

Dimensionamiento de un secador rotatorio para la mena aurífera de la empresa UEB producciones mineras "Placetas"

Tesis presentada en opción al título de ingeniero metalúrgico y materiales

António Chivango Daniel Dinis

Moa. 2019



Dimensionamiento de un secador rotatorio para la mena aurífera de la empresa UEB producciones mineras “Placetas”

Tesis presentada en opción al título de ingeniero metalúrgico y materiales

Autor: António Chivango Daniel Dinis

Tutores: MSc. Isidro Javier Cachaldora Francisco

MSc. Evangelia García Peña, Prof. Auxiliar

Dr.C Amaury de los Milagros Palacios Rodríguez, Prof. Auxiliar

Moa, 2019



Declaración de autoridad

Yo: António Chivango Daniel Dinis

Autor de este trabajo de diploma, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido presentado para ningún grado de calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el mismo documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", según lo establecido por la ley de propiedad intelectual con el cual, podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

António Chivango Daniel Dinis

DrC. Amaury De Los Milagros Palacios

Ms.C Evangelia Gracia Peña

Pensamiento

“Corregir lo que está mal y mejorar lo que está bien”

João Manuel Golçalves Lourenço

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por darme tanta fuerza y coraje de seguir luchando en busca de mis objetivos y metas.

Mis agradecimientos también van de forma extensiva a todas las personas que han contribuido en la realización de este trabajo y que me han apoyado a lo largo del periodo de mi formación, en especial:

- A mis padres Manuel da Costa Dinis (a la memoria) y Maria Teresa Dinis por todo lo que soy y por lo que he logrado hasta hoy es por la educación que ellos me han dado.
- A mis hermanas por todo el apoyo que me han dado a lo largo del periodo de formación.
- A mis tutores Dr.C Amaury Palacios De Los Milagros Rodríguez, MsC. Evangelia García Peña y el MsC. Isidro Javier Cachaldora Rodríguez, por su contribución en el desarrollo de este proyecto.
- A mi novia Marlis Guilian Mojica y su familia por todo el apoyo que me han dado, a mis amigas Adriana Harmant Oroceno y Lisnet Sulmira Rodríguez Aldana por su apoyo incondicional en el periodo de formación.
- Al Dr. José Luís Alexandre y el MSc. Manuel Bernardo Chitumba Marques, por su aporte para que fuera posible la realización de este proyecto.
- A los compañeros Avelino Chinduamba Capingana, Joaquim Canjila Dala, Fausto Adérito Chipala Pedro, Hortencio Lopes Bento Ricueno, Nelson Paulo Bunga y a mi gran amigo y hermano Gilberto Coragem Messo Gomes por su gran apoyo durante el periodo de formación.
- A mis amiguitos Víctor Manuel Cuenca y Magda Paula Gamboa por sus amistades y por hacerme sentir bien en mi periodo de formación.
- A mis compañeros de aula por haberme ayudado de una u otra forma.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a todos los estudiantes de la carrera de ingeniería metalúrgica y materiales especialmente a los de 5to año para que sigan luchando por sueños y que nunca desistan de luchar para alcanzar sus objetivos y metas, este trabajo también va dedicado a la memoria mi padre que tanto hizo para poder verme graduado y que infelizmente por deseo de Dios se fue a descansar en el periodo de la realización de este sueño.

Resumen

El presente proyecto de grado tiene como propósito dimensionar un secador rotatorio de minerales auríferos con el objetivo de reducir la humedad del mineral para el proceso de preparación mecánica, porque esta provoca el embotamiento y el desgaste acelerado de los trituradores de mandíbula e impacto, en la empresa UEB producciones mineras "placetas". Para el desarrollo del proyecto se consideraron los balances de masa y energía, así como los cálculos mecánicos para determinar las variables necesarias del proyecto como índices de entrada y salida en el balance de masa y energía, tensión, potencia y fuerzas para cálculos mecánicos y dispositivos auxiliares. Como resultado se obtiene el balance de masa al procesar 80 000 kg/d contenedora de 27 % de humedad disminuyendo la misma entre 5 % y 7 %. Se concluye un dimensionamiento preliminar de un secador rotatorio de minerales auríferos con un diámetro de 1,50 m, una longitud de 10 m y con una potencia requerida para rotar el secador de 6,66 rpm. Para la instalación del ventilador con una velocidad máxima de aire de 3,5 m/s se calculó el área de sección transversal y como resultado se obtuvo 1,77 m² y con una potencia del motor de 0,111 Hp. Para la instalación de un intercambiador de calor se calculó el área frontal de paso de aire es de 0,31 m², la cantidad de columnas de tubos es de 20 106,25 y el número de tubos totales es de 3351. Se hicieron las valoraciones ecológicas del proceso de secado.

Palabras Clave: dimensionamiento, secador, minerales auríferos, embotamiento, trituradoras.

Abstract

The present project of degree has like purpose to dimension a rotatory auriferous-minerals drier for the sake of shortening the humidity of the mineral for the process of mechanical preparation, because this provokes the dullness and the wear expedited of the crushers of jaw and I impact, at the company UEB mining productions placetas. For the development of the project, the mass and energy balances were considered, as well as the mechanical calculations to determine the necessary variables of the project as input and output index in the balance of mass and energy, voltage, power and forces for mechanical calculations and devices auxiliaries. As a result, the balance of mass is obtained by processing 80 000 kg/d and containing 27 % moisture, decreasing it by 5 to 7 %. Is concluded the preliminary dimensioning of a rotatory drier of aurifereous minerals with a diameter of 1,50 m and a length of 10 m, with a power required to rotate the dryer of 6,66 rpm. For the installation of the fan with a top speed of air of 3.5 m/s calculated him the cross-sectional area and as a result 1.77 m² were obtained and with a potency of 0.111 Hp's motor. The front area of step of air was calculated for the installation of an inter-heat exchanger you come from 0.31 m², the quantity of columns of pipes comes from 20 106.25 and the number of total pipes comes from 3351. The assessments of the process of drying became dried.

Key words: dimension, drier, auriferous minerals, dullness, grinders.

Introducción	1
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DEL SECADO DE MINERALES AURÍFEROS.....	5
1.1 PROCESO DE SECADO	5
1.1.1 Descripción general del proceso de secado	5
1.1.3 Cinética del secado	6
1.1.4 Velocidad constante de secado	7
1.1.5 Determinación del contenido de humedad.....	7
1.2 Clasificación y selección de secadores.....	8
1.3 ESTADO DEL ARTE DEL SECADO DE MINERALES AURÍFEROS	20
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
Proceso de trituración.....	28
Proceso de molienda.....	29
Proceso de lixiviación-Adsorción	30
Proceso de elución-electrólisis	30
Proceso de fundición del doré.....	31
2.2 Caracterización de los materiales empleados.....	33
2.2.1 Caracterización de la mena inicial	33
2.2.2 Caracterización del agente secador	34
2.3 Leyes y ecuaciones empleadas.....	34
2.3.1 Ley de conservación de masa.....	34
2.3.2 Ley de conservación de energía.....	35
2.4 Metodología para realizar balances de masa y energía del proceso de secado	35
2.4.1 Balance de masa.....	35
2.4.2 Balance de energía.....	38
2.4.2.1 Calor físico del aire para el secado (Q_{e1})	39
2.4.2.2 Calor físico de la mena que entra al secador (Q_{e2}).....	39
2.4.2.3 Calor físico del mineral producto (Q_{s1}).....	39
2.4.2.4 Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Q_{s2}).....	39
2.4.2.5 Pérdida de calor con el polvo (Q_{s3})	39
2.4.2.6 Calor físico de los gases salientes (Q_{s4}).....	40
2.4.2.7 Pérdida de calor al medio ambiente (Q_{s5}).....	40
2.5 Dimensionamiento del secador	40
2.5.1 Cálculo de la velocidad de secado; WT	40
2.5.1.1 Velocidad periodo contante; W_C	41
2.5.1.2 Velocidad poscritica o decreciente; W_D	41
2.5.1.3 Cálculo de tiempo total de secado; θ_T	41
2.5.1.4 Cálculo del tiempo de secado en el periodo constante; θ_a	42
2.5.1.5 Cálculo del tiempo de secado poscritico; θ_p	42
2.6 Cálculo del volumen del secador	42
2.7 Cálculo del diámetro del secador	42
2.8 Cálculo de la longitud del secador.	43
2.8.1 Potencia requerida para rotar el secador.....	43
2.8.2 Cálculo de las revoluciones por minuto del cilindro	44
2.9 Calculo de la masa de las partes en movimiento.....	44
2.9.1 Masa del material dentro del secador	44

