

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Especialidad: Metalurgia y Materiales

Trabajo de Diploma

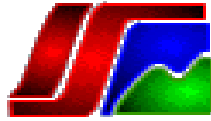
En Opción al Título de
Ingeniería en Metalurgia y Materiales

Análisis termoenergético del proceso de secado de las
menas lateríticas en los hornos rotatorios de la
empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Héctor Carlos González Correoso

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

Especialidad: Metalurgia y Materiales

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de

Ingeniería en Metalurgia y Materiales

Título: Análisis termoenergético del proceso de secado de las menas lateríticas en los hornos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Autor: Héctor Carlos González Correoso

Tutores: M. Sc. Carlos Salazar Oliva

Dr. C. Pedro Enrique Beyris Mazar

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"

Pensamiento

"La calidad nunca es un accidente; siempre es el resultado de un esfuerzo de la inteligencia"

John Ruskin

Dedicatoria

Dedico este trabajo, desde lo más profundo de mi ser y con el mayor orgullo y satisfacción, a mi abuela Idalia Peña González, quien en vida me entregó más de lo que incluso alguien puede llegar a imaginar, supo proporcionarme la educación suficiente, junto a mis padres, para convertirme en la persona que soy hoy en día, no existen palabras para expresar mi gratitud y amor. Aunque ya no esté físicamente presente, quiero manifestar que estuve, estoy y estaré siempre orgulloso de ella, del mismo modo que sé que ella lo estaría de mí.

Agradecimientos

Este trabajo es el fruto y resultado, no solo de cinco años de esfuerzo y sacrificio en la universidad, sino de veintitrés años de vida, llenos de sueños y metas, victorias y derrotas, en los cuales fueron y son partícipes disímiles de personas, cada una en su momento, otras desde y para siempre, sin las cuales no hubiese sido posible su realización. Es por ello que quiero expresar mi más sincero agradecimiento a:

- *Mis padres Katia y Juan Carlos por haber confiado siempre en todas y cada una de las decisiones que he tomado en mi vida, por ese apoyo incondicional con el que siempre he contado y sé que podré seguir contando, por el amor que me transmiten día a día, porque sin ellos no sería posible nada de lo que he logrado hasta el momento, por la educación que ambos supieron proporcionarme, por formar parte de esa inspiración que me motiva a alcanzar mis metas y sueños; en fin, tan solo por el hecho de tenerme como hijo.*
- *Mis hermanas Eylín y Karla por darme fuerza día a día para seguir adelante, esa motivación que me inspira a luchar para alcanzar mis sueños.*
- *Mi familia por estar siempre presentes en mi vida y haberme apoyado en cada momento.*
- *Mis amigos Carlos, Anyel, Luis Ángel, Lázaro, Roibert, Javier, Adrián, Niubel, Martín y Ernesto por haberme dado la mano cada vez que los necesité, por haber sido capaces de darle ese toque alegre a mi vida, y aún más importante, por demostrarme que la verdadera amistad si existe, solo hay que saber encontrarla.*
- *Mis tutores el M.Sc. Carlos Salazar Oliva y el Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar por haber sido capaces de darme acceso a sus vastos conocimientos y experiencia, y por haber sabido guiarme en el transcurso de esta etapa.*

➤ *Al M.Sc. Orleydi Loyola Breffe por hacerse presente en momentos difíciles, pese a los problemas siempre estuvo dispuesto a darme la mano y colaborar con mi trabajo.*

Y a todos los que han contribuido de una forma u otra, no solo a la realización de este trabajo, sino que detalle a detalle han sabido darme la fuerza necesaria para seguir adelante.

¡Muchísimas Gracias!

Declaración de Autoridad

Yo, Héctor Carlos González Correoso, autor del presente Trabajo de Diploma, por medio de este escrito certifico su propiedad intelectual en favor de la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" y la empresa productora de níquel y cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara" para el uso que las mismas estimen conveniente.

Héctor Carlos González Correoso

Autor

M. Sc. Carlos Salazar Oliva

Tutor

Dr. C. Pedro Enrique Beyris Mazar

Tutor

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue realizar el análisis termoenergético del secador de tambor rotatorio número dos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, con el objetivo de identificar los principales parámetros que inciden en el mal comportamiento de los parámetros de eficiencia de trabajo del horno. Para ello se empleó los métodos de balance de masa y energía, a partir de los datos tomados en el Panel de Control de la empresa para el referido secador. Se determinó que el combustible fuel-oil aporta el 63 % del total de la energía que es suministrada al equipo y los gases provenientes de la Planta de Hornos de Reducción el 34 %, mientras que el rendimiento térmico del mismo fue de un 85 % y el índice de consumo de combustible igual a $23,2 \text{ kg}_{\text{comb}}/\text{t}_{\text{min seco}}$. A partir de una variación de algunos de los parámetros del horno se determinó que la humedad de entrada del mineral y el flujo de combustible que se alimenta son los parámetros de mayor incidencia en el comportamiento de la eficiencia de trabajo del secador, por lo que se propuso adoptar un sistema de secado solar para eliminar parte de esta humedad inicial y contribuir al ahorro de fuel-oil en la entidad.

ABSTRACT

The purpose of this work was to perform the thermo energetic analysis of the rotary drum dryer number two of the Company "Commander Ernesto Che Guevara", with the objective of identifying the main parameters that affect the bad performance of the working efficiency parameters of the kiln. To do this, the mass and energy balance methods were used, based on the data taken from the company's Control Panel for the aforementioned dryer. It was determined that the fuel oil contributes 63 % of the total energy that is supplied to the equipment and the gases coming from the Reduction Furnace Plant 34 %, while the thermal performance of the same was 85 % and the fuel consumption index equal to 23,2 kg_{comb}/t_{min dry}. From a variation of some of the parameters of the furnace it was determined that the humidity of entrance of the mineral and the flow of fuel that is fed are the parameters of greater incidence in the behavior of the working efficiency of the dryer, so it was proposed to adopt a solar drying system to eliminate part of this initial humidity and contribute to saving fuel oil in the state.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
1.1 Introducción	6
1.2 Generalidades del secado de sólido.....	6
1.2.1 Principio físico del secado.....	8
1.2.2 Factores que determinan la eficiencia del secado.....	9
1.2.3 Mecanismos de movimiento de la humedad en los materiales porosos	10
1.2.4 Curvas de secado.....	11
1.2.5 Principio del secado rotativo	13
1.3 Procesos de transferencia de calor en secadores cilíndricos.....	14
1.4 Descripción de las instalaciones	15
1.4.1 Flujo tecnológico de la UBP Planta Preparación de Minerales	18
1.4.1.1 Sistema de limpieza de los gases de secaderos	23
1.5 Análisis crítico de trabajos precedentes	24
1.6 Conclusiones del capítulo	29
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
2.1 Introducción	30
2.2 Descripción de los materiales empleados	30
2.2.1 Caracterización general de las menas lateríticas	31
2.2.2 Caracterización del horno de tambor rotatorio número dos de la planta	31
2.2.3 Caracterización del fuel-oil utilizado como combustible en el proceso	34
2.3 Descripción de los métodos empleados.....	37
2.3.1 Técnicas experimentales para la toma de datos en el proceso de secado	38

2.3.2 Metodología de cálculo para el balance de masa.....	39
2.3.3 Metodología de cálculo para el balance de energía térmica	46
2.3.3.1 Determinación de las corrientes energéticas.....	48
2.4 Conclusiones del capítulo	57
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	58
3.1 Introducción	58
3.2 Principales resultados obtenidos.....	58
3.2.1 Resultados del balance de masa	58
3.2.2 Resultados del balance energético	61
3.2.3 Influencia de los restantes parámetros en el flujo de combustible	64
3.2.4 Consideraciones generales.....	66
3.3 Valoración económica.....	67
3.4 Valoración ecológica	68
3.5 Conclusiones del capítulo	69
CONCLUSIONES.....	70
RECOMENDACIONES.....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La producción global de níquel ha crecido significativamente en los últimos años. Y si bien la demanda también se ha incrementado, el mercado global de este metal ha pasado gran parte de los últimos años en superávit, lo que ha mantenido los precios bajos. Entre 2009 y 2013, el níquel extraído registró el segundo mayor aumento (después de la magnesita) entre los 73 metales y minerales que abarca el informe de producción mundial de minerales del Servicio Geológico Británico (BGS por sus siglas en inglés). El alza fue del 88 % (Superneau, 2015).

En América Latina, aunque la producción sí aumentó en ese período, no logró seguir el ritmo. Creció sólo un 24 % y pasó a ser una porción menor del total. En particular, la producción latinoamericana mostró un descenso de un 10 % en 2013, en todos los países productores excepto Guatemala, que recién en 2012 ingresó a este grupo, con bajos volúmenes (Superneau, 2015).

Entre los países mayores productores y exportadores de níquel se encuentran Indonesia, Filipinas, Canadá, Nueva Caledonia, Australia, Rusia y Brasil, con producciones superiores a las 100 000 toneladas métricas anuales; y otros como China, Guatemala, Cuba y Colombia con producciones inferiores a esta cifra (ACTUALITIX, 2019).

Aunque la demanda de níquel se ha mantenido en ascenso año tras año, siendo China el principal comprador en el mercado, las perspectivas futuras apuntan hacia un incremento considerable de esta, debido a la revolución del automóvil eléctrico que se ha desatado durante estos últimos años. Se estima que de una flota de aproximadamente dos millones de estos automóviles que existían para el año 2016, se incrementen en el peor de los casos a nueve millones para el 2020 y 60 millones para el 2030. La razón de esta perspectiva se basa en el incremento de las capas de óxido de níquel en el recubrimiento de los polos en las pilas, las cuales contienen iguales cantidades de níquel, cobalto y manganeso en sus cátodos (Morini, 2018).

En nuestro país, la producción de níquel se ha visto afectada durante un prolongado período debido a la falta de inversión y renovación, provocada fundamentalmente por las significativas dificultades económicas a las que se encuentra expuesto. No obstante, la industria cubana del níquel constituye, uno de los eslabones de mayor envergadura en la economía del país, solo antecediéndole el turismo y la industria azucarera (Ferrer, 2018).

Puede decirse que la metalurgia del níquel en Cuba se divide en cuatro etapas. La primera etapa comprende el período comprendido entre los años 1942-1962, cuando se inicia la explotación del yacimiento Nicaro, en la provincia de Holguín, haciendo uso de la tecnología Caron. Esta industria posteriormente al triunfo de la Revolución Cubana sería bautizada con el nombre de "Comandante René Ramos Latour". La segunda etapa se inicia en el año 1962 y culmina en 1986, la cual significó todo un reto para los profesionales cubanos, al lograr echar a andar la primera planta metalúrgica con tecnología de lixiviación ácida en el mundo, la cual sería bautizada como "Comandante Pedro Soto Alba". La tercera etapa comienza en 1986 y se extiende hasta 1994, cuando se realiza la apertura y explotación del yacimiento Punta Gorda (Moa), con la entrada en funcionamiento de una tercera planta metalúrgica, como resultado de la cooperación del bloque de los países socialistas. La construcción y puesta en marcha de la tercera planta metalúrgica de tecnología Caron llamada "Comandante Ernesto Che Guevara" se caracteriza por grandes problemas tecnológicos y ambientales. Su eficiencia en muchos casos no supera el 60 % y la productividad era relativamente baja. La última etapa o etapa actual comienza en 1994 con la creación de la firma Cubano-Canadiense (Empresa mixta "Comandante Pedro Soto Alba" *Moa-Nickel SA*), lo cual permitió un cambio sustancial en la industria minero-metalúrgica cubana en casi todos los órdenes, condiciones de trabajo, eficiencia tecnológica, etc. Actualmente solo se encuentran estas dos últimas en funcionamiento, y son las responsables de que nuestro país sea capaz de producir aproximadamente 50 000 toneladas de níquel anuales (Rodríguez, 2006) y (CUBADEBATE, 2018).

La Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" en específico, constituye uno de los pilares de la Revolución Cubana al ser la única empresa niquelífera en actual funcionamiento de total autoridad y propiedad estatal, además del enorme significado histórico que esta posee. El esquema tecnológico de la empresa está basado en el esquema carbonato amoniacal de

mineral reducido, proceso Caron. Esta tecnología estudiada y aprobada en la práctica durante muchos años en la República de Cuba, ha funcionado desde los años de la Segunda Guerra Mundial y en la propia fábrica desde su puesta en marcha. La decisión de utilizar esta tecnología está explicada en sus propias ventajas, al ser poco compleja, con el uso de equipos sencillos y de amplia utilización en la industria metalúrgica a nivel mundial, al ser además un proceso continuo y a condiciones de presión atmosférica. El complejo minero-metalúrgico de níquel de la empresa comprende nueve Unidades Básicas de Producción. Estas son la Unidad Básica Minera, Planta Preparación de Mineral, Planta Hornos de Reducción, Planta Lixiviación y Lavado, Planta Recuperación de Amoníaco-Cobalto, Planta Calcinación y Sínter, Planta Termoenergética, Planta Recepción y Suministros, y las Direcciones de Servicios para el Aseguramiento al Proceso Productivo (Mayoral, 2016).

Uno de los factores que ha golpeado a la empresa y que en la actualidad continúa haciéndolo, es su baja eficiencia energética, debido al elevado consumo de la mayoría de los equipos, así como los elevados índices de consumo de combustibles y otros reactivos. La Unidad Básica de Producción Planta Preparación de Mineral es el más claro ejemplo de ello, pues se considera una de las de mayor incidencia en este problema. Esta planta está integrada por dos procesos fundamentales, que son el secado y la molienda, ambos considerados grandes consumidores de energía, siendo los principales promotores del consumo de aproximadamente el 23 % del total de la energía consumida en la entidad (NiECG, 2015).

El proceso de secado se lleva a cabo en hornos de tambor rotatorios diseñados para este fin, que es eliminar la humedad del mineral tanto como sea posible, para así facilitar los posteriores procesos a los que será sometido. La empresa cuenta con seis secaderos rotatorios, de los cuales dos se encuentran en actual funcionamiento mientras los restantes son sometidos a procesos de inspección y mantenimiento (NiECG, 2015). Sobre estos equipos metalúrgicos se concentran varias interrogantes debido a su bajo desempeño actual, evidenciado fundamentalmente en que su eficiencia de trabajo operacional se encuentra por debajo de lo normalizado, trayendo consigo que se afecte la eficiencia de los demás procesos, y, por ende, la eficiencia de la empresa en general. Resulta evidente que la eficiencia de estos equipos se está viendo afectada por determinados parámetros, cuyo conocimiento resultaría de enorme importancia para erradicar este problema.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, se establece el siguiente **problema de estudio**:

Necesidad de identificar los principales parámetros que determinan la baja eficiencia de trabajo de los secadores de tambor rotatorio de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Por ello se toma como **objeto de la investigación** el secador de tambor rotatorio número dos perteneciente a la Unidad Básica de Producción Planta Preparación de Mineral.

El **campo de acción** donde se enmarca la investigación es el proceso de transferencia de calor y masa en los cilindros horizontales rotatorios para el secado.

Debido a lo anteriormente planteado se desarrolla la siguiente **hipótesis científica**:

Si se aplican los métodos para el balance de masa y energía al objeto de estudio, entonces se podrá determinar las principales causas que determinan la baja eficiencia de trabajo del secador rotatorio en el proceso de secado de mineral.

Objetivo general

Identificar los parámetros que provocan la baja eficiencia de trabajo de los cilindros horizontales rotatorios en el proceso de secado de mineral laterítico de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica de trabajos precedentes acerca del proceso de secado en cilindros horizontales rotatorios.
2. Aplicar los métodos de balance termo-energético al cilindro horizontal rotatorio número dos.
3. Identificar y evaluar el comportamiento de los parámetros fundamentales del proceso de secado y su influencia en los indicadores de eficiencia.

Tareas técnicas:

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el proceso de secado en cilindros horizontales rotatorios y los métodos de balance térmico y de masa existentes.
2. Identificación de los principales parámetros que influyen en los valores de eficiencia del proceso de secado del mineral laterítico y el sistema de medición empleado.
3. Establecimiento de los gráficos de comportamiento de los principales parámetros que influyen en los indicadores de eficiencia del proceso de secado.
4. Valoración de los impactos económicos y ambientales del proceso en las condiciones de explotación de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Los métodos de investigación empleados en el trabajo son:

- Histórico-lógico: para la actualización del estado del arte relacionado con las teorías de secado, actualmente usadas para describir el proceso de secado de materiales porosos.
- Sistémico: para la sistematización de la teoría básica de los procesos de secado que resulta de interés para la evaluación termo energética del objeto de estudio.
- Inductivo-deductivo: para la determinación de las limitaciones de las investigaciones consultadas, al ser aplicadas al secado del mineral laterítico y para la adecuación del procedimiento de cálculo al proceso investigado.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los principales rasgos y fundamentos teóricos del proceso de secado de sólidos. También se realiza una descripción general del esquema tecnológico de la Unidad Básica de Producción Planta Preparación de Mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, haciendo énfasis en el proceso de secado en particular, así como el análisis crítico de trabajos precedentes realizados sobre el área o tema en cuestión, lo cual permite obtener una panorámica actual acerca del mismo.

1.2 Generalidades del secado de sólido

El secado comúnmente describe el proceso de eliminación térmica de sustancias volátiles (humedad) para la obtención un producto sólido. La humedad mantenida en una combinación química suelta, presente como una solución líquida dentro del sólido o incluso atrapada en la microestructura del sólido, que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro, se denomina humedad ligada. La humedad en exceso de la humedad ligada se llama humedad no unida. Cuando un sólido húmedo se somete a secado térmico, se producen dos procesos simultáneamente:

1. Transferencia de energía (principalmente en forma de calor) del ambiente circundante para evaporar la humedad de la superficie.
2. Transferencia de humedad interna a la superficie del sólido y su posterior evaporación debido al proceso anterior.

La velocidad a la que se realiza el secado se rige por la velocidad a la que se desarrollan los dos procesos. La transferencia de energía como calor del ambiente circundante al sólido húmedo puede ocurrir como resultado de la convección, conducción o radiación y, en algunos casos, como resultado de una combinación de estos efectos. Los secadores industriales difieren en tipo y diseño, dependiendo del método principal de transferencia de calor

empleado. En la mayoría de los casos, el calor se transfiere a la superficie del sólido húmedo y luego al interior.

En el primer proceso, la eliminación del agua como vapor de la superficie del material, depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, área de la superficie expuesta y presión.

En el segundo proceso, el movimiento de humedad interna dentro del sólido, es una función de la naturaleza física del sólido, la temperatura y su contenido de humedad.

En una operación de secado, cualquiera de estos procesos puede ser el factor limitante que gobierna la velocidad de secado, aunque ambos proceden simultáneamente a lo largo del ciclo de secado (Kasatkin, 1987).

El cambio de fase y la producción de una fase sólida como producto final son características esenciales del proceso de secado. El secado es una operación esencial en las industrias química, agrícola, de biotecnología, de alimentos, de polímeros, de cerámica, farmacéutica, de pulpa y papel, de procesamiento de minerales y de procesamiento de madera. El secado es quizás la operación más antigua, más común y más diversa de las unidades de ingeniería química. Se han reportado más de 400 tipos de secadores, mientras que más de 100 tipos distintos están disponibles comúnmente. Compite con la destilación como la unidad de operación más intensiva en energía debido al alto calor latente de vaporización y la ineficiencia inherente de usar aire caliente como el medio de secado (más común). Varios estudios informan que el consumo nacional de energía para las operaciones de secado industrial oscila entre 10 y 25 %, en dependencia de las instalaciones (Mujumdar, 2006).

El secado de varias materias primas es necesario por una o varias de las siguientes razones: necesidad de sólidos que fluyen fácilmente, conservación y almacenamiento, reducción del costo de transporte, logro de la calidad deseada del producto, etc. En muchos procesos, es el secado inadecuado y puede provocar daños irreversibles a la calidad del producto, y, por ende, un producto no escalable. Es útil tener en cuenta las siguientes características únicas del secado, que lo convierten en un proceso fascinante y desafiante para la investigación y el desarrollo:

- El tamaño del producto puede variar desde micras hasta decenas de centímetros (en grosor o profundidad).
- La porosidad del producto puede oscilar entre 0 y 99,9 %.
- Los tiempos de secado varían de 0,25 s (secado de papel de seda) a cinco meses (para ciertas especies de madera dura).
- Las capacidades de producción pueden variar desde 0,10 kg/h hasta 100 t/h.
- Las velocidades del producto van desde cero (estacionarias) hasta 2000 m/min (papel de seda).
- Las temperaturas de secado varían desde debajo del punto triple hasta por encima del punto crítico del líquido.
- La presión de operación puede variar desde una fracción de milibares hasta 25 atm.
- El calor se puede transferir de forma continua o intermitente por convección, conducción, radiación o campos electromagnéticos.

