NC 621-1-208 Óxido de Níquel + Cobalto parte I “Determinación de Níquel y Cobalto total”, método electrogravimétrico.

La muestra de ensayo se disuelve en presencia de ácido sulfúrico diluido y clorato de potasio, las sales resultantes se redisuelven con agua. El hierro y el manganeso se separan por filtración previa adición de hidróxido de amonio y persulfato de amonio. La descomposición del residuo insoluble se realiza por fusión empleando piro sulfato de potasio o de sodio.

La deposición electrolítica del níquel se realiza empleando un electrodo de malla de platino-iridio, determinando la masa antes y después de la electrólisis.

2.9.4 Método de determinación de Cobalto, Hierro, Zinc, y Manganeso

NC 621-2-2011 Óxido de Níquel + Cobalto Parte 2: “Determinación de Cobalto, Hierro, Zinc, y Manganeso”, método absorción atómica.

El método para determinar el contenido de cobalto, hierro, cobre y zinc en los óxidos de níquel tiene como principio disolver las muestras en una mezcla de ácido clorhídrico, nítrico y perclórico, se diluye a un volumen determinado, y posteriormente se mide la absorbencia en un espectrofotómetro de absorción atómica, al comparar las mediciones contra una curva de calibración de concentración conocida para cada elemento en particular.

2.9 5 Método para la determinación de azufre combustible

NC 261-3-2011 Óxido de Níquel + Cobalto Parte 2: “Determinación de Azufre y Carbonato.

El método se basa en la combustión de la muestra en presencia de oxígeno, empleando un acelerador, en un horno de alta frecuencia, dando lugar a la formación de dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2), logrando la determinación cuantitativa de estos componentes a través del analizador infrarrojo, en correspondencia con el peso de la muestra y los factores de calibración.

Nota: El flujo ininterrumpido de oxígeno garantiza la limpieza del sistema, evitando además la ocurrencia de interferencias o envenenamiento de los sensores u otras partes del analizador.

Conclusiones parciales

1. La aplicación del Software StatGraphics brinda bondades estadísticas que facilitan el ajuste del modelo del diseño experimental y valorar la calidad del ajuste.
2. Mediante el gráfico de causas- efecto de Ishikawa se identifican las causas generales fundamentales y las secundarias que originan el problema principal, la variación de la carga que afecta la calidad del óxido de níquel.
3. Se utiliza la técnica gráfica para definir y encontrar las causas que provocan un problema, en este caso se refiere a la carga de carbonato de níquel alimentada al calcinador.
4. El Sistema de Gestión de la Calidad del laboratorio analítico permite que las determinaciones analíticas sean repetibles y reproducibles, elevando la confiabilidad de los resultados.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, para lo cual se establece una comparación con trabajos precedentes, todos sobre la base de la Influencia de la carga en el horno.

3.1 Contenido relativo de los metales en función de la carga

En la figura 3.1 se muestra el contenido relativo de los metales Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre de en función de la carga del horno de calcinación uno.

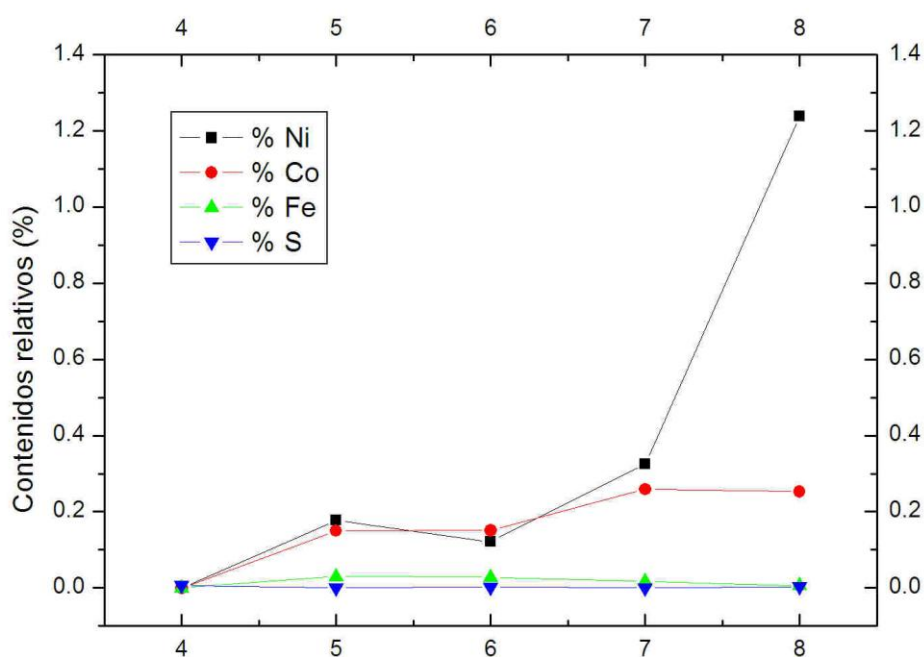


Figura 3.1 Comportamiento del contenido relativo de los metales en función de la carga del horno

En la figura 3.1 se muestra el contenido relativo de los metales de Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre en función de la carga del horno de calcinación uno. Los valores se llevaron a relativos para obtener una correlación entre los datos, acercando la escala. Se observa un aumento en el contenido de níquel en el óxido calcinado con la carga. Además podemos ver que la carga se comportó

entre 4 a 8 t/h en el período analizado, lo que indica que se operó con una carga baja.

En esta figura se muestra el comportamiento del contenido de los metales Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre en función de la carga del horno de calcinación uno por separado.