2.9.2 Masa del cilindro.....	44
2.9.3 Masa de elevadores del producto	44
2.9.4 Cálculo de la velocidad periférica de los rodillos.....	45
2.9.5 Cálculo del motor de giro del cilindro.....	45
2.9.6 Inercia del cilindro de secado	45
2.10 Cálculo e instalación del ventilador	47
2.11 Diseño e instalación del intercambiador de calor	47
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	50
3.1 Proceso de secado.....	50
3.1.1 Resultados del balance de masa para el proceso de secado	50
3.1.1.1 Cálculo de la mena seca	50
3.1.1.2 Cálculo de la mena húmeda.....	50
3.1.2 Balance del proceso de secado	51
3.1.3 Cálculo del polvo	51
3.2 Resultados del balance de energía para el proceso de secado.....	52
Calor físico del aire para el secado (Q_{e1}).....	53
Calor físico de la mena que entra al secador (Q_{e2}).....	53
Calor físico del mineral producto (Q_{s1})	53
Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Q_{s2}).....	53
Pérdida de calor con el polvo (Q_{s3}).....	53
Calor físico de los gases salientes (Q_{s4})	53
Pérdida de calor al medio ambiente (Q_{s5})	53
3.3 Dimensionamiento del secador	54
3.4 Cálculo del volumen del secador.....	55
3.5 Cálculo del diámetro del secador	56
3.6 Cálculo de la longitud del secador.	56
3.6.1 Potencia requerida para rotar el secador.....	56
3.6.2 Masa del material dentro del secador	56
3.6.3 Masa del cilindro.....	57
3.7 Masa de elevadores del producto.....	57
3.7.1 Cálculo de la velocidad periférica de los rodillos.....	57
3.7.2 Cálculo del motor de giro del cilindro	58
3.8 Cálculo e instalación del ventilador	59
3.9 Diseño e instalación del intercambiador de calor	60
VALORACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE SECADO DE MINERALES	63
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70

INTRODUCCIÓN

El secado consiste en la eliminación total o parcial de un líquido que empapa a un sólido. Existen varios modos de llevar a cabo el secado, pero el más importante consiste en la evaporación del líquido hacia un gas inerte mediante la aportación de calor. También puede efectuarse de forma mecánica, por expresión o centrifugación.

Una operación relacionada es la liofilización, en la que el líquido se congela y posteriormente se produce la sublimación del sólido.

En general el secado puede aplicarse a cualquier líquido que empapa a un sólido, utilizando un gas inerte cualquiera para arrastrar el vapor. Sin embargo en la mayor parte de las ocasiones el líquido es agua y el gas de arrastre el aire.

Mediante el secado se modifican y mejoran las propiedades del sólido (p. Ej. En alimentos se evita el deterioro por microorganismos), se facilita su manejo (se evita p. Ej. La aglomeración de los sólidos granulares húmedos) y se abarata su transporte. El secado suele ser la etapa final de muchos procesos de fabricación, resultando esencial en algunas industrias como la papelera cerámica y maderera. (Boaya. 2014)

Las operaciones de secado requieren un consumo elevado de energía.

Existe una gran variedad de procesos de secado, que parten de la diversidad de materiales a secar: sólidos granulares, sólidos porosos y no porosos pastas geles, materiales biológicos, productos alimenticios (leche, tomate, granos etc.).

Desde el punto de vista de la operación los procesos de secado se diferencian en el método seguido para transmitir calor, que puede ser por convección conducción o radiación y también por métodos dieléctricos o de microondas.

La conducción se puede llevar a cabo desde las paredes que estén en contacto con el sólido, p. Ej. Desde las bandejas que lo soportan. Este mecanismo puede interesar si se trata de sólidos muy húmedos, con poco espesor. En este caso

la temperatura del sólido puede ser más elevada en unas zonas que en otras.

La convección se lleva a cabo mediante gases calientes (aire o gases de combustión). Es el método más empleado. Permite una buena regulación de la

humedad y de la temperatura y con ello un control de la velocidad de secado. La radiación suele estar presente como un mecanismo adicional en todos los secaderos, combinada con la convección. Tan solo es el mecanismo predominante en el caso de la liofilización, ya que al efectuarse a vacío no es posible utilizar la convección. (Boaya. 2014)

El secado dieléctrico o por microondas es muy uniforme y rápido, pero tiene un coste elevado, por lo que solo se aplica en productos de alto valor añadido.

Desde otro punto de vista los secaderos pueden ser continuos o intermitentes dependiendo básicamente de la producción requerida y, por supuesto, de la economía del proceso.

La gran variedad de productos y la complejidad del proceso de secado hacen que no exista un modelo único que represente la operación y que permita el diseño preciso de los secaderos. Por esta razón, el diseño específico de secaderos para una operación dada suele llevarse a cabo por las propias empresas fabricantes de los equipos, que suelen disponer de mucha información procedente de equipos instalados con anterioridad.

El secado también se considera como una operación unitaria mediante la cual se extrae la humedad de un producto. Respecto de su origen, no se sabe exactamente desde cuando nuestros ancestros emplearon este proceso para conservar alimentos, pero la historia muestra que fue un proceso de prueba y error. El primer registro de este método data del siglo XVIII y fue utilizado para secar vegetales. Eventualmente se logró una base científica que permitió el desarrollo de una industria mundial de procesamiento y conservación de alimentos. Como en la mayoría de los avances tecnológicos, el desarrollo de la industria del secado ha estado estrechamente ligado a escenarios de guerra alrededor del mundo, al requerirse conservar y transportar alimentos con una calidad y duración suficientes. Teoría del secado, se explican los principios teóricos del proceso de secado, donde se puede ver su complejidad al aplicarlo en productos alimenticios. (Boaya.2014)

En la industria cubana del níquel el proceso de secado natural de las lateritas se implementa conforme a las recomendaciones de estudios realizados en el Centro de Desarrollo de Investigaciones del Níquel y la empresa niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara (Estenez 2001, 2009). Los estudios antes citados se orientan, esencialmente, al desarrollo del SIEM como un paquete

tecnológico, a pesar de que el mismo presupone la construcción o adaptación de instalaciones industriales que generan altos costos de inversión inicial y elevados consumos de portadores energéticos.

La planta de procesamiento Oro Descanso de la Empresa Geominera del Centro, se ubica en la Unidad de Producciones Mineras de Placetas (antiguas instalaciones de la Empresa Productora de Artículos Ópticos, EPAO), sito en el Consejo Popular Cumbre, a 2 ½ km al sur de la ciudad de Placetas a una distancia de 9 km de la autopista Nacional, a 2 ½ de la carretera central, apenas 300 m del ferrocarril central, así como 17 km de la mina Descanso y a 66 km del prospecto Lote Grande, en una región muy poblada, cercana al nacimiento del río Zaza.

