



Evaluación del índice de consumo de Fuel - Oil en los calcinadores

TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERA

METALÚRGICA Y MATERIALES

AUTOR: Liliannis Maresma Pérez

Moa, 2024



Evaluación del índice de consumo de Fuel - Oil en los calcinadores

TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERA

METALÚRGICA Y MATERIALES

AUTOR: Liliannis Maresma Pérez

TUTOR(ES): MsC. Airem Garbey Frometa

Ing. Ernesto Martínez De la Cruz

Moa, 2024

PENSAMIENTO

“Las grandes cosas en el trabajo nunca son hechas por una sola persona, son hechas por un gran equipo.”

José Martí

DEDICATORIA

*A quienes me inspiraron y me dieron la fuerza necesaria
para cumplir nuestro sueño:
a mis padres, a mis héroes.*

AGRADECIMIENTOS

Con la realización de este trabajo comienza una etapa muy esperada en mi vida, la de mis sueños como profesional, y quiero agradecer de todos aquellos que han estado conmigo en este proceso:

- ✓ Primeramente, a Dios por obrar en mi vida, permitirme encontrar las personas correctas y ayudarme en todo momento.
- ✓ A mis padres por tanto sacrificio y apoyo en todo momento.
- ✓ A mi hermano, por estar en todos mis momentos desde siempre.
- ✓ A mi pareja por estar en los momentos difíciles, por las noches de estudio y por haber sido mi sostén en esta última etapa.
- ✓ A mis tutores Ernesto Martínez De la Cruz y Airem Garbey Frometa, por el esfuerzo, la dedicación con que me guiaron a pesar de sus cargas de trabajo; mi gran equipo.
- ✓ Al personal de la empresa Moa Nickel S.A. “Pedro Sotto Alba” por ser mi escuela durante las prácticas laborales en especial a: Luis Angel Jimenez Perez por su dedicación y sacrificio durante todo ese proceso.
- ✓ A los profes de la UMOa por acogerme como una alumna más siempre que necesite ayuda.

En fin, a todas esas personas que han estado pendiente de mí en este proceso, a todas las que me han ayudado de corazón, muchas gracias.

RESUMEN

En la presente investigación se realiza una evaluación del índice de consumo de Fuel Oil en los calcinadores de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara de Moa, con el objetivo de crear una herramienta para la realización de los balances de masa y energía del proceso de calcinación para poder evaluar el índice de consumo de Fuel Oil y las pérdidas de calor ante diferentes condiciones operacionales. Se estableció los modelos matemáticos del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno de tambor rotatorio de la UBP Calcinación y Sínter, donde se elaboró una hoja de cálculo en MS Excel para determinar las pérdidas de calor que se producen en las condiciones actuales de operación y se validaron los resultados obtenidos en trabajos anteriores. También se determinaron las principales causas que deterioran el índice de consumo de Fuel Oil, las cuales son, la baja carga alimentada al horno calcinador, alto % de humedad de la pulpa de carbonato y los períodos en calentamiento. Por tanto se determinaron los cálculos del índice a través de las causas mencionadas anteriormente, a través de la realización de estos cálculos se observó que hubo un incumplimiento de este índice, ya que la norma para este año es de 0,489.

Palabras claves: Balance de masa y energía, proceso de calcinación, modelos matemáticos, índice de consumo de Fuel Oil.

ABSTRACT

This research evaluates the Fuel Oil consumption index in the calciners of the Comandante Ernesto Ché Guevara Company in Moa, with the objective of creating a tool for performing mass and energy balances of the calcination process in order to evaluate the Fuel Oil consumption index and heat losses under different operational conditions. Mathematical models of the basic nickel carbonate calcination process in the rotary drum furnace of the Calcination and Sintering UBP were established, where a spreadsheet in MS Excel was developed to determine the heat losses that occur under the current operating conditions and the results obtained in previous works were validated. The main causes that deteriorate the Fuel Oil consumption index were also determined, which are, the low load fed to the calciner furnace, high % of moisture in the carbonate pulp, and heating periods. Therefore, the index calculations were determined through the causes mentioned above, through the realization of these calculations it was observed that there was a non-compliance with this index, since the standard for this year is 0,489.

Keywords: Mass and energy balance, calcination process, mathematical models, Fuel Oil consumption index.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
1.1 Descripción general del esquema tecnológico de la Planta de Calcinación y Sínter.....	4
1.2 Características del Fuel Oil	6
1.3 Causas que influyen en el deterioro del índice de consumo de Fuel Oil.....	7
1.4 Aplicación de la Teoría Integral de los Hornos.....	7
1.4.1 Proceso Tecnológico.....	7
1.4.2 Proceso Energético.....	9
1.4.3 Proceso de transferencia de calor.....	10
1.4.4 Proceso Mecánico.....	11
1.4.5 Proceso Aerodinámico.....	11
Conclusiones parciales del capítulo 1.....	12
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
2.1 Metodología de cálculo para el Balance de Masa.....	13
2.2.1 Cálculo de la composición del CBNi (seco).....	15
2.2.2 Cálculo de los elementos contenidos en el CBNi.....	16
2.3 Determinación de la masa de Polvo.....	17
2.3.1 Determinación de los elementos compuestos en el Polvo.....	17
2.4 Determinación de la masa de Fuel- Oil.....	18
2.4.1 Cálculos de los elementos contenidos en el Fuel - Oil.....	18
2.5 Determinación de la masa de Aire.....	18
2.5.1 Cálculos de los elementos contenidos en el Aire.....	19
2.6 Determinación de la masa de Agua.....	19
2.6.1 Calculamos los componentes que se encuentran en el Agua por esta ecuación:.....	20
2.7 Cálculo de los productos calcinados.....	21
2.7.1 Determinación de los componentes que se encuentran en el NiO.....	21
2.8. Determinación de los componentes que se encuentran en el CO ₂	21
2.9 Masa de los componentes que encuentran en el SO ₂	22
2.10 Se determina los componentes que se encuentran en el Agua.....	22
2.11 Determinación de los componentes que se encuentran en el Polvo.....	23
2.12 Determinación del nitrógeno y el oxígeno en la salida.....	23

2.13 Determinación de los componentes que se encuentran en otros.....	23
2.14 Metodología de cálculo para el Balance de Energía.....	24
2.15 Principales ecuaciones de entrada.....	25
2.15.1 Calor aportado por el combustible.....	25
2.15.2 Calor aportado por el aire.....	25
2.15.3 Calor físico del fuel oil precalentado.....	26
2.15.4 Calor aportado por el vapor de pulverización.....	26
2.16 Principales ecuaciones de calor útil.....	26
2.16.1 Calor físico del CBNi seco y polvillo a la salida de la zona de cadenas.....	26
2.16.2 Calor para calentar y evaporar el agua.....	27
2.16.3 Calor para la calcinación de CBNi seco.....	27
2.17 Principales ecuaciones de calor perdido.....	27
2.17.1 Calor sensible de los gases salientes.....	27
2.17.2 Calor sensible del polvo.....	28
2.17.3 Pérdidas a través de las paredes.....	28
2.17.4 Pérdidas de calor con el agua de enfriamiento.....	30
2.17.5 Pérdidas de calor del producto enfriado.....	31
2.18. Cálculo del índice de consumo de Fuel Oil.....	31
Conclusiones parciales del capítulo 2.....	32
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
3.1 Balance de masa en el horno calcinador.....	33
3.1.1 Cálculo de composición de CBNi seco.....	33
3.1.2 Masas de los elementos contenidos en el CBNi.....	33
3.2.1 Masas por elementos en el Polvo.....	34
3.2.2 Masas contenidas en el Aire.....	34
3.2.3 Masas contenidas en el Agua.....	34
3.2.4 Masa de otros elementos que entran al proceso.....	35
3.3 Cálculo del producto calcinado.....	35
3.3.1 Masas de los elementos que se encuentran en el CO ₂	35
3.3.2 Masas de los elementos que se encuentran en el SO ₂	35
3.3.3 Masas de los elementos que se encuentran en el Agua.....	36
3.3.4 Masas de los elementos que se encuentran en el Polvo.....	36

3.3.5 Masas de los elementos que se encuentran en el Nitrógeno y en el Oxígeno.....	36
3.3.6 Masas de otros elementos que salen del proceso.....	36
3.3.7 Comprobación de resultados de Balance de Masa.....	37
3.4 Metodología de cálculo para el Balance de Energía.....	38
3.4.1 Principales ecuaciones de entrada.....	42
3.4.1.1 Calor aportado por el carbonato básico de níquel más el polvillo.....	42
3.4.1.2 Calor aportado por el combustible.....	43
3.4.1.3 Calor aportado por el aire.....	43
3.4.1.4 Calor físico del fuel oil precalentado.....	43
3.4.1.5 Calor aportado por el vapor de pulverización.....	43
3.5.2.1 Calor físico del CBNi seco y polvillo a la salida de la zona de cadenas.....	43
3.5.2.2 Calor para calentar y evaporar el agua.....	43
3.5.2.3 Calor para la calcinación de CBNi seco.....	44
3.6.3.1 Calor sensible de los gases salientes.....	44
3.6.3.2 Calor sensible del polvo.....	44
3.6.3.3 Pérdidas a través de las paredes.....	44
3.6.3.4 Pérdidas de calor con el agua de enfriamiento.....	47
3.6.3.5 Pérdidas de calor del producto enfriado.....	47
3.7 Comprobación de los resultados de Balance Energía.....	47
3.8 Cálculo del índice de consumo de Fuel Oil.....	49
Conclusiones parciales del capítulo 3.....	49
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	51
ANEXOS.....	53

INTRODUCCIÓN

([Yarnangoré, 2014](#)) La empresa Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna se localiza en el municipio de Moa provincia Holguín. En esta 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. En la Planta de Calcinación y Sínter, ocurre el proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno de tambor rotatorio.

La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. La planta niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) emplea este proceso para la obtención del óxido de níquel a partir de la descomposición química del carbonato básico de níquel (NiCO) en un horno de tambor rotatorio (HTR), mediante la combustión del petróleo precalentado. El uso racional y eficiente de este recurso o sea del combustible constituye una necesidad imperante en los momentos actuales de nuestro país, debido a la oscilación de los precios en el mercado internacional, pues en estos momentos están bajos, principalmente en las industrias consumidoras de este portador energético como son las del níquel.

([Yarnangoré, 2014](#)) Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de la Unión del Níquel y el MINBAS, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos. El (HTR) instalado en la referida planta, juega un papel esencial dentro del proceso, pues en el mismo se produce la descomposición del carbonato básico de níquel en óxido de níquel más cobalto, y algunas impurezas y productos gaseosos.

El (HTR) instalado en la referida planta juega un papel esencial dentro del proceso, pues en el mismo se produce la descomposición del carbonato básico de níquel en óxido de níquel más cobalto, y algunas impurezas y productos gaseosos, tienen una larga historia de uso en la industria Química y Metalúrgica, acerca de los mismos se han acometido numerosos estudios desde el punto de vista tecnológico en varios países, sin embargo, respecto a la automatización integral del horno son pocos los intentos realizados.

El proceso CARON, por medio del cual se extrae el níquel de los yacimientos lateríticos, lixiviando el mineral reducido con una solución de carbonato de amonio a presión atmosférica, ha sido un proceso importante en la refinación de las lateríticas con alto contenido de hierro. El mismo se aplica en nuestro país en las empresas Comandante René Ramos Latour de Nicaro y en la Empresa Ernesto Che Guevara ubicada en Punta Gorda, Moa.