Claramente, no es posible ningún procedimiento de diseño único que pueda aplicarse a todas o incluso a varias de las variantes de un secador. Por lo tanto, es necesario el conocimiento de las propiedades del material (calidad) y de los modos de transferencia de calor material-elemento secante, cuando se intenta diseñar un secador o analizar uno existente. Hablando matemáticamente, todos los procesos involucrados, incluso en el secador más simple, son altamente no lineales y, por lo tanto, la ampliación de los secadores generalmente es muy difícil. La experimentación en el laboratorio y las escalas piloto, junto con la experiencia de campo y el saber cómo, es esencial para el desarrollo de una nueva aplicación de secador. Los vendedores de secadores son necesariamente especializados y normalmente ofrecen solo una gama limitada de equipos de secado (Mujumdar, 2006).

1.2.1 Principio físico del secado

El proceso de secado está caracterizado simultáneamente por una transferencia de calor y otra de masa. Mientras en la superficie de la sustancia se produce un proceso de evaporación superficial, en el que la velocidad de extracción de la humedad, llamada velocidad de secado,

estará afectada por la transferencia de calor y de masa en la superficie del material (Duy, 2013).

1.2.2 Factores que determinan la eficiencia del secado

Los factores fundamentales que influyen en la eficiencia del secado son los siguientes:

- **Características del mineral alimentado:** Aquí se tiene en cuenta entre otros factores, la granulometría y humedad del mineral alimentado, los que están relacionados directamente. La alimentación de un mineral muy fino dificulta el proceso de secado debido fundamentalmente a que se elimina solo el agua superficial, quedándose el agua reticular o interna que ayuda a la aglomeración del mineral, provocando un aumento de humedad en el producto secado. Por tanto es necesario homogeneizar el mineral antes de alimentar a los secaderos para mejorar la humedad del producto final. Es decir que se disminuye el consumo de combustible y se mejora la eficiencia de los tambores secadores.
- **Tiempo de retención del mineral:** Este factor determina el tiempo medio necesario de permanencia del mineral dentro del secadero para que sea tratado de forma adecuada, ya que el mineral en dependencia de otros factores, puede tardar mayor o menor tiempo al llegar al final del secadero. Este tiempo se determina de forma experimental y es importante conocerlo para garantizar un producto con las características correctas.
- **Velocidad del gas:** Este factor es importante y se calcula en base a la capacidad del secadero. Una velocidad alta de los gases caliente provoca poco contacto entre las fases (gases y mineral) lo que conlleva a un secado deficiente del mineral. Además el arrastre de polvo aumenta llevando consigo partículas con alto contenido de humedad que pueda afectar el sistema de limpieza de gases. De lo contrario, una baja velocidad de los gases, que puede ser producto de una condición de avería o mala operación puede provocar un recalentamiento de la superficie del secado, un deficiente secado debido a la saturación de estos gases calientes y también recalentamiento de la cámara de combustión con posible desprendimiento de ladrillos. Por esto, la velocidad de los gases debe ser la adecuada (según cálculo) para garantizar una buena operación durante el secado.

- Temperatura del aire o gas: Ocurrirá lo mismo que lo antes escrito ya que la velocidad depende directamente de la temperatura, además con gases muy calientes se afecta el sistema de colección de polvo en los electrofiltros, puesto que la eficiencia decae producto de que los gases arrastran el polvo (con un diámetro pequeño la cortina de mineral que se forma recorre un tramo muy corto lo que no le permite estar mayor tiempo en contacto con los gases). Todo lo contrario ocurre cuando se usa un diámetro grande. El diámetro se calcula en dependencia de la cantidad de mineral, entre otras cosas, y no puede ser infinitamente grande porque el consumo de energía es proporcional al diámetro y a la carga del tambor secador.
- Longitud del secado: También se tiene en cuenta desde el punto de vista de la capacidad del secadero. Esta longitud debe ser tal que permita el secado del material (mineral) que se alimenta hasta la humedad requerida a la máxima capacidad. En la primera mitad del tambor la humedad se elimina en mayor cuantía por estar los gases más caliente siendo requerida la longitud restante para liquidar una cantidad pequeña de humedad (Duy, 2013).

1.2.3 Mecanismos de movimiento de la humedad en los materiales porosos

Para explicar el traslado de la humedad en los materiales porosos, durante el proceso de secado, en la literatura científica se pueden encontrar referencias a diversos mecanismos de movimiento de la humedad (Hernández, 2003), ellos son:

- Difusión líquida: debido a los gradientes de concentración de humedad.
- Difusión de vapor: debido a los gradientes de presión parcial del vapor
- Movimiento de líquido: debido a las fuerzas capilares
- Flujo de líquido o vapor: debido a diferencias en la presión que existe en el interior de los poros y el agente secante.
- Efusión: se presenta cuando el camino libre medio de las moléculas de vapor es del orden del diámetro de los poros.
- Movimiento de líquido: debido a la gravedad.
- Difusión superficial: debido a los gradientes de concentración de humedad y de presión parcial del vapor que se generan en la superficie de secado.

De forma general se considera que el mecanismo de flujo capilar es el que predomina durante el periodo de secado de velocidad constante, mientras que los mecanismos de condensación- evaporación y flujo de vapor corresponden al periodo de velocidad decreciente (Keey, 1980). El estudio de estos mecanismos, aplicados al análisis del proceso de secado, ha dado lugar a diferentes teorías de secado, las cuales han sido anteriormente descritas.

1.2.4 Curvas de secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición, contenido de humedad y el tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, considerablemente de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar. De acuerdo con (Boizán, 1991) una de las formas más eficiente de describir el proceso de secado es mediante las curvas de velocidad de secado contra humedad promedio en un sistema de coordenada $(du/d\tau) = f(u)$. En la figura 1 se representan de forma general las etapas de secado por lo que transita un sólido objeto sometido al proceso. El tramo AB corresponde al período de calentamiento. En esta la temperatura del material se eleva hasta la temperatura a bulbo húmedo y su humedad baja muy poco. La velocidad de secado crece y en B alcanza su máximo valor.

El período de velocidad de secado constante corresponde a la recta BC. En esta etapa tiene lugar una intensa evaporación de la humedad libre. La velocidad del proceso es máxima y depende fundamentalmente de la resistencia externa a la difusión y en menor cuantía de la resistencia interior del sólido a la difusión. El período de velocidad de secado decreciente, según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C

hasta D. A pesar de que en sentido general este es el comportamiento de los sólidos, en ocasiones durante el secado de algunos materiales (los cereales y algunos vegetales como la papa, remolacha y la zanahoria) en el primer periodo su temperatura no se mantiene constante, sino que sigue creciendo hasta alcanzar valores superiores a la del bulbo húmedo. Este comportamiento permite concluir que la proposición realizada por (Likov, 1954) de llamar a esta etapa período de temperatura constante no es satisfactoria. Es más acertado llamarlo período de velocidad de secado constante ya que se cumple para cualquier material.

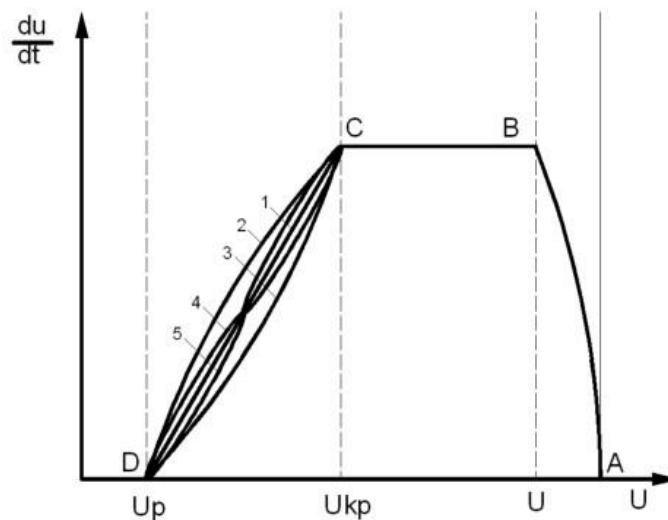


Figura 1. Curva de secado de sólidos. Fuente: (Boizán, 1991).

El proceso de secado está destinado a eliminar el exceso de humedad para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos. En este caso en particular, el secado se efectúa en hornos de secador rotatorio con cámara de combustión independiente. Durante el proceso de secado ocurre una transferencia de calor y otra de masa. Mientras en la superficie de la partícula existe humedad, se produce la evaporación superficial, la velocidad de extracción de la humedad interior depende de la velocidad de transferencia de calor al interior de la partícula y la velocidad de transferencia de masa a la superficie del material.

El secado en hornos de secador rotatorio se produce cuando los gases calientes generados en la cámara de combustión, interaccionan directamente con el mineral húmedo. Estos secadores poseen en su interior elementos levantadores encargados de favorecer un mejor intercambio de calor entre los gases y el mineral. También ayudan al avance del mineral por

la inclinación del secador, lo cual se ve favorecido por el efecto de arrastre de los gases que viajan en la misma dirección. El efecto de los levantadores se resume en lo siguiente:

- a) Permite una distribución uniforme de la carga en la sección interior del secador por lo que requiere menor consumo de potencia para moverlo.
- b) Permite la formación de cortinas de mineral uniformes con una amplia superficie de contacto con los gases, con lo que se favorece la evaporación.

1.2.5 Principio del secado rotativo

El secador rotativo de calentamiento directo, funciona sobre el principio de elevación y pulverización del producto mediante un flujo de aire caliente que se introduce a corriente o contracorriente. Por el contrario, en el secador indirecto, más apropiado para materiales finos y polvorientos, el contacto entre el producto y el aire de secado es nulo, ya que se calientan desde el exterior a través de una batería equipada con varios quemadores u otras fuentes de calor externas.

La eficacia del secador depende principalmente del diferencial entre las temperaturas del aire de entrada y el de salida, aunque el grado de transferencia de calor también viene determinado por la relación entre el diseño de las aletas y la velocidad de rotación. No obstante, independientemente de las temperaturas del aire y del material, el tiempo de secado (o de residencia) es crucial, ya que depende de la velocidad de difusión del agua desde el centro hasta la superficie del material.

Para aumentar la eficacia térmica y en los casos en que se requiera inertización, es posible reciclar los gases de escape. Esto puede implementarse en la mayoría de los sistemas de secado mediante corrientes de aire e incorporarse a las operaciones de secado existentes.

En las aplicaciones especiales, el diseño rotativo en cascada se adapta para ofrecer una configuración de elevadores cruciforme o de caída rápida.

Asimismo, también pueden utilizarse según se requieran enfriadores rotativos en cascada y secadores/enfriadores combinados (GEA, 2019).

1.3 Procesos de transferencia de calor en secadores cilíndricos

En un secador cilíndrico rotatorio, el calor se transfiere al sólidos por dos trayectorias, a través de la superficie superior expuesta y la superficie que está en contacto con la pared cubierta (Boateng, 2008). La primera está dado por la transferencia de calor del gas a la superficie del sólido que está en suspensión y la superficie de la cama que reciben calor directamente por radiación y convección de la mezcla de gases que se emplea para el secado (Q_1) y el calor cedido por la pared no cubierta por convección y radiación (Q_2), mientras que en la superficie inferior que se encuentra en contacto con la pared cubierta el calor se transmite por una combinación de radiación, convección y conducción (Q_3) (Boateng, 2008). Esta última trayectoria de transferencia es parte del ciclo regenerativo de la pared del horno, que a medida que gira recibe también energía térmica a través de la radiación la convección del gas a la pared (Sunkara, 2013) (Q_4); una parte del calor recibido por la pared se pierde al exterior mediante la conducción de calor de la pared interior a la exterior (Q_5).

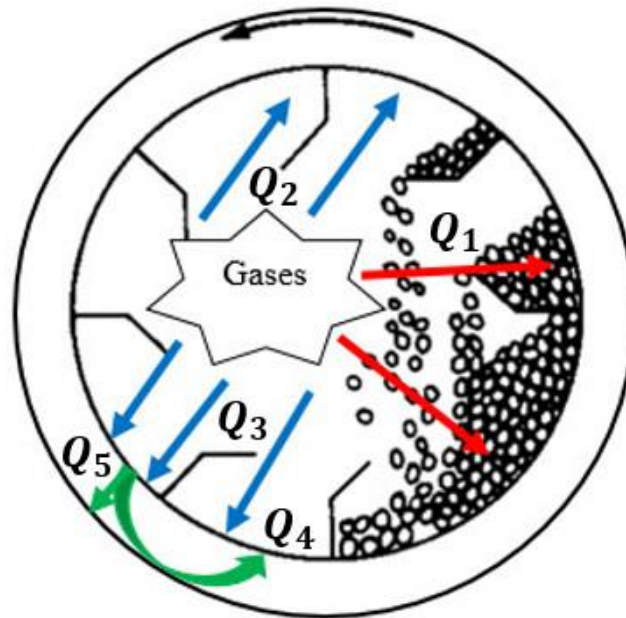


Figura 2. Modos de transferencia de calor en el interior del secador.

1.4 Descripción de las instalaciones

La empresa productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” fue inaugurada en el año 1986, como resultado de una colaboración socialista entre nuestro país y la antigua Unión Soviética.

El área de la construcción de la fábrica se encuentra al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, Provincia de Holguín, en la costa sur del Océano Atlántico, entre los ríos Moa y Yagrumaje, a cuatro kilómetros de la ciudad de Moa y a dos kilómetros del pueblo de Punta Gorda. El puerto marítimo está a tres kilómetros al norte de la fábrica.

La tecnología de la empresa está basada en el esquema carbonato amoniacal del mineral reducido, proceso Caron. Esta tecnología estudiada y aprobada en la práctica durante muchos años en la República de Cuba, ha funcionado desde los años de la Segunda Guerra Mundial y en la propia fábrica desde su puesta en marcha. La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato amoniacal en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se explica por las ventajas propias de esta tecnología.

Es un proceso continuo que se utiliza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización en los aparatos conocidos, (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.) Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentiniticos, mientras que el esquema de lixiviación ácida a presión empleando ácido sulfúrico, permite solamente el proceso de la fracción laterita.

Tomando en consideración el déficit de energía eléctrica en la República de Cuba, el proceso amoniacal consume mucha energía eléctrica, sin embargo tiene muchas ventajas en comparación con el proceso hidrometalúrgico.

Al mismo tiempo este proceso se realiza con un consumo relativamente pequeño de reactivos. El único reactivo que se utiliza en gran cantidad es el amoníaco, el consumo del mismo es necesario solo para compensar las pérdidas mecánicas y tecnológicas.

El producto final de la fábrica (Óxido de Níquel Sinterizado, Sulfuro de Níquel y Cobalto, Sulfuro de Níquel, Óxido de Níquel en Polvo y Óxido de Níquel en Polvo Químico) son productos estables, de exportación en el mercado mundial.

El complejo minero metalúrgico de níquel de la empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” (ver figura 3) comprende las siguientes Unidades Básicas de Producción.

1. Unidad Básica Minera.
2. Unidad Básica de Producción Planta Preparación de Mineral.
3. Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción.
4. Unidad Básica de Producción Planta Lixiviación y Lavado.
5. Unidad Básica de Producción Planta Recuperación de Amoniac-Cobalto.
6. Unidad Básica de Producción Planta Calcinación y Sínter.
7. Unida Básica de Servicios Planta Termoenergética.
8. Unidad Básica de Servicios Planta Recepción y Suministro.
9. Direcciones y Unidades Básicas de Servicios para el aseguramiento al proceso productivo.

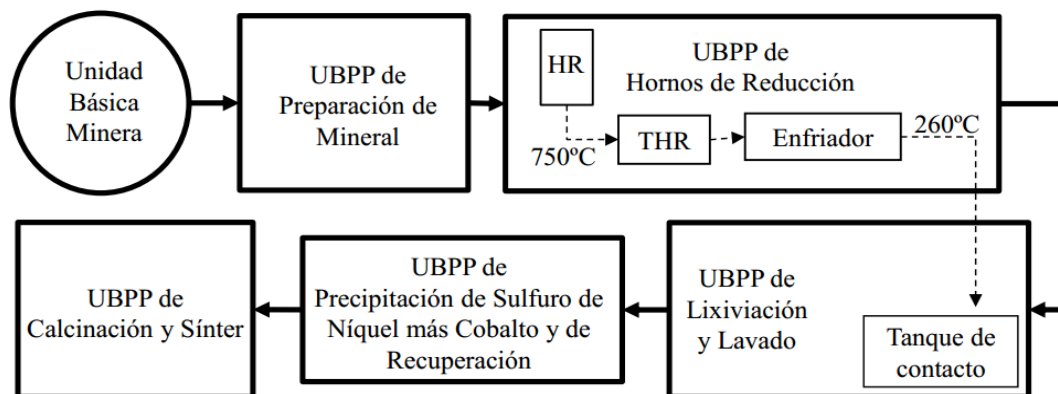


Figura 3. Esquema del proceso tecnológico de lixiviación carbonato-amoniaca.

Fuente: (Góngora, 2014).

La Mina. Tiene la función de suministrar el mineral a la fábrica. Está situada a 1,5 km al suroeste del área industrial de la fábrica y es una mina a cielo abierto.

Para la alimentación del mineral a la fábrica la mina tiene instalada una tecnología compuesta por equipos de arranque y camiones de diferentes características para el transporte hasta las instalaciones de depósito e industria.

Los yacimientos concesionados a la empresa son:

- Yacimiento Punta Gorda.
- Yacimiento Yagrumaje Norte.
- Yacimiento Yagrumaje Sur.
- Yacimiento Camarioca Este.

Actualmente solo se encuentran los tres primeros en explotación.

Estos yacimientos están formados por capas que tienen distintos intereses en su utilización. La parte superior, escombro, compuesta por minerales sin interés industrial en estos momentos, ya que no se cuenta con tecnología económicamente factible para su procesamiento y tiene una altura de 1 a 15 m, la capa de reserva industrial, de 1 a 20 m de altura, está compuesta por minerales de lateritas y serpentinas blandas, y otra capa de serpentina dura que no se emplea en este proceso industrial, pero se reserva para otros tipos de procesos. Además, contienen altas humedades lo que dificulta el proceso de extracción.

Los componentes fundamentales del mineral son. El níquel, el cobalto y otros como el hierro en gran cantidad, sílice y magnesio.

Preparación de Mineral. Tiene la función de darle tratamiento al mineral recibido de la mina en cuanto a humedad y granulometría para ser tratado en el proceso de extracción, mediante la reducción del níquel y cobalto fundamentalmente.

Hornos de Reducción. Es la planta que transforma al mineral para extraer el Ni y Co de forma selectiva, en hornos de soleras múltiples con gases reductores obtenidos del petróleo.

Lixiviación y Lavado. Extrae el Ni y el Co de la pulpa del mineral reducido y aireada en un sistema a contracorriente con licores carbonato amoniacal, obteniendo un licor enriquecido

de Ni y Co y una pulpa empobrecida de estos dos elementos, pero con contenido de amoníaco que se recupera posteriormente.

Recuperación de Amoníaco-Cobalto. Cumple la función de limpiar los licores provenientes de la primera etapa de lixiviación para luego descobaltizarlo y obtener el Sulfuro de Níquel y Cobalto como un producto comercializable, además de destilar el licor descobaltizado para obtener el carbonato de níquel, destilar la cola para recuperar amoníaco y producir el licor fuerte que se alimenta a la UBP Planta de Lixiviación y Lavado.

Calcinación y Sínter. Se encarga de espesar y filtrar la pulpa de carbonato producto de la destilación del licor, convertir el carbonato secado en óxido de níquel para producir el Óxido de Níquel Sinterizado como producto final para la comercialización. Cuenta con un sistema de recolección de polvo para disminuir las pérdidas de níquel de donde se obtiene el Óxido de Níquel en Polvo y el Óxido de Níquel en Polvo Químico que también se comercializan.

Termoenergética. Se encarga de suministrar el vapor y la energía eléctrica al sistema productivo.

Recepción y Suministro. Es la encargada de tratar y alimentar el agua al proceso productivo. Así como el suministro del Carbón y el Amoníaco a las plantas consumidoras.