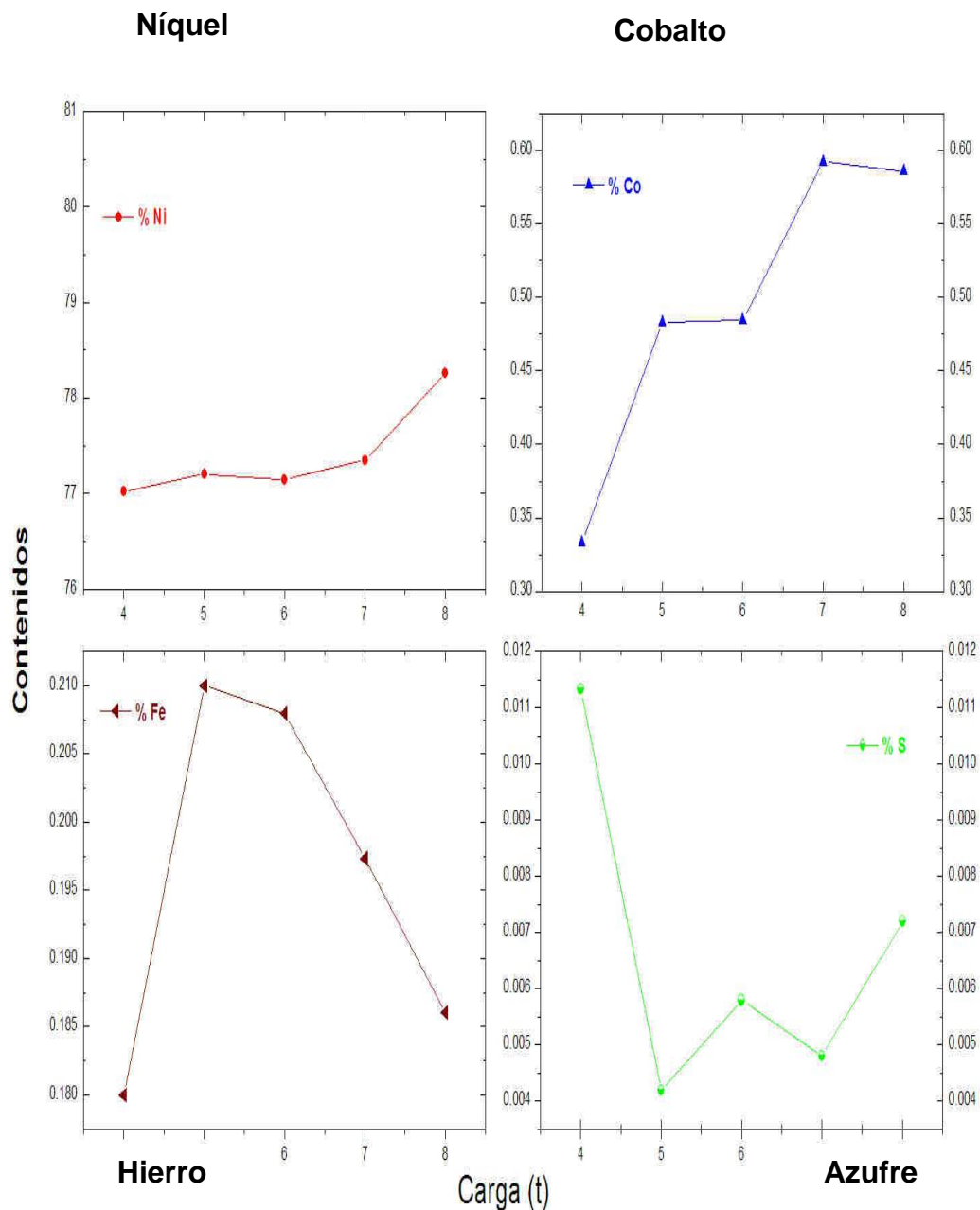


Figura 3.2 comportamiento del contenido real de los metales Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre en función de la carga del horno de calcinación uno

En el diagrama se observa el aumento del contenido de níquel, en el óxido de níquel calcinado en relación con la carga, esto está dado por operar el horno con una relación petróleo-aire alta por encima de 12, operándose con una atmósfera reductora, así como la incidencia de la llama sobre la porción del óxido que se desplaza por la zona más cercana al quemador, favoreciendo la metalización del producto.

Los valores de cobalto y hierro cumplen con los requisitos establecidos con el cliente y su variación depende fundamentalmente de otros factores externos al proceso de calcinación.

El elemento azufre a pesar de cumplir los requisitos establecidos con el cliente, se observa que varía en dependencia de la carga alimentada.

Análisis de la varianza

Comportamiento del níquel

Modelo codificado:

$$Ni = 75,8212 + 0,262442 \cdot \text{CargaCBN} \quad (3.1)$$

R-cuadrado = 69,4103 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 59,2137 porcentaje

Error estándar de est. = 0,318088

Error absoluto medio = 0,224554

Estadístico de Durbin-Watson = 1,76769
(P=0,1055)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,113879

Análisis de la Varianza

Comportamiento del hierro

Modelo codificado:

$$Fe = 0,196653 - 0,0000667 \cdot \text{CargaCBN} \quad (3.3)$$

Análisis de la varianza

Comportamiento del cobalto

Modelo codificado:

$$Co = 0,12713 + 0,0614542 \cdot \text{CargaCBN} \quad (3.2)$$

R-cuadrado = 85,5621 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 80,7495 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0460895

Error absoluto medio = 0,0334994

Estadístico de Durbin-Watson = 2,85009
(P=0,0113)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,632385

Análisis de la Varianza

Comportamiento para el azufre

Modelo codificado:

$$S = 0,01122 - 0,00076 \cdot \text{CargaCBN} \quad (3.4)$$

R-cuadrado = 0,00639386 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0152289

Error absoluto medio = 0,0106022

Estadístico de Durbin-Watson = 1,64691 (P=0,0748)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,0900021

R-cuadrado = 18,0095 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,00296063