(Pantoja,2008) El elevado consumo de fuel oil en esta tecnología nos obliga a optimizar los parámetros tecnológicos de operación del horno. Para lograr mejores valores de eficiencia, el tema del consumo de combustible es de vital importancia.

Después de este amplio recorrido introductorio podemos decir que a nivel industrial se observan variaciones en el consumo de fuel oil de los calcinadores en el Horno de tambor rotatorio debido a la variación en la composición química en las menas alimentadas.

Problema de Investigación: Insuficiente conocimiento de las incidencias del alto % de humedad de la pulpa de carbonato, la baja carga alimentada al horno calcinador y los periodos en calentamiento en el índice de consumo de fuel oil.

Objetivo General: Analizar la influencia de la humedad del carbonato, la baja carga alimentada y los períodos de calentamiento en el horno calcinador para el mejoramiento del proceso en la UBP Calcinación y Sínter.

Objeto de Estudio: Proceso de calcinación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Campo de acción: Está vinculado con el Índice de consumo de Fuel - Oil.

Hipótesis de investigación: Si se analizan los factores que influyen en el proceso de calcinación entonces se pueden sugerir estrategias con vistas a corregir el deterioro del índice de consumo de Fuel – Oil.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar las materias primas que intervienen en el proceso de calcinación.
- Analizar la influencia del índice de consumo de Fuel - Oil en la calidad del óxido descargado por el horno calcinador.
- Analizar la influencia de cada uno de los factores que intervienen en el proceso de calcinación.

Tareas de investigación

- Búsqueda bibliográfica relacionada con la temática tratada en la investigación.
- Evaluar la incidencia de periodos de calentamiento del horno calcinador de consumo de Fuel - Oil.
- Evaluar la incidencia de la humedad del carbonato en el índice de consumo de Fuel - Oil.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La teoría integral de los hornos (TIH) es la herramienta metodológica principal para asimilar y perfeccionar los procesos y equipos piro-metalúrgicos (Diomidovski, 1970). El análisis de los 5 procesos que ocurren en el HTR permitirá revelar las principales insuficiencias que impiden una correcta realización de los balances de masa y energía de la calcinación del carbonato básico de níquel (CBNi). (Yarnangoré, 2014)

El presente capítulo se establece los fundamentos teóricos del proceso de calcinación de carbonato básico de níquel como base para realizar la caracterización del proceso tecnológico de los Hornos de Tambor Rotatorio para la calcinación de carbonato básico de níquel en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa.

1.1 Descripción general del esquema tecnológico de la Planta de Calcinación y Sínter

La UBP Planta de Calcinación y Sínter se compone de cinco procesos: proceso de filtración y sedimentación, proceso de calcinación, proceso de sinterización, proceso producción de Sulfuro de Níquel y proceso de envase y almacenamiento de óxidos.

En este trabajo abordaremos sobre el proceso de Calcinación por tanto, el carbonato básico de níquel en forma de torta cae libremente entre los bolsillos del filtro hasta el transportador de banda TR-116 A – 117 A – 118 A (uno en cada línea), y luego se descarga en los TR – 116 B – 117 B – 118 B (uno en cada línea), donde se sitúan 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 son tres, 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 (HC 201, 202, 203), teniendo siempre uno de reserva. A medida que el carbonato desciende va sufriendo variaciones en su composición, debido a las temperaturas existentes en las diferentes zonas del horno, obteniéndose como producto el óxido de níquel calcinado.

El polvo de óxido de níquel que es arrastrado en los calcinadores por los gases se recupera, una parte en la batería de ciclones (CN-201, 202 y 203), la otra parte que continúa con el recorrido de los gases es recolectado en los electrofiltros de tipo YZ-4-37 (EF-201, 202 y 203).

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 en la piscina donde se encuentra sumergida parte de la superficie del enfriador. Existiendo contacto indirecto entre el óxido de níquel Calcinado y el agua.

Si el óxido obtenido no posee la calidad óptima (alto azufre o baja densidad) se suministra a la tolva de los alimentadores del Sínter (T-303) para su posterior reproceso al horno.

El sistema clasificador descarga a una tolva con sistema de alimentador de sinfín el cual es accionado por un mando conectado a un sistema automático de pesaje para ser envasado el producto en sacos de 25 kg. El rechazo y el resto que no fue clasificado se reprocesa en los hornos de calcinación.

El óxido de níquel que se destina para la producción de Sínter, transportado desde el área de calcinación a través de los elevadores de cangilones 209 A y B hacia la tolva de óxido (TV – 302), en la sección de preparación de mezcla en el área de Sínter.

El Sínter o producto final de granulometría (+19 a 40) mm es transportado por los transportadores 323 y 330, hacia las tolvas de producto final donde es envasado en bolsas de nylon Big-Bag con un peso de 1505 kg, luego se almacena para después proceder a la formación de los lotes.

En el área de envase y almacenaje de producto final existen 2 máquinas de envase. El producto envasado tiene granulometría (+19 a 40) mm. En ambas máquinas se instaló una romana de 300 kg a la cual se descarga el Sínter con ayuda de dos alimentadores vibratorios (uno para cada dos tolvas de producto final). El Sínter se envasa en Big Bag con capacidad para cinco

pesadas de 300 kg para un peso total de 1 500 kg, que después de envasado se traslada con ayuda de un montacargas a la pesa de plataforma para rectificar su peso y después almacenarlo.

1.2 Características del Fuel Oil

El Fuel - Oil , también conocido como aceite combustible fósil líquido derivado de la destilación del petróleo crudo. Es más pesado y viscoso que la gasolina o el diésel, y se utiliza principalmente para generar calor y energía en aplicaciones industriales, comerciales y marinas. Está compuesto principalmente por hidrocarburos, pero también contiene otros elementos como azufre, nitrógeno y metales. El contenido de azufre es una consideración importante, ya que las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) contribuyen a la contaminación del aire y la lluvia ácida a pesar de los desafíos que tiene seguirá desempeñando un papel importante en el panorama energético durante algún tiempo.

Tabla 1. Parámetros fundamentales del Área de Calcinación

Mes	FP	Carga	R P/A	Dif (PV-PFOQ)	NiO Desc	Dens. Pulpa
enero	957,363	8,253	0,151	3,820	30,770	1035,642
febrero	941,299	9,785	0,146	3,635	31,114	1039,030
marzo	885,514	12,037	0,142	3,456	30,396	1037,147
abril	924,559	11,836	0,144	3,530	27,532	1039,840
total	927,033	10,443	0,146	3,613	30,005	1037,836

En esta tabla la cual se utiliza para evaluar el comportamiento que ha tenido el flujo de petróleo , la carga alimentada al calcinador , la relación petróleo/ aire total , el óxido de níquel descargado por el horno de la densidad de la pulpa de carbonato básico de níquel y el índice de Fuel - Oil , la cual está comprendida entre el 1ro de Enero y el 30 de Abril , la cual está dividida por meses , el promedio de cada mes y el promedio total en este período y tener una mejor referencia . El índice que está aprobado como norma para este año 2024 es de 0,489 , se evidencia que en todo este período el índice se ha incumplido entre las principales causas están las descriptas a continuación:

1.3 Causas que influyen en el deterioro del índice de consumo de Fuel Oil

Entre las principales causas que influyen en el deterioro del índice de consumo de Fuel - Oil está en primer lugar por la alta humedad del carbonato básico de níquel que debe tener un valor máximo de 70 % y si se excede de ese valor hay un mayor consumo de Fuel - Oil porque es más agua que se tiene que evaporar del material alimentado al horno calcinador , la cual se debe a la baja densidad de la pulpa del carbonato que esta entre el rango de (1060-1250 g/L), cuando está por debajo de este valor lo recomendable es poner el horno en calentamiento porque se incrementa la humedad y atenta contra el índice de Fuel - Oil , también se debe por la baja temperatura de CBNi que esta entre (< 86 °C) . Otra causa es la baja carga alimentada a los hornos calcinadores esta como tal , incluyendo el tiempo que puede estar en calentamiento o no el horno por déficit por bajo volumen de destilación , también influye por las deficiencias en el sistema de vacío . en segundo lugar está el horno en calentamiento que también se debe por la baja densidad de la pulpa del carbonato , por averías y paros planificados y por la puesta en operación de una línea . y en 3er lugar y último está la baja carga alimentada que es al igual que las otras por la baja densidad de la pulpa del carbonato y por la baja temperatura del CBNi. Estas son las diferentes causas que influyen en el deterioro de ese índice.

1.4 Aplicación de la Teoría Integral de los Hornos

1.4.1 Proceso Tecnológico

La influencia de los diferentes parámetros sobre la productividad (A) del horno en toneladas métricas de producto por día (t/d) se expresa por la ecuación:

$$A = M \cdot \varphi \cdot \omega_{max} \cdot \tau \dots\dots\dots 1.1$$

En la zona de calcinación:

En esta zona tiene lugar la combustión del fuel-Oil por lo que la temperatura máxima de los gases puede alcanzar valores entre (1300 y 1600) °C en el tramo más cercano a la llama, mientras que a medida que se acerca al extremo de la zona de cadenas la temperatura de los gases aumenta de 850 - 950 °C.

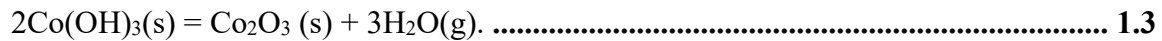
El Proceso tecnológico en esta zona es la disociación térmica del CBN seco industrial. La calidad del mismo varía en correspondencia con la composición del licor producto de lixiviación por NH₃, CO₂, Ni, S, Co, Fe y otros iones presentes; además, de las condiciones de velocidad de cristalización del CBN durante la destilación. Por consiguiente, varían, tanto la composición de fase del CBN, como su granulometría, densidad y morfología. Esto aconseja representar el CBN seco en su forma contaminada con azufre por la variable siguiente:



La mencionada variabilidad de las propiedades físicas y químicas del CBN indican la necesidad de caracterizar con rigor las muestras de CBN que se toman a la entrada del horno y en el sedimentador para diferenciar los “patrones” de operación respecto a cada tipo de CBN que permita garantizar una calidad estable del NiO producto, lo cual hasta ahora no ha sido posible, constituyendo una de las razones de que el producto salga fuera de especificaciones con una frecuencia perceptible.

Uno de los problemas que existen en la metodología actual del balance de masa del CBN seco es la determinación de la masa de las H₂O, así como la masa de Otros elementos no analizados químicamente que se corresponda con la composición racional del producto NiO con una calidad determinada.

Para las impurezas principales de Fe y Co, se asume que las reacciones son las siguientes:



El grado de disociación de las reacciones deben ser el 100 % para garantizar la calidad del producto NiO, tanto en composición química, como en densidad, por lo que se toman muestras de este con una pala a la salida del horno HTR.