Direcciones y Unidades Básicas de Servicios. Aseguran el suministro de los diferentes recursos, el mantenimiento de las instalaciones, la fuerza laboral con la competencia necesaria, la supervisión, la tecnología y desarrollo, el control económico y todas las acciones para garantizar el desarrollo del Sistema de Dirección y Gestión Empresarial (NiECG, 2015).

1.4.1 Flujo tecnológico de la UBP Planta Preparación de Minerales

En la Unidad Básica de Producción Planta Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal.

El mineral desde los yacimientos es transportado por carros de volteo hasta las cribas fijas en dependencia de la sección que se encuentre en operación o para ambas si existe disponibilidad en las mismas, en estas cribas es donde por primera vez el mineral recibe un beneficio mecánico el cual consiste en separar las partículas mayores de 420 x 380 mm,

pasando las fracciones menores al interior de las tolvas 215-TV-1A o 1B, igualmente en dependencia de la sección que se encuentre en operación o para ambas en dependencia de la disponibilidad de las mismas.

El mineral, desde el interior de dichas tolvas es alimentado mediante los alimentadores de esteras 215-AL-1A o 1B a las cribas vibratorias 215-ZA-1A o 1B, estas cribas clasificarán el mineral con fracciones +150 mm y lo alimentarán a los transportadores de rechazo 215-TR-16A o 16B, los que transportan el material de rechazo hasta el área de las galería desde donde es evacuado a través de equipamientos mineros hasta el área de la mina, de la misma forma el mineral con fracciones -150 mm (beneficiado) es el que se alimentará al proceso técnico-productivo de la industria y será recibido por los transportadores 215-TR-1A o 1B, en dependencia de la sección que se encuentre en operación o para ambas en caso de encontrarse las dos secciones operando. Estos transportadores poseen una capacidad de 900 t/h (250 kg/s) de transportación, son los encargados del transporte de mineral hasta la zona de carga del transportador 215-TR-2, con capacidad para la transportación de 1 800 t/h (500 kg/s) de mineral húmedo, el que transportará el material hasta la zona de carga del transportador 215-TR-3. Este último, con igual capacidad de transporte de 1 800 t/h, se caracteriza por ser reversible, o sea, que puede operar con la velocidad de rotación para ambos lados, por lo que es capaz de alimentar el contenido del mineral para el transportador 215-TR-4A o 215-TR-4B, estos últimos transportadores de igual capacidad de transporte, verterán su contenido a los transportadores de enlace 215-TR-14 o 15. La capacidad de estos transportadores es de 1 700 t/h (472,222 kg/s), los que alimentan el mineral a los transportadores 215-TR-5 o 6A, de capacidad 750 t/h (208,333 kg/s).

Los transportadores 5 o 6A, son los encargados de transportar el mineral alimentan desde los transportadores 215-TR-14 o 15 hasta de zona de carga de los transportadores 215-TR-7 o 7A, los que se encargan de llevar el mineral hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h (208,333 kg/s) y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 215-TR-8 u 8A, que tiene como función la de alimentar a los secaderos y al depósito de mineral interior o de emergencia.

La alimentación a los secaderos se realiza a través de unos desviadores que se encuentran justamente sobre las tolvas de los secaderos. La alimentación al depósito interior se realiza de la misma forma, o sea, mediante desviadores de mineral que se encuentran situados sobre dos correas colocadas entre los secaderos 2 y 3, 4 y 5, al final de los transportadores 8 y 8A se encuentra el transportador 215-TR-10-3 el que no cuenta con desviador de mineral por ser el transportador que cierra el circuito de alimentación de mineral húmedo a la sección de los secaderos. Estos transportadores 215-TR-10-1, 10-2, 10-3 poseen capacidad 750 t/h (208,333 kg/s).

El mineral almacenado en el depósito interior se usará cuando, por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a esta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la UBP trabajar durante cuatro días.

Este depósito posee para la manipulación del material, dos grúas de puente 215-GH-101 A y B de capacidad igual a 350 t/h (97,222 kg/s) cada una. Estas se encargan de alimentar a los secaderos en los casos expuestos anteriormente. El mineral llegará a los secaderos 215-SC-101-106 pasando a través de alimentadores de esteras 215-AL-101-106 de capacidad variable de 90 a 120 t/h (25 a 33,333 kg/s) y los transportadores de bandas 215-TR-9-1 al 9-6 de capacidades igual a 125 t/h (34,72 kg/s) cada uno.

El tambor secador posee una longitud igual a 48 000 mm y un diámetro 4 500 mm. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente de (36 a 38) %, la que puede ser mayor en épocas de lluvia, y saldrá del mismo con valores de 4,0 a 5,5 % según lo establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión 215-CC-101-106 dotada de un quemador de petróleo. Se suministra aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario o gases procedentes de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción.

Los gases combustionados dentro de las cámaras alcanzan una temperatura de 1 500 °C y bajan hasta valores entre 750 y 850 °C al ponerse en contacto con el aire en exceso que se suministra, o gases procedentes de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de

Reducción, que a su vez sirven para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral.

Con esta última temperatura es con la que entran los gases al tambor secador. La circulación de los gases al tambor secador se realiza en dirección concurrente con el mineral alimentado de forma que, ese contacto gases calientes–mineral permita que este último se vaya secando y se obtenga al final del secadero un producto con las características adecuadas. Los gases al salir del secadero tendrán una temperatura de 85 a 95 °C. Los gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crean unos ventiladores de tiro 215-VE-108 a 113 situados a la salida de cada electrofiltro que posee cada secadero individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos del 36 a 40 % del polvo que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado, y que por lo general posee una granulometría de $-0,074$ mm, por lo que será introducido al sistema de colección de polvo.

El mineral después de secado, es beneficiado en la descarga del tambor a través de un Tromell, mediante el cual se rechazan las rocas mayores de 10 mm hacia el transportador 11 y el resto del mineral es descargado en el transportador 11A, estas correas son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el mineral caliente que sale de los secaderos. La capacidad es de 490 t/h (136,111 kg/s).

En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del mineral seco.

Este mineral secado y beneficiado, es llevado en la correa 215-TR-12A, que es la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h (136,111 kg/s) y descarga su contenido en cuatro tolvas, una para cada molino 215-TV-201 al 204 de 160 toneladas de capacidad cada una, mediante desviadores de mineral colocados sobre la correa y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Las rocas rechazadas son descargadas en la correa 215-TR-12, la cual transporta el material de rechazo hacia una tolva de 92 t de capacidad, ubicada al final del transportador, desde la cual es evacuado a través de camiones de volteo. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h (136,111 kg/s).

Sobre estas correas se encuentra montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha que se mezclará conjuntamente con el mineral de forma dosificada, mediante un sistema automático que regulará la relación petróleo–mineral, instalada en la misma área que es de 3,6 a 4,2 %, siendo utilizado como agente reductor en la Unidad Básica de Producción Planta Horno de Reducción. El porcentaje a dosificar es orientado por la dirección de tecnología de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción. Desde cada tolva el mineral llegará a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde hacerlo a los alimentadores de discos 215-AL-23 al 30 que poseen cada tolva y que pueden entregar de 55 a 120 t/h (15,277 a 3,333 kg/s) a las correas 215-TR-13-1 al 13-4, las que descargan el mineral en el molino de bolas 215-ML-201 al 204; la capacidad de esta correa es de 160 t/h (44,44 kg/s).

De esta forma el mineral llega al molino de bolas cuya capacidad es de 120 t/h (33,333 kg/s) y tiene como dimensiones 5 700 mm de longitud y 3 200 mm de diámetro.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t por diseño, con la que operan los molinos 201 y 204.

El producto que el molino debe entregar tendrá una granulometría con un 85 a 88 % de la clase -0,074 mm.

Los molinos 202 y 203 operan con el 80 % del coeficiente de llenado del molino según la carga nominal de diseño (54 t de bolas), encontrándose con 43,2 t de bolas.

Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 215-VE-205 al 208 de 134 000 m³/h (3,722 m³/s) de capacidad situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que está formado por un molino, un separador neumático 215-SN-201, cuatro ciclones 215-CN-201 al 204: A, B, C y D, dos baterías de seis ciclones 215-CN-205 al 210: A, B, C, D, E y F. Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona; este doble efecto propicia la obtención del mineral molido.

El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250 mm, donde sufre una clasificación de forma que, el que tenga características de

producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no posea estas características pasará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.

Este equipo puede realizar este trabajo a merced del “*Damper*” que posee y que son regulados para obtener la granulometría del mineral que se desea.

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 215-TV-205 1 y 2. Lo que no se recoge en los ciclones y que por lo general, es un mineral con granulometría $-0,074$ mm pasará por un sistema de limpieza de gases de filtros de mangas donde se captura la casi totalidad del polvo que entra en él.

De igual forma, todo el polvo recogido es enviado hacia las tolvas de producto final mediante el empleo de transporte neumático. Todo el mineral molido es transportado hacia los silos de almacenaje del mineral de la Unidad Básica de Producción Planta Hornos de Reducción, mediante el empleo de bombas neumáticas 215-BO-107 a la 112 colocadas en la descarga de las mencionadas tolvas (NiECG, 2015).

1.4.1.1 Sistema de limpieza de los gases de secaderos

Como se expuso anteriormente, el polvo que es barrido por los gases del interior de cada secadero es introducido en un sistema de colección de polvo formado por dos baterías de cuatro ciclones cada uno, 215-CN-101-112: A, B, C, D de 73 % de eficiencia y diámetro de 1 800 mm, y por un electrofiltro de cuatro polos 215-EF 101 al 106 que trabaja con una tensión de 75 000 a 80 000 V y a una eficiencia de 99,5 %.

Esto significa que del 36 al 40 % del polvo arrastrado por los ventiladores de tiro de cada secadero, el 73 % se quedará colectado con las tolvas de los ciclones y el 27 % restante llegará a los electrofiltros, previo paso por una zona llamada embudos muertos donde también se coleccionará cierta cantidad a merced de la caída brusca de presión.

Estos embudos muertos y los campos del electrofiltro poseen tolvas de almacenamiento de mineral, el que es descargado en transportadores de paletas hundidas 215-TRP-101 al 112 de capacidad 20 t/h (4,166 kg/s) cada uno, los que transportarán su carga a otros transportadores

similares, pero de mayor capacidad de transportación, los 215-TRP-117 y 215-TRP-118 de 300 t/h de capacidad cada uno (83,333 kg/s), los 215-TRP-115: A y B con 40 t/h (11,111 kg/s), y los 215-TRP-116: A y B de 20 t/h (5,555 kg/s).

Estos últimos descargarán su contenido en las tolvas de mineral 215-TV-108 A y B, las que alimentarán a las bombas de transporte neumático 215-BO-113 a la 118, que son las encargadas de transportar este polvo hacia las tolvas de producto final (215-TV-205 1 y 2) de los molinos. La capacidad de estas bombas es 120 t/h (33,333 kg/s) cada una.

Los gases una vez limpios de polvo son enviados a la atmósfera debida a la succión y tiro forzado que crea un ventilador 215-VE-108 al 113, colocado al final de cada filtro eléctrico atravesando una chimenea 215-CH-101 de 140 m de altura. La capacidad del ventilador es de 249 000 a 279 000 m³/h (69,16 a 77,49 m³/s). La concentración de polvo que debe salir a la atmósfera debe ser de 200 mg/m³n (NiECG, 2015).

1.5 Análisis crítico de trabajos precedentes

El secado es sin duda uno de los procesos más antiguos conocidos por el hombre y aparece en muchas de las manipulaciones a las que es sometido un producto a lo largo de sus fases de elaboración. Son muchos los campos donde se hace necesario este proceso y existen varias razones para disminuir la humedad de un producto, entre las cuales se podrían citar: cumplir la exigencia de la calidad del producto final, reducir costo de transporte, conservar un producto durante su almacenamiento (estabilidad microbiológica), procesado para aumentar la capacidad de otros aparatos e instalaciones del proceso (propiedades de fluidez y viscosidad), permitir tratamientos posteriores del producto, aumentar el valor de los subproductos obtenidos (Castaño, 2009).

Numerosas son las investigaciones y trabajos realizados alrededor de este proceso, sobre todo con la finalidad de optimizar la eficiencia de trabajo de los equipos en los que se lleva a cabo, con el único fin de incrementar la eficiencia operativa y energética de los mismos y por ende de las instalaciones en las que estos se encuentren. Los hornos de tambor rotatorio constituyen probablemente los equipos de mayor difusión en el mundo industrial para el secado de sólidos, y son, entre otras cosas, sus parámetros de trabajo tan poco complejos lo que los hace tan interesantes y prácticos.

Luego de una intensa y profunda revisión bibliográfica acerca del tema en cuestión, que es el proceso de secado de sólidos, se recogieron los siguientes resultados.

(Azman, 2008), realizó un diagnóstico termo-energético al horno de tambor rotatorio número tres de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara para un incremento de la productividad del mismo, mediante los métodos de balances de masa y energía. El autor determinó los valores de rendimiento térmico para diferentes productividades del equipo, según las condiciones de explotación en aquel entonces. Se pudo apreciar un decrecimiento de dicho rendimiento al incrementarse la productividad del secador. Además determinó los flujos de combustible consumidos por el equipo analizado para esos valores de productividad.

(García, 2016), realizó igualmente un diagnóstico termoenergético a los hornos de tambor rotatorio número tres y número seis de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, mediante los métodos de balances de masa y energía. En el trabajo se logró determinar los índices de consumo de combustible, así como sus respectivos rendimientos térmicos para los secaderos tres y seis, obteniéndose valores numéricos similares para ambos. Además se logró fijar los principales parámetros que rigen el comportamiento de los secaderos: el rendimiento térmico, el consumo de combustible y la productividad específica, y también se determinó que existe una fuerte dependencia de estos con respecto al flujo de mineral alimentado y a su humedad relativa de entrada.

(Delgado, 2013), desarrolló un trabajo sobre los secaderos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, donde propone un método de balance térmico y de masa con correcciones específicas que permiten considerar la variabilidad de los principales parámetros de trabajo (rendimiento, índice de consumo de combustible, productividad específica), así como la dependencia de estos con respecto al flujo de mineral alimentado y a su contenido de humedad.

(Tamayo, 2001), realizó un estudio acerca del proceso de secado de carbón antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro mediante los métodos de balance de masa y energía en los hornos de tambor rotatorios establecidos en dichas instalaciones para este fin. Demostró mediante los cálculos que los flujos de combustible reales del proceso son considerablemente mayores que los calculados, al mismo tiempo que el flujo de carbón seco

según los cálculos realizados es menor que el flujo real de las instalaciones. También demostró que las pérdidas de calor en el cuerpo del secador son mayores que en la cámara de combustión, y que la variable o parámetro de mayor incidencia sobre los índices de consumo de combustible y humedad de salida del material es el contenido de humedad de entrada o inicial del mismo.

(Domínguez, 2011), realizó igualmente una evaluación al proceso de secado de carbón antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro mediante los métodos de balance de masa y energía, arribando a conclusiones similares a las obtenidas por (Tamayo, 2001), en cuanto a los índices de consumo de combustible y contenido de humedad de salida del material. El autor en este caso sí tuvo en cuenta el parámetro tiempo para el proceso de secado, específicamente el tiempo de retención del material en el horno, alegando que este es variable y dependiente. También logró demostrar que a menor contenido de humedad inicial del material, mucho menor índice de consumo de combustible, afirmando que este parámetro es el de mayor incidencia en este proceso.

Por lo general en cualquier proceso de secado la humedad contenida en el sólido es un parámetro fundamental para iniciar los procedimientos de cálculo e investigación, este fenómeno es representado a través de curvas que describen el comportamiento de la humedad del sólido en función del tiempo, en condiciones externas fijadas, mostrando que durante el movimiento del sólido dentro del secadero rotatorio este secado no es uniforme, al no interactuar todo el flujo de calor con todo el material alimentado provocando pérdidas de calor que pueden determinarse utilizando la metodología de cálculo para la transferencia de masa y energía (Liptak, 1999).

(Incropera, 2003), aborda la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de calor y masa, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de las mismas en sus más diversas formas.

(Likov, 1954), demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del

material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilaroporosos, grupo al que corresponde el mineral laterítico según la clasificación dada por (Kasatkin, 1987).

(Philip et al., 1957), estudian las fuerzas capilares que causan el transporte del líquido, en términos de gradientes del contenido de humedad y temperatura resultante en una ecuación de difusión. Aunque el trabajo se realizó para diferentes condiciones de experimentación, el mismo indica los elementos a considerar en el estudio experimental del proceso.

(Myklestad, 1963), realizó un trabajo relacionado con la modelación matemática del proceso de secado. El autor obtuvo un modelo estático de un secadero a contra corriente, donde trabajó con un coeficiente volumétrico global de transferencia de calor y consideró la temperatura del sólido invariable en la zona de velocidad de secado constante.

(Deich et al., 1975), desarrollan un modelo dinámico asumiendo las siguientes consideraciones:

- Se trabaja con parámetros distribuidos para el sólido y el gas.
- El calor específico del sólido es constante.
- Los coeficientes de transferencia de masa y de energía son constantes.
- Las velocidades del sólido y del gas son constantes a lo largo del cilindro del secador.
- Los fenómenos de combustión, difusión y radiación son despreciables.

(Fulford, 1969) y (Boizán, 1991), proporcionan varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado. Estos modelos reportados por diferentes fueron establecidos considerando la velocidad de secado (N) constante. En todos los casos N se expresa en forma de una función empírica de los parámetros fundamentales del proceso. Estas expresiones no pueden ser aplicadas al secado del mineral laterítico porque en este proceso la velocidad de secado varía y no existe fluidización, además, los materiales experimentados (semillas de tomate, granos y partículas de papa, respectivamente) tienen propiedades termofísicas diferentes a la del sólido estudiado en este trabajo.

(Reay, 1979), realizó un trabajo que contiene un estudio general del secado de sólidos, donde incluye un modelo para el sólido y otro para la instalación de forma independiente. En el

modelo de comportamiento del sólido, obtiene la velocidad de secado como función de la humedad en dicho sólido y de la temperatura y humedad del aire seco. En este estudio se pone de manifiesto que una de las principales dificultades a la hora plantear un modelo fiable está en la medición del coeficiente volumétrico de transmisión de calor y del tiempo de paso del sólido en el cilindro.

Relacionado con la modelación matemática del proceso de secado se han publicado varios artículos, dentro de ellos es importante destacar el trabajo de (Castaño, 2009), en el trabajo los autores obtienen y validan un modelo matemático para el secado de arena, basando el principio investigativo en el aumento de temperatura para reducir el porcentaje del agua, realizando y aplicando las ecuaciones fundamentales del balance de masa, energía y transferencia de calor al modelo.

(Duchense et al., 1997), presentan en su trabajo un simulador de secadores rotatorios con cuatro submodelos: modelo de combustión, modelo de transporte, modelo del gas y modelo del sólido. En este simulador se muestra que para controlar la humedad del sólido en la salida la principal variable a manipular es el flujo de combustible.

(Huang, 1979), usó un sistema de ecuaciones para la etapa funicular de secado, en el cual el movimiento del líquido debido al flujo capilar es dominante y un sistema diferente de ecuaciones para el estado pendular, donde el movimiento de la humedad ocurre a través de la difusión del vapor.

Los secadores rotatorios tienen una larga historia de uso en la industria. Numerosos estudios se han acometido en los mismos, desde el punto de vista tecnológico, para lograr mayor eficiencia durante el secado de los diferentes materiales y mayor calidad en los productos que se obtienen. Estos han estado dirigidos en varias direcciones: para describir el comportamiento de la transferencia de calor y masa en el secador, el transporte de sólidos, y en otros casos, estudios dedicados a caracterizar la cinética de secado y la humedad de equilibrio (Torres, 1999).

Valoraciones sobre consumo energético también se encuentran en el libro de texto: Cálculo de los principales procesos en los Hornos Metalúrgicos (Chang, 1997), en el mismo se estudia la aplicación de la teoría integral de los procesos tecnológico, aerodinámico, mecánico, de

transmisión de calor y energético en los cálculos y proyectos de los hornos metalúrgicos, incluyendo sus instalaciones auxiliares.

El trabajo investigativo realizado por (Domínguez, 2011), es uno de los estudios más integradores, desde el punto de vista metodológico, de balances térmicos y de masa en secadores en Cuba, este trabajo está relacionado con el secado de carbón antracita en este tipo de equipos. El autor analiza las diferentes corrientes energéticas que se generan en el proceso y estima el índice de consumo de combustible y los principales parámetros que influyen en él.