En la empresa UBE producciones mineras “placetas” no cuenta con un secador para la reducción de la humedad del mineral para el proceso de preparación mecánica lo que provoca:

- Baja eficiencia metalúrgica
- Baja productividad
- Deshumanización del trabajo: motivado por el embotamiento y la incrustación del mineral en las paredes del triturador de mandíbula e impacto debido a la elevada humedad del mineral.

Problema: El embotamiento y el desgaste acelerado de las trituradoras provocados por el alto contenido de humedad del mineral en la empresa UEB producciones mineras “Placetas”.

Objeto de investigación: Secador de minerales auríferos.

Campo de acción: Dimensionamiento del secador.

Objetivo general: Dimensionar un secador para disminuir el contenido de humedad y mejorar el proceso de preparación mecánica en la empresa UEB producciones mineras “Placetas”

Objetivos específicos:

- Caracterizar la empresa UEB (Unidad Empresarial de Base) producciones mineras “Placetas”, y la materia prima.
- Determinar los principales parámetros de dimensionamiento en la empresa UEB (Unidad Empresarial de Base) producciones mineras “Placetas”.

Hipótesis: Si se dimensiona un secador para disminuir el contenido de humedad y mejorar el proceso de preparación mecánica entonces se podrá obtener un mineral con las características adecuadas para el proceso de preparación mecánica en la empresa UEB (Unidad Empresarial de Base) producciones mineras “Placetas”.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DEL SECADO DE MINERALES AURÍFEROS

1.1 PROCESO DE SECADO

1.1.1 Descripción general del proceso de secado

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido, es decir; en la microestructura del mismo. Cuando un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos procesos ocurrirán simultáneamente:

- ✓ Habrá transferencia de energía (comúnmente como calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.
- ✓ Habrá transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido.

La velocidad a la cual el secado es realizado está determinada por la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se llevan a cabo. La transferencia de energía, en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos. (Boaya. 2014)

1.1.1.1 Condiciones externas

Este caso se refiere al proceso 1, donde, la eliminación de agua en forma de vapor de la superficie del material, depende de las condiciones externas tales como: temperatura, humedad y flujo del aire, área de la superficie expuesta y presión. Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado cuando la humedad de la superficie está siendo removida. En algunos materiales puede haber encogimiento, excesiva evaporación en la superficie, después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos gradientes de humedad del interior a la superficie. Este fenómeno es causado por el sobresecado y encogimiento y consecuentemente las altas tensiones dentro del material, dando como resultado agrietamiento y deformación.

1.1.1.2 Condiciones internas

El movimiento de humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física dentro del sólido, la temperatura y su contenido de humedad. En una operación de secado cualquiera de estos procesos puede ser el factor que

determine la velocidad de secado.

A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del sólido mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie, la cual ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente, difusión, flujo capilar, presión interna causada por el encogimiento durante el secado. (Boaya. 2014)

1.1.2 Mecanismo de secado.

Hay dos métodos para remover la humedad:

- ✓ Evaporación: Esta ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre, y esta puede ser disminuida, bajando la presión (evaporación al vacío). Si la presión disminuye baja más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelada.
- ✓ Vaporización: El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

1.1.3 Cinética del secado.

Si un lote de polvo o granos húmedo es secado en un lecho fluidizado y el contenido de humedad X (definido como peso de agua por unidad de peso de sólido seco) es determinado como una función de tiempo t .

Esta es convencionalmente dividida en dos partes, el primero llamado periodo de velocidad constante de secado y el segundo velocidad decreciente de secado. El contenido de humedad en el punto de transición entre los dos periodos es llamado contenido crítico de humedad X_{cr} . Si el secado continúa más tiempo, X se aproximará al contenido de humedad X_e , correspondiente a la humedad de equilibrio. En cualquier punto de la curva, la cantidad de humedad removible permanente ($X - X_e$) se conoce como el contenido de humedad libre. (Boaya. 2014)

La velocidad de secado, $-dX/dt$, puede ser determinada en cualquier punto derivando la curva de X contra t . Una gráfica de $-dX/dt$ contra el contenido de humedad libre ($X - X_e$) es una forma alterna de representar el secado característico de un material.

Como un método aproximado, el periodo de velocidad constante puede ser considerado como correspondiente a la humedad removida de la superficie de las partículas, mientras que el periodo de velocidad decreciente corresponde a la eliminación de la humedad interna.

1.1.4 Velocidad constante de secado.

La superficie contiene humedad, la vaporización se lleva a cabo a partir de ahí. En esta etapa de secado se lleva a cabo la difusión del vapor del agua a través de la interfase aire/humedad y la velocidad a la cual la superficie por difusión es eliminada. Hacia el final del periodo constante, la humedad tuvo que ser transportada del interior del sólido hacia la superficie por fuerzas capilares. Cuando el promedio del contenido de humedad ha alcanzado el contenido de humedad crítico X_{cr} , la película de humedad en la superficie ha sido tan reducida por evaporación que más allá del secado causa distorsiones más allá de la superficie, entonces, el proceso se controla por las resistencias exteriores.

1.1.4.1 Velocidad decreciente de secado.

La velocidad a la cual la humedad puede pasar a través del sólido como resultado de la concentración de gradientes entre las partes más profundas y la superficie es el paso a controlar. Dado que, la profundidad media del nivel de humedad incrementa progresivamente y la conductividad de calor de las zonas externas secas es muy pequeña, la velocidad de secado es cada vez más influenciada por la conducción de calor. Sin embargo, si el producto seco tiene una densidad alta y cavidad pequeña con poros pequeños, el secado es determinado no tanto por la conducción de calor, pero, si por una resistencia alta a la difusión dentro del producto. Como la concentración de humedad disminuye por el secado, la velocidad de movimiento de humedad interna también disminuye. (Boaya. 2014)

1.1.5 Determinación del contenido de humedad.

1.1.5.1 Métodos directos.

Estos consisten esencialmente en la determinación del contenido de humedad

de una muestra de secado llevada a cabo en un horno de secado con o sin soplado a través de aire, o por secado en una cámara de vacío o en su defecto en un desecador de vacío. La muestra de material tiene que ser preparada en cada caso de la siguiente manera: el material es desintegrado en piezas de 1-2 mm³, y una muestra con masa de 4-5 g es colocada dentro de un previamente secado y pesado contenedor de vidrio, el cual es colocado dentro de la cámara de secado y secar a 102-105 °C. La medida de la masa es llevada a cabo a temperatura ambiente, no sin antes dejar que la muestra sea enfriada en el desecador.

El proceso de secado puede considerarse completo cuando la diferencia entre el valor obtenido por el contenido de humedad del material en dos medidas consecutivas no exceda ± 0.05 %. La literatura indica que este proceso es más rápido cuando se lleva a cabo a 130-150 °C. Sin embargo, investigaciones probaron los resultados obtenidos de esta manera pueden variar 0.5-1.0 %. Así, el método rápido parece ser conveniente solo para determinación aproximada del contenido de humedad del material. (Boaya. 2014)

1.1.5.2 Métodos indirectos.

En el caso particular de las industrias, el contenido de humedad presente en el material tiene que ser determinado por métodos más rápidos que los métodos directos. Ejemplos de métodos indirectos son los siguientes: métodos eléctricos de los cuales tres han llegado a ser muy difundidos: determinación de humedad basado en el cambio de la resistencia DC, medida de capacitancia electrostática (constante dieléctrica del material), y la medición de las pérdidas en un campo de AC. Otros métodos rápidos son los métodos químicos desarrollados principalmente para la mayoría de los casos, cuando la humedad es agua, tal es el caso del análisis de Kart-Fischer basado en reacción química del yodo en la presencia de agua, y el método de extracción el cual es llevado a cabo con etanol.