1.4.2 Proceso Energético

$$E \cdot X = \frac{A}{\tau} \left(q_m + \sum Q_{perd} \right) \dots\dots\dots 1.5$$

$$[A] = t_{mp} \cdot \frac{t_p}{t_{mp} \cdot h} \cdot \frac{h}{d} = \left[\frac{t_p}{d} \right]$$

Donde:

Para una hora de balance:

$E \cdot X = Q_{sumin}$, en (kJ/h) – constituye la fuente principal de suministro de energía al horno para garantizar el perfil de temperatura de los gases y el material, mediante la combustión del combustible líquido (fuel-oil). Para este tipo de combustible, $E = PCI$, (kJ/kg) y X es el flujo másico de fuel oil, suministrado al quemador, (kg/h). El Poder Calórico Inferior (PCI), se determina en el Laboratorio de la empresa por una bomba calorimétrica y X se determina por el flujómetro, instalado en el nudo de combustión, en caso que se mida en (m³/h), se emplea la densidad que ofrece el laboratorio a la temperatura de calentamiento de éste, en (kg/m³).

En el nudo de combustión, se controla el flujo y presión del: fuel-oil, aire primario y secundario, así como la temperatura del fuel-oil y la presión del vapor de H₂O para pulverizar el fuel oil en la boquilla. El flujo de este vapor no se conoce y habrá que determinarlo por los balances de masa y energía, lo que constituye una de las tareas técnicas del presente trabajo.

Hay que señalar que tanto el vapor como el fuel oil entran calientes al sistema y aportan un calor físico complementario.

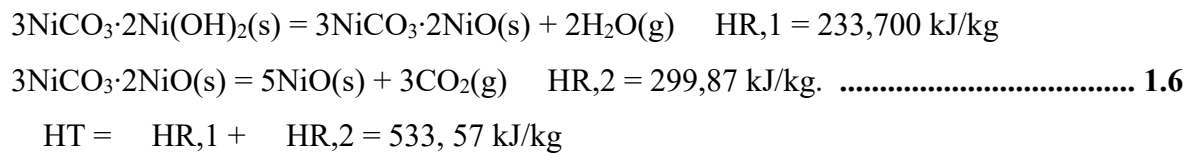
$A/t \times q_m$ – es la necesidad energética del CBN húmedo para transformarse en producto NiO con la calidad requerida por el mercado, en (kJ/h) y , en (kJ/t). Se le denomina calor útil .

Qútil) consumido en este Proceso, el cual determina la eficiencia energética del horno (EFE).

Para la Calcinación del CBN, el sentido energético de cada acápite del Qútil puede ser enumerado ordenadamente como el consumo de energía para:

- calentar el H₂O libre y su evaporación a P = 1 at;
- calentar la masa del CBN seca desde la temperatura que entró al horno hasta la temperatura de disociación para transformarlo en NiO producto;
- sobrecalentar los gases tecnológicos -resultado de la disociación térmica- y el polvo arrastrado desde la zona de calcinación hasta la salida del horno;
- disociar toda la masa de CBN seco hasta NiO producto.

En este último acápite se empleó los resultados de la tesis de doctorado en ciencias químicas de Romero, M (1991) para el CBN sin impurezas de azufre, de acuerdo al mecanismo siguiente:



Para el caso del sulfato de Ni, se tomarán los datos termodinámicos existentes en la bibliografía para completar la energía específica que aproximadamente requiere el CBN seco industrial-contaminado- para convertirlo en producto de NiO. En este caso se desprecia el resto de los compuestos minoritarios.

1.4.3 Proceso de transferencia de calor

La ecuación principal de la transferencia de calor (TC) de una fase gaseosa, líquida o sólida hacia el CBN para llevar la energía hacia el CBN y convertirlo en producto NiO en el espacio de trabajo del horno se representa de forma particular en la TIH por la ecuación:

$$\frac{A}{\tau} \cdot q_m = h_T \cdot \Delta t \cdot F_m \cdot 3600 \quad \dots\dots\dots 1.7$$

Donde:

ht - es el coeficiente de transferencia de calor total en el horno.

Fm - es la superficie del material que participa en el intercambio térmico.

La gran importancia del proceso de transferencia de calor se demuestra por la práctica de ingeniería al ser calculada la longitud de las zonas de transformaciones físico químicas del material.

1.4.4 Proceso Mecánico

Caracteriza el movimiento de los materiales sólidos dentro del horno (CBN seco y Producto NiO). Este flujo volumétrico de materiales es descrito por la TIH por la ecuación:

$$A/tps = F_s \cdot W_s \dots\dots\dots 1.8$$

Operacionalmente la velocidad del material se calcula por la fórmula empírica:

$$W_s = 5,78 \cdot D_{inter} \cdot B \cdot n , \text{ en (m/h) } \dots\dots\dots 1.9$$

Donde:

Dinter - es el diámetro interior de cada zona del horno, en (m);

B - es el ángulo de inclinación del tambor, entre (3 y 5)0, respecto a la horizontal.

(n) – es la frecuencia de rotación del tambor, en (rpm). La disminución de este parámetro durante la operación del horno cuando se procesa un CBNi que da NiO producto fuera de especificaciones, permite incrementar el tiempo de retención del CBN dentro del horno, si la productividad es constante, aunque en ciertos límites que puede resultar insuficiente para revertir las mencionadas consecuencias.

1.4.5 Proceso Aerodinámico

$$\left(\frac{A}{\tau} \cdot V_1 + V_2 \cdot X + V_3 \right) \cdot \frac{T}{T_0} = F_g \cdot W_t \dots\dots\dots 1.10$$

Los flujos volumétricos dentro del paréntesis son iguales a V_0 por lo que se calculan por el balance de materiales (proceso tecnológico) a condiciones normales ($T= 273 \text{ K}$ y $P = 1 \text{ atm}$).

En la ecuación (1.10)

$A/t \cdot V_1$ – es el flujo volumétrico de los gases tecnológicos

$V_2 \cdot X$ - es el flujo volumétrico (m^3/h) de los gases de la combustión completa del fuel oil (CO_2 , H_2O y SO_2).

V_3 - es el flujo volumétrico (m^3/h) de un reactivo gaseoso. En la calcinación, teóricamente, este no existe, ya que no se emplea el aire como reactivo oxidante del CBN, aunque ayuda a oxidar las impurezas de S que contiene la pasta de CBNi que no están en forma de sulfatos) y garantiza la atmósfera oxidante que necesita la disociación térmica, desde el punto de vista termodinámico. Por eso, todo el aire alimentado, se incluye en V_2 .

Los parámetros de control son la temperatura de los gases que determinan la radiación térmica, la velocidad de los gases salientes que influye sobre la intensidad de la transferencia de calor por convección forzada y se regula por el ventilador de tiro que está detrás del electrofiltro, los flujos de aire para la combustión y la presión de salida del aire primario en el ventilador, además de la P del vapor de pulverización y del fuel oil en el quemador, como se analizó en el proceso energético.

Conclusiones parciales del capítulo 1

Se hizo un análisis profundo del flujo tecnológico de la UBP Calcinación y Sínter, siendo más específicos en el área de calcinación.

Se identificaron las principales causas que atentan contra el cumplimiento del índice de consumo de fuel oil, las cuales son: la baja carga alimentada al horno calcinador, la alta humedad del CBNi alimentado y los períodos de calentamiento de dicho equipo.

En este capítulo se plasman y se explican las principales ecuaciones de la teoría integral de los hornos, aplicadas específicamente a los hornos calcinadores ubicados en la UBP Calcinación y Sínter.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se presenta la metodología de cálculo empleada para la realización de los balances de masa y energía en el horno calcinador.

2.1 Metodología de cálculo para el Balance de Masa

Para la determinación de la influencia de la carga alimentada al horno calcinador el proceso de calentamiento de dicho equipo y la alta humedad de CBNi se procederá a realizar varios balances de masas y energías según cada caso. Se identifican y plasman las principales ecuaciones que serán utilizadas para lograr lo anteriormente expuesto.

Balance de masa o balance de materia se define como una determinación de las cantidades de los diferentes materiales que intervienen en el proceso, basándose en la ley de conservación de masa., de manera que se puede contabilizar las cantidades de diversos materiales que entran y salen del sistema. La ecuación básica en los balances materiales es la ley de conservación de la materia.

Balance de Energía: Es la contabilidad de la energía que entra y sale del horno durante el proceso de calcinación para optimizar la eficiencia del horno minimizando las pérdidas de energía .

La figura 2.1 muestra las corrientes de entrada y salida del horno para el desarrollo del balance de masa.

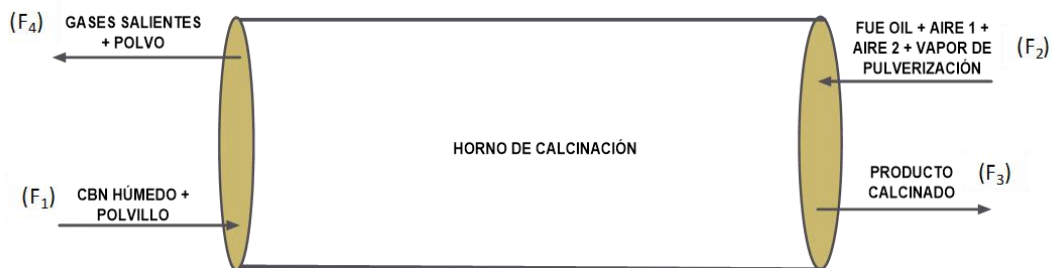


Figura 2.1 Flujos entrantes y salientes en el horno calcinador.

Tabla 2.1 Masas molares para la realización del balance de masa

Elementos	M.M	Elementos	M.M
Ni	58,610	Fuel-Oil	170,132
S	32,00	Aire	30,00
C	12,011	Agua	18,000
O	16,000	CO ₂	44,011
H	1,00	SO ₂	64,000
N	14,00	2NiCO ₃	237,242
Carbonato	669,682	3Ni(OH) ₂	277,83
NiO	74,610	NiSO ₄	154,61

Tabla 2.2 Datos ideales para el balance

Variables	Valores	U/M
Carga	300,000	t
Humedad	67,500	%
Fuel oil	30,000	t
Polvo	50,000	t
Aire primario	239,630	t

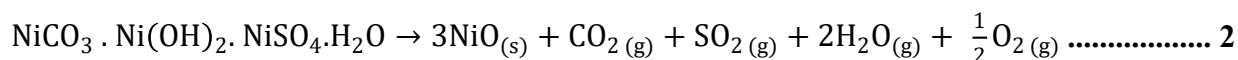
Aire secundario	36,783	t
Aire total	276,413	t
Agua	202,500	t
Carbonato seco	97,500	t
% Ni en el carbonato	51,49	%

Tabla 2.3 Datos para el balance de masa con Alta Humedad, con 4 horas de calentamiento y con baja carga

Variables	Valores	U/M
Carga deficiente	180,000	t
Alta Humedad	72,500	%
Tiempo en calentamiento	4,000	h

2.2.1 Cálculo de la composición del CBNi (seco)

Para el desarrollo de los balances de masa hay que tener en cuenta que las ecuaciones que se desarrollaran a continuación serán las mismas para los 4 balances y la reacción principal de descomposición del carbonato básico de níquel, es la que se plantea a continuación:



Para la determinación del carbonato seco se determina por la siguiente ecuación:

$$m(\text{CBNi})_{\text{seco}} = \frac{m(\text{Carbonato})_{\text{total}} * (100 - \text{humedad})}{100} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

$m(\text{CBNi})_{\text{seco}}$ - masa del carbonato básico de níquel , (kg)