Error absoluto medio = 0,002072

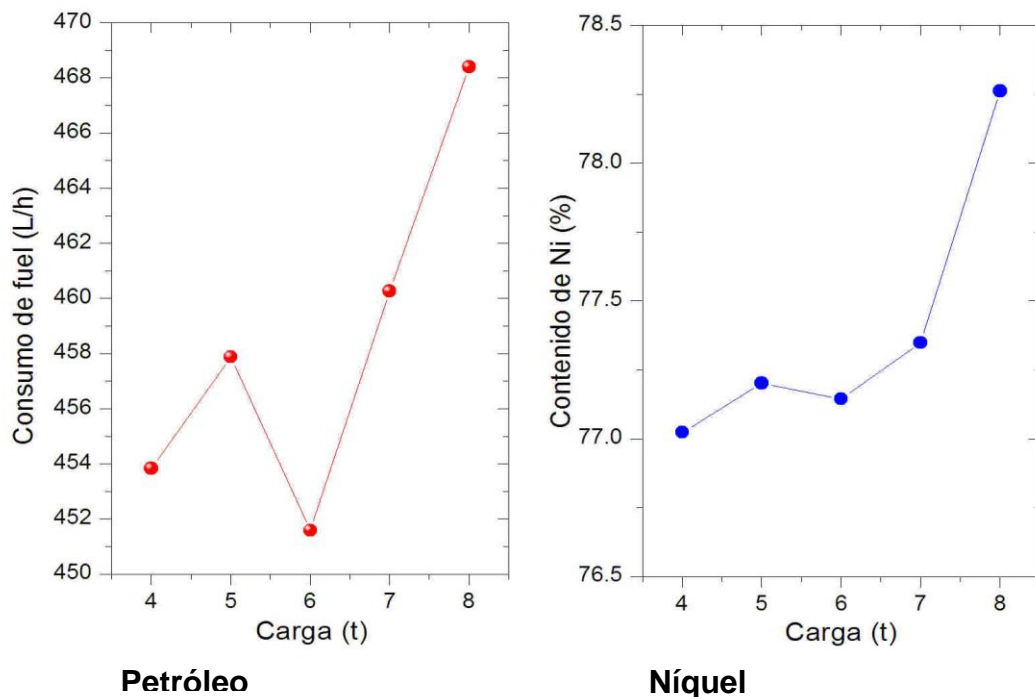
Estadístico de Durbin-Watson = 2,12232 (P=0,1402)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,326939

Para cada elemento se realizó el análisis de la varianza y se obtuvo el modelo de regresión lineal codificada (ecuaciones 3.1 para el níquel, 3.2 para el cobalto, 3.3 para el hierro y 3.4 para el azufre)

3.2 Consumo de petróleo en correspondencia de la carga

En la figura 3.3 se refleja el consumo de petróleo en correspondencia de la carga de carbonato en el horno de calcinación uno, vemos que tiene una proporcionalidad directa entre el petróleo y la carga de carbonato al horno.



Petróleo **Níquel**
Figura 3.3 El consumo de petróleo en correspondencia de la carga de carbonato en el horno de calcinación uno

En el diagrama se observa que a medida que aumenta la carga, aumentó el consumo de petróleo, obteniéndose menor consumo para la carga de 6 toneladas. El consumo de petróleo, estuvo favorecido por la estabilización de la humedad del carbonato y la carga evitando movimientos en el suministro del petróleo al calcinador y por consiguiente ahorro del mismo. Además se trabajó en mejorar la diferencia presión de vapor- petróleo (de 1,0 a 1,5) favoreciendo una mejor atomización del petróleo y el ajuste de la relación petróleo- aire (de 11,0 a 12,0)

Análisis de Varianza

Comportamiento consumo de petróleo

Modelo codificado: $\text{Cons Fuel} = 439,477 + 3,1525 \cdot \text{Carga CBN}$ (3.5)

R-cuadrado = 58,1042 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 44,1389 porcentaje

Error estándar de est. = 4,88738

Error absoluto medio = 3,23364

Estadístico de Durbin-Watson = 2,02759 (P=0,1754)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,13073

Para el consumo de petróleo se realizó el análisis de la varianza y se obtuvo el modelo de regresión lineal codificada (ecuación 3.5)

3.3 Relación petróleo – aire con los contenidos relativos de Níquel, cobalto, hierro y azufre

En la figura 3.4 se representa la relación petróleo – aire con los contenidos relativos de Níquel, cobalto, hierro y azufre.

La relación petróleo – aire como se observa se mantenía con valores altos por encima de 12,0 operándose con una atmosfera reductora, lo que propicia la sobre metalización del óxido calcinado. Lo correcto es trabajar este parámetro entre valores de 11,0 a 12,0 con una dosis mayor de aire primario.

Para la relación petróleo – aire se realizó el análisis de la varianza y se obtuvo el modelo de regresión lineal codificada (ecuación 3.6)

En la figura 3.4 se representa la relación petróleo - aire con los contenidos relativos de metales de Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre.

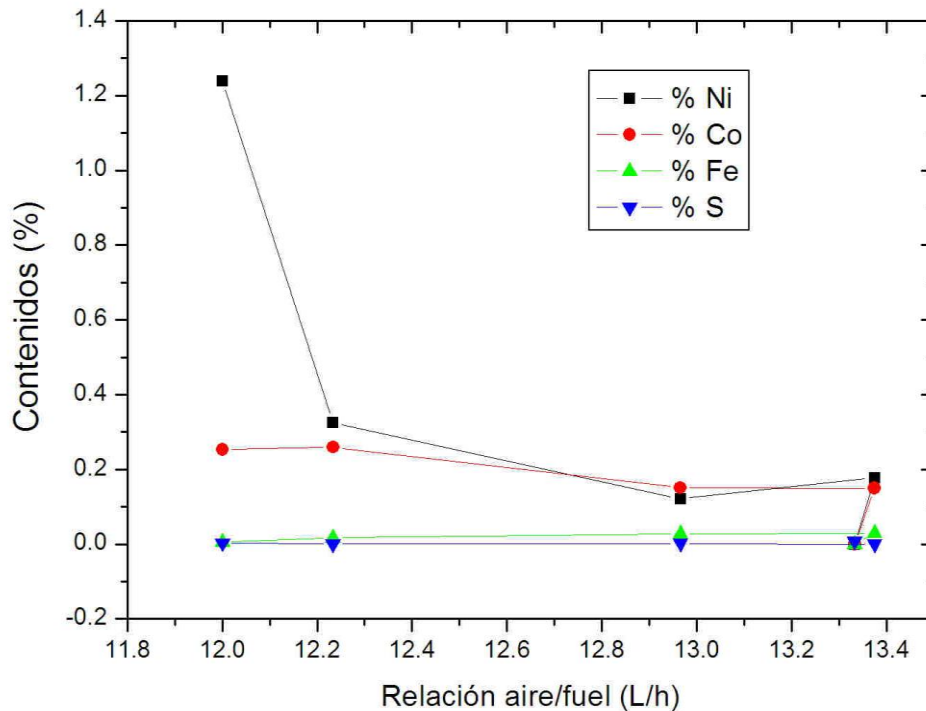


Figura 3.4 Relación petróleo - aire con los contenidos relativo de metales de Níquel, Cobalto, Hierro y Azufre