1.6 Conclusiones del capítulo

- Mediante una profunda revisión bibliográfica realizada, relacionada con el proceso de secado en cilindros horizontales rotatorios, se comprueba que han sido numerosos los estudios realizados en este ámbito, siendo comunes los resultados obtenidos, entre ellos que algunos de los parámetros de mayor incidencia en la eficiencia de trabajo del horno son el flujo de combustible alimentado y la humedad de entrada del material.
- La revisión bibliográfica de investigaciones realizadas acerca del proceso de secado en las industrias cubanas del níquel arroja que los estudios realizados son insuficientes, debido a que las condiciones de trabajo cambian de manera sistemática y los parámetros varían simultáneamente con ellas, por lo que se hace necesario incrementar la profundidad en dichas investigaciones para la obtención de resultados de mayor utilidad para el mejoramiento de la eficiencia del proceso en dichas entidades.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Los métodos a utilizar en cualquier investigación y su posterior ejecución son las herramientas fundamentales para asegurar la teoría de dicha investigación. Es por ello que en el presente capítulo se describen los materiales y métodos utilizados en el transcurso del trabajo. Se realiza una caracterización de los materiales utilizados para la medición y experimentación, así como los equipos industriales involucrados en el proceso en cuestión, las herramientas y Software informáticos utilizados, entre otros. Posteriormente se caracterizan los métodos empleados para la realización de dichas mediciones y experimentos, y se desarrolla la metodología para los cálculos de balances de masa y de energía en los hornos de tambor rotatorio para el secado de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

2.2 Descripción de los materiales empleados

Los materiales involucrados en la realización de este trabajo se dividen en tres grandes grupos, teniendo en cuenta fundamentalmente el origen o la finalidad de los mismos. De este modo, el primer grupo está conformado por los materiales, equipamiento, etc. que intervienen directamente en el proceso industrial en cuestión, en este caso el proceso de secado de mineral. En este grupo se encuentran fundamentalmente las menas lateríticas húmedas, las cuales constituyen la materia prima alimentada en el proceso y por ende, el material de interés; el fuel-oil como combustible utilizado en el horno durante el proceso de secado; y el horno de tambor rotatorio como el equipo donde se desarrolla dicho proceso. En un segundo grupo se concentran los materiales que constituyen la fuente mediante la cual se obtuvieron los valores reales de los principales parámetros a tener en cuenta para el desarrollo de los cálculos. En este caso, se encuentran las instalaciones encargadas de controlar los parámetros de interés en este proceso, que es el Panel de Control de la planta. En el tercer grupo se ubican las herramientas computacionales utilizadas para el desarrollo del trabajo, entre las que se pueden destacar el paquete de Microsoft Office y otros Software auxiliares, como el AutoCAD 2015 para la elaboración de los esquemas y dibujos técnicos de los equipos, el

MathCAD, para la realización de algunos de los cálculos programados del trabajo, y el software COMPRAC (Composición Racional), diseñado por el Dr.C. Antonio Chang Cardona, para la obtención de la composición mineralógica del mineral que se alimenta al secador.

2.2.1 Caracterización general de las menas lateríticas

El mineral proveniente de la mina, que se alimenta a los secaderos posee una relación Limonita de Balance-Serpentina de Balance LB/SB = 4/1 que quiere decir que la mezcla del mineral serpentínico y el mineral limonítico estará formado por cuatro partes de limonita y una parte de serpentina.

La humedad de entrada de mineral será de 36 a 38 %, pudiendo ser mayor en épocas de lluvia, y alrededor de 34 % en temporada de sequía, su peso volumétrico será de 1,7 t/m³, y su composición química en base seca está dada en la tabla 1 (NiECG, 2015).

Tabla 1. Composición química del mineral que se alimenta al proceso de secado.

Elemento	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr	Mn
Composición (%)	1,05	43,9	0,125	7,26	2,13	8,8	1,717	0,664

Partiendo de los resultados analíticos de alta precisión mediante el empleo de microscopía electrónica de barrido (SEM), se ha podido establecer la composición mineralógica básica para cada horizonte del perfil laterítico de los yacimientos de los cuales se abastece la empresa, identificándose la goethita, hematita, gibbsita, cromita, entre otros minerales. El níquel se asocia principalmente a la goethita y el cobalto a los minerales de manganeso (Muñoz, 2012).

2.2.2 Caracterización del horno de tambor rotatorio número dos de la planta

El horno de tambor rotatorio constituye uno de los equipos de mayor utilización industrial para realizar el proceso de secado de sólidos. Su amplia utilización se debe, sobre todo, a las diversas ventajas que este aporta, siendo una de ellas la posibilidad de secar casi todo tipo de material y hacerlo bajo condiciones atmosféricas. Es por ello que se utiliza básicamente para

el secado continuo a presión atmosférica de materiales de trozos, granulados, áridos (sales minerales, fosforita, etc.).

La empresa Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con seis secadores rotatorios de tambor de similares características y parámetros de funcionamiento, de los cuales se encuentran simultáneamente dos en funcionamiento mientras que los cuatro restantes se encuentran detenidos, ya sea bajo supervisión y mantenimiento o en desuso.

El secador de mineral laterítico estudiado, que es el número dos (ver figura 4), está compuesto por una cámara de combustión (1), en la cual se suministra el combustible, aire para la combustión y la pulverización y los gases residuales proveniente de los hornos de reducción de mineral, algunos de los cuales continúan combustionando, pero de igual manera se aprovecha la energía térmica de cada uno de ellos. Los gases generados producto son enviados a la cámara de paso (2) en donde son mezclados con más aire de exceso para aumentar el volumen de gases.

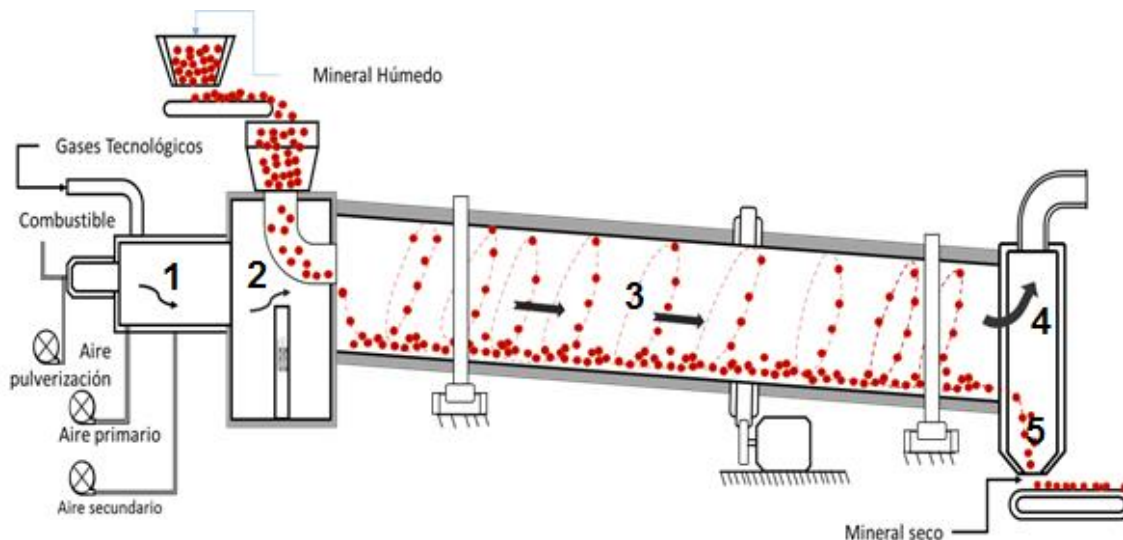


Figura 4. Esquema representativo del secador de tambor rotatorio.

El tambor o cilindro rotatorio (3), parte del horno donde se realiza el proceso de secado, tiene 5,4 m de diámetro y 40 m de longitud, posee un ángulo de inclinación de 15 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal, para facilitar el mezclado y traslado del material. El mismo trabaja en isocorriente y con las condiciones de operación expuestas en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales parámetros de trabajo del secador 2 de la planta.

Parámetros	Valores
Humedad del mineral a la entrada del secadero ($W_{ent\ min}$)	34,58 %
Humedad del mineral a la salida del secadero ($W_{sal\ min}$)	3,53 %
Flujo de combustible alimentado al secadero (F_{comb})	2 205 kg/h
Temperatura de entrada del combustible ($T_{ent\ comb}$)	122 °C
Flujo de mineral a la salida del secadero o productividad del horno ($F_{sal\ min}$)	95 t/h
Temperatura de salida del mineral ($T_{sal\ min}$)	80 °C
Temperatura de salida de los gases del secadero ($T_{sal\ gases}$)	88 °C
Flujo volumétrico de los gases provenientes de Hornos ($F_{V_{gases\ HR}}$)	46 000 m ³ /h
Temperatura de los gases provenientes de Hornos ($T_{gases\ HR}$)	270 °C
Temperatura de la cámara de paso del secadero (T_{cam})	681 °C
Flujo volumétrico de aire primario ($F_{V_{aire\ prim}}$)	18 738 m ³ /h
Temperatura de entrada del aire al horno ($T_{ent\ aire}$)	50 °C
Flujo volumétrico de aire de pulverización ($F_{V_{aire\ pulv}}$)	57 600 m ³ /h

*NOTA: Cada parámetro fue extraído del CITECT en el Panel de Control de la empresa. En el caso de la productividad del horno, se promedió la productividad total para los dos secaderos que se encontraba en funcionamiento, y el flujo volumétrico de los gases provenientes de la Planta de Hornos de Reducción fue extraído del Manual de Operaciones de la Planta.

Además, en la parte interna del cilindro están dispuestas una serie de palas o aletas soldadas que favorecen la elevación y volteo del material mientras el cilindro rota apoyado sobre rodillos, permitiendo un mejor contacto entre el sólido y la corriente gaseosa.

Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan temperaturas de aproximadamente 1500 °C y bajan hasta 800-850 °C al ponerse en contacto con el aire y los gases de hornos de reducción, el exceso que se suministra sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral. Con esta temperatura es con la que entran los gases al tambor secador de forma que, ese contacto gases calientes – mineral, permite que este último se vaya secando

y se obtenga al final un producto con humedad de $\pm 3 \%$. Los gases, al salir del secadero, pueden tener temperaturas de 80 a 100 °C. Los gases que salen del secador son succionados por un ventilador de tiro situado a la salida del electrofiltros que posee cada secadero individualmente. Estos gases arrastran consigo alrededor del 36 % del polvo, que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado y que, por lo general, poseen una granulometría (-0,074) mm (NiECG, 2015). El horno posee una capa de fibra de vidrio como material termoaislante, la cual cumple la función de evacuar parte del calor que se transfiere hacia la pared del horno, y la cámara de combustión está revestida con material refractario debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan durante la combustión.

2.2.3 Caracterización del fuel-oil utilizado como combustible en el proceso

El fuel-oil es un combustible que normalmente proviene de la primera etapa del proceso de refinación (destilación atmosférica), viscoso y con alto contenido energético, lo cual lo hace apto para ser usado en calderas, hornos y para las plantas de generación eléctrica. En los procesos de refinación del fuel oil se obtienen subproductos como aceites, lubricantes y asfaltos. También es utilizado como combustible en motores marinos. Es un combustible que está formado por grandes cadenas de hidrocarburos, particularmente alcanos, ciclo alcanos y algunos compuestos aromáticos, tiene un color oscuro y olor característico a azufre.

Se clasifica con números del 1 al 6, para tal clasificación se considera su punto de ebullición, su composición y su viscosidad. De acuerdo a su número, entre más alto sea este, mayor será su viscosidad. Para los procesos industriales, generalmente necesita un precalentamiento antes de ser inyectado a la caldera u horno, esta temperatura se recomienda entre 80 °C y 100 °C, esto con el fin de evitar que los hidrocarburos livianos sean evaporizados y lograr de esta manera mantener el poder calórico original (RECOPE, 2011).

Viscosidad

Es una de las propiedades físicas que tienen mayor importancia dado que es una medida de la facilidad con que el combustible es bombeado o atomizado en el quemador. La viscosidad aumenta conforme aumenta el número de carbonos en la cadena. En la empresa RECOPE (Refinería Costarricense de Petróleo) se han realizado disímiles pruebas de variación de viscosidad versus temperatura, donde se observa un decrecimiento acelerado de sus valores,

así como una ligera estabilización de la misma en el ámbito de temperatura entre 70 °C y 100 °C.

Temperatura de inflamación

Conocido también como punto de ignición, punto de inflamación o *flash point*, es la temperatura más baja a la que un combustible debe calentarse para que genere vapores suficientes que se mezclen con el oxígeno y se inicie la combustión. Su importancia en la industria va desde el punto de vista de la seguridad en el almacenamiento y manejo. Los valores de punto de ignición mínimos permisibles normalmente están establecidos por la Norma Centroamericana (RTCA). La norma establece un valor de temperatura de 60 °C mínimo. El valor de temperatura de 110,9 °C en promedio ofrece un margen adecuado para efectos de precalentamiento.

Residuos carbón Conradson

Es el residuo no combustible, que por su naturaleza se parece al carbón. El valor del carbón residual se obtiene mediante una prueba destructiva, en la cual el combustible es destilado hasta la sequedad en ausencia de aire. Es un indicador de la cantidad de humo negro (hollín), que se forma en las chimeneas de hornos y calderas, así como en los quemadores. El límite de especificación es de 20 % máximo, pero su valor promedio de 7,68 % es comparable con valores estándares internacionales.

Agua y sedimento

Este valor debe ser lo más bajo posible con el fin de evitar el bloqueo o atascamiento en los tanques de almacenamiento, en las tuberías u otras partes del equipo de combustión. Disminuye el poder calórico del combustible y la temperatura del hogar, favoreciendo el punto de rocío ácido (significado) y la corrosión. Usualmente los sedimentos tienden a acumularse en los filtros y los quemadores. El agua presente en el fondo de tanques normalmente es la causa de formación de emulsiones y de la corrosión de estas partes de los tanques de combustibles. Aunque la Norma Nacional permite hasta un 2 %, su valor promedio en el 2010 fue de 0,13 %

Densidad

Por si sola, la densidad no tiene una relación directa con las características del fuel-oil, pero es un dato necesario para los cálculos de balance de energía. La densidad aumenta conforme aumenta el número de carbonos en la cadena. Se estima que el promedio anual de la densidad del fuel-oil es aproximadamente de 936,6 kg/m³.

En la empresa se utiliza el combustible fuel-oil, generalmente de importación, salvo excepciones donde se ha utilizado de procedencia nacional, aunque no es conveniente para la empresa debido al elevado contenido de azufre que posee, lo cual puede ser perjudicial para las instalaciones. Según documentos oficiales de la empresa, entre los que destacan contratos de compra e informes de pruebas de laboratorios realizadas al fuel-oil que se utiliza en dicha entidad, se han recopilado los siguientes resultados.

Tabla 3. Principales parámetros de control del fuel-oil en la empresa. Fuente: (NiECG, 2015).

Índice	Unidad	Método Analítico	Especificidad Contratada	Resultado Laboratorio Químico
Visc. a 50 °C	CSTOK	D-445	450 máx.	340,84
Visc. a 80 °C	CSTOK	-	69 máx.	66,40
Densidad API	-	D-1298	10,5 min.	15,8
Punto Inflamación	°C	D-93	65 min.	120,0
Carbón Conradson	%	D-189	17 máx.	9,82
Cenizas	%	D-382	0,10 máx.	0,04
Agua	%	D-95	1 máx.	0,00
Azufre	%	D-129	3,5 máx.	1,82
Temp. de Fluidez Crítica	°C	D-97	18 máx.	-
Impurezas mecánicas	%	D-473	0,15 máx.	0,02
Asfáltenos	%	D-1548	13 máx.	1,99
Valor Calórico	kcal/kg	D-4698	9600 min	10213,88
Sodio	PPM	D-1218	60 máx.	-
Vanadio	PPM	D-1548	400 máx.	-
Densidad	g/cm ³	-	0,9846 máx.	0,9602

Como se puede apreciar en la tabla 3, específicamente en las columnas de las especificidades contratadas y las pruebas de laboratorio realizadas, los valores obtenidos están muy acordes con los requeridos, por lo que se puede afirmar que el fuel-oil cumple con las condiciones de trabajo, y por ende posee buena calidad para su uso industrial.

Valor Calórico Inferior del combustible.

$$\text{VCI} = 42\,765,516 \text{ kJ/kg}$$

Tabla 4. Composición química del combustible utilizado en los secaderos.

Elemento	C	H	S	O ₂	N ₂	W	A
Composición (%)	87,40	10,60	1,82	0,07	0,07	0,00	0,04

2.3 Descripción de los métodos empleados

Para el desarrollo de este trabajo, según lo planteado en el diseño metodológico del mismo, para lograr darle cumplimiento al objetivo general se emplea el método de balance térmico, que no es más que la realización de los balances de masa y energía al objeto de estudio planteado: el secador rotatorio número dos de la UBP Planta de Preparación del Mineral.

Los balances de materia y energía son una de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos y se utilizan para contabilizar los flujos de materia y energía entre un determinado proceso industrial y los alrededores, o entre las distintas operaciones que lo integran. Por tanto, se aplica esta metodología para poder contabilizar los diferentes flujos de materiales que entran y salen del equipo, toda aquella energía que se suministra y se pierde, así como las necesidades energéticas del mismo, que en último término se traducirán en los requerimientos de servicios auxiliares.

El propósito fundamental es, mediante un análisis de los resultados obtenidos, identificar y determinar los parámetros que están ocasionando que el secadero esté operando con una eficiencia menor que la normalizada para estos equipos, así como la determinación de las pérdidas de calor por la pared del tambor en las condiciones reales de la empresa, y suponiendo la presencia de un material termoaislante como revestimiento, con el fin de comprobar la energía que podría ser evacuada en el interior del equipo y aprovechada útilmente durante el proceso.

2.3.1 Técnicas experimentales para la toma de datos en el proceso de secado

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación de secado se utilizó el método pasivo, debido al régimen de producción ininterrumpido en el que se encuentra dicha instalación, por tanto se emplearon los medios que se encuentran en el panel de control de la planta de preparación del mineral para la obtención de estos parámetros.

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos denominado CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso metalúrgico. En la figura 5 se muestra una imagen del Panel de Control de la empresa para el secador 2 con algunas de las principales variables que son controladas y registradas por el sistema.

Las propiedades termofísicas de las diferentes sustancias de trabajo (aire, gases y mineral laterítico) se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones expuestas en la literatura consultada (Perry, 1985), y fueron seleccionados también determinados valores de variables y ecuaciones de acuerdo con las recomendaciones de las investigaciones precedentes y literaturas especializadas en procesos termodinámicos de transmisión de calor (Incropera, 2003), (Torres, 1999) y (Azman, 2008).

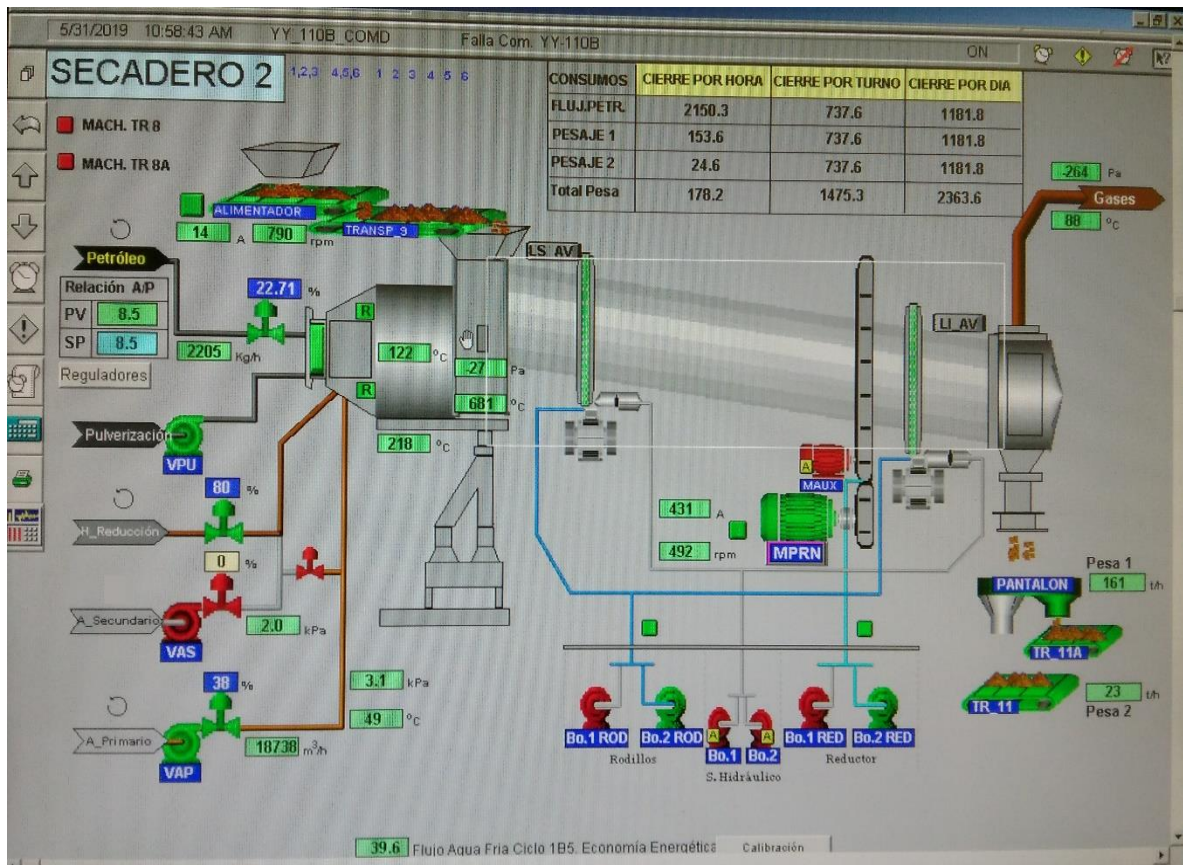


Figura 5. Sistema de adquisición de datos para el secadero número dos registrados por el CITECT en el Panel de Control.