$m(\text{Carbonato})_{\text{total}}$ - masa del carbonato básico de níquel total, (kg)

2.2.2 Cálculo de los elementos contenidos en el CBNi

$$m(\text{S})_{\text{CBNi}} = \frac{m(\text{Carbonato})}{MM(\text{Carbonato})} MM(\text{S}) \dots\dots\dots 2.2$$

Donde:

$m(\text{S})_{\text{CBNi}}$ - masa del azufre contenido en el CBNi , (kg)

$MM(\text{CBNi})$ - masa molar del carbonato básico de níquel , (kg/kmol)

$MM(\text{S})$ - masa molar del azufre , (kg/kmol)

$$m(\text{Ni})_{\text{CBNi}} = \frac{m(\text{Carbonato})_{\text{seco}} * 51,49}{100} \dots\dots\dots 2.3$$

Donde:

$m(\text{Ni})_{\text{CBNi}}$ - masa del níquel contenido en el carbonato , (kg)

$$m(\text{C})_{\text{CBNi}} = \frac{m(\text{Carbonato}) * 2}{MM(\text{Carbonato})} MM(\text{C}) \dots\dots\dots 2.4$$

Donde:

$m(\text{C})_{\text{CBNi}}$ - masa del carbono contenido en el carbonato , (kg)

$MM(\text{C})$ - masa molar del carbono , (kg/kmol)

$$m(O)_{CBNi} = m(\text{Carbonato})_{\text{seco}} - m(\text{Ni})_{\text{carbonato}} \dots\dots\dots 2.5$$

Donde:

$m(\text{Carbonato})$ – masa del carbonato, (kg)

$m(\text{Ni})_{\text{carbonato}}$ - masa de níquel contenido en el carbonato, (kg)

$$m(H)_{CBNi} = \frac{m(\text{Carbonato}) * 6}{MM(\text{Carbonato})} MM(H) \dots\dots\dots 2.6$$

Donde:

$m(H)_{CBNi}$ - masa del hidrógeno contenido en el carbonato, (kg)

$MM(H)$ - masa molar del hidrógeno, (kg/kmol)

2.3 Determinación de la masa de Polvo

Para determinar la masa de polvo se halla por la siguiente ecuación:

$$m(\text{Polvo}) = \frac{m(\text{Carbonato})_{\text{total}}}{6} \dots\dots\dots 2.7$$

Donde:

$m(\text{Polvo})$ - masa de Polvo, (kg)

2.3.1 Determinación de los elementos compuestos en el Polvo

Se determina el níquel contenido en el polvo por la siguiente ecuación:

$$m(\text{Ni})_{\text{polvo}} = \frac{m(\text{polvo}) * 72}{100} \dots\dots\dots 2.8$$

Donde:

$m(\text{Ni})_{\text{polvo}}$ - masa del níquel contenido en el polvo, (kg)

$$m(O)_{\text{polvo}} = m(\text{Polvo})_{\text{total}} - m(\text{Ni})_{\text{polvo}} \dots\dots\dots 2.9$$

Donde:

m(O)polvo - masa del oxígeno contenido en el polvo, (kg)

m (Polvo)total - masa del polvo total, (kg)

m(Ni)polvo - masa del níquel en el polvo, (kg)

2.4 Determinación de la masa de Fuel- Oil

Se determina la masa del Fuel - Oil por la siguiente ecuación:

$$m(\text{Fuel - Oil}) = \frac{m(\text{carbonato})_{\text{total}}}{100/1000} 24 \dots\dots\dots 2.10$$

Donde:

m(Fuel - Oil) - masa del Fuel - Oil, (kg)

2.4.1 Cálculos de los elementos contenidos en el Fuel - Oil

$$m(\text{C})_{\text{Fuel-Oil}} = \frac{m(\text{Fuel - Oil}) * 12}{MM(\text{Fuel - Oil})} MM(\text{C}) \dots\dots\dots 2.11$$

Donde:

m(C)Fuel-Oil - masa del carbono que se encuentra en el Fuel- Oil, (kg)

MM(Fuel - Oil) - masa molar del Fuel- Oil, (kg/kmol)

MM(C) - masa molar del carbono, (kg/kmol)

$$m(\text{H})_{\text{Fuel-Oil}} = m(\text{Fuel Oil}) - m(\text{C})_{\text{Fuel-Oil}} \dots\dots\dots 2.12$$

Donde:

m(H)Fuel-Oil - masa del hidrógeno contenido en el Fuel-Oil, (kg)

2.5 Determinación de la masa de Aire

La masa de Aire se determina por la ecuación siguiente:

$$m(\text{Aire}) = \frac{(Faire1rio + Faire2rio) * 1,29}{1000} \dots\dots\dots 2.13$$

Donde:

$m(\text{Aire})$ - masa del aire, (kg)

$F_{\text{aire 1rio}}$ - flujo del aire primario, (kg/h)

$F_{\text{aire 2rio}}$ - flujo del aire secundario, (kg/h)

2.5.1 Cálculos de los elementos contenidos en el Aire

$$m(\text{O})_{\text{aire}} = m(\text{Aire}) * 0,21 \dots\dots\dots 2.14$$

Donde:

$m(\text{O})_{\text{aire}}$ - masa del aire contenida en el aire, (kg)

$$m(\text{N})_{\text{aire}} = m(\text{Aire}) * 0,78 \dots\dots\dots 2.15$$

Donde:

$m(\text{N})_{\text{aire}}$ - masa del nitrógeno contenido en el aire, (kg)

La masa de otros compuestos que se encuentran en el Aire se calcula de la siguiente manera:

$$m(\text{Otros})_{\text{aire}} = m(\text{Aire}) - m(\text{N}) - m(\text{O}) \dots\dots\dots 2.16$$

Donde:

$m(\text{Otros})_{\text{aire}}$ - masa de otros compuestos contenidos en el aire, (kg)

$m(\text{Aire})$. masa del aire, (kg)

$m(\text{O})$ - masa del oxígeno, (kg)

$m(\text{N})$ - masa del nitrógeno, (kg)

2.6 Determinación de la masa de Agua

$$m(\text{Agua}) = m(\text{Carbonato})_{\text{total}} - m(\text{Carbonato})_{\text{seco}} \dots\dots\dots 2.17$$

Donde:

$m(\text{Agua})$ - masa del agua, (kg)

m(Carbonato)total - masa del carbonato total, (kg)

m(Carbonato)seco - masa del carbonato seco, (kg)

2.6.1 Calculamos los componentes que se encuentran en el Agua por esta ecuación:

$$m(O)_{\text{agua}} = \frac{m(\text{Agua})}{MM(\text{Agua})} MM(O) \dots\dots\dots 2.18$$

Donde:

m(O)agua - masa del oxígeno contenido en el Agua, (kg)

MM(Agua) - masa molar del Agua, (kg/kmol)

MM(O) - masa molar del oxígeno, (kg/kmol)

$$m(H)_{\text{agua}} = m(\text{Agua}) - m(O)_{\text{agua}} \dots\dots\dots 2.19$$

Donde:

m(H)agua - masa del hidrógeno contenida en el agua, (kg)

$$m(\text{otros})_{\text{entra}} = m(\text{aire}) - m(O)_{\text{aire}} - m(N)_{\text{aire}} \dots\dots\dots 2.20$$

Donde:

m(otros)entra - masa de otros que entra en el proceso, (kg)

m(aire) - masa del aire, (kg)

m(O)aire - masa de oxígeno en el aire, (kg)

m(N)aire - masa de nitrógeno en el aire, (kg)

2.7 Cálculo de los productos calcinados

A partir de los resultados de los experimentos realizados, se realiza entonces la composición racional de los productos calcinados mediante la relación estequiométrica con el níquel calcinado.

Cálculo de la masa total de los productos calcinados

$$m(\text{NiO})_{\text{salida}} = \frac{m(\text{Ni})}{MM(\text{Ni})} MM(\text{NiO}) \dots\dots\dots 2.21$$

Donde:

$m(\text{NiO})_{\text{salida}}$ - masa del óxido de níquel en la salida, (kg)

$MM(\text{Ni})$ - masa molar del níquel, (kg/kmol)

$MM(\text{NiO})$ - masa molar del óxido de níquel, (kg/kmol)

2.7.1 Determinación de los componentes que se encuentran en el NiO

$$m(\text{Ni})_{\text{NiO}} = m(\text{Ni})_{\text{salida}} * 0,77 \dots\dots\dots 2.22$$

Donde:

$m(\text{Ni})_{\text{NiO}}$ - masa del níquel contenido en el óxido de níquel, (kg)

$m(\text{Ni})_{\text{salida}}$ - masa del níquel en la salida, (kg)

$$m(\text{O})_{\text{NiO}} = m(\text{NiO}) - m(\text{Ni})_{\text{NiO}} \dots\dots\dots 2.23$$

Donde:

$m(\text{O})_{\text{NiO}}$ - masa del oxígeno contenido en el óxido de níquel, (kg)

2.8. Determinación de los componentes que se encuentran en el CO₂

$$m(\text{C})_{\text{CO}_2} = \frac{m(\text{CO}_2) * MM(\text{C})}{MM(\text{CO}_2)} \dots\dots\dots 2.24$$

Donde:

$m(\text{C})_{\text{CO}_2}$ – masa del carbono que se encuentra en el dióxido de carbono, (kg)

$$m(O)_{CO_2} = \frac{m(CO_2) * MM(O)}{MM(CO_2)} \dots\dots\dots 2.25$$

Donde:

$m(O)_{CO_2}$ – masa del oxígeno que se encuentra en el dióxido de carbono, (kg)

$m(O)_{entrada}$ – masa del oxígeno en la entrada, (kg)

2.9 Masa de los componentes que encuentran en el SO₂

$$m(S)_{SO_2} = m(S)_{entrada} \dots\dots\dots 2.26$$

Donde:

$m(S)_{SO_2}$ – masa del azufre contenido en el dióxido de azufre, (kg)

$m(S)_{entrada}$ – masa del azufre en la entrada, (kg)

$$m(O)_{SO_2} = \frac{m(SO_2) * MM(O)}{MM(SO_2)} \dots\dots\dots 2.27$$

Donde:

$m(O)_{SO_2}$ – masa del oxígeno que se encuentra en el dióxido de azufre, (kg)

2.10 Se determina los componentes que se encuentran en el Agua

$$m(H)_{agua} = \frac{m(agua) * MM(H)}{MM(agua)} \dots\dots\dots 2.28$$

Donde:

$m(H)_{agua}$ – masa del hidrógeno en el agua, (kg)

$$m(O)_{agua} = m(agua) - m(H)_{agua} \dots\dots\dots 2.29$$

Donde:

$m(O)_{agua}$ – masa del oxígeno en el agua, (kg)

2.11 Determinación de los componentes que se encuentran en el Polvo

$$m(\text{Ni})_{\text{polvo}} = m(\text{Ni})_{\text{entrada}} - m(\text{NiO})_{\text{NiO}} \dots\dots\dots 2.30$$

Donde:

$m(\text{Ni})_{\text{polvo}}$ – masa del níquel en el polvo, (kg)

$m(\text{Ni})_{\text{entrada}}$ – masa del níquel en la entrada, (kg)