1.2 Clasificación y selección de secadores.

La selección del contenido final de humedad es principalmente dictada por los requerimientos de almacenamiento y estabilidad. El contenido final de humedad determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso. Los gradientes de humedad interna dentro de las partículas y la variación del contenido de humedad entre las partículas son importantes. Las

restricciones de temperatura pueden aumentar a causa de la degradación térmica, cambios de fase, decoloración y manchas, flamabilidad de polvos, entre otros factores. La sensibilidad térmica fija la temperatura máxima a la cual la sustancia puede ser expuesta durante el tiempo de secado. (Boaya. 2014)

La primera subdivisión está basada en métodos de transferencia de calor:

- ✓ Conducción de calor.
- ✓ Convección de calor.
- ✓ Radiación de calor.

La siguiente subdivisión está basada en el tipo de recipiente secador:

1.2.1 Secadores por Conducción

Los secadores por conducción o indirectos son adecuados para sólidos de poco espesor o para productos con alto grado de humedad. El calor para evaporación se suministra a través de superficies calientes (estáticas o en movimiento).

Secadores de tambor: Consta de un tambor de metal calentado que gira, en cuyo interior se evapora una capa delgada de líquido o suspensión hasta secar después el material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante un cuchillo. Para un secador de este tipo, el factor controlante es la transferencia de calor y no la difusión. Los materiales fluidos y semifluidos, como soluciones, lodos, pastas y suspensiones, pueden secarse en este tipo de secadores indirectos, como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2: Secador de tambor

Secadores indirectos al vacío con anaqueles: Es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles que opera al vacío. El calor se conduce a través de las

paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se usa principalmente para materiales sensibles a la temperatura o que se oxiden fácilmente, como se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3: Secador al vacío con anaqueles

1.2.2 Secadores por Radiación

El secado por radiación se lleva a cabo mediante radiación electromagnética cuya longitud de onda se halla dentro del rango de espectro solar y microondas.

Secadores solares: Está desarrollado primordialmente por un gabinete cubierto cuya tapa consta de un material traslucido que deja pasar los rayos del sol, de este modo se utiliza la energía en forma de rayos para lograr la evaporación de la humedad del sólido. No obstante, el funcionamiento de este secador depende de las condiciones climáticas y los tiempos de secado suelen ser largos, además de tener una capacidad de producción pequeña, como se muestra en la figura 1.4



Figura 1.4: Secador solar

1.2.3 Secadores por Convección

Los secadores en donde la transferencia de calor es por convección se utilizan para secar partículas y alimentos en forma laminar. En dichos secadores el calor es suministrado por medio de aire caliente o gas, el mismo que fluye sobre la superficie del sólido a secar. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado, o gases de combustión directa pueden utilizarse en sistemas de secado por convección. Algunos secadores convectivos o directos son:

Secadores en bandejas: resultan convenientes cuando la capacidad de producción es pequeña. Usualmente pueden secar cualquier producto, pero la mano de obra necesaria para la carga y descarga da lugar a costes de operación elevados. Este tipo de secador funciona mediante un ventilador que recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas, también puede usar calor eléctrico. Frecuentemente se utilizan en el secado de materiales valiosos tales como colorantes y productos farmacéuticos, como se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5: Secador de bandeja

Secadores de túnel: Estos suelen ser compartimientos de bandejas que operan en serie, en donde las bandejas se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan por la superficie caliente de cada bandeja. Un ventilador extrae cierta cantidad de aire a la atmosfera. “El tiempo de residencia en el secador debe ser lo suficientemente grande como para reducir al valor deseado el contenido de humedad del sólido. La operación puede ser básicamente adiabática o el gas puede calentarse con espirales de calentamiento a lo largo de su trayectoria a través del secador; en este caso, la operación puede ser a temperatura constante. Es posible utilizar este tipo de secadores para cualquier material que pueda secarse sobre platos: cristales, tortas de filtración, pastas, cerámicas y similares, como se muestra en la figura 1.6.



Figura 1.6: Secador de túnel

Secadores por aspersión: Un líquido se atomiza o rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez, y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. Las partículas obtenidas son porosas y ligeras, como se muestra en la figura 1.7



Figura 1.7: Secador por aspersión

Secadores rotatorios: Consta de un pequeño cilindro que gira sobre su eje con una pequeña inclinación. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo de gas caliente mediante un flujo a contracorriente, también puede ser a través de la pared calentada del cilindro. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por el segmento superior y se desplazan por el cilindro a medida que éste gira. Son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos, como se muestra en la figura 8 (Boaya. 2014)



Figura 8: Secador rotatorio

1.2.4 Partes de un secador rotatorio

En los sistemas de secado se consideran tres secciones descritas a continuación:

- Cámara de acondicionamiento de aire.
- Cámara de secado.
- Ventilador

1.2.4.1 Cámara de acondicionamiento de aire

Esta sección permite al aire adquirir las características ideales para el secado.

Estas a su vez están formadas por:

- Intercambiador de calor.
- Fuente de energía.

1.2.4.1.1 Intercambiador de calor

Son equipos de transferencia de calor, principalmente recuperan calor entre dos corrientes en un proceso, para un mejor entendimiento de estos equipos se los clasifican según su configuración, las cuales son de doble tubo, coraza y tubo, calor de placas y calor de flujo cruzado (Q. Kern. 1999).

Intercambiadores de doble tubo

Están formados de dos juegos de tubos concéntricos, dos tes conectoras, un cabezal de retorno y un codo en U, la tubería de interiores soporta en la exterior, el fluido entra en al tubo interior. La tes tiene boquillas roscadas que permiten la entrada y salida del fluido exterior. Son muy útiles estos intercambiadores de calor ya que proporciona superficie de transferencia de calor de bajos costos (Q. Kern. 1999), como se muestra en la figura 1.9.



Figura 1.9: Intercambiador de calor de doble tubo

Intercambiadores de tubo y coraza

Son los más comunes en las industrias, contiene gran número de tubos empacado en una carcasa, se caracterizan porque los tubos se abren hacia ciertas zonas grandes llamadas cabezales, se encuentra en cada extremo de la carcasa (Cengel. 2011), como se muestra en la figura 1.10.



Figura 1.10: Intercambiador de calor de tubo y coraza

Intercambiadores de placas y armazón

Consta de una serie de placas y pasos corrugados. Los fluidos calientes y fríos pasan alternados, de esta manera cada corriente fría queda rodeada por dos frías, dando excelentes resultados en la transferencia (Cengel. 2011), como se muestra en la figura 1.11.



Figura 1.11: Intercambiador de calor de placas y amazon

1.2.4.2 Fuente de energía

Cuando no existe peligro de que la materia prima se llegara a contaminar por gases de combustión existe métodos de calentamiento mediante quemadores:

- Quemadores de petróleo
- Quemadores de gas
- Uso de combustible sólidos

Quemadores de petróleo

Para la mayoría de las aplicaciones, es fundamental conseguir una combustión completa, pues una pequeña traza de hollín es suficiente para colorear a un material claro. Para lograr esto son precisas tres condiciones:

- a) La atomización del combustible debe ser muy buena, de manera que sea pequeño el residuo no volátil de las gotitas
- b) Es necesario obtener una llama turbulenta con un rápido mezclado para quemar todas las partículas secundarias de carbón que se forman en la llama por reacción térmica antes que estas alcancen un gran tamaño.
- c) Los gases de la llama no deben enfriarse por dilución hasta que no se haya completado la combustión. Es necesario disponer de tiro forzado para lograr el cumplimiento de la condición (b) y en muchas instalaciones es adecuado un quemador del tipo de atomización a baja presión. En estos quemadores todo el aire de combustión o al menos una alta proporción de él, es suministrado al quemador a una presión de unos 75 mbar y también sirve para atomizar al combustible (Nonhebel. 1979).