2.3.2 Metodología de cálculo para el balance de masa

El balance de masa es un método matemático muy utilizado, principalmente en la Ingeniería Química. Se basa en la ley de conservación de la materia, y establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante (excluyendo, las reacciones nucleares o atómicas en las que la materia se transforma en energía según Einstein). La masa que entra en un sistema debe salir del sistema o acumularse dentro de él, según la expresión (2.1):

$$\text{Entrada} = \text{salida} + \text{acumulación} \quad (2.1)$$

Para la realización del balance de masa del proceso de secado de las menas lateríticas en el secador rotatorio número dos de la Planta Preparación del Mineral se expone la metodología siguiente.

Masa total de mineral que se alimenta al horno

La masa de mineral que se alimenta al secadero está definida según la siguiente expresión:

$$m_{\text{ent min}} = m_{\text{sal min}} + m_{\text{ent min}} \cdot (W_{\text{ent min}} - W_{\text{sal min}}) \quad (2.2)$$

donde:

$m_{\text{ent min}}$: Masa de mineral que se alimenta al secador, kg.

$m_{\text{sal min}}$: Masa de mineral seco a la salida del horno, kg.

$W_{\text{ent min}}$: Humedad de entrada del mineral, %.

$W_{\text{sal min}}$: Humedad a la salida del mineral, %.

Luego de extraer factor común y despejar, se tiene que:

$$m_{\text{ent min}} = \frac{m_{\text{sal min}}}{(1 - W_{\text{ent min}} - W_{\text{sal min}})} \quad (2.3)$$

Masa de agua que se elimina (evapora) del mineral

Esta masa corresponde a la cantidad de agua externa que se evapora, y se determina según la siguiente expresión:

$$m_{\text{agua evap}} = m_{\text{ent min}} \cdot (W_{\text{ent min}} - W_{\text{sal min}}) \quad (2.4)$$

Masa total de agua externa presente en el mineral

$$m_{\text{agua total}} = m_{\text{ent min}} \cdot W_{\text{ent min}} \quad (2.5)$$

Composición racional másica de la materia prima

La composición racional másica de la materia prima expresa, desde el punto de vista estequiométrico, el contenido de cada elemento y compuesto que esta posee, teniendo en cuenta la composición químico-mineralógica del mineral, según la siguiente expresión:

$$m(\text{Me}) = \frac{\% \text{ Me}}{100} \cdot m_{(\text{MP})\text{seca}} \quad (2.6)$$

donde:

$m(\text{Me})$: Masa del metal en cuestión, kg.

$\% \text{ Me}$: Contenido del metal en el mineral, %.

$m_{(\text{MP})\text{seca}}$: Masa de la materia prima seca, kg.

Por la ley de estequiometría se tiene que:

$$m(\text{elem}) = \frac{n(\text{elem}) \cdot \text{MA}(\text{elem}) \cdot m(\text{comp})}{n(\text{comp}) \cdot \text{MM}(\text{comp})} \quad (2.7)$$

donde:

$m(\text{elem})$, $m(\text{comp})$: Masas del elemento químico y el compuesto que lo contiene respectivamente, kg.

$n(\text{elem})$, $n(\text{comp})$: Cantidad de sustancia o número de moles del elemento y el compuesto respectivamente, kmol.

$\text{MA}(\text{elem})$, $\text{MM}(\text{comp})$: Masa atómica del elemento y masa molar del compuesto respectivamente, kg/kmol.

La ecuación anterior hace referencia a la determinación de la masa de un elemento químico contenido en un compuesto del cual se conoce su masa. También puede ser aplicada de forma

viceversa, y a su vez entre compuestos diferentes que participen en una misma reacción química, tal y como se muestra a continuación:

$$m(\text{comp A}) = \frac{n(\text{comp A}) \cdot \text{MM}(\text{comp A}) \cdot m(\text{comp B})}{n(\text{comp B}) \cdot \text{MM}(\text{comp B})} \quad (2.8)$$

donde A y B son dos compuestos diferentes que participan en una misma reacción química.

Composición racional másica del aire

El aire se suministra al secador de dos maneras diferentes según su propósito, el aire primario para garantizar la combustión del combustible, y el aire de pulverización para atomizar dicho combustible, de modo que se facilite la ocurrencia de las reacciones de combustión. También existe un flujo de aire secundario que actualmente no se alimenta al equipo. Partiendo del flujo volumétrico de aire que se alimenta se tiene:

$$m_{\text{aire}} = V_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \quad (2.9)$$

donde:

m_{aire} : Masa de aire alimentado al secador, kg.

V_{aire} : Volumen de aire que se alimenta al equipo, m^3 .

ρ_{aire} : Densidad del aire a la temperatura de alimentación, kg/m^3 .

La cantidad de oxígeno presente en el aire puede ser determinada mediante la expresión siguiente:

$$m_{\text{O}_2} = \frac{m_{\text{aire}} \cdot \% \text{O}_{2\text{aire}}}{100 \%} \quad (2.10)$$

donde:

m_{O_2} : Masa de oxígeno presente en el aire, kg.

$\% \text{O}_{2\text{aire}}$: Contenido de oxígeno en el aire, %.

Como el aire se compone fundamentalmente de oxígeno y nitrógeno, se tiene:

$$m_{\text{N}_2} = m_{\text{aire}} - m_{\text{O}_2} \quad (2.11)$$

donde:

m_{N_2} : Masa de nitrógeno contenida en el aire, kg.

Estas expresiones son aplicables para el aire primario y el de pulverización.

Composición racional másica del combustible fuel-oil

La composición racional másica del combustible viene dada por el contenido de cada elemento que se encuentra presente en su composición química, incluyendo las cenizas y la humedad, según la ecuación siguiente:

$$m(\text{elem})_{\text{comb}} = \frac{m_{\text{comb}} \cdot \% \text{ elem}}{100 \%} \quad (2.12)$$

donde:

$m(\text{elem})_{\text{comb}}$: Masa de cada elemento que compone al combustible fuel-oil, kg.

m_{comb} : Masa total de combustible alimentado al secador, kg.

% elem: Contenido del elemento en el combustible, %.

Composición racional másica de los gases provenientes de Hornos de Reducción

Se conoce que a los secaderos se alimenta un volumen de gases provenientes de la planta de Hornos de Reducción, esto se lleva a cabo con el objetivo de aprovechar la energía térmica que estos poseen y reducir por ende el flujo de combustible que se alimenta. Para determinar la composición racional másica se emplea, partiendo del volumen y la composición química de los mismos, la expresión siguiente:

$$m(\text{gas})_{\text{HR}} = \frac{m(\text{gases})_{\text{HR}} \cdot \% \text{ gas}}{100 \%} \quad (2.13)$$

donde:

$m(\text{gas})_{\text{HR}}$: Masa del gas contenido en la masa total de gases provenientes de Hornos, kg.

$m(\text{gases})_{\text{HR}}$: Masa total de los gases provenientes de la planta de Hornos, kg.

% gas: Contenido del gas en la masa total de gases provenientes de Hornos, %.

Composición racional másica de los gases productos de la combustión

Los gases producto de la combustión se forman una vez que el combustible fuel-oil contacta con el oxígeno a la temperatura indicada impuesta por el quemador, cada componente del combustible, como el C, H₂ y S reacciona con el oxígeno dando lugar a estos gases. Además, también combustionan el CO y el H₂ provenientes de la Planta de Hornos, por lo que también se tienen en cuenta. Por tanto se hace necesario determinar la cantidad de oxígeno necesaria para combustionar el combustible alimentado, según la siguiente ecuación:

$$m(O_2)_{comb} = \frac{n(O_2)_{comb} \cdot MA(O_2)_{comb} \cdot m(elem)_{comb}}{n(elem)_{comb} \cdot MM(elem)_{comb}} \quad (2.14)$$

donde:

$m(O_2)_{comb}$: Masa de oxígeno que reacciona con el componente del combustible, kg.

$n(O_2)_{comb}$: Cantidad de moles del oxígeno, kmol.

$MA(O_2)_{comb}$: Masa atómica del oxígeno, kg/kmol.

$m(elem)_{comb}$: Masa del elemento o componente del combustible que combustiona, kg.

$n(elem)_{comb}$: Cantidad de moles del elemento del combustible, kmol.

$MM(elem)_{comb}$: Masa molar de dicho elemento, kg/kmol.

Luego se suman ambas masas para obtener la masa total de cada gas producto de la combustión, tal y como se muestra a continuación:

$$m(gas)_{comb} = m(elem)_{comb} + m(O_2)_{comb} \quad (2.15)$$

$m(gas)_{comb}$: Masa total del gas que se forma producto de la combustión, kg.

Composición racional másica de los gases salientes

Los gases que salen del horno son una mezcla producto de las diferentes transformaciones físico-químicas que ocurren en el secador, tales como la evaporación del agua contenida en el mineral y las reacciones de combustión, además de los gases que provienen de la Planta de Hornos de Reducción. La composición racional másica de los gases salientes viene dada

por la suma de estas tres corrientes diferentes de gases, las cuales se determinan anteriormente.

Composición racional másica del polvo que se pierde con los gases

Los secaderos cuentan con un sistema de captación de polvo, por lo que parte del polvo arrastrado por los gases es recuperado y reenviado al proceso nuevamente. Por ende, en la práctica, se asume una pérdida irreversible aproximada igual al 1 % de cada elemento que forma parte de la materia prima seca alimentada. Por tanto, según la expresión siguiente, se tiene:

$$m(\text{elem})_{\text{polvo}} = \frac{m(\text{elem})_{\text{MP seca}} \cdot \% (\text{elem})_{\text{polvo}}}{100 \%} \quad (2.16)$$

$m(\text{elem})_{\text{polvo}}$: Masa del elemento que se pierde en forma de polvo con los gases, kg.

$m(\text{elem})_{\text{MP seca}}$: Masa total del elemento contenida en la materia prima seca alimentada, kg.

$\% (\text{elem})_{\text{polvo}}$: Contenido del elemento que se pierde en forma de polvo con los gases, %.

Composición racional másica del producto seco a la salida del horno

La masa del producto seco a la salida del secador posee poca variación, desde el punto de vista de su composición química-mineralógica, siendo la disminución considerable de agua externa su principal variación. Además, se tiene en cuenta la disminución de masa debido a las pérdidas irreversibles por el polvo que escapa con los gases. Por tanto su composición racional excluye el agua evaporada durante el proceso de secado y el polvo perdido.

$$m(\text{elem})_{\text{prod}} = \frac{m(\text{elem})_{\text{MP seca}} \cdot \% (\text{elem})_{\text{prod}}}{100 \%} \quad (2.17)$$

Balance de masa general del proceso

Para el planteamiento del balance de masa general, debe ser comprobado verificando que se cumpla lo establecido según la ecuación (2.1). De esa manera es posible controlar los flujos entrantes y salientes del proceso y contabilizar cada uno de los mismos.

2.3.3 Metodología de cálculo para el balance de energía térmica

El balance de energía se realiza con el objetivo de lograr que la conversión de los recursos energéticos sea efectiva, aceptable y económica. Para aprovechar correctamente la energía así generada, es necesario comprender los principios básicos de su generación, uso y transformación en cualquiera de sus diferentes formas; para ello, se debe tener en cuenta la cantidad de energía (calor) que se suministra y se extrae del sistema.

Los balances energéticos son normalmente algo más complejos que los de materia, debido a que la energía puede transformarse de unas formas a otras (mecánica, térmica, química, etc.), lo que obliga a considerar este aspecto en las ecuaciones. En general, los balances de energía serán imprescindibles en equipos en los que el intercambio de energía sea determinante, lo que fundamentalmente sucederá en cambiadores de calor, evaporadores, columnas de destilación, hornos industriales, etc., es decir, cuando haya que calentar o enfriar un material.

En este caso se trata de un horno de tambor rotatorio para el secado de sólidos, por lo que la energía del sistema se transforma en energía térmica, la metodología de cálculo por ende está expuesta ajustándose a estas especificidades.

Por tanto, según lo reflejado anteriormente, la ecuación (2.18) representa el principio del balance energético para este equipo.

$$ECSE + ELRQ = ECSS + EPTC \quad (2.18)$$

donde:

ECSE: Energía de los calores sensibles entrantes, kJ.

ELRQ: Energía liberada por reacción química, kJ.

ECSS: Energía de los calores sensibles salientes, kJ.

EPTC: Energía perdida por transferencia de calor, kJ.

La figura 6 muestra las diferentes corrientes energéticas que interactúan en el secador:

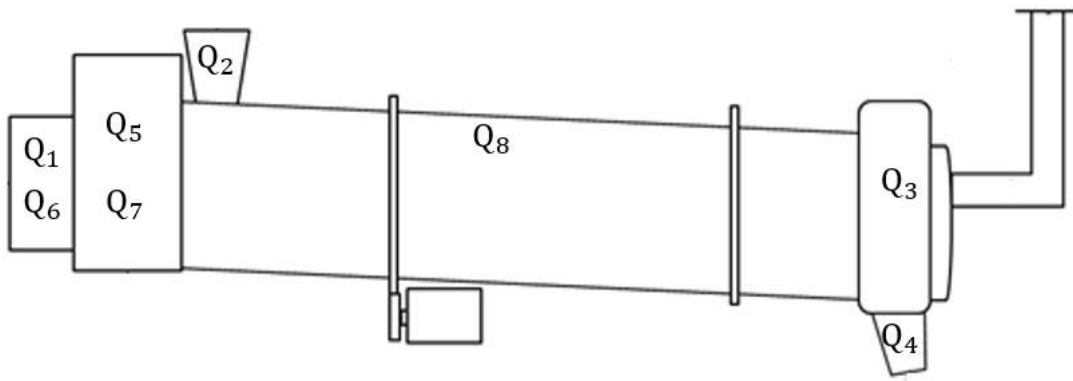


Figura 6. Corrientes energéticas que interactúan en el secador rotatorio.

Según lo analizado previamente, se plantea la ecuación (2.19), la cual establece el balance térmico para el equipo en cuestión.

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = Q_3 + Q_4 + Q_8 \quad (2.19)$$

donde:

Q_1 : Calor sensible y de reacción aportado por el combustible fuel-oil, (kJ/h).

Q_2 : Calor sensible aportado por la materia prima (mineral húmedo), (kJ/h).

Q_3 : Calor sensible de los gases que salen del secador (incluye el agua evaporada), (kJ/h).

Q_4 : Calor sensible del mineral a la salida (incluye el contenido de agua que posea), (kJ/h).

Q_5 : Calor sensible aportado por el aire de combustión o primario, (kJ/h).

Q_6 : Calor sensible aportado por el aire de pulverización, (kJ/h).

Q_7 : Calor sensible y de reacción aportado por los gases de la planta Hornos de Reducción, (kJ/h).

Q_8 : Calor perdido por conducción y convección a través de la pared del tambor, (kJ/h).

A partir de la ecuación (2.19), se determina cada uno de los calores involucrados, tal y como se muestra a continuación.

2.3.3.1 Determinación de las corrientes energéticas

En todo proceso pirometalúrgico, siempre debe existir una fuente energética que sea capaz de garantizar la ocurrencia del conjunto de transformaciones físico-químicas que tienen lugar dentro del equipo en cuestión. Por otra parte, también existe un flujo de energía que se consume útilmente en procesos y transformaciones deseadas, y otro que se pierde o se desaprovecha, el cual constituye pérdidas. Estos tres flujos energéticos se recogen en dos grupos fundamentales, los acápites de entrada (fuentes de energía suministrada) y los acápites de salida (energía consumida útilmente y pérdidas). El establecimiento de un método de balance energético a estos procesos garantizaría en control de estos parámetros anteriormente mencionados, pero, para ello deben ser determinados con anterioridad todos los flujos energéticos entrantes y salientes del proceso. Por ende, a continuación se determinan cada una de esas corrientes energéticas.

Calor sensible y de reacción aportado por el combustible fuel-oil (Q_1)

Esta corriente puede ser determinada según la ecuación 2.20:

$$Q_1 = F_{\text{comb}} \cdot \Delta H_{\text{comb}} + F_{\text{comb}} \cdot \text{VCI} \quad (2.20)$$

donde:

F_{comb} : Flujo de combustible alimentado, (kg/h).

ΔH_{comb} : Variación de la entalpía del combustible, (kJ/kg).

VCI: Valor Calórico Inferior del combustible, kJ/kg.

De la ecuación anterior se deriva el cálculo de la variación de la entalpía, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta H_{\text{comb}} = \int_{T_{\text{amb}}}^{T_{\text{ent comb}}} C_{p_{\text{comb}}} \cdot dT = C_{p_{\text{comb}}} \cdot (T_{\text{ent comb}} - T_{\text{amb}}) \quad (2.21)$$

donde:

$C_{p_{\text{comb}}}$: Calor específico del combustible, (kJ/kg°C).

T_{amb} y $T_{ent\ comb}$: Temperaturas ambiente y de entrada del combustible al horno respectivamente, ($^{\circ}C$).

El calor específico del combustible viene dado, según (Perry, 1985) por:

$$C_{p_{comb}} = \frac{0,383 + 0,00045 \cdot T_{ent\ comb}}{\rho_{esp}} \quad (2.22)$$

donde:

ρ_{esp} : Densidad específica del combustible a 25 $^{\circ}C$, (0,986 g/cm³). Este parámetro debe aparecer de manera obligatoria en esta unidad de medida para la ecuación anterior.

Calor sensible aportado por la materia prima, (Q_2)

En el caso específico de esta corriente, ocurre que la temperatura de alimentación de la misma es muy cercana a la temperatura ambiental, por lo que al determinar la variación de entalpía, se obtiene un valor demasiado pequeño, llegando a ser insignificante en cuanto a su aporte energético. Por tanto para cálculos de ingeniería se puede asumir que el calor asociado a esta corriente energética es despreciable.

$$Q_2 = 0$$

Calor sensible de los gases que salen del horno (Q_3)

Esta corriente abarca todos los gases que salen del secadero, incluyendo el agua que se elimina del mineral alimentado, por tanto:

$$Q_3 = Q_{3(G)} + Q_{3(VA)} \quad (2.23)$$

donde:

$Q_{3(G)}$: Calor perdido por los gases que salen del horno (excluyendo el agua), (kJ/h).

$Q_{3(VA)}$: Calor perdido por el agua que se evapora del mineral, (kJ/h).

Calor perdido por los gases

El calor que se pierde con los gases se determina según la siguiente expresión:

$$Q_{3(G)} = \sum F_{\text{sal(G)}} \cdot \Delta H_{(G)} \quad (2.24)$$

donde:

$F_{\text{sal(G)}}$: Flujo másico de los gases a la salida del equipo (excluye el agua evaporada), kg/h.

$\Delta H_{(G)}$: Variación de entalpía de cada uno de los gases a la salida del horno, kJ/kg.

Es necesario tener en cuenta que al expresar la sumatoria se están incluyendo específicamente cada uno de los gases que salen del horno.

El flujo másico de los gases se determina mediante la metodología del balance de masa planteada anteriormente y la variación de la entalpía mediante la expresión (2.21).