$m(\text{Ni})_{\text{NiO}}$ – masa del níquel en el óxido de níquel, (kg)

$$m(\text{O})_{\text{polvo}} = m(\text{polvo}) - m(\text{Ni})_{\text{polvo}} \dots\dots\dots 2.31$$

Donde:

$m(\text{O})_{\text{polvo}}$ – masa del oxígeno en el polvo, (kg)

$m(\text{Ni})_{\text{polvo}}$ – masa del níquel en el polvo, (kg)

2.12 Determinación del nitrógeno y el oxígeno en la salida

$$m(\text{N})_{\text{salida}} = m(\text{N})_{\text{entrada}} \dots\dots\dots 2.32$$

Donde:

$m(\text{N})$ – masa del nitrógeno en la salida, (kg)

$$m(\text{O})_{\text{salida}} = m(\text{O})_{\text{entrada}} - m(\text{O})_{\text{NiO}} - m(\text{O})_{\text{CO}_2} - m(\text{O})_{\text{SO}_2} - m(\text{O})_{\text{agua}} - m(\text{O})_{\text{polvo}} \dots\dots\dots 2.33$$

Donde:

$m(\text{O})_{\text{salida}}$ - masa de oxígeno en la salida, (kg)

2.13 Determinación de los componentes que se encuentran en otros

$$m(\text{C})_{\text{otros}} = m(\text{C})_{\text{entrada}} - m(\text{C})_{\text{CO}_2} \dots\dots\dots 2.34$$

Donde:

$m(C)_{\text{otros}}$ - masa del carbono que se encuentra en otros, (kg)

$m(C)_{\text{entrada}}$ - masa del carbono en la entrada, (kg)

$m(C)_{\text{CO}_2}$ - masa del carbono que se encuentra en el CO_2 , (kg)

$$m(H)_{\text{otros}} = m(H)_{\text{entrada}} - m(H)_{\text{agua}} \dots\dots\dots 2.35$$

Donde:

$m(H)_{\text{otros}}$ - masa del hidrógeno que se encuentra en otros, (kg)

$m(H)_{\text{entrada}}$ - masa del hidrógeno en la entrada, (kg)

$m(H)_{\text{agua}}$ - masa del hidrógeno que se encuentra en el agua, (kg)

2.14 Metodología de cálculo para el Balance de Energía

Para el desarrollo del balance de energía se emplea la metodología descrita por ([Chang Cardona 1997](#)) y ([Yarnangoré 2014](#)). Para el desarrollo del balance energético se tienen en cuenta los resultados del balance de masa. En la figura 2.2 se representan las diferentes energías pérdidas, aportadas y consumidas involucradas en el proceso de calcinación.

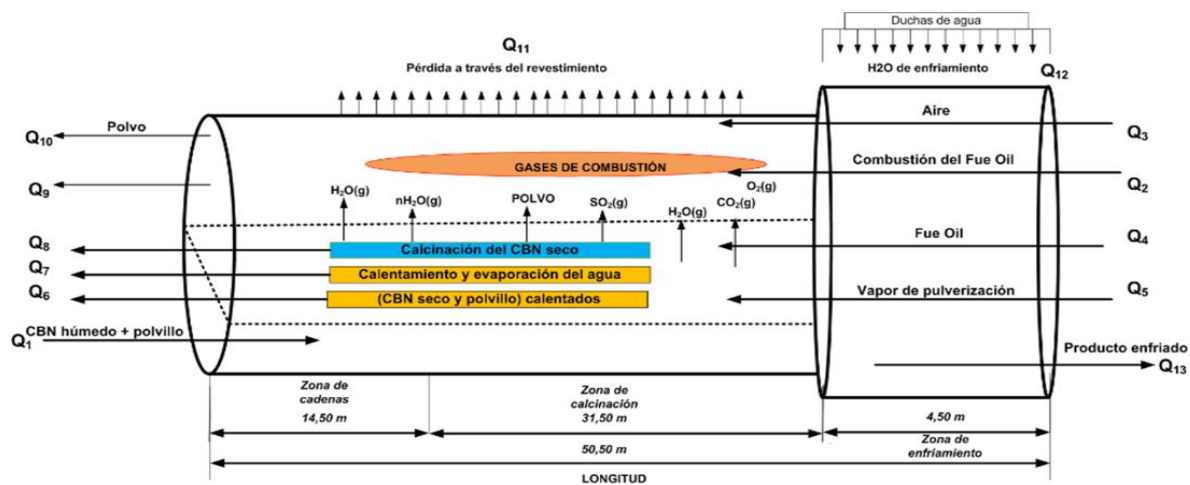


Figura 2.2. Energías involucradas en el balance térmico del horno calcificador

2.15 Principales ecuaciones de entrada

A continuación, se plantean las ecuaciones que se utilizan para el cálculo del calor que entra al horno, el aportado por el proceso de combustión y el calor interno de los cuerpos de los materiales alimentados.

$$Q_1 = F(\text{CBNi},s) * C_p(\text{CBNi}) * t_e^{\text{CBNi}} + F(\text{polvillo}) * C_p(\text{polvillo}) * t_e^{\text{polvillo}} \dots\dots\dots 2.36$$

Donde:

Q_1 - flujo de calor aportado por el carbonato básico de níquel y el polvillo alimentado al horno (kJ/h)

$C_p(\text{CBNi},s)$ y $C_p(\text{polvillo})$ - Capacidad calorífica media del carbonato básico de níquel y del polvillo en la zona de cadena (kJ/kmol °C)

t_e^{CBNi} y t_e^{polvillo} - temperaturas de entrada del CBNi y el polvillo (°C)

2.15.1 Calor aportado por el combustible

$$Q_2 = F(\text{fuel oil}) * PCI \dots\dots\dots 2.37$$

Donde:

Q_2 : flujo de calor aportado por el combustible (kJ/h)

$F(\text{fuel oil})$: flujo másico del fuel oil (kg/h)

PCI: poder calórico del combustible (kJ/kg)

2.15.2 Calor aportado por el aire

$$Q_3 = F_a * C_p(a) * t_a \dots\dots\dots 2.38$$

Donde:

Q_3 : flujo de calor aportado por el aire de combustión (kJ/h)

$C_p(a)$: calor específico del aire (kJ/m³ °C)

t_a : temperatura absoluta del aire (°C)

2.15.3 Calor físico del fuel oil precalentado

$$Q_4 = F(\text{fuel oil}) * C_p(c) * t_c \dots\dots\dots 2.39$$

Donde:

Q_4 : flujo de calor físico aportado por el combustible (kJ/h)

$C_{p(c)}$: calor específico del combustible (kJ/kg °C)

t_c : temperatura del combustible (°C)

2.15.4 Calor aportado por el vapor de pulverización

$$Q_5 = F_{VP} * H(H_2O)_V \dots\dots\dots 2.40$$

Donde:

Q_5 : flujo de calor aportado por el vapor de pulverización (kJ/h)

F_{VP} : flujo de vapor de pulverización (kg/h)

$H(H_2O)_V$: entalpía específica de vapor de agua saturado (kJ/kg)

2.16 Principales ecuaciones de calor útil

A continuación, se plantean las ecuaciones que se utilizan para el cálculo del calor útil dentro del horno.

2.16.1 Calor físico del CBNi seco y polvillo a la salida de la zona de cadenas

$$Q_6 = F(\text{CBNi},S) * C_p(\text{CBNi}) * t_s^{\text{CBNi}} + F(\text{polvillo}) * C_p(\text{polvillo}) * t_s^{\text{polvillo}} \dots\dots\dots 2.41$$

Donde:

Q_6 : flujo de calor consumido por el CBNi + polvillo en la zona de cadenas (kJ/h)

$C_p(\text{CBNi})$ y $C_p(\text{polvillo})$: Capacidad calorífica media del CBNi y el polvillo a la temperatura de salida de la zona de cadenas (kJ/kg°C)

t_s^{CBNi} y $t_s^{polvillo}$: temperatura de salida en la zona de cadenas (°C)

2.16.2 Calor para calentar y evaporar el agua

$$Q_7 = F(H_2O)_{libre} * [Cp(H_2O) * (t_{eb} - t_e^{CBN}) + \lambda_v] \dots\dots\dots 2.42$$

Donde:

$Cp(H_2O)$: calor específico del agua (kJ/kg °C)

λ_v : calor específico de evaporación del agua (kJ/kg)

t_{eb} : temperatura de ebullición del agua (°C)

2.16.3 Calor para la calcinación de CBNi seco

$$Q_8 = F(CBNi,s) * \Delta H_T(CBNi,s) + F(NiSO_4) * \Delta H_T(NiSO_4) \dots\dots\dots 2.43$$

Donde:

Q_8 : flujo de calor necesario para la calcinación de carbonato seco (kJ/h)

$\Delta H_T (CBNi,s)$: entalpía de formación de carbonato básico de níquel sin considerar el agua externa, ni el $NiSO_4$ (kJ/kg)

$F(CBNi,s)$: flujo másico de carbonato de níquel seco sin considerar el flujo de sulfuro de níquel (kg/h)

$\Delta H_T (NiSO_4)$: entalpía de formación de sulfuro de níquel (kJ/kg)

2.17 Principales ecuaciones de calor perdido

Las siguientes ecuaciones permiten determinar las principales pérdidas de calor.

2.17.1 Calor sensible de los gases salientes

$$Q_9 = \sum [F_{GS} * Cp_{GS}] * t_g^S \dots\dots\dots 2.44$$

Donde:

Q_9 : calor perdido por el flujo de gases salientes (kJ/h)

C_{pGS} : calor específico de los gases salientes (kJ/kg °C)

t_g^s : temperatura de salida de los gases (°C)

2.17.2 Calor sensible del polvo

$$Q_{10} = F(\text{polvo}) * C_p(\text{polvo}) * t_g^s \dots\dots\dots 2.45$$

Donde:

$C_{p(\text{polvo})}$: calor específico del polvo a la temperatura de salida de los gases (kJ/kg °C)

2.17.3 Pérdidas a través de las paredes

$$Q_{11} = Q_p^{ZD} + Q_p^{ZC} \dots\dots\dots 2.46$$

Donde:

Q_{11} : calor perdido con el medio por las paredes (kJ/h)

Q_p^{ZD} : calor perdido en la zona de cadenas (kJ/h)

Q_p^{ZC} : calor perdido en la zona de calcinación (kJ/h)

La temperatura del ladrillo

La temperatura del ladrillo en el interior del horno será determinada por la siguiente expresión.

$$t_l = \frac{t_e^G - t_s^G}{\ln\left(\frac{t_e^G - 0.5*(t_e^M + t_s^M)}{t_e^G - 0.5*(t_e^M + t_s^M)}\right)} + 0.5 * (t_e^M + t_s^M) \dots\dots\dots 2.47$$

Donde:

t_e^g y t_s^g : temperatura de entrada y salida de los gases en las respectivas zonas (°C)

t_e^m y t_s^m : temperatura de entrada y salida del carbonato en las respectivas zonas (°C)

Determinación de las pérdidas en la zona de cadenas

$$Q_p^{ZD} = \frac{2\pi * L_{ZD} * (t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_{rev}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{rev}}{D_{in}}\right)_{rev} + \frac{1}{\lambda_{acero}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{acero}}{D_{in} + 2 * \delta_{rev}}\right)_{acero}} \dots\dots\dots 2.48$$

Donde:

L^{ZD} : longitud de la zona de cadenas (m)