Quemadores de gas

En estos quemadores la llama es muy estable, pudiéndose regular la relación aire/gas, manteniendo el máximo caudal de aire y pudiéndose alcanzar una variación en el caudal del gas, si se regula en la misma proporción al caudal del aire (Nonhebel, 1979).

Uso de combustibles

Es posible utilizar combustibles sólidos en los secadores con fuego directo si no hay objeciones a la contaminación del producto por las partículas de ceniza.

Pueden usarse alimentadores automáticos para obtener una operación continua y facilitar el control de la temperatura. En los secadores de gran tamaño puede utilizarse carbón pulverizado. De la misma forma que los quemadores de petróleo, debe usarse una cámara de combustión completa antes de reunir los gases calientes con el aire de dilución (Nonhebel. 1979).

1.2.4.3 Cámara de secado

La cámara de secado consta en un cilindro que gira sobre soportes, ligeramente inclinado sobre la horizontal. La longitud varía de 4 a 10 veces el diámetro. El material húmedo ingresa por un extremo del cilindro y avanza por el en virtud de la rotación saliendo por el otro extremo seco. Cuando los gases calientes circulan en el sentido del material, facilitan la movilización del material húmedo a través del secador (Perry. 2001). El diseño de la cámara de secado consta de elevadores y motor.

Elevadores para secadores

Permiten un máximo de transferencia de calor y materia, cuando todo el material en el proceso cae en cascada. Bajo estas condiciones los coeficientes de transferencia por unidad longitud son proporcionales a su retención. También es importante que la cortina de material que cae, deben ser llevadas a través de la carcasa. Con este diseño particular de elevador, el máximo tiempo de retención de sólidos alcanza al 15% del volumen del cilindro (Nonhebel. 1979).

Motor

Son utilizados para permitir la rotación del cilindro, por lo general las revoluciones en estos tipos de secadores varían entre 4 a 5 RPM, dependiendo la naturaleza del material húmedo (Perry. 2001).

Debido a este requerimiento se debe acoplar una caja reductora para permitir las revoluciones necesarias, o en su defecto se instala un moto- reductor.



Figura 1.12: motor-reductor

Ventiladores

Son turbo máquinas, que convierten la energía mecánica a energía neumática, a través de un rotor con aspas o álabes, que le imprime energía cinética al aire. Los ventiladores centrífugos son aquellos que entra el aire paralelo al eje del rotor y es expulsado perpendicular al mismo, muy utilizado en el secado de granos.

Consta de un rotor con álabe, dentro de una carcasa de forma de espiral, cuando el rotor gira, el aire ingresa a través de la abertura de la carcasa, en los álabes. Estos ventiladores son de gran rendimiento, trabajando a amplios rangos de presiones.

Los álabes inclinados hacia delante operan a presiones bajas, tiene niveles de ruido bajos. Los álabes inclinados hacia atrás son los más eficientes, no se sobrecargan y son más silenciosos. Los álabes radiales son autolimpiables se sobrecargan cuando trabajan a altas presiones (CENICAFÉ. 2012).



Figura 1.13: Ventilador centrífugo

1.2.5 Tipos de secadores rotatorios

Secador rotatorio directo en cascada

La carcasa rotatoria alcanza los 3 m de diámetro; según la producción requerida, la longitud comprende entre 4 a 15 diámetros. Para el desplazamiento longitudinal del sólido, la carcasa está montada con una pendiente comprendida entre el 2,5 y el 5 por ciento. Unidas a la pared cilíndrica hay una serie continua de elevadores que a medida que, rota el secador, estos toman el material y los arrojan en cascada dentro de la corriente gaseosa. El secador gira de 4 a 5 RPM. La velocidad del aire de 1,5 a 2,5 m/s, dependiendo del tamaño de las partículas a secar del aire y cantidad de aire formando dentro del secador.

Dirección de los flujos aire/sólidos: el uso de flujo de aire y sólido en corriente

paralela es cuando se debe evaporar una gran proporción de humedad en las primeras etapas de secado: esto también permite trabajar a altas temperaturas en la entrada sin alcanzar altas temperaturas en el producto a secar. Esto no debe calentarse más de 90 °C para evitar la formación de humos.

En el secador de flujos contracorriente, la temperatura del sólido seco tiende a alcanzar la temperatura del aire de entrada, por consiguiente, esta operación indica la necesidad de calentar el sólido a una temperatura alta para completar el secado.

La temperatura de salida del aire en un secador de corriente paralela es de unos 10 a 20 °C mayor a la temperatura del producto seco (Nonhebel, 1979).

Secador de persianas

El aire fluye por canales formados por tablillas conformadas de persianas y sale a través del lecho del sólido. Una válvula regula el flujo del aire solo por aquella persiana que se encuentra bajo el lecho del material a secar. Las persianas forman un tambor interno. En una operación normal se usa un lecho relativamente espeso, de 40 % del volumen del secador. El aire que abandona el secador es canalizado por un conjunto de ciclones de alta eficiencia (Nonhebel, 1979).

Secador indirecto

Posee una carcasa rotatoria inclinada, está provisto de tubos que contienen vapor o agua caliente. La alimentación forma una delgada capa que se calienta a través de los tubos por contacto directo. La velocidad del aire es de 0,3 m/s. Estos secadores son muy utilizados para aquellos materiales presenten un período de secado decreciente prolongado a una temperatura prácticamente constante (Nonhebel, 1979).

1.3 ESTADO DEL ARTE DEL SECADO DE MINERALES AURÍFEROS

MOSTAFA, 1977 (citado por D. Reay y C. G. J. Baker) hizo un estudio de secado de silica gel en un lecho fluidizado de 0.10 m de diámetro. Midió la temperatura del lecho y la humedad del aire como una función de la altura arriba de la placa distribuidora, indico que tanto en el periodo de velocidad constante como en el de velocidad decreciente, el secado fue ocurriendo solamente a cualquier punto en el fondo 0.02 m del lecho. Incrementando la altura del lecho de 0.05 m a 0.20 m no hubo diferencias significativas para el grado de humedad del gas. Sin embargo, la humedad relativa del gas que sale del lecho fue sustancialmente menor que la humedad relativa en equilibrio correspondiente al contenido de humedad del sólido predominante.

Por lo tanto, tomando en cuenta lo anterior se deduce que, en materiales como: silica gel el cual pierde agua fácilmente y con ello la mayoría del secado se logra dentro de una distancia corta respecto al distribuidor, y el gas que sale de fase densa esta probablemente cerca del equilibrio con los sólidos; por otro lado, incrementando la profundidad del lecho arriba de la zona de secado no hay incremento significativo en la velocidad de secado.

En los experimentos con silica gel, Mostafa, 1977 (citado por D. Reay y C. G. J. Baker) descubrió que incrementando el diámetro de partícula d_p de 106 a 2247 μm se obtiene un ligero incremento en la velocidad de secado. Los experimentos fueron ejecutados a la misma velocidad de gas, altura y temperatura de lecho. En contraste, Venecek y Picka, 1964 (citados por D. Reay y C. G. J. Baker), en sus experimentos con fertilizante NPK, encontraron que el tiempo para eliminar una cantidad dada de humedad fue proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula.

SÁNCHEZ Y FLORES. 2014 hicieron el diseño y construcción de un secador rotatorio para la obtención de escamas PET donde el trabajo se realizó con el objetivo de reducir sustancialmente la humedad del plástico, el equipo antes mencionado servirá como medio de enseñanza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo para reforzar el conocimiento teórico acerca del secado de sólidos.