Calor consumido por el agua que se evapora

Este se determina mediante la ecuación (2.24), pero aplicado a un único compuesto, que es el agua, por tanto:

$$Q_{3(VA)} = F_{\text{sal(VA)}} \cdot \Delta H_{(VA)} \quad (2.25)$$

La determinación del flujo de vapor de agua ($F_{\text{sal(VA)}}$) viene dada por:

$$F_{\text{sal(VA)}} = F_{\text{ent min}} \cdot \frac{W_{\text{ent min}}}{100} - f_{F_{\text{sal min}}} \cdot \frac{W_{\text{sal min}}}{100 \cdot f_{F_{\text{sal min}}}} \quad (2.26)$$

donde:

$F_{\text{ent min}}$: Flujo de mineral húmedo alimentado, (kg/h).

$f_{F_{\text{sal min}}}$: Relación de mineral secado.

$W_{\text{ent min}}$ y $W_{\text{sal min}}$: Contenidos de humedad del mineral a la entrada y a la salida respectivamente, (%).

$$f_{F_{\text{sal min}}} = \frac{100 - W_{\text{sal}}}{100} \quad (2.27)$$

La variación de entalpía del vapor de agua ($\Delta H_{3(\text{VA})}$) se determina mediante la siguiente expresión:

$$\Delta H_{3(\text{VA})} = \int_{T_{\text{amb}}}^{T_{\text{sal gases}}} C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot dT + \tau_{\text{sal gases}} = C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\text{sal gases}} - T_{\text{amb}}) + \tau_{\text{sal gases}} \quad (2.28)$$

donde:

$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}}$: Calor específico del agua, (4,195 kJ/kg·°C).

$T_{\text{sal gases}}$: Temperatura de salida de los gases del horno, (°C).

$\tau_{\text{sal gases}}$: Calor latente de vaporización del agua a la temperatura de salida de los gases del horno, (kJ/kg).

Calor sensible del mineral a la salida del horno (Q₄)

Esta corriente incluye el contenido de agua que este posee, que no fue posible eliminar durante el proceso de secado, por tanto se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_4 = (F_{\text{AR}} \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + F_{\text{sal min}} \cdot C_{p_{\text{sal min}}}) \cdot (T_{\text{sal min}} - T_{\text{amb}}) \quad (2.29)$$

donde:

F_{AR} : Flujo de agua retenida, kg/h.

$F_{\text{sal min}}$: Flujo de mineral a la salida del equipo (mineral seco), kg/h.

$C_{p_{\text{sal min}}}$: Calor específico del mineral seco que sale del horno, kJ/kg°C.

$T_{\text{sal min}}$: Temperatura de salida del mineral del horno, °C.

Calor sensible del aire primario, (Q₅)

Esta corriente energética viene dada fundamentalmente por la temperatura de entrada del aire al secador, la cual es de 49 °C.

$$Q_5 = F_{V_{\text{aire prim}}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot T_{\text{ent aire}} \quad (2.30)$$

donde:

$F_{V_{\text{aire prim}}}$: Flujo volumétrico de aire primario, m³/h.

$C_{p_{\text{aire}}}$: Calor específico del aire, kJ/(m³ °C).

$T_{\text{ent aire}}$: Temperatura de entrada del aire al horno, °C.

Calor sensible del aire de pulverización, (Q₆)

Para la determinación de esta corriente energética se utiliza la ecuación (2.30) aplicada al flujo volumétrico del aire para la pulverización que se alimenta.

Calor sensible y de reacción de los gases provenientes de hornos de reducción, (Q₇)

Al calor sensible aportado por estos gases se suma el calor de reacción aportado por el monóxido de carbono (CO) producto de la combustión incompleta en la planta de hornos de reducción, y el hidrógeno (H₂), por tanto, este se determina como sigue:

$$Q_7 = Q_{GHR} + Q_{R(CO)} + Q_{R(H_2)} \quad (2.31)$$

donde:

Q_{GHR} : Calor sensible de los gases provenientes de la planta de hornos de reducción, kJ/h.

$Q_{R(CO)}$: Calor de reacción del CO, kJ/h.

$Q_{R(H_2)}$: Calor de reacción del H₂, kJ/h.

$$Q_{GHR} = F_{GHR} \cdot \Delta H_{GHR} \quad (2.32)$$

donde:

F_{GHR} : Flujo másico de los gases alimentados provenientes de la planta de Hornos, kg/h.

ΔH_{GHR} : Variación de entalpía de los gases de Hornos, kJ/kg.

La variación de entalpía se determina mediante la ecuación (2.28) aplicada a esta corriente.

Calor de reacción del H₂ y el CO

$$Q_R = F_{GHR(CO)} \cdot \Delta H_{GHR(CO)} + F_{GHR(H_2)} \cdot \Delta H_{GHR(H_2)} \quad (2.33)$$

Las variaciones de entalpías se determinan mediante la ecuación (2.28) aplicada a estos gases.

Cálculo de las pérdidas de transferencia de calor en el tambor rotatorio

En la instalación de secado existen diversas pérdidas de calor las cuales afectan considerablemente el rendimiento de la instalación. Para el cálculo de las mismas se tienen en cuenta los modos de transferencia de calor que están presente en el sistema estudiado. Con el objetivo de una mejor comprensión de cómo ocurre este fenómeno. En la figura 7 se representa el corte transversal de la sección del tambor, en la cual se simboliza el traslado del flujo de calor neto transferido desde el interior del horno hacia el exterior. Donde Q_1 el flujo de calor transferido desde la pared interior al exterior por conducción y Q_2 es el calor que se pierdo por convección de la pared exterior al aire.

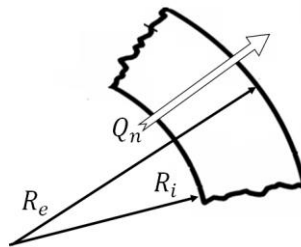


Figura 7. Pérdida de calor por conducción desde el interior hacia el exterior a través de la pared del horno.

Conociendo que cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, ocurre la transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura. Además que la transmisión de calor de sólido a sólidos, el cual ocurre mediante el contacto directo entre las partículas de un cuerpo y las de otro cuerpo o entre partes de un mismo cuerpo este fenómeno o modo se denomina como conducción, (Zalazar, 2016). Se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura. Esto se puede expresar a partir de

la ecuación (1.3) que se conoce como Ley de Fourier de la Conducción de Calor y se emplea cuando el flujo de calor en una sola dirección

$$q = -k \cdot A \cdot dT/dx \quad (2.34)$$

donde:

q: Calor transferido; W.

A: Área de la sección transversal; m².

K: Conductividad térmica; W/(m·K).

Para el caso particular estudiado donde se tiene que la conducción del calor ocurre desde el interior del tambor al exterior, la literatura especializada plantea que la ecuación que se emplea para estos casos es la siguiente:

$$q = \frac{dT}{R_r} \quad (2.35)$$

donde:

dT: Diferencia de temperatura.

R_r: Resistencia térmica.

El parámetro R_r es la resistencia que hace toda la estructura al paso del calor del interior al exterior, cuando se tiene una sola estructura R_r va a depender del radio interior, el radio exterior y la conductividad térmica del material con que está fabricado el cilindro anular. Por lo que la resistencia térmica se calcula según la expresión siguiente:

$$R_r = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \quad (2.36)$$

donde:

r_e y r_i: Radio exterior y interior del secador respectivamente, m.

k: Conductividad térmica de la pared del tambor. W/m·K.

L: Longitud del secador, m.

Para los casos en donde se tenga en cuenta varios materiales y otros modos de transferencia de calor entonces el circuito de resistencia se confecciona de la misma forma como en un circuito eléctrico (ver figura 8).

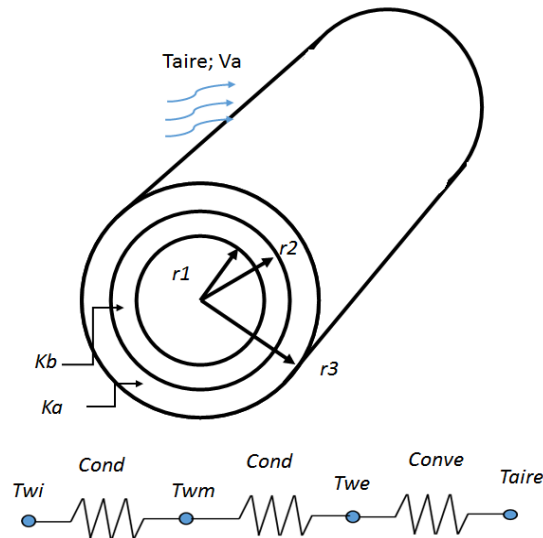


Figura 8. Representación gráfica de las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

Teniendo en cuenta el circuito de resistencia mostrado en la figura anterior se determina que la resistencia térmica se calcula según la siguiente expresión.

$$R_r = \frac{\ln(r_m/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k_b \cdot L} + \frac{\ln(r_e/r_m)}{2 \cdot \pi \cdot k_a \cdot L} + \frac{1}{h_{conv} \cdot A} \quad (2.37)$$

donde:

r_m : Radio medio del secador, m.

k_a y k_b : Conductividad térmica del material; W/m·K.

h_{conv} : Coeficiente de transferencia de calor por convección; W/m²·K.

A: Área de la superficie del secador, m².

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula teniendo en cuenta algunos números adimensionales (Reynolds; Rayleigh; Grashof; Prandls), los cuales definen ciertas condiciones, como la convección libre, forzada y mixta. En dependencia de estas condiciones se seleccionan las expresiones más precisas para determinar el Nusselt que se emplea para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección por la siguiente expresión:

$$N_u = \frac{h_{\text{conv}} \cdot k}{D} \quad (2.38)$$

donde:

N_u : Número de Nusselt, adim.

La expresión empleada para calcular el Nusselt (NUL) es la planteada por (Incropera, 2003) la cual se emplea para la transferencia de calor por convección por el exterior de un cilindro.

$$N_u = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left[\frac{Pr_0}{Pr_s} \right]^{1/4} \quad (2.39)$$

Los valores de los coeficientes C, m y n se toman de la Tabla 7.4 de (Incropera, 2003). El número de Reynolds (Re) se obtiene mediante la expresión (2.37) y el Prandls; se determina a la temperatura de la superficie en los apéndice A de (Incropera, 2003).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.40)$$

donde:

V: Velocidad del aire, m/s.

ν : Viscosidad cinemática del aire, m²/s.

D: Diámetro exterior del secadero, m.

Rendimiento térmico e índice de consumo de combustible del secador

El rendimiento térmico del equipo viene dado por la relación que existe entre el calor útil consumido en el proceso y el calor total disponible para que ocurran las diferentes

transformaciones deseadas. Según lo anteriormente planteado, y el análisis de los diferentes calores que intervienen en el horno, se plantea la siguiente expresión:

$$n_t = \frac{Q_{3\text{ VA}}}{(Q_1 + Q_7 + Q_5 + Q_6)} \cdot 100 \quad (2.41)$$

Por otra parte, el índice de consumo de combustible (I_c) se establece como la relación que existe entre la masa de combustible consumido y la productividad del equipo, se determina por la ecuación (2.39) y se expresa en $\text{kg}_{\text{comb}}/\text{t}_{\text{min}}$ (kilogramos de combustible consumido por cada tonelada de mineral seco).

$$I_c = \frac{F_{\text{comb}}}{F_{\text{sal min}}} \quad (2.42)$$

La aplicación de la metodología descrita en el epígrafe 2.3 al secador 2 de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara permite la realización de un análisis con mayor profundidad desde el punto de vista energético, con el fin de determinar los principales parámetros que ocasionan la baja eficiencia de trabajo del mismo.

2.4 Conclusiones del capítulo

- Mediante la caracterización de los materiales que intervienen en el proceso de secado (mineral laterítico, combustible fuel-oil y el secador rotatorio 2) se comprueba a través de la evaluación de algunos de sus principales parámetros de control que poseen las características y condiciones de trabajo necesarias para su utilización en la entidad.
- Se plantea la metodología de balance térmico para el secador, mediante la cual quedan planteadas cada una de las corrientes energéticas entrantes y salientes al secador, así como el rendimiento térmico del equipo y el índice de consumo de combustible del mismo.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se realiza una valoración técnico-económica y ecológica de los resultados de la investigación obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 2, considerando todos los aspectos relacionados con el proceso de secado de mineral laterítico en la empresa, para así establecer el comportamiento de los parámetros de trabajo y de eficiencia del proceso.

3.2 Principales resultados obtenidos

Con el objetivo de establecer posteriormente el comportamiento termoenergético del objeto de estudio, sobre la base del método de cálculo establecido en el capítulo 2, se muestran a continuación los principales resultados obtenidos a partir del desarrollo de los cálculos, así como las principales variables y parámetros analizados para el referido proceso de secado.

3.2.1 Resultados del balance de masa

Haciendo uso de la metodología expuesta en el epígrafe 2.3.2, y utilizando las ecuaciones desde la (2.1) a la (2.17) se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 9.

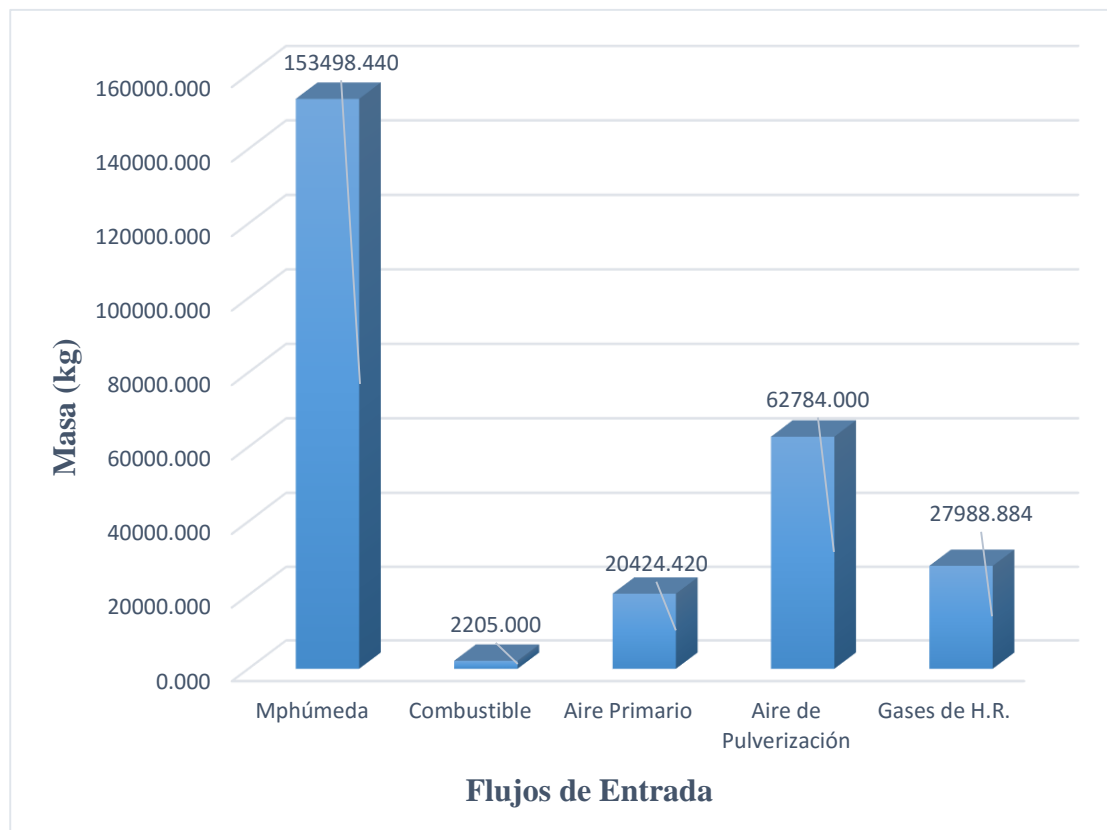


Figura 9. Relación de los flujos que se alimentan al equipo.

En la figura se muestra la relación de alimentación de los principales flujos másicos al secador. Un aspecto notable a destacar, es la importancia que posee el flujo de aire para la pulverización, el cual además de atomizar el combustible fuel-oil, complementa al flujo de aire primario para garantizar la combustión, puesto que este último no es suficiente. Además, se puede observar que la masa total de mineral húmedo alimentado al secadero es de 153 498,440 kg, parámetro que no se controla en la empresa, también se puede observar el flujo másico de alimentación de combustible y los gases provenientes de la planta de Hornos de Reducción.

En la figura 10 se puede observar la relación de los diferentes flujos másicos que salen del secador, como parte del complemento del balance de masa general.

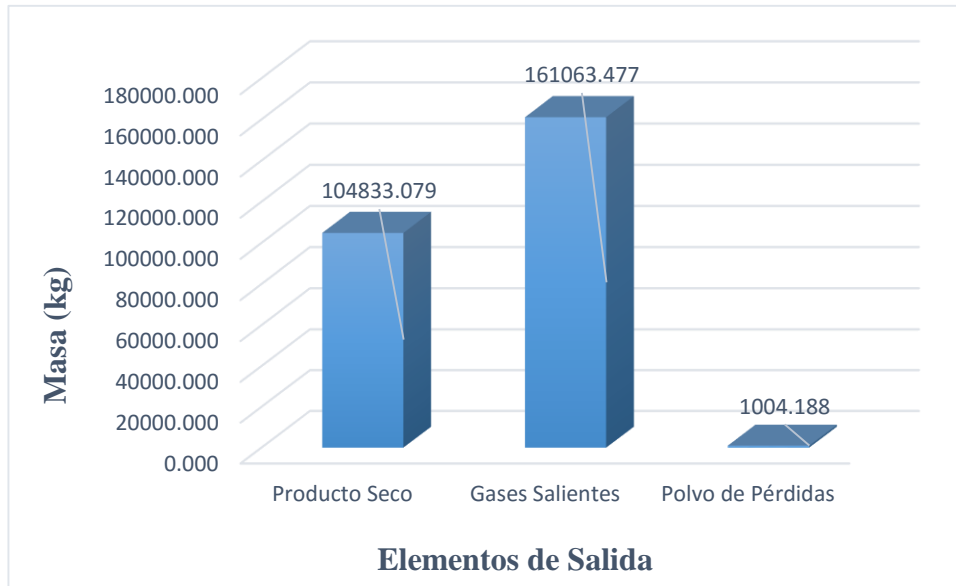


Figura 10. Relación de los flujos de salida del secador.

En el gráfico se muestra que el mayor flujo másico de salida lo constituye el de los gases salientes, debido a la combustión, el aire inyectado, el agua evaporada y los gases provenientes de la planta de Hornos que son alimentados al inicio del proceso, seguido de la masa de mineral seco y por último las pérdidas irreversibles en forma de polvo que escapan con los gases, lo que representa un bajo porcentaje, teniendo en cuenta la cantidad de los mismos que se recupera en el sistema de captación de polvo.

En la figura 11 se puede observar la relación del flujo másico de los gases a la salida del proceso, en la que se observa la elevada concentración de N_2 que sale del horno, evidenciada en el elevado flujo másico de aire alimentado, seguido del CO_2 , O_2 , H_2O y por último SO_2 . El agua evaporada está incluida en este flujo, al igual que el agua producto de la combustión del H_2 proveniente de la planta de Hornos de Reducción. En el caso del CO_2 , incluye la combustión del CO proveniente de Hornos.

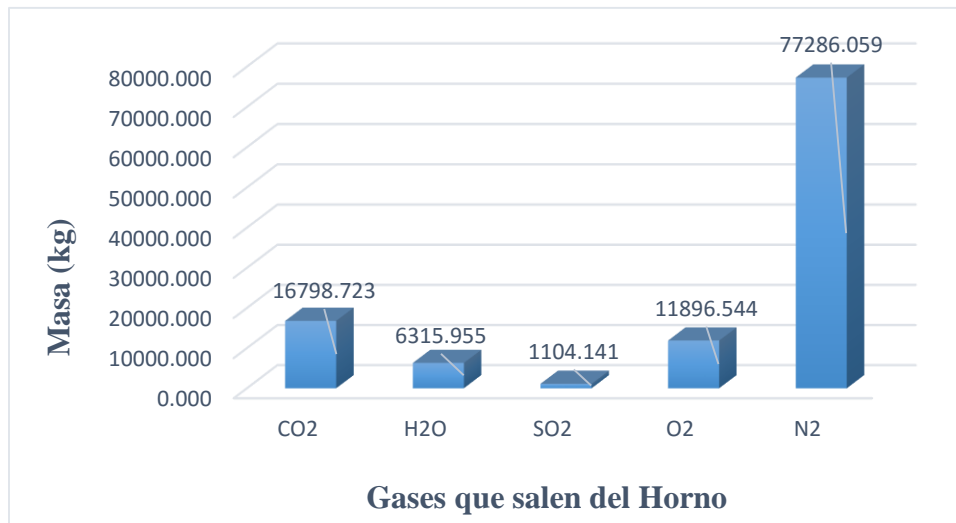


Figura 11. Relación de los flujos de los gases a la salida del secadero.