λ_{rev} : conductividad térmica del revestimiento (W/m K)

λ_{acero} : conductividad térmica del acero (W/m K)

D_{in} : diámetro interior del horno con el revestimiento (m)

δ_{rev} : espesor del revestimiento (m)

δ_{acero} : espesor del acero (m)

t_3 : temperatura de la cubierta del horno (°C)

t_1 : temperatura del ladrillo (°C)

Determinación de las pérdidas en la zona de calcinación

Para el cálculo de las pérdidas de calor esta zona será dividida en dos secciones.

$$Q_p^{ZC} = Q_p^{S1} + Q_p^{S2} \dots\dots\dots 2.49$$

Donde:

Q_{pZC} : flujo de calor perdido a través de las paredes en la zona de calcinación (kJ/h)

Q_p^{S1} : flujo de pérdidas de calor en la sección 1 (kJ/h)

Q_p^{S2} : flujo de pérdidas de calor en la sección 2 (kJ/h)

Determinación de la longitud de las secciones 1 y 2

$$L_{S(1,2)} = \eta_B * L_S = \frac{(L_{ZC} + L_{ZE})}{L_B} * L_S \dots\dots\dots 2.50$$

Donde

$L_{s(1,2)}$: longitud de la sección 1 o 2. (m)

L_{ZC} : longitud de la zona de calcinación (m)

L_{ZE} : longitud de la zona de enfriamiento (m)

L_B : longitud del bloque instalado en las dos zonas (m)

L_S : longitud de la sección del bloque (m)

n_B : cantidad de bloques que se debe instalar en la zona de calcinación y enfriamiento

Sección 1

$$Q_p^{S1} = \frac{2\pi * L_{s1} * (t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_{rev}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{rev}}{D_{in}}\right)_{rev} + \frac{1}{\lambda_{acero}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{acero}}{D_{in} + 2 * \delta_{rev}}\right)_{acero}} \dots\dots\dots 2.51$$

Donde:

L_{s1} : longitud de la sección 1 (m)

Sección 2

$$Q_p^{S2} = \frac{2\pi * L_{s2} * (t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_{rev}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{rev}}{D_{in}}\right)_{rev} + \frac{1}{\lambda_{fibra}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{fibra}}{D_{in} + 2 * \delta_{fibra}}\right)_{fibra} + \frac{1}{\lambda_{acero}} * \ln\left(1 + \frac{2 * \delta_{acero}}{D_{in} + 2 * \delta_{rev}}\right)_{acero}} \dots\dots\dots 2.52$$

Donde:

L_{s2} : longitud de la sección 2 (m)

λ_{fibra} : conductividad térmica de la fibra cerámica (W/m K)

δ_{fibra} : espesor de la fibra cerámica (m)

2.17.4 Pérdidas de calor con el agua de enfriamiento

$$Q_{12} = F(H_2O) * C_p(H_2O) * (t_a^{H_2O} - t_d^{H_2O}) \dots\dots\dots 2.53$$

Donde:

Q_{12} : flujo de calor perdido por el agua de enfriamiento (kJ/h)

F (H_2O): flujo másico de agua de enfriamiento (kg/h)

C_p (H_2O): calor específico del agua de enfriamiento (kJ/kg °C)

$t_a^{H_2O}$: temperatura del agua antes del enfriamiento (°C)

$t_d^{H_2O}$: temperatura del agua después del enfriamiento (°C)

2.17.5 Pérdidas de calor del producto enfriado

$$Q_{13} = F_{PF} * C_p(PF) * t_s^{PF} \dots\dots\dots 2.54$$

Donde:

Q_{13} : flujo de calor perdido en el producto final (kJ/h)

C_p (PF): calor específico del producto final (kJ/kg °C)

t_s^{PF} : temperatura salida del producto calcinado (°C)

2.18. Cálculo del índice de consumo de Fuel Oil

El índice de consumo de Fuel - Oil se haya por la siguiente ecuación:

$$IFO = \frac{FOconsumido}{NiOdescargado} \dots\dots\dots 2.55$$

Donde:

IFO : Índice de Fuel - Oil

FO consumido: (toneladas)

NiO descargado (toneladas)

En donde la norma del IFO para este año (2024) es de 0,489

Conclusiones parciales del capítulo 2

Fue definida la metodología de investigación a seguir.

Se plasmaron las principales ecuaciones que se utilizaron con el objetivo de calcular las masas de los diferentes elementos que intervienen en el proceso de calcinación.

Se plasmaron las principales ecuaciones que se utilizaron con el objetivo de realizar balances de energía en el proceso de calcinación.

Se determinó el índice de consumo de fuel oil para los siguientes casos: baja alimentación de la pulpa de carbonato, periodos de calentamiento y alta humedad de la materia prima alimentada.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente capítulo se exponen los resultados de la metodología de cálculo desarrollada en el Capítulo 2 para la realización de los balances de masa y energía y el análisis de los índices fundamentales del proceso. Se creó una hoja en MS Excel donde fueron desarrollados los cálculos.

3.1 Balance de masa en el horno calcinador

El balance de masa fue desarrollado a partir de los datos iniciales expuestos en las tablas 2.1 y tabla 2.2 . A través de estas tablas se hicieron los correspondientes cálculos.

3.1.1 Cálculo de composición de CBNi seco

Sustituyendo valores en la ecuación 2.1 se obtuvo el flujo de carbonato seco alimentado al horno.

$$m(\text{CBNi})_{\text{seco}} = \frac{300 * (100 - 67,500)}{100} = 97,500 \text{ kg}$$

3.1.2 Masas de los elementos contenidos en el CBNi

Se calcularon las masas de los elementos presentes en el CBNi seco por las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 obteniéndose los resultados siguientes.

$$m(\text{S}) = \frac{97,500}{669,682} * 32,00 = 4,659 \text{ kg}$$

$$m(\text{Ni}) = \frac{97,500 * 51,49}{100} = 50,203 \text{ kg}$$

$$m(\text{C}) = \frac{97,500 * 2 * 12,011}{669,682} = 3,497 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{CBNi}} = 97,500 - 50,203 = 47,297 \text{ kg}$$

$$m(\text{H})_{\text{CBNi}} = \frac{97,500 * 6}{669,682} = 0,874 \text{ kg}$$

3.2.1 Masas por elementos en el Polvo

A partir de la masa de Polvo calculado por la ecuación 2.7, se sustituyen los valores conocidos en las ecuaciones 2.8 y 2.9 obteniéndose los siguientes resultados:

$$m(\text{Ni})_{\text{polvo}} = \frac{50,00 * 72}{100} = 36,00 \text{ kg}$$

Ahora calculamos la masa de oxígeno en el polvo

$$m(\text{O})_{\text{polvo}} = 50,00 - 36,00 = 14,00 \text{ kg}$$

A partir de la masa del Fuel Oil calculado se sustituyen los valores conocidos en la ecuación 2.11 obteniéndose la masa del carbono en el Fuel Oil y en la ecuación 2.12 para hallar la masa de hidrógeno contenido en él.

$$m(\text{C})_{\text{Fuel Oil}} = \frac{30,00 * 12 * 12,011}{170,132} = 25,415 \text{ kg}$$

$$m(\text{H})_{\text{Fuel Oil}} = 30,00 - 25,415 = 4,865 \text{ kg}$$

3.2.2 Masas contenidas en el Aire

Después de haber calculado la masa de Aire por la ecuación 2.13 se halla ahora los elementos contenidos en el por las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16.

$$m(\text{O})_{\text{aire}} = 276,413 * 0,21 = 58,047 \text{ kg}$$

$$m(\text{N})_{\text{aire}} = 276,413 * 0,78 = 215,602 \text{ kg}$$

$$m(\text{Otros})_{\text{aire}} = 276,413 - 215,602 - 58,047 = 2,764 \text{ kg}$$

3.2.3 Masas contenidas en el Agua

A partir de la masa de agua la cual fue calculada por la ecuación 2.17 se hallan los componentes que se encuentran en ella por las ecuaciones 2.18 y 2.19 obteniendo los siguientes resultados:

$$m(\text{O})_{\text{agua}} = \frac{202,500 * 16,00}{18,00} = 180,00 \text{ kg}$$

$$m(\text{H})_{\text{agua}} = 202,500 - 180,00 = 22,500 \text{ kg}$$

3.2.4 Masa de otros elementos que entran al proceso

Después de haber calculado las masas de los diferentes elementos, ahora calculamos la masa de otros elementos que entra al proceso la cual se realiza por la ecuación 2.20, obteniendo los siguientes resultados:

$$m(\text{otros})_{\text{entrada}} = 276,413 - 215,602 - 58,047 = 2,764 \text{ kg}$$

3.3 Cálculo del producto calcinado

A partir de la ecuación 2.21 se cálculo la masa de NiO que sale del proceso, y ahora calculamos los elementos que se encuentran en el por las ecuaciones 2.22 y 2.23 obteniendo los resultados siguientes:

$$m(\text{Ni})_{\text{NiO}} = 86,203 * 0,77 = 66,376 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{NiO}} = 86,20275 - 66,376 = 86,20275 \text{ kg}$$

3.3.1 Masas de los elementos que se encuentran en el CO₂

A partir de la masa de CO₂ se calcularon las masas de los elementos contenidos en el por las ecuaciones 2.24 y 2.25, dando los siguientes resultados:

$$m(\text{C})_{\text{CO}_2} = \frac{2,459 * 12,011}{44,011} = 0,671 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{CO}_2} = \frac{2,459 * 16,00}{44,011} = 0,894 \text{ kg}$$

3.3.2 Masas de los elementos que se encuentran en el SO₂

Ahora calculamos la masa de los elementos que se encuentran en el SO₂ a partir de las ecuaciones 2.26 y 2.27, dando estos resultados:

La masa de azufre en el SO₂ que sale es igual a la masa de azufre que entra en el proceso, por tanto:

$$m(\text{S})_{\text{SO}_2} = 4,659 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{SO}_2} = \frac{9,317 * 16,00}{64,00} = 2,329 \text{ kg}$$

3.3.3 Masas de los elementos que se encuentran en el Agua

Se calcularon las masas de los componentes que se encuentran en el agua por las ecuaciones 2.28 y 2.29 dando los siguientes resultados:

$$m(\text{H})_{\text{agua}} = \frac{202,500}{18,00} = 11,25 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{agua}} = 202,500 - 11,25 = 191,250 \text{ kg}$$

3.3.4 Masas de los elementos que se encuentran en el Polvo

A partir de la masa de polvo se calcularon las masas contenidas en ella por las ecuaciones 2.30 y 2.31 dando estos resultados:

$$m(\text{Ni})_{\text{polvo}} = 86,203 - 66,376 = 19,827 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{polvo}} = 27,536 - 19,827 = 7,710 \text{ kg}$$

3.3.5 Masas de los elementos que se encuentran en el Nitrógeno y en el Oxígeno

La masa de nitrógeno en la salida es igual a la masa de nitrógeno en la entrada la cual se calculó por las ecuaciones 2.32 y 2.33, por tanto:

$$m(\text{N})_{\text{salida}} = 215,602 \text{ kg}$$

$$m(\text{O})_{\text{salida}} = 299,344 - 19,827 - 0,894 - 2,329 - 191,250 - 7,710 = 77,333 \text{ kg}$$

3.3.6 Masas de otros elementos que salen del proceso

Ahora calculamos las masas de otros elementos que salen del proceso por las ecuaciones 2.34 y 2.35 por tanto:

$$m(\text{C})_{\text{otros}} = 28,241 \text{ kg}$$

$$m(\text{H})_{\text{otros}} = 27,958 - 11,25 = 16,708 \text{ kg}$$

La masa de otros en la salida es igual a la masa de otros en la entrada por tanto:

$$m(\text{otros})_{\text{salida}} = 2,764 \text{ kg}$$

3.3.7 Comprobación de resultados de Balance de Masa

En la tabla 3.1 se resumen los resultados de los balances de masa por elementos y por compuestos, utilizando la hoja de cálculo en MS Excel elaborada.