Para el diseño se realizaron ensayos en el laboratorio adquiriendo diferentes datos, mismos que sirvieron para elaborar los cálculos de ingeniería para un

correcto dimensionamiento del equipo realizando una previa selección de los principales elementos que conforman el equipo, estos son: Cámara de secado, motor, ventilador, fuente de calor. El equipo fue fabricado en acero inoxidable AISI 304, y cuyas dimensiones son las siguientes: la cámara de secado tiene una longitud de 80 cm, diámetro de 38 cm, un volumen de 90 L y una capacidad de 10 Kg/h; la potencia del motor es de 1/2 HP (373 W); la velocidad con la que trabaja el ventilador es 3600 RV, la temperatura óptima de la fuente de calor es 115 °C. Con este equipo se logró alcanzar una eficiencia del 87,6 %, cumpliendo así la especificación de este tipo de equipos.

Como resultados se obtuvo una reducción de humedad del PET desde un 28 % hasta 1%, en un tiempo de 0,3 horas y con una velocidad total de secado de 5,36 Kg/m²h.

Concluimos que el secador rotatorio está en excelentes condiciones para el proceso de secado de PET alcanzando una reducción de la humedad de 1 %.

Recomendamos que al momento de utilizar el equipo se debe tener una mascarilla, guantes, mandil, para un buen desempeño y reducir los peligros que se puedan presentar en el laboratorio.

El diseño y construcción de un secador de bandejas para biomasa, se lo realizó para reducir la humedad en diferentes materiales pertenecientes a este tipo, basando el diseño en el secado de pasto azul. El tema de investigación se desarrolló en la Escuela de Ingeniería Química, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Basándonos en el método experimental se procedió a realizar el diseño del equipo. Primero se ejecutó una simulación en un secador del mismo tipo para adquirir las condiciones de secado adecuadas para el material. Considerando las mismas se procedió a realizar la construcción del equipo en sí. El equipo fue fabricado en acero inoxidable AISI 304, cuyas dimensiones son 56cm de ancho, 68cm de largo y 56cm de profundidad. Posee 5 bandejas de dimensiones 42.5cm de largo, 38cm de ancho y 3cm de espesor cada una, cabe indicar que cada bandeja posee una malla metálica de tipo MESH 40. Además, posee un tablero de control automático PID, un ventilador con potencia de 1700 rpm y una resistencia eléctrica de 2000W como medio de calentamiento. El equipo funciona con una corriente de 220V.

El secador de bandejas nos permitió reducir la humedad del pasto azul desde

un 80% hasta alcanzar una humedad igual al 30% sin la afectación de sus propiedades primordiales que son proteína y fibra.

Se concluye que el equipo construido será de gran ayuda al momento de realizar análisis y diferentes procesos de investigación. El presente tema de investigación está dirigido a las personas interesadas en la operación de secado para biomasa. JIMÉNEZ Y PINOS .2014.

GUTIÉRREZ. 2013 realizó el Diseño Integral de un Secador Experimental de Túnel en el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos (CEPROBI) cuyo propósito es apoyar a los proyectos de investigación y de capacitación en los cursos que se imparten, donde interesa demostrar el proceso de secado de materiales biológicos.

Se desarrolló un prototipo para la captura y análisis automático de imágenes digitales y datos, consistente en un conjunto de cámaras, equipos de medición y software de control. Este prototipo puede ser aplicado en equipos y sistemas para adquirir, clasificar y analizar imágenes automáticamente, y relacionar la información generada de tales imágenes con otras variables de operación como el peso y la temperatura.

El desarrollo de esta tesis se centra en la integración del prototipo para la captura y análisis de imágenes digitales y datos con el túnel de secado, mediante interfaces de comunicación. Con esta integración más el desarrollo de un software para monitorear el proceso, es posible capturar y analizar imágenes digitales en tiempo real del material que se seca, obteniendo lecturas de cambios en color y forma, así como del cambio de peso (cinéticas de secado), y de la temperatura.

El prototipo más el secador de túnel de charolas experimental, forman un paquete tecnológico de bajo costo que puede ser de utilidad para instituciones de educación en ingeniería o investigación y desarrollo, en la obtención de parámetros de secado de materiales.

Para la realización de este trabajo se empleó una metodología basada en la de sistemas duros, y el proceso cibernético, la cual se describe y se denominó como “Metodología para la Investigación Tecnológica Sistémica Experimental” (MITSE).

Se realizaron ensayos con el equipo ya integrado, obteniendo resultados favorables y comprobándose experimentalmente la factibilidad de obtener

prototipos con fines de investigación y educativos.

RIVAS. 2015 realizó diseño de Secadores Convectivos Zonales para Procesamiento de Paletas y Productos de Álamo donde El proyecto está enfocado a estudiar y rediseñar algunos sectores críticos de un secador convectivo zonal, que Innovatec Ltda. Diseñó y desarrollo para la empresa TEMSA (Terciados y elaboración de maderas S.A.), que la compañía emplea para secar paletas de álamo de $300 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$. El equipo, de una configuración tipo túnel en 3 niveles, cuenta con 3 cámaras de secado independientes operando a 90, 45 y 90 °C, respectivamente, con un tiempo de residencia total de 67 min distribuido en 12, 30 y 25 min por cámara. Cada cámara está equipada con 2 ventiladores axiales de $5.670 \text{ m}^3/\text{h}$ cada uno y 2 radiadores de 120 kW cada uno.

El objetivo general del proyecto es evaluar y desarrollar modificaciones del secador, para lograr una mejora en el sistema de aireación y una optimización en la pérdida de presión en el lecho de secado. Los objetivos específicos son: i) Efectuar una investigación conceptual de los mecanismos de distorsión de las paletas y considerarlos en el diseño mejorado del equipo, ii) Efectuar estudios experimentales de pérdida de presión en lechos/camas de paletas (análisis ΔP -Q), iii) Efectuar un estudio de Mecánica de Fluidos Computacionales (CFD) de las condiciones de aireación del lecho de secado, y iv) Proponer configuraciones de alta eficiencia y desempeño para los ventiladores e intercambiadores convectivos ad hoc para el secador.

Para modelar conceptualmente y, por ende, entender los principales fenómenos de gobierno de la distorsión se revisó la bibliografía de los fenómenos de migración de agua, colapso celular, se visualizó una macrorelación entre propiedades mecánicas y dilatación/contracción y, finalmente, se propuso un modelo de pandeo elastoplástico termo-mecánico de los productos. Para el análisis ΔP -Q de lechos de paletas se diseñó un equipo experimental consistente en un lecho estático vertical o cama de paletas, instrumentado con un manómetro diferencial de columna de 300 mm, un tubo de Pitot AMCA con capacidad para medición de velocidad de aire en el intervalo de 0 a 30 m/s; y se condujeron experimentos de flujo por el lecho midiendo ΔP vs Q para lechos de 5 a 200 mm de altura. Para el análisis fluidodinámico se construyeron modelos 3D de cámaras de secado similares a

las del secador de diseño original (sin obstáculos) y con deflectores para orientar el flujo de aire hacia la cama de secado. Para esos modelos se resolvió mediante una técnica CFD, empleando el software Solidworks en el módulo Flow simulator, el campo de velocidad interno y la distribución de presión; para varias condiciones de borde de interés. Para el estudio de configuraciones del equipo se construyó un modelo de cálculo de balance de calor y masa considerando el flujo de material por el secador, la transferencia de calor aire-lecho y la migración de humedad.

Los principales resultados del proyecto indican que: i) La distorsión es un problema inherente al tipo de producto, se ve muy influenciada por los fenómenos de colapso celular y anisotropía; que generan altas tensiones residuales. Para cada especie de madera existe una ventana operacional que permite minimizar la distorsión, pero que es dependiente de la tecnología de secado, ii) Los lechos de paletas de 50 – 200 mm desarrollan una ΔP -Q tan alta como 400 Pa a 15 m/s, con una ley tipo Ergun $\Delta P = kQ^{0,9}$ [Pa] siendo $K = 2.005e$ [Pa · (m³/s)^{-0,9}] la resistencia específica del lecho y e su espesor, iii) Las cámaras de secado del equipo en estudio pueden mejorar ostensiblemente su desempeño al reconfigurarse con deflectores de aire y cuña de fondo. La alimentación del aire debe ser, como mínimo, a 15 m/s para alcanzar una buena distribución de aire y promover un secado uniforme.