Las figuras 9 y 10 representan el balance de masa general del secador 2, el cual se realizó en base a la productividad del equipo en una hora de trabajo. Las tablas con los restantes resultados de interés están representadas desde el anexo 4 hasta el anexo 9.

3.2.2 Resultados del balance energético

Siguiendo la metodología de cálculo expuesta y detallada en el epígrafe 2.3.3, y haciendo uso de las ecuaciones (2.18-2.40) se desarrollaron los cálculos para el HTR 2 de la empresa, tomando como las principales variables y parámetros de trabajo de los materiales (mineral alimentado y combustible fuel-oil) y el equipo, los descritos en las tablas 1, 2, 3 y 4. Para la selección de los diferentes datos termodinámicos utilizados se empleó la bibliografía especializada (Perry, 1985) (ver anexos 1, 2, 3, 10, 11, 12 y 13); y se tomaron algunos resultados obtenidos del balance de materiales realizado. A partir del desarrollo de la misma se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Balance de energía general del secador.

Acápites de Entrada		Q, kJ	Total, %
1	Calor sensible y de reacción del combustible, Q_1	94 706 372	62,87
2	Calor sensible y de reacción de los gases de HR, Q_7	51 064 581	33,90
3	Calor sensible del aire alimentado, Q_5 y Q_6	4 870 025	3,23
Total		150 640 978	100,00
Acápites de Salida			
Calor Útil			
4	Calor consumido por el agua evaporada, $Q_{3(VA)}$	128 040 634	85,00
Pérdidas			
5	Calor sensible del mineral a la salida del horno, Q_4	6 281 855	4,17
6	Calor sensible de los gases a la salida del horno, $Q_{3(G)}$	13 488 629	8,95
7	Calor perdido a través de las paredes del tambor, Q_8	2 829 860	1,88
Total		150 640 978	100,00

En la tabla anterior se muestran las diferentes corrientes energéticas de entrada y salida que interactúan en el secadero durante una hora de trabajo, donde se establece el balance energético para el equipo.

En las figuras 12 y 13 se manifiesta por separado, la composición de las corrientes energéticas entrantes y salientes en el equipo respectivamente, para su mejor entendimiento.

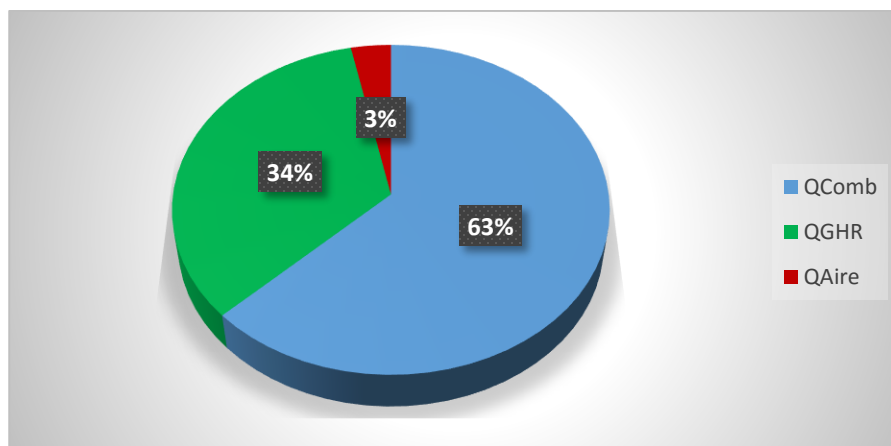


Figura 12. Composición de las corrientes energéticas de entrada al secador.

De la figura 12 se observa que el calor aportado por el combustible fuel-oil constituye la principal fuente de energía para el proceso, aportando el 63 % de la energía total del sistema, seguido del calor aportado por los gases provenientes de Hornos de Reducción, el cual ocupa aproximadamente el 34 % de dicha energía, al ser alimentado al secadero un flujo volumétrico de 46 000 m³/h a una temperatura de 270 °C. A partir de esta observación, realizando una comparación de la situación actual de la empresa, se comprueba que estos resultados obtenidos se encuentran acordes a la misma, puesto que, según datos de la empresa, proporcionados en el CITECT, con la alimentación de los gases de Hornos de Reducción, la entidad ahorra 1 000 kg/h de combustible fuel-oil aproximadamente, flujo que representa el 30 % del total que sería necesario suministrar si no se alimentaran estos gases al secadero, que sería de aproximadamente 3 000 kg/h, lo que constituye un parámetro de gran significación e importancia para la entidad, al reducir considerablemente el costo energético.

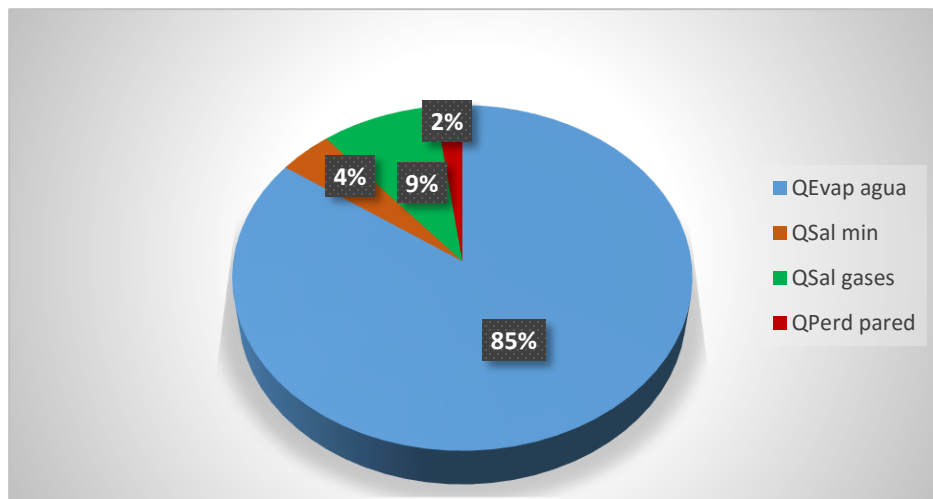


Figura 13. Composición de las corrientes energéticas de salida del equipo.

En la figura 13 se observa que el 85 % de la energía suministrada al equipo se consume útilmente en la evaporación del agua externa presente en el mineral, lo cual es el objetivo principal del proceso, mientras que con los gases salientes se escapa aproximadamente el 9 % de dicha energía. Las pérdidas de calor por la pared del tambor representan el 2 % y existe un exceso energético de. Esto significa que solamente el 15 % de la energía suministrada se pierde, resultado que es favorable desde el punto de vista de la eficiencia energética del equipo.

Rendimiento térmico e índice de consumo de combustible

Teniendo en cuenta el calor empleado para evaporar el agua presente en el mineral de entrada (128 040 634 kJ), y el calor total suministrado al equipo (150 640 978 kJ) se obtiene, según la ecuación (2.41), que el equipo posee un rendimiento térmico de un 85 %, lo cual representa el calor que se emplea útilmente en el proceso, y el 15 % restante constituye las pérdidas de calor.

A partir del flujo de combustible alimentado y la productividad del horno se determina según la ecuación (2.42) el índice de consumo de combustible del equipo, el cual se obtiene que es de 23,21 kg_{comb}/t_{min seco}, valor que se encuentra en la media según datos de la empresa.

3.2.3 Influencia de los restantes parámetros en el flujo de combustible

Para poder realizar la evaluación de los diferentes parámetros y variables del proceso, y analizar su comportamiento de una manera más precisa, se desarrolló la metodología expuesta anteriormente para la variación de algunos de los parámetros, específicamente para analizar el comportamiento del flujo de combustible, el que constituye, desde el punto de vista técnico-económico, el de mayor importancia en el proceso.

Para el aumento de la humedad de entrada del mineral, asumiendo los restantes parámetros de trabajo constantes, los resultados obtenidos se muestran en la figura 14.

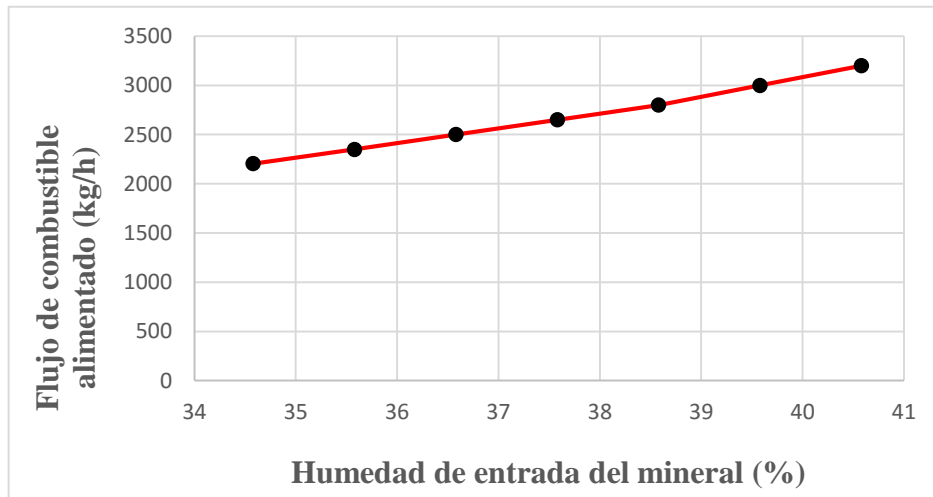


Figura 14. Comportamiento del flujo de combustible ante el incremento de la humedad de entrada del mineral.

Según el análisis de la figura 14 se deduce que, por cada valor porcentual de humedad de entrada del mineral que se incremente, el flujo de combustible aumenta en 150 kg/h aproximadamente, lo cual equivale, según el Valor Calórico Inferior del combustible, a un flujo energético de 6 414 827,33 kJ/h. Resulta obvio que el aumento del flujo del combustible es un resultado lógico, en cambio el objetivo es evaluar el comportamiento de este parámetro, en cuanto a la cantidad que aumenta por cada valor porcentual de humedad que se incremente. Es importante destacar que al mantener los restantes parámetros constantes influye de manera concisa en los resultados obtenidos.

Luego, se realiza el mismo procedimiento para la productividad del equipo, manteniendo igualmente constantes los restantes parámetros de trabajo. La variación es de 5 t/h.

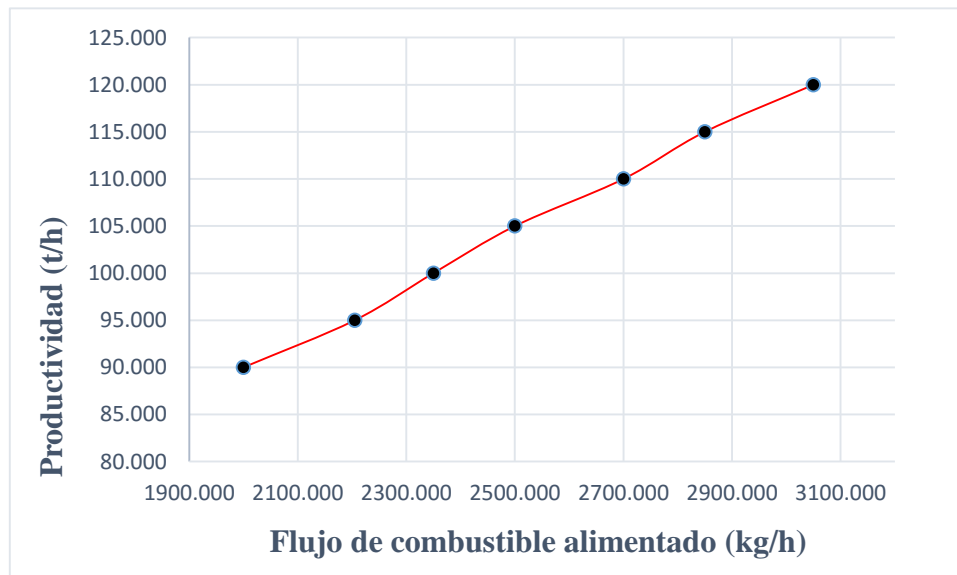


Figura 15. Comportamiento del flujo de combustible ante el incremento de la productividad del horno.

El comportamiento del gráfico anterior es similar al representado por la figura 14, debido a que lógicamente a mayor cantidad de mineral obtenido a la salida, mayor cantidad de mineral fue procesado, y por ende, mayor flujo de combustible empleado para ello. El objetivo es igualmente observar en qué medida varía este consumo. Según su análisis se puede deducir que, para el incremento de 5 t/h de la productividad del horno, el flujo de combustible se incrementa igualmente de 200 a 300 kg/h. La productividad del horno es un parámetro que depende fundamentalmente del flujo de mineral que se alimente, de la humedad que este

posea y otros parámetros, mientras mayor sea la productividad del equipo, de cierta manera es algo provechoso, porque se incrementa el flujo de mineral seco que se alimenta a los restantes procesos y plantas, y por ende la productividad de la empresa. Un aspecto importante a tener en cuenta es que todos los equipos industriales poseen una productividad límite por su diseño, además de que este es un parámetro totalmente beneficioso.

3.2.4 Consideraciones generales

A partir de lo expuesto en los epígrafes 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3, específicamente el análisis de las figuras desde la 9 hasta la 15 se puede afirmar que existen dos parámetros que poseen una estrecha relación con la eficiencia de trabajo del horno, y que a su vez depende el uno del otro, la humedad de entrada del mineral y el flujo de combustible alimentado. En el caso de la productividad del horno, aunque sí incide sobre el consumo de fuel-oil, pues es un parámetro que al incrementarse favorece el proceso productivo de la planta, y por ende de la empresa.

Quedó demostrado que la humedad de entrada del mineral es el parámetro de mayor incidencia, debido a que su incremento provoca un aumento considerable del flujo de combustible, y a su vez solamente depende de las condiciones climatológicas y medioambientales, o sea, que en tiempos lluviosos se incrementa en gran medida y dificulta la correcta realización del proceso, afectando la mayoría de los restantes parámetros. En el caso de la humedad de salida del mineral, es un parámetro que varía poco, generalmente se encuentra en el rango de 3 % a 5 %.

Otro de los parámetros que interviene en el secador es el flujo total de aire alimentado, el cual es prácticamente constante (teniendo en cuenta el aire primario y el de pulverización), pero el aire depende entre otras cosas, del combustible alimentado, por lo que no se considera que afecte la eficiencia del equipo, siempre y cuando se suministre debidamente.

Los gases provenientes de Hornos de Reducción constituyen una fuente importante de energía. Este flujo pudiera afectar la eficiencia si se dejara de suministrar al secadero, pero mientras este se mantenga en constante alimentación contribuye al ahorro de combustible.

Según lo analizado anteriormente, se puede afirmar que la humedad de entrada es el parámetro que más afecta la eficiencia del horno, por lo que sería eficiente adoptar algún método que condicione la reducción de la humedad del mineral antes de alimentarse al secador. Uno de estos métodos a tener en cuenta es el secado solar. Teniendo en cuenta lo analizado, con la reducción de 4 % a 5 % del contenido de agua en el mineral como mínimo, se puede lograr el ahorro de fuel-oil notablemente y contribuir, por ende a la disminución del índice de consumo y de los costos de producción.

3.3 Valoración económica

El enfoque económico del proceso de secado viene dado por el consumo de combustible fuel-oil, como fuente de energía principal del proceso. Actualmente, según (PETROECUADOR, 2019), el precio de una tonelada de fuel-oil es de aproximadamente 343 USD (0,343 USD/kg), y se estima que en los próximos años este se incremente en mayor medida. A partir del flujo de combustible alimentado al proceso, es posible determinar el costo del mismo para un día de trabajo.

$$C_{\text{comb}} = 0,343 \text{ USD/kg} \cdot 2\,205 \text{ kg/h} \cdot 24 \text{ h/d}$$

$$C_{\text{comb}} = 18\,151,56 \text{ USD/d}$$

El valor obtenido anteriormente corresponde al costo diario del combustible que emplea el secadero.

Se conoce, según la figura 12 que el 34 % de la energía que se alimenta al secadero la proporciona el flujo de gases provenientes de Hornos de Reducción. De no ser alimentado este flujo, el consumo de combustible del secadero, y por tanto su costo, fuese relativamente superior tal. El flujo teórico de combustible se determina como se muestra en la ecuación (3.1).

$$F_{\text{comb t}} = \frac{Q_7}{\text{VCI}} \quad (3.1)$$

La ecuación anterior implica a un flujo de combustible teórico ($F_{\text{comb t}}$), el cual sería necesario alimentar al horno en caso de que no fuese alimentado el flujo de gases de Hornos, según la cantidad de calor que aporta este último y el Valor Calórico Inferior del fuel-oil.

$$F_{\text{comb t}} = \frac{51\,064\,581 \text{ kJ/h}}{42\,765,516 \text{ kJ/kg}} = 1\,194 \text{ kg/h}$$

A partir del flujo de combustible teórico se determina el costo diario del mismo.

$$C_{\text{comb t}} = 0,343 \text{ USD/kg} \cdot 1\,194 \text{ kg/h} \cdot 24 \text{ h/d}$$

$$C_{\text{comb t}} = 9\,829,01 \text{ USD/d}$$

Este resultado significa que la empresa ahorra 1 194 kg/h de combustible gracias al flujo de gases provenientes de Hornos de Reducción, lo que se traduce a 9 829,01 USD/d. Cabe destacar que solamente se está teniendo en cuenta el objeto de estudio analizado, pero en realidad este resultado implica todos los secaderos que estén en funcionamiento.

A modo general, se puede observar que debido al elevado costo del fuel-oil en el mercado internacional y el elevado consumo del mismo en el secadero, el costo del proceso de secado es relativamente alto, teniendo en cuenta las expectativas para los meses venideros. Por tanto, se hace necesario la búsqueda de alternativas para disminuir en mayor medida dichos costos.

3.4 Valoración ecológica

Como residuos del proceso, son enviados al medio ambiente cierta cantidad de agentes contaminantes en forma de gases y polvo, a pesar de que la empresa cuenta con sistemas de captación que recuperan la mayor parte de este polvo. Dentro de los gases, el SO₂ en particular constituye el de mayor peligro para la contaminación medioambiental, debido a sus propiedades nocivas, destructivas y tóxicas. Este gas proviene de dos fuentes diferentes, la combustión del azufre contenido en el fuel-oil y la porción del mismo proveniente del flujo de gases de Hornos. Es una realidad que el fuel-oil utilizado en la entidad en numerosas ocasiones es adquirido con un contenido elevado de este elemento (S), el cual según (PETROECUADOR, 2019) no debe exceder un contenido de un 1,5 % (para hornos, calderas o quemadores). Según la tabla 3, el contenido de azufre del fuel-oil es de 1,82 %; y el permitido es de hasta 3,5 % máximo, el cual, como se aprecia es relativamente mayor. Este requerimiento viene dado más bien al cuidado y protección de los equipos y las instalaciones, debido a que el SO₂ en concentraciones elevadas, suele deteriorar las instalaciones por las que circula, además de ser uno de los agentes que provocan las llamadas lluvias ácidas. Es

importante controlar el contenido de este gas que es emitido a la atmósfera para evitar situaciones como las anteriormente mencionadas.

En la figura 11 se muestra que el flujo de SO₂ que es emitido del secador es de 1 104,14 kg/h, el cual equivale al 0,98 % del flujo másico total de los gases que salen, contenido adecuado según (NiECG, 2015).

En el caso del polvo que escapa con los gases, en la figura 10 se observa que este posee un flujo másico de 1 004,19 kg/h, el cual representa el 0,38 % del total de flujos másicos salientes, y el 0,89 % con respecto al flujo másico total de los gases, siendo apto según (NiECG, 2015).