Análisis de la varianza de: Relación petróleo - aire

Análisis de Varianza

Comportamiento relación petróleo - aire

Modelo codificado: Rel. Petro - Aire = 15,0664 – 0,380833·Carga CBN (3.6)

R-cuadrado = 90,5414 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87,3885 porcentaje

Error estándar de est. = 0,224732

Error absoluto medio = 0,158724

Estadístico de Durbin-Watson = 2,14193 (P=0,1335)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,217467

3.4 Relación Densidad del carbonato- Humedad-Temperaturas con respecto a la carga

En diagrama observamos la relación Densidad del carbonato- Humedad- Temperaturas 4 y 5 a ($^{\circ}$ C) con respecto a la carga. se refleja en la figura 3.5

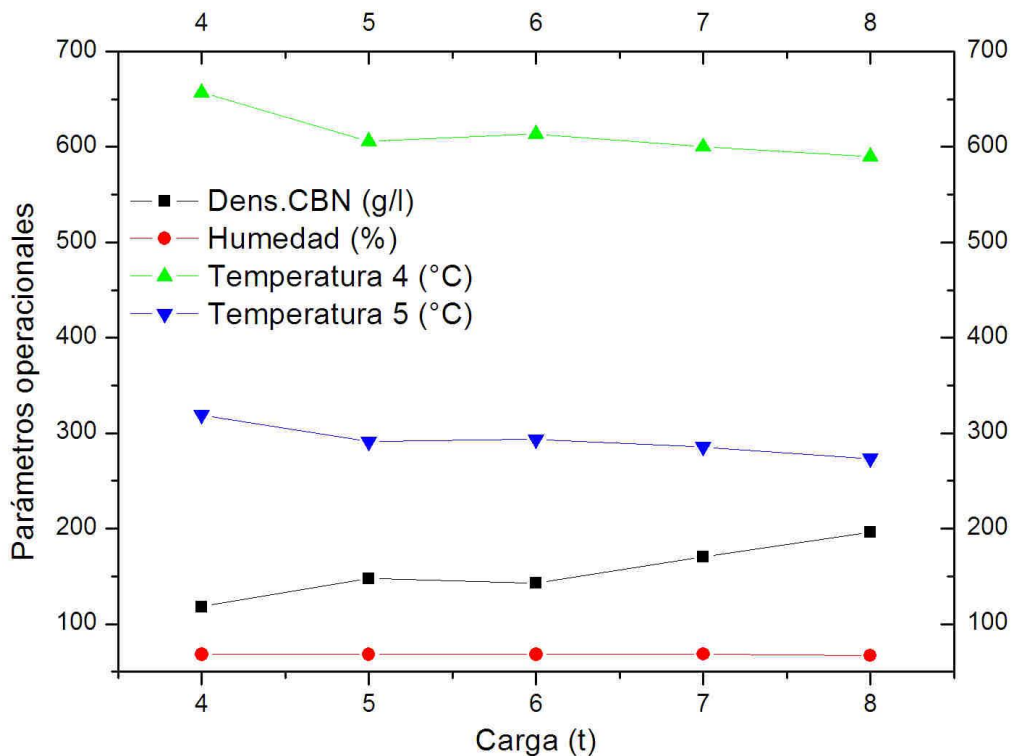


Figura 3.5 Relación Densidad del carbonato- Humedad- Temperaturas 4 y 5 a ($^{\circ}$ C) con respecto a la carga

Como se observa con el aumento la densidad del carbonato aumenta proporcionalmente la carga. La humedad mantiene valores estables lo que favorece el sostenimiento de la carga y evitar movimientos en la automática que suministra el petróleo, todo esto favorece estabilidad en el perfil térmico (temperatura 4 zona cadenas y temperatura 5 zona secado) lo cuál permite lograr una mejor operación.

Para cada parámetro se realizó el análisis de la varianza y se obtuvo el modelo de regresión lineal codificada (ecuaciones 3.7 para la densidad del carbonato, 3.8

para la Humedad del carbonato, 3.9 para la temperatura 4 zona de cadenas y 3.10 para la temperatura 5 zona secado)

Análisis de la varianza de: Densidad del carbonato, Humedad, Temperatura 4 y temperatura 5

Análisis de Varianza

Comportamiento densidad carbonato

Modelo codificado:

$$\text{Dens. CBN} = 47,9517 + 17,85 \cdot \text{Carga CBN (3,7)}$$

R-cuadrado = 91,6378 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,8504 porcentaje

Error estándar de est. = 9,84466

Error absoluto medio = 6,21862

Estadístico de Durbin-Watson = 2,73636 (P=0,0189)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,417331

Análisis de Varianza

Comportamiento humedad carbonato

Modelo codificado

$$\text{Humedad CBN} = 69,6215 - 0,258833 \cdot \text{Carga CBN (3,8)}$$

R-cuadrado = 46,7275 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 28,97 porcentaje

Error estándar de est. = 0,504574

Error absoluto medio = 0,335782

Estadístico de Durbin-Watson = 1,96892 (P=0,1740)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,219644

Análisis de Varianza

Comportamiento Temperatura 4

Modelo codificado:

$$\text{Temperatura 4 CBN} = 697,003 - 13,9517 \cdot \text{Carga CBN (3.9)}$$

R-cuadrado = 72,6206 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 63,4942 porcentaje

Error estándar de est. = 15,6404

Error absoluto medio = 8,59795

Estadístico de Durbin-Watson = 2,55592

Análisis de Varianza

Comportamiento Temperatura 5

Modelo codificado:

$$\text{Temperatura 5 CBN} = 350,891 - 9,71167 \cdot \text{Carga CBN (3.10)}$$

R-cuadrado = 83,81 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 78,4133 porcentaje

Error estándar de est. = 7,79308

Error absoluto medio = 4,43299

Estadístico de Durbin-Watson = 2,67307

(P=0,0383)

(P=0,0245)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -
0,462603

Autocorrelación residual en Lag 1 = -
0,475864

3.5 Relación del tiro, el contenido de Dióxido de Carbono y Oxígeno en los gases con respecto a la carga

Se observa en la figura 3.6 la relación del tiro, el contenido de Dióxido de Carbono y oxígeno en los gases con respecto a la carga