Tabla 3.1. Resultados de balance de masa por elementos.

ENTRADA

Element. / Comp.	Ni	S	C	O	H	N	Otros	Total	%
Carbto.	50,203	4,659	3,497	47,297	0,874			97,500	64,032
Polvo	36,000			14,000				50,000	7,514
Fuel oil			25,415		4,585			30,000	4,508
Aire				58,047		215,60 2	2,764	276,41 3	41,538
Agua				180,00 0	22,500			202,50 0	23,531
Otros							2,764	2,764	0,415
Total	86,203	4,659	28,913	299,34 4	27,958	215,60 2	2,764	665,44 3	100
%	12,954	0,700	4,345	44,984	4,201	32,400	0,415	100	

SALIDA

NiO	66,376			19,827				86,203	12,954
CO₂			0,671	0,894				654,23 7	25,00
SO₂		4,659		2,329				19,480	2,927
Agua				191,25 0	11,25			202,50 0	12,310

Polvo	19,827			7,710				27,537	4,138
N						215,60 2		215,60 2	15,500
O				77,333				664,75 4	20,00
Otros		0,000	28,241	0,000	16,708		2,764	47,714	7,171
Total	86,203	4,659	28,913	299,34 4	27,958	215,60 2	2,764	665,44 3	100
%	12,954	0,700	4,345	44,984	4,201	32,400	0,415	100	

Como se puede apreciar, de las corrientes de entrada el aire representa el 41,538% del total y el CBNi el 64,032%. En las corrientes de salida el flujo más influyente es el de los gases salientes representando un 25,00%, debido al aumento de la humedad contenida en el CBNi. El producto calcinado representa solamente un 12,954% de las masas salientes del proceso.

3.4 Metodología de cálculo para el Balance de Energía

La realización de los balances de energía es fundamental en cualquier proceso, para determinar su eficiencia. Una limitación importante en los balances de energía es la falta de datos o en la exactitud de los datos disponibles, por lo que los resultados de análisis dependen de la exactitud de los mismos, en las tablas 3.2, 3.3 se presentan las temperaturas de entrada y salida de cada una de las zonas del horno.

Tabla 3.2. Temperatura del CBNi dentro del horno

Temperatura		°C
Entrada del CBNi +polvillo		80
Zona de Cadena	Entrada	80
	Salida	450

Zona de Calcinación	Entrada	450
	Salida	825
Zona de Enfriamiento	Entrada	825
	Salida	350

Tabla 3.3. Temperatura de los gases dentro del horno.

Temperatura		°C
Zona de Calcinación	Entrada	1 250
	Salida	770
Zona de Cadena	Entrada	770
	Salida	380
Salida de los gases		350

Las capacidades caloríficas también fueron determinadas en la hoja de cálculo y fueron determinadas como Cp de la mezcla por la ecuación:

$$Cp_m = \sum x * Cpx \dots\dots\dots 3.1$$

Donde:

Cp_m: capacidad calorífica de la mezcla (kJ/kg °C)

x: fracción masa de la especie (flujo del compuesto/ flujo de la corriente)

Las capacidades caloríficas específicas de las especies metálicas fueron determinadas a la temperatura media de cada zona ((temperatura de entrada + temperatura de salida)*0.5), por ([Samsonov,1980](#)) como capacidades caloríficas polinomiales por la ecuación:

$$Cp = a + b * T - c * T^{-2} \dots\dots\dots 3.2$$

Donde a, b y c representan constantes específicas para cada compuesto presentes en la bibliografía utilizada.

Tabla 3.4. Capacidades caloríficas del CBNi

Cp (kJ/kg °C)							
Zona	Tm (°C)	NiCO₃	NiSO₄	Ni(OH)₂	Fe(OH)₃	Co(OH)₃	CBNi
Cadena	265	0,464	2,483	0,634	0,952	0,409	0,886
Calcinación	638	0,464	2,483	0,634	0,952	0,409	0,886

Tabla 3.5. Capacidades caloríficas de la corriente de reciclo

Cp (kJ/kg°C)					
Zona	T media (°C)	NiO	FeO	CoO	Polvillo
Cadena	265	1,34	0,767	0,698	1,319
Calcinación	638	2,175	0,809	0,745	2,138
Arrastre con los gases	565	2,016	0,802	0,737	1,982

Tabla 3.6. Capacidad calorífica del producto calcinado

Cp (kJ/kg°C)					
Zona	T media (°C)	NiO	FeO	CoO	P.F
Enfriamiento	588	2,066	0,804	0,739	2,0191

Las capacidades caloríficas de los gases salientes se determinaron también por Cp de mezcla, utilizando capacidades calóricas por compuestos a temperatura media de la zona expuestos en ([Cruz Viera 1985](#)).

Tabla 3.7. Capacidades caloríficas de los gases salientes

Cp (kJ/kg°C)							
Zona	T media (°C)	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	G.S
Cadena	560	0,84	0,71	2,08	0,92	1,04	1,33

La capacidad calórica del aire de determina también como Cp de mezcla, los Cp del aire seco y del agua fueron tomados a la temperatura de inyección al horno (30°C) de ([Mijeeu](#))

Tabla 3.8. Capacidad calorífica del aire húmedo

Cp (kJ/kg°C)			
T media (°C)	aire seco	H ₂ O	Aire Húmedo
30	1,005	4,174	1,046

Las características del combustible se tomaron de la ficha técnica del combustible.

Tabla 3.9. Propiedades físicas del combustible: fuel oil

Parámetros	U/M	Magnitudes
PCI	kJ/kg	40 641,619
Cp(c)	kJ/(kg°C)	2,1
tc	°C	150
Ic (índice de consumo de combustible)	kg/t de NiO	490

El flujo de agua de enfriamiento fue tomado del reporte técnico mensual de la planta Termoeléctrica, el agua sale de las duchas a temperatura ambiente bañando las paredes del horno en la zona, hasta caer en la piscina. Para la determinación de la temperatura del agua luego del enfriamiento se realizaron varias mediciones usando un pirómetro óptico y promediando los valores obtenidos en las mediciones. Los valores de densidad y capacidad calorífica fueron tomados de ([Pávlov 1976](#)).

Tabla 3.10 Propiedades del agua de enfriamiento.

Índice	U/M	Valor
Flujo de H₂O de enfriamiento	m ³ /h	20,58
Temperatura inicial	°C	25
Temperatura final	°C	45
Densidad a temperatura inicial	kg/m ³	993
C_p (a T_{media})	kJ/(kg°C)	4,18
Flujo de H₂O de enfriamiento	kg/h	20 434,67

3.4.1 Principales ecuaciones de entrada

Por medio de las siguientes ecuaciones se determinarán los flujos de calores aportados al equipo por los diferentes materiales entrantes.

3.4.1.1 Calor aportado por el carbonato básico de níquel más el polvillo

El calor aportado al horno por la carga alimentada se determinó por la ecuación 2.36. Los flujos se toman de la tabla 3.1, las capacidades caloríficas de la tabla 3.4 y 3.5, las temperaturas se toman de la tabla 3.2 y 3.3

$$Q_1 = 97,500 * 0,886 * 80 + 50,00 * 1,319 * 80 = 12186,8 \text{ kJ/h}$$

3.4.1.2 Calor aportado por el combustible

El calor aportado por el combustible se determinó por la ecuación 2.37. El poder calórico inferior se toma de la tabla 3.9:

$$Q_2 = 30,00 * 40641,619 = 1219248,57 \text{ kJ/h}$$

3.4.1.3 Calor aportado por el aire

El calor aportado por el aire de combustión se determinó por la ecuación 2.38:

$$Q_3 = 17\ 181,05 * 1,0468 * 30 = 539\ 528,843 \text{ kJ/h}$$

3.4.1.4 Calor físico del fuel oil precalentado

El calor físico que aporta el combustible se determinó por la ecuación 2.39:

$$Q_4 = 30,00 * 2,1 * 117 = 235\ 117,84 \text{ kJ/h}$$

3.4.1.5 Calor aportado por el vapor de pulverización

El calor aportado por el vapor se determinó por la ecuación 2.40. La entalpía del vapor es de 2781 kJ/kg, se toma de ([Pávlov, 1976](#)) a $P = 9,5 \text{ at}$ y $t = 175,50 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q_5 = 182,77 * 2781 = 508\ 293,41 \text{ kJ/h}$$

3.5.2.1 Calor físico del CBNi seco y polvillo a la salida de la zona de cadenas

El calor consumido por el carbonato a la salida de la zona de cadenas se determinó por la ecuación 2.41:

$$Q_6 = 97,500 * 0,886 * 450 + 50,00 * 2,138 * 450 = 86978,25 \text{ kJ/h}$$

3.5.2.2 Calor para calentar y evaporar el agua

El calor consumido para evaporar el agua en el carbonato se determinó por la ecuación 2.42. La capacidad calórica igual a $4,19 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$ en el intervalo de temperatura de la ecuación y el calor

de vaporización 2258,4 kJ/kg para el agua en la línea de saturación a presión de 1 atmósfera y temperatura de ebullición 100°C según ([Pávlov, 1976](#)):

$$Q_7 = 202,500 * [4,19 * (100 - 80) + 2258,4] = 474295,5 \text{ kJ/h}$$

3.5.2.3 Calor para la calcinación de CBNi seco

El calor consumido para calcinar el CBNi seco se determinó por la ecuación 2.43.

Para lograr mayor exactitud se utilizan los resultados expuestos por ([Romero, 1991](#)) según los cuales la disociación completa en CBNi ocurre en dos etapas:

- I. Eliminación de la humedad externa;
- II. Eliminación del H₂O interna presente en la estructura cristalina del CBN;

Para una entalpía total de las dos etapas igual a: $\Delta H_T = 533,57 \text{ kJ/kg}$.

Además, se considera la disociación del sulfato de níquel: $\Delta H_R(\text{NiSO}_4) = 336,013 \text{ kJ/kg}$

$$Q_8 = 97,500 * 533,57 + 400,798 * 336,013 = 186\ 696,413 \text{ kJ/h}$$

3.6.3.1 Calor sensible de los gases salientes

El calor perdido en los gases salientes se determinó por la ecuación 2.44

$$Q_9 = 1462,5 * 1,982 * 380 = 1101\ 468,97 \text{ kJ/h}$$

3.6.3.2 Calor sensible del polvo

El calor perdido con el polvo se determinó por la ecuación 2.45

$$Q_{10} = 50,00 * 1,982 * 380 = 37658,00 \text{ kJ/h}$$

3.6.3.3 Pérdidas a través de las paredes

Para determinar las pérdidas de calor a través de las paredes se utiliza la metodología validada por ([Yarnangoré, 2014](#)), considerando solamente la conducción a través de las paredes, dividiendo el horno por zonas y considerando del tipo de ladrillo, características físico mecánicas y la forma geométrica del mismo. La tabla 3.2 recoge los datos generales para la determinación del calor perdido por las paredes.