3.5 Conclusiones del capítulo

- Se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el balance térmico aplicado, mediante los cuales se determina que el parámetro de mayor incidencia sobre la eficiencia energética del secadero es la humedad de entrada del mineral, seguido del flujo de combustible alimentado, el cual depende en su mayoría del primero.
- La valoración económica realizada al proceso arroja que debido a los elevados precios del fuel-oil en el mercado internacional y los elevados flujos del mismo empleados en el secadero, se hace necesario emplear técnicas que contribuyan a disminuir la humedad de entrada del mineral al horno para así disminuir el flujo de combustible empleado, y por ende, los costos de producción del equipo.
- La valoración económica del proceso arroja que los contenidos de agentes contaminantes (SO₂ y polvo) emitidos al medio ambiente se encuentran en el rango adecuado.

CONCLUSIONES

- Se corrobora que los parámetros de mayor incidencia en la eficiencia del secador son la humedad de entrada del mineral y el flujo de combustible alimentado, y que este último depende intensamente del primero.
- Se realiza una intensa revisión bibliográfica acerca del tema en cuestión, mediante la cual se determina que las investigaciones realizadas en el ámbito tratado son numerosas, siendo comunes los resultados obtenidos, entre ellos que algunos de los parámetros de mayor incidencia en la eficiencia de trabajo del horno son el flujo de combustible alimentado y la humedad de entrada del material.
- Se plantea la metodología de cálculo para el balance termoenergético del secador, mediante la cual quedan expresados cada uno de los flujos caloríficos de entrada y salida del mismo, algunos de los cuales permiten conocer el rendimiento térmico y el índice de consumo del combustible.

RECOMENDACIONES

1. Reducir el contenido de humedad externa del mineral mediante el secado solar, antes de ser alimentado al secador. Esto traería consigo el ahorro de gran cantidad de combustible al ser relativamente menor la masa de agua que se debe evaporar del material.
2. Controlar en la planta el flujo de mineral húmedo alimentado, mediante la instalación de un sistema de pesaje debajo de la banda transportadora que alimenta el mineral al secador.
3. Controlar el flujo de gases provenientes de la planta de Hornos de Reducción, el cual aporta una cantidad de energía significativa al proceso como para no ser un parámetro controlado.

BIBLIOGRAFÍA

- ACTUALITIX. 2019.** Actualitix. [En línea] 2019. <http://www.es.actualitix.com>.
- Azman, Gailani. 2008.** *Diagnóstico térmico del proceso de secado en los tambores cilíndricos rotatorios de la empresa Ernesto Che Guevara*. ISMM. Moa : s.n., 2008. Trabajo de Diploma.
- Boateng, A. A. 2008.** *Basic Description of Rotary Kiln Operation, in Rotary Kilns*. Burlington : Butterworth-Heinemann, 2008. págs. 15-21.
- . **2008.** *Heat Transfer Processes in the Rotary Kiln Bed, in Rotary Kilns*. Burlington : Butterworth-Heinemann, 2008. págs. 205-238.
- Boizán, M. 1991.** *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba : ISJAM, 1991.
- Castaño, F. 2009.** *Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente*. 2009. págs. 32-43.
- Chang, A. 1997.** *Cálculo de los principales procesos en los Hornos Metalúrgicos*. La Habana : Félix Varela, 1997.
- CUBADEBATE. 2018.** [En línea] 13 de diciembre de 2018. <http://www.cubadebate.cu>.
- Deich et al., V. 1975.** *Optimum Control of Drying Processes in a Rotary Drum*. s.l. : Dryer Theor. Found. Chem Engng., 1975.
- Delgado, Yodelkis. 2013.** *Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales*. ISMM. Moa : s.n., 2013. Tesis de Maestría.
- Domínguez, Luis A. 2011.** *Evaluación del proceso de secado del Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro*. ISMM. Moa : s.n., 2011. Tesis de Maestría.

- Domínguez, V. 2011.** *Evaluación del proceso de secado del Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro.* Moa : s.n., 2011.
- Duchense et al., C. 1997.** *Modelling and Dynamic Simulation of an Industrial Rotary Dryer.* s.l. : Dev. Chem. Eng. Mineral Process, 1997.
- Duy, S. N. 2013.** *Balances de masa y energía de los procesos de secado y tostación reductora con el uso de gas natural como combustible en el proyecto Ferroníquel Minera S.A.* Moa : s.n., 2013.
- Ferrer, Rosalí. 2018.** Radio Reloj. [En línea] 2 de octubre de 2018. <http://www.radioreloj.cu>.
- Fulford, D. 1969.** *A suvey of recent soviet research on the drying of solids.* s.l. : Can. J Chem. Eng., 1969.
- García, Jorge Enrique. 2016.** *Balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en los hornos rotatorios horizontales.* ISMM. Moa : s.n., 2016. Trabajo de Diploma.
- GEA. 2019.** GEA. *Engineering for a Better World.* [En línea] 12 de marzo de 2019. <https://www.gea.com/>.
- Hernández, R. & Quinto, D. 2003.** *Secado de medios porosos: situación actual y perspectivas.* México : s.n., 2003.
- Huang, C. 1979.** *Multi – Phase moisture transfer in porous media subjectted to temperature gradient.* 1979. págs. 295-307.
- Incropera, F. 2003.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* La Habana : Pueblo y Educación, 2003. Vols. 1, 2 y 3.
- Kasatkin, A. G. 1987.** *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química.* La Habana : Pueblo y Educación, 1987.
- Keey, R. B. 1980.** *Theoretical Foundations of Drying Technology Advances in Drying Hemisphere publishing Corp.* 1980. Vol. 1.

- Likov, A. 1954.** *Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos*. Moscú : Gostejizdat, 1954.
- Liptak, B. G. 1999.** *Optimization of Industrial Processes*. s.l. : CRC Press, 1999.
- Mayoral, M. J. 2016.** Nación y Emigración. [En línea] 2016. <http://www.nacionyemigracion.cu>.
- Morini, Thiago. 2018.** El País. [En línea] 1 de abril de 2018. <http://www.elpais.com>.
- Mujumdar, Arun S. 2006.** *Handbook of Industrial Drying*. Singapur : s.n., 2006.
- Muñoz, J. N. 2012.** *Mineralogía de las menas lateríticas del Yacimiento Punta Gorda: Implicaciones Técnica-Operativas durante la explotación*. Moa : s.n., 2012.
- Myklestad, O. 1963.** *Theory in the design of dryers*. 1963.
- NIECG. 2015.** *Manual de Operaciones de la Unidad Básica de Producción Planta Preparación del Mineral*. Moa : s.n., 2015.
- Perry, J. 1985.** *Chemical Engineering Handbook*. New York : Mc Graw Hill, 1985. 6ta Edición.
- PETROECUADOR. 2019.** *Precios de venta a nivel de terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional*. EP Petroecuador Gerencia de Comercialización Nacional. Quito : s.n., 2019.
- Philip et al., J. 1957.** *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. s.l. : Geophys Union, 1957.
- Reay, D. 1979.** *Theory in the Design of Dryers*. s.l. : Chem. Eng., 1979.
- RECOPE. 2011.** *Manual de Productos*. Empresa Refinadora de Petróleo. Costa Rica : s.n., 2011.
- Rodríguez, R. 2006.** *La minería del níquel en Cuba: pasado, presente y futuro*. Girona : s.n., 2006.

Sunkara, K. R. 2013. *Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum.* *Powder Technology.* 2013. págs. 107-116.

Superneau, Laura. 2015. BNamericas. [En línea] 2015. <http://www.bnamericas.com>.

Tamayo, Maydelín. 2001. *Balance de masa y energía en la instalación de secado de Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro.* ISMM. Moa : s.n., 2001. Trabajo de Diploma.

Torres, E. 1999. *Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios.* ISMM. Moa : s.n., 1999. Tesis de Maestría.

Zalazar, Carlos. 2016. *Modelación matemática del proceso de activación del carbón vegetal en horno colíndrico rotatorio.* Moa : s.n., 2016. págs. 140-154.

ANEXOS

Anexo 1. Valores termodinámicos de a y b de los diferentes compuestos.

Mineral	a (J/K)	b(J/K ²)
2FeOOH	1,246	0,233
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	93,200	0,087
(Mg,Fe)(Cr,Al) ₂ O ₄	39,000	0,01
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	1079,540	-0,006
MnO ₂	54,125	
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·3H ₂ O	338,120	
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O	1298,35	
Fe ₃ O ₄	167,140	0,079
SiO ₂	81,147	0,018
NiO	47,347	0,009
CoO	48,520	0,038
CO ₂	43,483	0,011
FeO	52,827	0,006
MgO	65,211	0,004
H ₂ O(g)	34,409	0,001
H ₂ O(l)	23,500	0,035
Fe ₂ O ₃	103,580	0,072
Al ₂ O ₃	238,320	-0,041
Ni	17,832	0,025
Co	21,432	0,013
Fe	17,288	0,029
C	11,189	0,013
FeO	52,827	0,029
Mn	15,739	0,031

Anexo 2. Entalpías de formación de los diferentes compuestos a 25 °C.

Mineral	H (kJ/mol)	H (kcal/mol)
FeOOH	-559,500	-133,6
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	-2563,925	-612,5
(Mg,Fe)(Cr,Al) ₂ O ₄		
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	-8723,187	-2084,842
MnO ₂	-385,405	-124,3
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·3H ₂ O	-5950,500	
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O	-9445,246	
Fe ₃ O ₄	-1118,400	-267,3
SiO ₂	-910,700	-203,35
NiO	-239,743	-58,4
CoO	-239,070	-56,86
Al ₂ O ₃	-1674,609	-400,05
Fe ₂ O ₃	-824,200	-197
CO ₂	-393,510	-93,98
FeO	-264,8	-64,62
MgO	-601,349	-143,81
H ₂ O(g)	-241,951	-57,79
Fe ₂ O ₃	-824,200	
Co	0	
Ni	0	
Fe	0	
C	0	
Mn	0	
Mg ₂ (SiO ₄)	-2174,663	
Mg ₂ (Si ₂ O ₆)	-3092,144	
CO (g)	-110,52	-26,396
Mg	0	

Anexo 3. Masas atómicas y molares de los diferentes elementos y compuestos.

Elemento químico	Masa atómica	Compuesto químico	Masa molar, kg/kmol
Zn	65,409	ZnO	81,408
Cu	63,536	CuO	79,535
Fe	55,847	Fe ₃ O ₄	231,537
Si	28,086	SiO ₂	60,084
O	15,999	2FeO(OH)	177,706
Al	26,982	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	156,006
Mg	24,325	(Mg Fe)(Cr Al) ₂ O ₄	302,132
Ni	58,690	NiO	74,689
Co	58,930	CoO	74,929
Cr	52,000	Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	554,338
Mn	54,940	MnO ₂	86,938
H	1,008	Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·H ₂ O	436,055
H ₂ O	18,015	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O	588,376
C	12,01	CO ₂	44,01
S	32,07	SO ₂	64,07
N	14,01	-	-

Anexo 4. Composición racional másica de la materia prima seca alimentada.

COMPOSICIÓN RACIONAL MÁSCA DE LA MENA LATERÍTICA HÚMEDA ALIMENTADA AL SECADERO DURANTE UNA HORA DE TRABAJO CONSTANTE													
	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO ₂	H ₂ O	O	Cr	Otros	Total, kg	Total, %
2FeO(OH)	34996.950							5634.498	15047.754			55679.202	36.274
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O				3238.506				3240.514	2882.019			9361.039	6.098
(Mg Fe)(Cr Al) ₂ O ₄	925.861			894.731	402.679				1060.422	1724.190		5007.885	3.263
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈					887.702		1447.035	432.805	578.412			3345.954	2.180
MnO ₂						666.781			387.616			1054.397	0.687
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·H ₂ O	1313.478						2828.797	423.767	565.358			5131.400	3.343
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O				543.266			1209.042	325.357	610.546			2688.211	1.751
Fe ₃ O ₄	6847.557								2610.888			9458.445	6.162
SiO ₂							1805.530					1805.530	1.176
NiO		1054.397							288.202			1342.599	0.875
CoO			125.523						34.142			159.666	0.104
H ₂ O (libre)								53079.360				53079.360	34.580
Otros											5384.455	5384.455	3.508
Total, kg	44083.845	1054.397	125.523	4676.503	1290.381	666.781	7290.404	63136.301	24065.361	1724.190	5384.455	153498.142	100.000
Total, %	28.719	0.687	0.082	3.047	0.841	0.434	4.750	41.132	15.678	1.123	3.508	100.000	

Anexo 5. Composición racional másica de la materia prima húmeda alimentada.

COMPOSICIÓN RACIONAL MÁSCA DE LA MENA LATERÍTICA HÚMEDA ALIMENTADA AL SECADERO DURANTE UNA HORA DE TRABAJO CONSTANTE

	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO ₂	H ₂ O	O	Cr	Otros	Total, kg	Total, %
2FeO(OH)	34996.950							5634.498	15047.754			55679.202	36.274
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O				3238.506				3240.514	2882.019			9361.039	6.098
(Mg Fe)(Cr Al) ₂ O ₄	925.861			894.731	402.679				1060.422	1724.190		5007.885	3.263
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈					887.702		1447.035	432.805	578.412			3345.954	2.180
MnO ₂						666.781			387.616			1054.397	0.687
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·H ₂ O	1313.478						2828.797	423.767	565.358			5131.400	3.343
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O				543.266			1209.042	325.357	610.546			2688.211	1.751
Fe ₃ O ₄	6847.557								2610.888			9458.445	6.162
SiO ₂							1805.530					1805.530	1.176
NiO		1054.397							288.202			1342.599	0.875
CoO			125.523						34.142			159.666	0.104
H ₂ O (libre)								53079.360				53079.360	34.580
Otros											5384.455	5384.455	3.508
Total, kg	44083.845	1054.397	125.523	4676.503	1290.381	666.781	7290.404	63136.301	24065.361	1724.190	5384.455	153498.142	100.000
Total, %	28.719	0.687	0.082	3.047	0.841	0.434	4.750	41.132	15.678	1.123	3.508	100.000	

Anexo 6. Composición racional másica del producto seco a la salida del secador.

COMPOSICIÓN RACIONAL MÁSCICA DE LA MENA LATERÍTICA SECA A LA SALIDA DEL SECADERO													
	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO ₂	H ₂ O	O	Cr	Otros	Total, kg	Total, %
2FeO(OH)	31397.181							5054.936	13499.950			49952.067	52.581
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O				2905.395				2907.196	2585.576			8398.167	8.840
(Mg Fe)(Cr Al) ₂ O ₄	830.628			802.700	361.260				951.348	1546.841		4492.776	4.729
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈					796.393		1298.193	388.287	518.917			3001.791	3.160
MnO ₂						598.196			347.746			945.942	0.996
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·H ₂ O	1178.374						2537.828	380.179	507.205			4603.587	4.846
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O				487.386			1084.681	291.891	547.746			2411.703	2.539
Fe ₃ O ₄	6143.220								2342.334			8485.554	8.932
SiO ₂							1619.814					1619.814	1.705
NiO		945.942							258.558			1204.500	1.268
CoO			112.612						30.631			143.243	0.151
H ₂ O (libre)								4910.244				4910.244	5.169
Otros											4830.613	4830.613	5.085
Total, kg	39549.403	945.942	112.612	4195.480	1157.653	598.196	6540.516	13932.733	21590.010	1546.841	4830.613	95000.000	100.000
Total, %	41.631	0.996	0.119	4.416	1.219	0.630	6.885	14.666	22.726	1.628	5.085	100.000	

Anexo 7. Composición racional másica del polvo que escapa con los gases.

COMPOSICIÓN RACIONAL MÁSCICA DEL POLVO QUE SI PIERDE CON LOS GASES (SE ASUME EL 1 % POR CADA ELEMENTO SÓLIDO DE LA MATERIA PRIMA SECA)													
	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	SiO ₂	H ₂ O	O	Cr	Otros	Total, kg	Total, %
2FeO(OH)	349.969							56.345	150.478			556.792	55.447
Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O				32.385				32.405	28.820			93.610	9.322
(Mg Fe)(Cr Al) ₂ O ₄	9.259			8.947	4.027				10.604	17.242		50.079	4.987
Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈					8.877		14.470	4.328	5.784			33.460	3.332
MnO ₂						6.668			3.876			10.544	1.050
Fe ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·H ₂ O	13.135						28.288	4.238	5.654			51.314	5.110
Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ ·4H ₂ O				5.433			12.090	3.254	6.105			26.882	2.677
Fe ₃ O ₄	68.476								26.109			94.584	9.419
SiO ₂							18.055					18.055	1.798
NiO		10.544							2.882			13.426	1.337
CoO			1.255						0.341			1.597	0.159
Otros											53.845	53.845	5.362
Total, kg	440.838	10.544	1.255	46.765	12.904	6.668	72.904	100.569	240.654	17.242	53.845	1004.188	100.000
Total, %	43.900	1.050	0.125	4.657	1.285	0.664	7.260	10.015	23.965	1.717	5.362	100.000	

Anexo 8. Composición racional másica de los gases que salen del horno

Composición Racional Másica de los gases que salen del horno, kg							
	C	H	S	O	N	Total (kg)	Total (%)
CO ₂	4584.523			12214.199		16798.723	14.814
H ₂ O		706.759		5609.196		6315.955	5.570
SO ₂			552.630	551.510		1104.141	0.974
O ₂				11896.544		11896.544	10.491
N ₂					77286.059	77286.059	68.153
Total (kg)	4584.523	706.759	552.630	30271.450	77286.059	113401.422	100.000
Total (%)	4.043	0.623	0.487	26.694	68.153	100.000	

Anexo 9. Balance de masa general.

ENTRADA																			
	Ni	Fe	Co	Al	Mg	Mn	Cr	SiO ₂	H ₂ O	O	C	S	N ₂	H	W	A	Otros	Total	%
Mp_{leada}	1054.397	44083.845	125.523	4676.503	1290.381	666.781	1724.190	7290.404	63136.598	24065.361							5384.455	153498.440	57.511
Combustible										1.5435	1927.170	40.131	1.5435	233.730	0	0.882		2205.000	0.826
Aire Primario										4289.128			16135.292					20424.420	7.652
Aire de Pulverización										13184.64			49599.36					62784.000	23.523
Gases de H.R.										12796.138	2657.353	512.499	11549.864	473.029				27988.884	10.487
Total	1054.397	44083.845	125.523	4676.503	1290.381	666.781	1724.190	7290.404	63136.598	54336.811	4584.523	552.630	77286.059	706.759	0.000	0.882	5384.455	266900.744	100.000
%	0.395	16.517	0.047	1.752	0.483	0.250	0.646	2.732	23.655	20.358	1.718	0.207	28.957	0.265	0.0000	0.0003	2.017	100.000	
SALIDA																			
Producto Seco	1043.853	43643.007	124.268	4629.738	1277.478	660.113	1706.949	7217.500	15374.856	23824.708							5330.611	104833.079	39.278
Gases Salientes									47661.173	30271.450	4584.523	552.630	77286.059	706.759	0.000	0.882		161063.477	60.346
Polvo de Pérdidas	10.544	440.838	1.255	46.765	12.904	6.668	17.242	72.904	100.569	240.654							53.845	1004.188	0.376
Total	1054.397	44083.845	125.523	4676.503	1290.381	666.781	1724.190	7290.404	63136.598	54336.811	4584.523	552.630	77286.059	706.759	0.000	0.882	5384.455	266900.744	100.000
%	0.395	16.517	0.047	1.752	0.483	0.250	0.646	2.732	23.655	20.358	1.718	0.207	28.957	0.265	0.0000	0.0003	2.017	100.000	

Anexo 10. Calor específico y densidad de los gases producto de la combustión a 88 °C.

Gases	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
Cp (kJ/kg·K) 88 °C	1,042	0,929	0,899	1,97	0,982
ρ(kg/m ³) 88 °C	0,9625	1,1	1,518	0,974	1,58

Anexo 11. Calor específico y densidad de los gases provenientes de Hornos a 270 °C.

Gases	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	SO ₂	H ₂
Cp (kJ/kg·K) 270 °C	1,065	0,988	1,05	1,997	1,076	1,187	14,53
ρ(kg/m ³) 270 °C	0,6124	0,6998	0,9625	0,4005	0,6122	1,113	0,044

Anexo 12. Principales propiedades termodinámicas del agua.

Propiedad	Valor
Densidad específica (g/cm ³)	0,9602
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	2317
Calor específico (kJ/kg°C)	4,195

Anexo 13. Propiedades termodinámicas de otros compuestos.

Entalpía de reacción del CO a 25 °C (kJ/kg)	10097,9
Entalpía de reacción del H ₂ a 25 °C (kJ/kg)	142376,2
Calor específico del mineral a la salida (kJ/kg°C)	0,963

Anexo 14. Portada del Software COMPRAC utilizado durante la realización del trabajo.