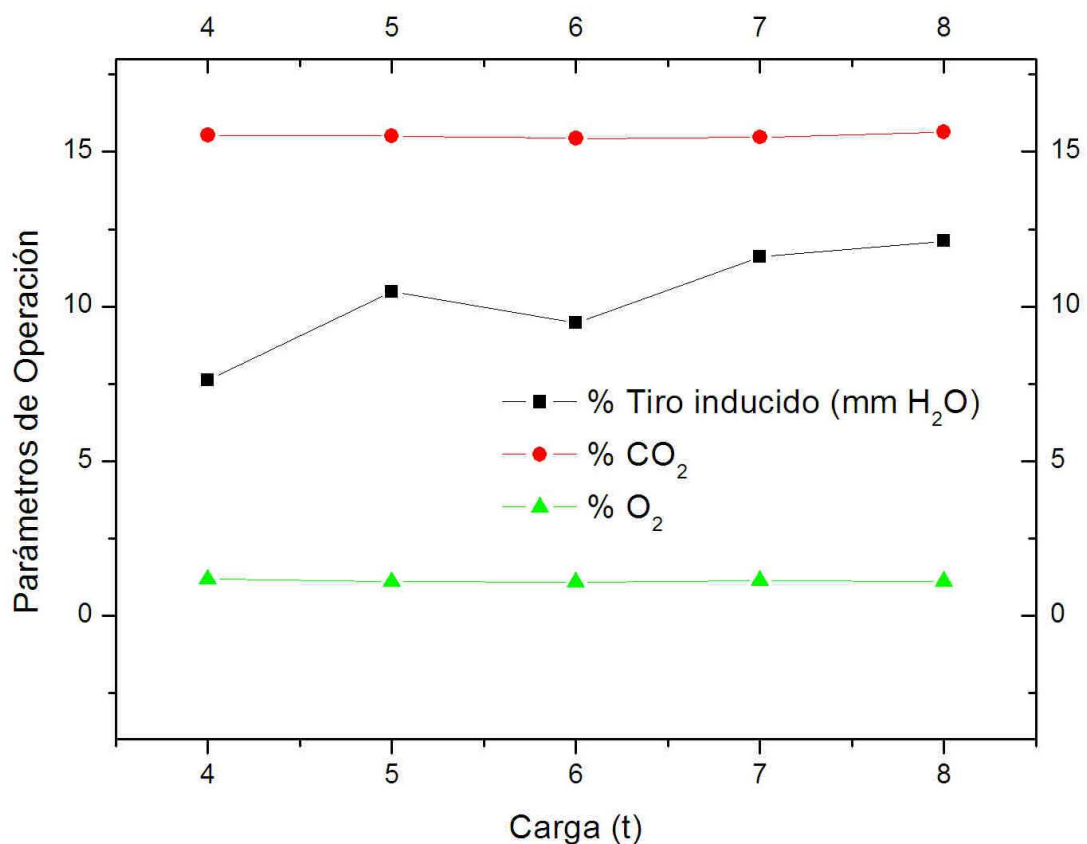


Figura 3.6 Relación del tiro, el contenido de Dióxido de Carbono y oxígeno en los gases.

Como se observa con el aumento del tonelaje aumenta el tiro. En cuanto al elemento oxígeno y dióxido de carbono en la composición de los gases de salida del calcinador, se logró estabilizarlo, el oxígeno se mantuvo en a valores iguales

o por encima de 1,0 %, operándose con un exceso de aire y una atmósfera oxidante; esto evita el alto contenido de níquel densidad en el óxido calcinado.

Para cada parámetro se realizó el análisis de la varianza y se obtuvo el modelo de regresión lineal codificada (ecuaciones 3.11 para el tiro, 3.12 para la contenido de dióxido de carbono en los gases a la salida del calcinador, 3.13 para el contenido de oxígeno de los gases a la salida del calcinador.

Análisis de Varianza

Comportamiento Tiro inducido

Modelo codificado:

$$\text{Tiro Ind} = 4,19844 + 1,01017 \cdot \text{Carga CBN}$$

R-cuadrado = 79,4674 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 72,6232 porcentaje

Error estándar de est. = 0,937476

Error absoluto medio = 0,623784

Estadístico de Durbin-Watson = 3,39398 (P=0,0003)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,771422

Análisis de Varianza

Comportamiento de CO₂

Modelo codificado:

$$\text{CO}_2 = 15,4156 + 0,01708334 \cdot \text{Carga CBN}$$

R-cuadrado = 11,9468 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0846758

Error absoluto medio = 0,0594907

Estadístico de Durbin-Watson = 1,59019 (P=0,0628)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,0309759

Análisis de Varianza

Comportamiento de O₂

Modelo codificado:

$$\text{O}_2 = 1,1836 - 0,0092916 \cdot \text{Carga CBN}$$

R-cuadrado = 16,5612 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0380775

Error absoluto medio = 0,0276327

Estadístico de Durbin-Watson = 1,91283 (P=0,1527)

Conclusiones parciales

Aunque la carga se comportó de 4,0 a 8,0 t/h en el período analizado se puede establecer que operó con una carga baja, obteniéndose los mejores resultados en e rango de operación entre 6,0 y 8,0 t/h.

El contenido de níquel, en el óxido de níquel calcinado en relación con la carga, aumenta, esto esta dado por operar el horno con una relación petróleo-aire alta por encima de 12 operándose con una atmósfera reductora, así como la incidencia de la llama sobre la porción de del óxido que se desplaza por la zona más cercana al quemador, favoreciendo la metalización del producto.

Se obtuvieron los modelos de regresión lineal

CONCLUSIONES

- En la literatura consultada, no existe una basta información sobre los hornos de calcinación de la empresa " Comandante René Ramos Latour ", pero se logra actualizar el contenido de la temática estudiada y su relación con las teóricas existentes.
- En el período analizado la carga de carbonato básico al calcinador se comportó de 4,0 a 8,0 t/h; promediando 6,0 t/h. por lo que se operó con baja carga.
- En el rango de carga de 6,0 a 8,0 t/h se logran los mejores resultados en la operación del calcinador.
- Se refleja la incidencia de la baja carga en los parámetros operativos del horno de calcinación y las características del óxido de níquel calcinado.