Tabla 3.11. Propiedades de los materiales

	Material	D_{int} (m)	δ (m)	λ(W/m°C)
Carcaza	Acero inoxidable	3,15	0,035	46,5
Revestimiento	Chamota	2,75	0,2	1,25
Revestimiento	Bauxita	2,65	0,25	2,3
Fibra cerámica	Silice	2,63	0,01	0,3

La temperatura del ladrillo se determina por la siguiente expresión

Haciendo uso de la ecuación 2.47, sustituyendo los datos de la tabla 3.3 se obtuvieron las temperaturas del ladrillo en el interior del horno en ambas zonas.

$$t_{1CD} = \frac{770^{\circ}\text{C} - 380^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{770^{\circ}\text{C} - 0.5 * (80^{\circ}\text{C} + 450^{\circ}\text{C})}{380^{\circ}\text{C} - 0.5 * (80^{\circ}\text{C} + 450^{\circ}\text{C})}\right)} + 0.5 * (80^{\circ}\text{C} + 450^{\circ}\text{C}) = 529^{\circ}\text{C}$$

$$t_{1C} = \frac{1250^{\circ}\text{C} - 770^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{1250^{\circ}\text{C} - 0.5 * (450^{\circ}\text{C} + 825^{\circ}\text{C})}{770^{\circ}\text{C} - 0.5 * (450^{\circ}\text{C} + 825^{\circ}\text{C})}\right)} + 0.5 * (450^{\circ}\text{C} + 825^{\circ}\text{C}) = 951^{\circ}\text{C}$$

Tabla 3.12. Temperatura del ladrillo

Zona	t₁(°C)	t₂(°C)
Cadena	529	169
Calcinación	951	355

Las t₃ fueron resultados promediados de los datos recopilados en los reportes diarios de la planta en el mes de Mayo 2024 de las temperaturas internas en los diferentes puntos de medición instalados en el horno.

➤ **Determinación de las pérdidas en la zona de cadenas**

Las pérdidas en la zona de cadenas fueron determinadas por la ecuación 2.48, en esta zona los ladrillos refractarios instalados son de Chamota.

$$Q_p^{ZD} = \frac{2\pi * 14,5m * (529^\circ C - 951^\circ C)}{\frac{1}{1,25W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,2m}{2,75m}\right)_{rev} + \frac{1}{46,5 W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,035m}{3,15m}\right)_{acero}} = 300\ 084,239\ W$$

➤ **Determinación de las pérdidas en la zona de Calcinación**

Para el cálculo de las pérdidas de calor esta zona será dividida en dos secciones, en las zonas de calcinación y enfriamiento el material refractario instalado es bauxita y tiene además una fibra cerámica de sílice entre el refractario y la carcasa del horno.

➤ **Sección 1**

La longitud de la sección 1 se determinó por la ecuación 2.47

$$L_{S1} = \frac{(31,5\ m + 4,5\ m)}{0,198m} * 0,048m = 8,727m$$

Una vez calculados todos los datos necesarios se determinó por la ecuación 2.51 las pérdidas de energía a través de la sección 1 de los ladrillos.

$$Q_p^{S1} = \frac{2\pi * 8,727m * (951^\circ C - 355^\circ C)}{\frac{1}{2,3W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,25m}{2,65m}\right)_{rev} + \frac{1}{46,5W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,035m}{3,15m}\right)_{acero}} = 431\ 974,348W$$

➤ **Sección 2**

La longitud de la sección 2 se determinó por la ecuación 2.50, las características del bloque instalado en la zona fueron tomadas de la figura 4 del anexo, para la determinación de las pérdidas se utilizó la ecuación 2.51.

$$L_{S2} = \frac{(31,5\ m + 4,5\ m)}{0,198m} * 0,102m = 18,545m$$

$$Q_p^{S2} = \frac{2\pi * 18,545m * (951^\circ C - 355^\circ C)}{\frac{1}{2,3W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,25m}{2,65m}\right)_{rev} + \frac{1}{0,3W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,01m}{2,63m}\right)_{fibra} + \frac{1}{46,5W/m^\circ C} * \ln\left(1 + \frac{2 * 0,035m}{3,15m}\right)_{acero}} = 688\ 149,2102W$$

Las pérdidas totales de la zona de calcinación fueron calculadas por la ecuación 2.49

$$Q_p^{ZC} = 431974,348W + 688149,2102W = 1\,120\,123,56\,W.$$

Por último, se determina el calor perdido a través de las paredes en todo el horno por la ecuación 2.46.

$$Q_{11} = 300\,084,239\,W + 1\,120\,123,56\,W = 1\,420\,207,79\,W$$

$$1\,W * 1 \frac{J}{s} * 0.001 \frac{kg}{J} * 3600 \frac{s}{h}$$

Entonces: $Q_{11} = 5\,112\,748,07\,kJ/h$

3.6.3.4 Pérdidas de calor con el agua de enfriamiento

El calor perdido en la zona de enfriamiento se determinó por la ecuación 2.53

$$Q_{12} = 202,500 * 4,18 * (45 - 25) = 16929,00\,kJ/h$$

3.6.3.5 Pérdidas de calor del producto enfriado

La cantidad de calor que se pierde con el producto enfriado se determinó por la ecuación 2.54

$$Q_{13} = 133,916 * 2,019 * 350 = 94632,09\,kJ/h$$

3.7 Comprobación de los resultados de Balance Energía

En la tabla 3.13 se resumen los resultados del balance de energía desarrollado para facilitar la comprobación de los mismos.

Tabla 3.13 Resultados de Balance de Energía

Calor Aportado	kJ/h	%
Q ₁ : CBNi + polvillo	12186,8	0,485
Q ₂ : Combustión del fuel oil	1219248,57	48,491
Q ₃ : aire que entra al horno	539528,843	21,458

Q4: Calor físico del fuel oil	235117,84	9,351
Q5: el vapor de pulverización	508293,41	20,215
Total	3 418 866,02	100
Calor útil		
Q6: CBNi,s + polvillo a salida de la zona de cadenas	86978,25	2,544
Q7: calentar y evaporar el agua	474295,5	35,873
Q8: la calcinación del CBNi seco	186696,413	5,461
Calor perdido		
Q9: gases salientes	1101468,97	32,217
Q10: polvo	37658,00	3,102
Q11: paredes	1420 207,797	13,535
Q12: agua de enfriamiento	169 29,00	4,50
Q13: producto enfriado	94 632,09	2,768
Total	3 418 866,02	100

Una vez comprobados los resultados obtenidos se puede proceder al análisis de los mismos. Como se puede apreciar en la tabla 3.9, el mayor calor aportado es el Q2, con un 96.0% del calor total suministrado; lo cual se corresponde con la operación del horno, donde se produce la calcinación del mineral por contacto directo con el fuel oil.

Dentro de los calores consumidos útilmente se puede apreciar que Q7 representa un 35,873% del flujo total de calor.

Analizando las pérdidas, a las que se le debe prestar mayor atención es a las que se producen debido a los gases salientes (Q9), que representa el 32,217%.

Por otra parte, el 13,535% del total de calor perdido es por las paredes (Q11); identificándose como causa fundamental, la pérdida de espesor de los ladrillos refractarios del interior del horno, por incumplir los ciclos de mantenimiento y por el material de los mismos.

3.8 Cálculo del índice de consumo de Fuel Oil

A través de la ecuación 2.55 y de la tabla 3.1 se calcula el índice de consumo de Fuel Oil para los siguientes casos:

La baja carga alimentada al horno calcinador, alto % de humedad de la pulpa de carbonato y los períodos en calentamiento que en este caso se realizó con 4h de calentamiento, dando los siguientes resultados:

1ro para la baja carga alimentada al horno calcinador

$$IFO = \frac{30,00}{78,479} = 0,382$$

2do para el alto % de humedad de carbonato

$$IFO = \frac{20,400}{51,721} = 0,394$$

3ro para 4h de calentamiento

$$IFO = \frac{26,800}{71,835} = 0,373$$

Estos son los resultados del índice de consumo de Fuel Oil para los casos mencionados anteriormente por lo que se demuestra que el índice se ha incumplido, ya que la norma para este año es de 0,489.

Conclusiones parciales del capítulo 3

- Se aplicó una nueva metodología de cálculo para realizar el balance de masa del proceso de calcinación . La metodología consiste en el cálculo de la composición racional del carbonato básico de níquel que se encuentra en la estructura del carbonato.
- Se realizó el balance de energía del proceso de calcinación.
- Se aplicó una nueva metodología de cálculo para determinar el índice de consumo de Fuel Oil.
- Se creó un software de cálculo para la realización de los balances metalúrgicos del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del trabajo se llega a las siguientes conclusiones:

- 1- Se creó una herramienta computacional para realizar los balances de masa y energía del proceso de calcinación que permitió evaluar el índice de consumo de Fuel Oil.
- 2- Se detectó que actualmente existe un incumplimiento de la norma de consumo del combustible (fuel-oil) usado en el horno a causa del incremento de las pérdidas de energía. Los índices de consumo de combustible calculados dan muy por debajo del valor normado(0,489).
- 3- Se demostró la efectividad de la metodología para los balances de masa y de energía en el horno calcinador de la empresa Ernesto Che Guevara.

RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de trabajos futuros se realizan las siguientes recomendaciones:

1- Realizar otros estudios relacionados con las características generales del Fuel Oil en cuanto a propiedades químicas y físicas de este.

BIBLIOGRAFÍA

1. YARNANGORÉ, B. Balance de masa y de energía del horno de calcinación de la empresa Ernesto Che Guevara. Departamento Metalurgia-Química, 2014
2. PANTOJA, H. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONSUMO DE FUEL-OIL DEL HORNO INDUSTRIAL HERRESHOFF. Departamento Metalurgia-Química, 2008
3. DA Diomidovski Hornos de metalurgia no ferrosa. Edtion ed. Metalurgia, Moscú, 1970
4. CHANG CARDONA, A. R. Y. I. A. *Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos*. Edtion ed. La Habana, 1997.
5. SAMSONOVA G.B, E. A. Propiedades Físico Químicas de los óxidos. Edtion ed. Moscú, 1980..
6. CRUZ VIERA, L. E. A. *Introducción a la Ingeniería Química*. Edtion ed. Editorial Pueblo y Educación 1985.
7. MIJEEU, M. Fundamentos de Termotransferencia. Fundamentos de Termotransferencia/por MA Mijeeu.
8. PÁVLOV, K. F. E. A. *PROBLEMAS Y EJEMPLOS PARA EL CURSO DE OPERACIONES BÁSICAS Y APARATOS EN TECNOLOGÍA QUÍMICA*. Edtion ed., 1976.
9. ROMERO, M. M. Cinética de las reacciones topoquímicas Tesis de doctorado Universidad de La Habana, 1991.

ANEXOS



Foto 1 Hornos de tambor rotatorio de la UBP Calcinación y Sínter



Figura 2 Vista exterior de los hornos.



Foto 3 Tanque de combustible Fuel Oil



Foto 4 Carbonato básico de níquel