RECOMENDACIONES

- Operar el calcinador en la zona óptima de carga de 6 a 8 t/h, que es donde se obtienen mejores resultados en la operación del mismo.
- Utilizar los modelos de regresión lineal obtenidos en la operación del calcinador con respecto a la carga.

$$\text{Ni} = 75,8212 + 0,262442 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Co} = 0,12713 + 0,0614542 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Fe} = 0,196653 - 0,0000667 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{S} = 0,01122 - 0,00076 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Cons Fuel} = 439,477 + 3,1525 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Rel. Petro - Aire} = 15,0664 - 0,380833 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Dens. CBN} = 47,9517 + 17,85 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Humedad CBN} = 69,6215 - 0,258833 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Temperatura 4 CBN} = 697,003 - 13,9517 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Temperatura 5 CBN} = 350,891 - 9,71167 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{Tiro Ind} = 4,19844 + 1,01017 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{CO}_2 = 15,4156 + 0,01708334 \cdot \text{Carga CBN}$$

$$\text{O}_2 = 1,1836 - 0,0092916 \cdot \text{Carga CBN}$$

- Realizar en otro estudio, un análisis estadístico de varianza para la obtención de un modelo de regresión multivariadas.

BIBLIOGRAFÍA

Columbié, A. et al. 1992. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio, *Minería y Geología*, 9 (1): 27-29.

Columbié, A. et al. 2000. Modelo matemático del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio, *Minería y Geología*, 17 (2): 47-53.

Columbié, A. 2001. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMMM, Departamento de Eléctrica, 100 pp, Moa. Cuba

Colectivo de profesores, 2003. Operaciones unitarias para operadores de plantas. Departamento de Metalurgia y Materiales, ISMM, Moa. Cuba

Chang, A. 1997. Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos. Editorial Félix Varela, La Habana, 227 p.

Chang, A. et al. 2003. Balance energético del calcinador de carbonato básico de níquel con adición de sulfuro de níquel. *Revista minería y geología*. Vol. XVII, Nos. 2.

Davinson, M. et al. 1981. Modelación de las regularidades de la calcinación del coque en un horno rotatorio", *Revista Metalurgia*, 5: 44-46.

Domínguez, H.; Selva, A. 1977. Informe parcial del trabajo de automatización del horno de calcinación. Empresa "Comandante René Ramos Latour", Informe técnico.

Falcón, LL. et al. 1977. Informe sobre la automatización del horno n.º2 de calcinación. Empresa "Cmdte. René Ramos Latour", Informe técnico.

Fernández, R. et al. 1990. Incremento de la calidad de los productos finales actuales de la tecnología carbonato amoniacal. Informe final de la investigación quinquenio 1986-1990, empresa "Comandante René Ramos Latour".

Font, G. 1975. Operación del kiln # 1 de la empresa "Comandante René Ramos Latour". Informe técnico.

García, E.; Palacios, A. 2012. Determinación de la eficiencia metalúrgica de la planta de calcinación y sínter de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Moa. Cuba.

- Hernández, E. et al. 1972. Metalurgia Extractiva de los Minerales Oxidados de Níquel en Cuba. Instituto Cubano del Libro: La Habana. Cuba.
- Martín, M. 2007. Calcinación del óxido de níquel en polvo, en atmósfera oxidante. Informe técnico. Manual de Operaciones de la planta de Recuperación y sinter de la empresa "René Ramos Latour", 61 p.
- Milanés, E. et al.1973. *Chem. Ing. Proc. Tech.* May, 17 (5): 17-25. Pruebas operativas del calcinador # 2. Empresa "Comandante René Ramos Latour". Informe técnico.
- Peña, A. et al. 2006. Una aplicación del análisis en componentes principales y de clasificación al estudio de los procesos industriales. Revista cubana química. Vol. XVII.
- Ramírez, P. et al. 1998. Caracterización de la pulpa del carbonato básico de níquel. *Revista Tecnología Química vol.18, No.1 y 2.*
- Ramírez, P. et al. 2005. Caracterización de la pulpa del carbonato básico de níquel. Revista Tecnología Química, Vol. XXV, No. 3.
- Riffaud, B. 1972. Modelling and simulation of an Alumine.
- Rodríguez, L. et al, 1970. Investigación de la modelación matemática del horno de calcinación. Vol. No.2. Nicaro: Empresa "Comandante René Ramos Latour".
- Romero, M. 1991. Cinética de reacciones topoquímicas y la caracterización de productos intermedios de la industria niquelífera. Tesis en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Químicas. La Habana.
- Tijonov, N. 1979. Cinética de la tostación considerando la composición granulométrica de la fase sólida, *Revista. Metalurgia*, 6: 91-94.

Anexos

Tabla 1 Base de datos utilizada para el análisis de la operación mes de Noviembre 2011

Mes: Noviembre 2011																
Día	Carbonato básico de Ni CBN		Temperaturas zonas Calcinador		Aire prim.	Relac. Aire petrol.	Tiro	ton. CBN	Análisis gases		Cons. Fuel oil	Dens. óxido	Características del Oxido			
	Densi	H ₂ O	4	5					Aire H ₂ O	ton.			%CO ₂	%O ₂	Ni %	Co %
	g/l	%	°C	°C	mm	-	mm	t			l/h	g/cm ₃				
4	80	68,0	504	267	35	12	7,1	6	15,8	1,2	434	2,84	76,74	0,40	0,18	0,003
5	80	66,0	498	283	32	14	9	5	15,4	1,0	435	2,82	77,40	0,66	0,10	0,002
6	90	69,0	497	281	33	13	8,3	5	15,4	1,2	425	2,84	76,80	0,48	0,25	0,001
7	120	70,0	617	284	33	13	11,2	6	15,2	1,0	441	2,84	76,82	0,32	0,36	0,001
8	110	70,0	665	317	32	14	10,4	6	15,2	1,2	432	2,82	76,52	0,32	0,22	0,002
9	130	69,0	631	310	34	14	10,6	5	15,2	1,0	466	2,84	76,88	0,33	0,34	0,001
10	110	69,0	649	313	30	14	7,2	5	15,8	1,2	419	2,84	76,75	0,32	0,31	0,003
11	100	71,0	662	306	31	14	7,4	5	15,6	1,1	436	2,82	76,80	0,30	0,19	0,010
12	110	71,0	629	322	35	13	9,5	6	15,2	1,2	464	2,83	76,91	0,27	0,15	0,020
13	110	68,5	632	310	36	13	9,6	6	15,6	1,2	484	2,84	77,44	0,33	0,21	0,030
14	110	69,0	640	320	32	14	8,8	5	15,2	1,1	436	2,84	77,60	0,32	0,37	0,001
15	100	68,9	620	310	34	13	7,1	4	15,8	1,0	454	2,83	76,30	0,28	0,19	0,003
16	100	69,5	651	308	32	14	6,9	4	15,6	1,2	448	2,83	76,82	0,24	0,17	0,003
17	90	69,3	633	311	35	15	10,7	4	15,8	1,2	518	2,84	76,76	0,25	0,14	0,030
18	100	68,0	641	320	33	14	7,2	6	15,2	1,0	459	2,84	76,08	0,33	0,16	0,001
19	90	69,2	658	327	31	14	6,9	6	15,2	1,2	434	2,83	77,10	0,27	0,13	0,020
20	100	68,7	642	322	37	13	8,9	4	15,4	1,1	497	2,83	76,83	0,27	0,22	0,010
21	120	68,0	628	311	34	14	7,8	6	15,8	1,2	468	2,85	76,55	0,26	0,33	0,010
22	100	68,6	637	318	33	14	7,4	6	15,2	1,2	451	2,82	76,78	0,28	0,34	0,010
23	100	68,0	541	323	34	14	9,3	6	16,0	1,0	480	2,83	76,58	0,26	0,39	0,020
24	150	67,5	647	322	33	14	6,8	6	15,0	1,2	451	2,84	76,71	0,28	0,27	0,010
25	110	66,0	638	319	35	14	7,2	4	15,2	1,2	478	2,84	77,29	0,25	0,18	0,020
PRO	105	68,7	616	309	33	14	8,4	5	15,4	1,1	455	2,83	76,84	0,32	0,236	0,010

Anexo 2

Tabla 1 Base de datos utilizada para el análisis de la operación mes de Diciembre 2011

Mes: Diciembre 2011																
Día	Carbonato básico de Ni CBN		Temperaturas zonas Calcinador		Aire Primario.	r(Aire-petróleo)	Tiro	ton. CBN	Análisis gases		Cons. Fuel oil	Dens. óxido	Características del Oxido			
	Densidad	H ₂ O	2	5					%CO ₂	%O ₂			Ni	Co	Fe	S
	g/l	%	°C	°C	mm H ₂ O	-	mm H ₂ O	t			l/h	g/cm ₃				
10	170	67,8	604	284	38	14	12,1	6	15,4	1,0	518	2,85	77,54	0,6	0,29	0,013
11	200	69,0	640	271	39	14	13,6	5	15,4	1,2	542	2,81	76,66	0,46	0,15	0,030
12	190	69,0	642	267	34	14	10,1	6	16	1,0	477	2,84	76,52	0,58	0,17	0,001
13	200	69,0	672	287	28	13	7,7	7	15,6	1,4	370	2,85	77,88	0,39	0,18	0,020
14	160	67,8	676	327	31	15	11,3	8	16	1,2	468	2,86	77,44	0,42	0,18	0,020
15	170	67,5	665	294	36	13	12,7	5	15,4	1,2	459	2,84	78,23	0,41	0,2	0,001
16	180	68,5	702	274	36	13	13,2	5	15,6	1,0	473	2,86	77,52	0,52	0,18	0,001
17	180	70,0	657	307	38	13	12,8	7	15,6	1,2	482	2,88	77,05	0,44	0,18	0,010
18	180	68,7	595	298	39	12	13,6	7	15,6	0,8	485	2,84	76,44	0,54	0,11	0,010
19	180	67,0	569	298	38	13	13,6	5	16	1,2	477	2,87	77,72	0,57	0,26	0,001
20	160	68,8	565	244	35	12	12,3	5	15,6	0,8	425	2,86	77,39	0,49	0,17	0,010
21	200	67,8	524	248	36	14	13,3	7	15,2	1,2	512	2,84	77,70	0,66	0,21	0,003
22	190	66,8	557	279	38	13	11,7	5	16	1,0	499	2,86	76,97	0,54	0,16	0,001
23	180	67,5	597	287	38	13	11,3	5	15,4	1,3	485	2,86	77,48	0,58	0,18	0,001
24	140	68,0	565	303	38	13	10,9	5	15,6	1,2	492	2,84	77,52	0,55	0,19	0,001
25	140	69,1	600	309	34	14	8,8	5	15,2	1,0	462	2,86	76,58	0,6	0,19	0,001
26	120	68,7	577	317	34	13	9,3	6	16	0,8	447	2,86	77,86	0,56	0,18	0,001
27	140	67,5	587	312	34	14	9,3	6	15	1,2	465	2,86	77,08	0,62	0,12	0,002
28	170	69,2	557	277	36	13	11,2	6	15,4	1,0	465	2,86	76,91	0,58	0,23	0,002
29	160	69,4	563	257	36	13	12,4	6	16	1,0	478	2,86	77,75	0,52	0,19	0,001
30	140	67,5	561	266	32	14	12,0	7	15,4	1,1	451	2,85	77,88	0,45	0,18	0,001
31	130	68,2	554	252	32	14	8,1	6	15,2	1,2	442	2,85	77,63	0,41	0,23	0,001
PRO	170,5	68,3	606	287	36	13	11,6	6	15,6	1,1	474	2,85	77,31	0,53	0,19	0,007

Anexo 3

Tabla 1 Base de datos utilizada para el análisis de la operación mes de Enero 2012

Mes: Enero 2012																
Día	Carbonato básico de Ni CBN		Temperaturas zonas Calcinador		Aire Primario	r(Aire-petróleo)	Tiro	ton. CBN	Análisis gases		Cons. Fuel oil	Dens. óxido Densidad	Características del Oxido H ₂ O			
	Densidad	H ₂ O	2	5					%CO ₂	%O ₂			g/l	%	°C	°C
	g/l	%	°C	°C	mm H ₂ O	-										
3	180	68,1	575	290	37	12	11,2	7	15,2	1,0	428	2,84	76,93	0,69	0,25	0,002
4	140	67,4	591	262	38	12	8,8	6	15,8	1,2	443	2,84	78,8	0,65	0,17	0,001
7	190	67,9	686	305	34	12	9,8	6	15,2	1,0	416	2,84	77,27	0,64	0,17	0,001
8	160	68,8	637	283	37	12	10,5	7	15,0	1,2	445	2,86	77,73	0,6	0,14	0,002
9	110	67,8	587	257	33	13	12,1	6	15,8	1,0	437	2,83	77,73	0,62	0,17	0,003
10	100	66,8	622	270	38	12	9,2	6	15,4	1,0	442	2,85	77,54	0,6	0,14	0,001
11	100	68,4	602	262	34	12	9,5	7	15,4	1,2	418	2,85	76,66	0,6	0,16	0,001
12	120	69,1	610	265	42	11	10,8	7	16,0	1,0	448	2,86	76,52	0,58	0,22	0,002
13	120	68,2	647	272	32	12	11,1	7	15,6	1,4	385	2,86	77,86	0,56	0,18	0,001
16	200	66,8	666	293	43	11	11,4	7	15,6	1,0	466	2,87	76,90	0,5	0,18	0,001
17	200	66,4	522	237	43	11	11,5	8	16,0	1,0	489	2,87	77,05	0,53	0,18	0,001
18	160	65,5	577	248	39	11	11,9	8	15,2	1,0	436	2,86	79,02	0,55	0,1	0,01
19	140	69	613	253	35	11	10,3	7	15,0	1,2	386	2,85	77,42	0,56	0,12	0,002
24	190	66,4	677	275	34	13	9,2	6	15,0	1,2	455	2,86	76,71	0,55	0,19	0,001
25	200	66,5	342	309	47	11	9,1	7	15,2	1,2	497	2,87	76,58	0,57	0,19	0,002
26	190	67,2	505	212	37	11	8,8	6	15,0	0,8	399	2,85	77,11	0,56	0,2	0,002
28	190	67,5	621	264	38	12	11,6	7	15,2	1,2	461	2,86	77,13	0,51	0,2	0,002
29	140	67,2	636	277	39	12	12,3	7	16,0	1,0	483	2,84	76,62	0,61	0,4	0,001
PRO	157	67,5	595	269	38	12	10,5	7	15,4	1,1	441	2,85	77,31	0,58	0,19	0,002

Anexo 4

Tabla 1 Base de datos utilizada para el análisis de la operación mes de Febrero 2012

Mes: Febrero 2012																
Día	Carbonato básico de Ni CBN		Temperaturas zonas Calcinador		Aire Primario.	r(Aire-petróleo)	Tiro	ton. CBN	Análisis gases		Cons. Fuel oil	Dens. óxido Densidad	Características del Oxido H ₂ O			
	Densidad	H ₂ O	4	5					%CO ₂	%O ₂			Ni	Co	Fe	S
	g/l	%	°C	°C	mm H ₂ O	Mm H ₂ O	t	l/h	g/cm ₃							
4	230	67,8	610	291	41	12	9,2	6	15,4	1,2	506	2,86	77,2	0,65	0,17	0,001
5	230	68,0	569	278	40	12	11,7	8	15,4	1,0	492	2,85	78,9	0,72	0,28	0,004
6	230	67,3	606	277	40	11	14,2	8	15,6	1,4	457	2,85	78,9	0,71	0,19	0,001
7	230	67,8	640	267	36	13	10,3	7	15,4	1,2	474	2,85	78,2	0,67	0,45	0,002
8	210	67,7	758	345	31	11	5,0	4	15,4	1,4	328	2,84	78,14	0,71	0,18	0,002
9	200	67,2	655	288	31	13	8,2	5	15,4	1,2	395	2,83	76,92	0,60	0,12	0,002
10	200	66,9	564	267	39	13	12,2	7	15,4	1,0	494	2,87	77,84	0,64	0,24	0,001
11	210	67,1	604	287	41	12	12,8	7	15,6	1,2	477	2,88	78,7	0,72	0,2	0,06
12	200	66,9	652	272	33	12	11,1	6	15,2	1,2	382	2,83	78,66	0,85	0,18	0,003
13	200	68,8	672	291	39	12	10,7	6	15,0	1,0	456	2,83	76,96	0,61	0,14	0,001
15	140	68,6	600	322	38	13	11,1	7	15,6	1,2	501	2,83	77,1	0,56	0,13	0,002
16	160	68,8	668	341	36	12	9,8	7	15,4	1,2	437	2,82	76,24	0,55	0,25	0,002
17	190	69,9	617	310	39	12	12,8	7	15,6	1,2	477	2,84	77,01	0,57	0,16	0,001
18	170	69,8	574	266	36	13	11,8	7	15,4	1,1	474	2,93	77,9	0,67	0,25	0,002
19	160	68,9	597	262	38	12	12,8	7	15,6	1,2	464	2,86	78,03	0,64	0,15	0,002
20	170	70,1	595	301	38	13	13,3	7	15,4	1,0	487	2,84	77,55	0,64	0,11	0,001
21	190	68,2	591	270	39	13	14,1	7	15,6	1,0	503	2,81	76,77	0,76	0,15	0,003
22	190	67,8	612	308	39	11	13,2	7	15,2	1,2	443	2,85	77,13	0,65	0,18	0,002
23	160	69,9	629	314	37	13	12,5	7	15,4	1,1	473	2,82	77,12	0,62	0,16	0,002
24	150	69,9	635	318	39	12	10,2	6	15,6	1,2	454	2,84	77,11	0,56	0,22	0,003
25	170	68,1	671	375	38	11	9,7	6	15,8	1,0	416	2,84	76,58	0,57	0,13	0,003
26	170	67,5	600	315	41	12	11,2	7	16,1	1,2	484	2,85	78,26	0,58	0,22	0,001
27	160	68,5	581	271	40	12	11,3	7	15,6	1,1	463	2,83	77,6	0,58	0,12	0,002
28	170	69,2	577	295	41	11	11,7	7	15,2	1,2	440	2,8	77,7	0,66	0,25	0,001
PRO	187	68,4	620	297	38	12	11,3	7	15,5	1,2	457	2,84	77,61	0,65	0,19	0,004