El estudio muestra que las cámaras de secado deben configurarse con un sistema de ventiladores tándem, de impulsión – succión, o con un sistema de ventiladores en serie (2 unidades); con una capacidad de 18.900 m³/h y radiadores de 165 kW para desarrollar un proceso de alta eficiencia, minimizando las pérdidas de producto.

Por lo anteriormente expuesto se concluye que el secador convectivo zonal, para este producto, está en el límite de sus posibilidades, porque no puede manejar con holgura el problema de distorsión del producto y el sistema de aireación de lechos desarrolla pérdidas de presión muy altas. Por ello se estima que se requiere un cambio tecnológico, transitando hacia secado en lecho fluidizado.

En la fabricación de cerámica en el Estado de Morelos, la etapa de secado de moldes de yeso implica una elevada relación del tiempo de la etapa de secado

entre el tiempo del resto de las etapas, la relación puede estar en el intervalo de 10 a 20 dependiendo del tipo de secado que utiliza el cliente, por lo que el secado ha generado grandes expectativas de optimización para el proceso de fabricación de cerámica en el gremio.

En este trabajo se presenta el rediseño de un secador solar para moldes de yeso, considerando la reducción de tiempos y movimientos, la homogenización en el secado y el uso eficiente de la energía. El desarrollo del secador consistió en tres etapas: el diseño, la construcción y la caracterización térmica. En el diseño se consideraron los requerimientos y restricciones principales que se utilizaron en un secador preliminar (Prototipo 1). También, se consideró la experiencia de evaluar la operación del secador, la reducción de costos de fabricación, la reducción de tiempos y movimientos en la producción de cerámica, la reducción del peso del secador y el ahorro de energía. Los requerimientos, las restricciones y las alternativas funcionales que surgieron en el rediseño del nuevo secador se utilizaron como datos de entrada en una metodología de diseño estructurada que permitió proponer el nuevo diseño. Las alternativas funcionales propuestas fueron evaluadas de manera relativa entre ellas mismas para cada requerimiento. En el caso del desempeño del ducto y la cubierta, las alternativas funcionales se evaluaron de manera experimental. La evaluación del desempeño térmico del sistema de secado permitió conocer la constante de secado y la eficiencia térmica de cada sección del secador.

La evaluación se realizó mediante pruebas al exterior, el colector solar respetando la norma ANSI/ASHRAE 9386, el sistema de captación solar (SCA) se evaluó considerando la ganancia de calor en el tanque de almacenamiento, el sistema de calentamiento de aire se evaluó considerando el volumen de aire calentado y el sistema de secado considerando la cantidad de agua removida de los moldes. La metodología de evaluación por secciones utilizada permitió optimizar el funcionamiento de manera separada de cada una. El uso de materiales y configuraciones más adecuadas permitió reducir el costo de fabricación en un 30.6%, también se logró de manera adicional el uso de la energía solar directa con lo que el consumo de energía del SCA se redujo en un 30%. Por otro lado, un ducto de suministro de aire que pierde su volumen cuando no opera, permitió mayor maniobrabilidad en la cama de secado y

aumentó la homogeneidad en un 46%. Con respecto al secador solar anterior (Prototipo 1), se mejoró la continuidad en el secado, se mejoró el tiempo de secado ceramista en un 27.3%, se mejoró la constante de secado en un 7.8% y se redujo el peso del secador en 51.8%. Por otro lado, la eficiencia térmica del Prototipo 2 se mejoró en 5% respecto al Prototipo 1. Finalmente, con la reducción del peso del secador y la nueva estrategia de llenado y vaciado de la cámara se redujeron los tiempos y movimientos en el secado de moldes de yeso. CASTRO. 2008.

El secado al aire libre es una práctica típica en el Ecuador, que se realiza exponiendo principalmente los productos directamente al sol colocándolos sobre el piso.

Este proceso de secado produce pérdidas y disminuye la calidad del producto seco. Frente a esta problemática, el Secador Solar por convección de aire caliente, es una eficiente solución a este problema que posibilita la conservación de las propiedades de los productos agrícolas, protección contra la contaminación ambiental y del ataque de insectos durante el proceso de secado. Este funcionamiento se basa en la utilización de un colector placa plana, el cual incrementa la temperatura del aire, para que se produzca la deshidratación del producto en la cámara de secado.

El presente trabajo de tesis define los parámetros de diseño, automatización y operación de un secador solar por convección de aire caliente, luego se lo ha construido y monitoreado. MARÍN Y TORRES. 2011.

LENIS Y CÓRDOVA. 2015 realizaron la Re-Ingeniería de un Secador Rotatorio Didáctico Para el Laboratorio de Operaciones Unitarias, proveniente del instituto de investigaciones donde no estaba siendo operado, el cual se realizó el respectivo traspase de equipo a la facultad de Ingeniería Química con el fin de ponerlo operativo para su funcionamiento en el Laboratorio de Operaciones Unitarias así como también al servicio de los estudiantes con fines didácticos para un mejor aprendizaje de los tipos de secado que se realizan dentro de las industrias en aquel país. Este tipo de secadores se fundamenta en la transferencia de calor y la necesidad de solucionar el problema de alto contenido de humedad, se realizó la reingeniería del secador con el fin de obtener mejoras en el proceso a realizar, para nuestras pruebas utilizaremos cacao, café y alverja dando a notar la efectividad de este proceso cuando se

trata de productos granulares. Teniendo en cuenta que la capacidad de producto dentro del secador es de 271 kg, sabiendo que este tipo de secadores solo trabaja con un 10 % a 15 % de su capacidad total, y que en tiempos de aproximadamente 1 hora reducirá el porcentaje de humedad del cacao de un 50 % a un 7 % aproximadamente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos a utilizar en cualquier investigación y su posterior ejecución son las herramientas fundamentales para asegurar la teoría de dicha investigación. Por estas razones, se describen los materiales y métodos utilizados en el transcurso del trabajo.

En el capítulo se caracterizan los materiales empleados y luego se desarrolla una metodología para los cálculos de balances de masa, de energía y otros en el proceso de secado de los minerales que se utilizan en la UEB producciones mineras "Placetas".

2.1. Esquema tecnológico del proceso de obtención de oro de la UEB Producciones mineras "Placetas"

La tecnología actual y propuesta de producción de oro de la UEB producciones mineras "Placetas" se muestra en la figura siguiente:

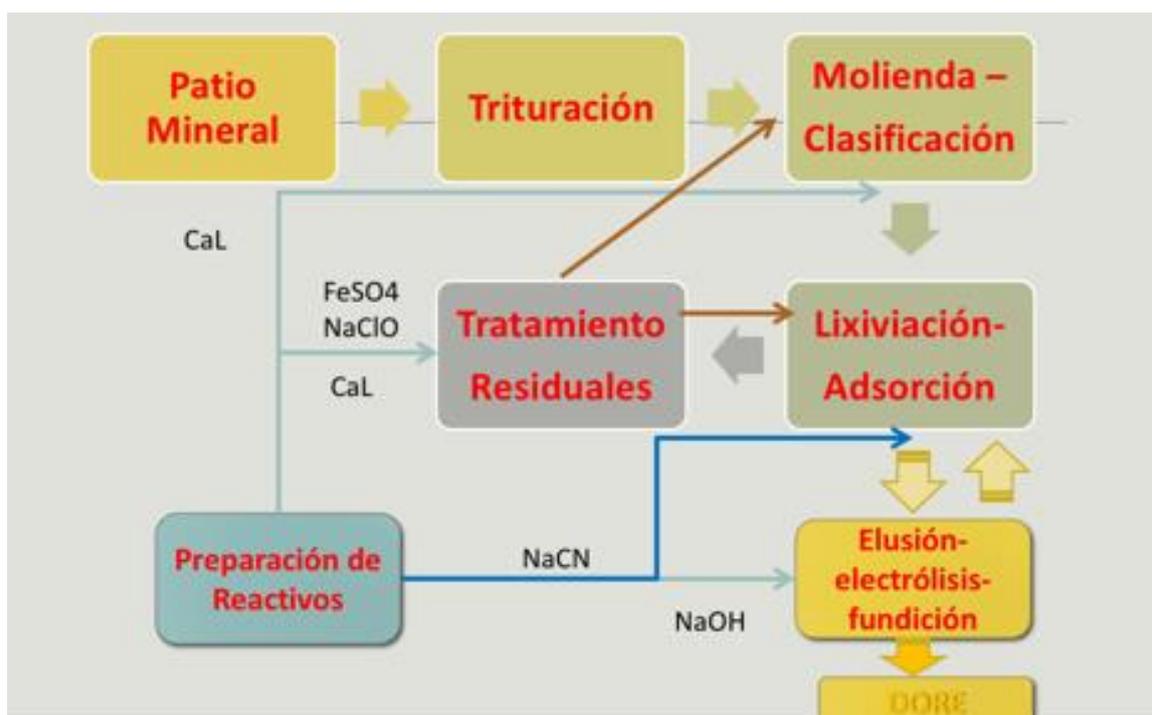


Figura 2.1. Esquema tecnológico del proceso de obtención de oro

En la figura 2.1 se muestra que la tecnología de obtención de oro consiste en cinco procesos fundamentales como son: Trituración, molienda, lixiviación-adsorción, elución-electrólisis y fundición del doré.

Proceso de trituración:

Es alimentado al triturador de quijada o mandíbula la fracción entre $- 250$ mm y $+ 50$ mm ya que la fracción menor de 50 mm es separada o clasificada en este

vibrador por una pequeña criba de barrotes con separación de 50 mm entre las barras de acero al manganeso, evitando así sobrecargas innecesarias al triturador (103), donde se reduce la granulometría a -50 mm y se descarga a la banda transportadora (104) junto con el clasificado por el vibrador de -50 mm. Así como la descarga (recirculación) del triturador secundario de impacto (107). La mena, se descarga en la criba vibratoria de dos paños (106), donde se clasifica primero por medio de una malla de 7 mm, y luego por una malla de 4 mm. La fracción +7 mm y -7 mm, + 4 mm pasa al triturador de impacto (107), que retorna mediante una banda transportadora (105) estableciendo un circuito cerrado entre la criba (106) y el impactor. El material cribado -4 mm, que es el producto final de esta sección, se transporta por la banda (109) hasta el silo de mineral triturado – 4 mm (110) donde se almacena para después ser dosificado a la sección de molienda.

En esta área laboran el operador de patio de mineral, el operador del cargador frontal, dos operadores de trituración y el Jefe de turno ó brigada de la sección lo que constituye 5 trabajadores por turno.

Proceso de molienda:

El mineral llega procedente del silo de almacenaje, el mineral triturado y cribado en la Sección 01, con una granulometría 100% - 4 mm. La sección de molienda y clasificación está diseñada para la reducción y clasificación de hasta 80 toneladas diarias, produciendo una pulpa con una granulometría deseada por proyecto de $d_{60-90} = 0.074$ mm (60 al 90 % de la masa) y un % de sólidos de 38 a 44 % (Actualmente no se alcanza ese grado de molienda, porque el clasificador espiral no cumple su función por ser una pulpa con % de sólidos muy superior al 25%, por lo que en acuerdo con el CIPIMM este equipo se elimina del proceso). La pulpa con las condiciones anteriores descritas y un pH de 10,5, alcanzado mediante la adición de agua recuperada con valores de pH de 8.5 procedente de la presa de colas y lechada de cal será enviada como materia prima a la lixiviación, pasando antes de llegar al primer reactor por una criba de control que consta de dos paños o tamices, de 0,64 mm y 0,4 mm, siendo la fracción + 0,4 mm la que retorne al molino. En esta área trabajan dos operadores, uno que atiende la alimentación al molino de bolas y otro que opera el molino de bolas y las bombas encargadas de trasladar la pulpa molida a lixiviación.

Proceso de lixiviación-Adsorción:

La pulpa molida procedente de la Sección II con un % de sólido entre 38 y 42 % y un grado de molienda entre 60 – 90 % bajo 0.074 mm (óptimo 90%) y pH entre 10.5 y 11.0, es alimentada al primer reactor de tren de lixiviación de cuatro etapas. En el primer reactor se adiciona la solución de NaCN concentrada procedente de la Sección VII de preparación de reactivos y se suministra aire proveniente de un soplante para aportar oxígeno, reactivo necesario para la reacción redox donde se forma el complejo de aurocianuro. Los reactores operaran con un inventario de carbón activado (CA) que garanticen una eficiencia alta de adsorción: Tanques 1 y 4: 40 g/L de CA; Tanques 2 y 3: 20 g/L de CA.

En cada reactor la pulpa entra en contacto con la solución de NaCN, el oro lixiviado es adsorbido por el CA. La pulpa fluye desde el primer reactor hacia el cuarto, reteniéndose el CA en cada reactor por la criba entretanque. En el cuarto reactor se adiciona el carbón fresco o recuperado y la pulpa agotada, separada del CA por la criba entretanque se envía a la sección de tratamiento de residuales. El trasiego de CA es en sentido contrario al de la pulpa (contracorriente) y se realiza mediante el empleo de elevadores de aire (airlift). La extracción de carbón activado cargado del primer reactor, con ley entre 1,5 y 5 KgAu/tC, se realiza también a través de dos air lifts hacia una criba, donde se separa el carbón pasando este hacia la sección de elución-electrólisis y la pulpa diluida retorna a los reactores de lixiviación.

Proceso de elución-electrólisis:

El método seleccionado para la elución del oro y la plata adsorbido en el carbón, obtenido con el procesamiento de la mena Oro Descanso, es el método de Zadra modificado a presión, este procedimiento consiste en eluir o extraer el complejo de oro y plata adsorbido en el carbón cargado, con empleo de una solución cáustica de cianuro de sodio compuesta por una mezcla de cianuro de sodio al NaCN a 5 – 6 g/L e hidróxido de sodio al 10 – 15 g/L trabajando a una temperatura de 95 -105°C y a presión de 1 bar. El tiempo de elución es 16 -20 horas recirculando la solución cáustica hasta que la concentración de oro se encuentre entre 3-5 ppm, momento en el cual se detiene la recirculación y se drenan las soluciones agotadas. El procedimiento empleado para la elución se ha mejorado con la incorporación de un sistema

de calentadores e intercambiadores que aprovechan el calor generado durante el proceso.

El carbón cargado con oro y plata procedente de la sección III de CIL, se descarga por medio de una bomba (305) a la criba (306) donde se lava con agua fresca y se alimenta por una tolva (500) que descarga por gravedad a la columna de lavado ácido (501) ubicada en esta sección. Una vez llena la columna con la cantidad de carbón a eluir (480 Kg/ día) comienza el proceso de lavado ácido en forma ascendente en tres etapas, calentamiento - lavado, lavado ácido y enjuague - neutralización del carbón cargado. Este proceso se realiza en tres etapas:

1. La primera etapa denominada de calentamiento y lavado,
2. La segunda el lavado ácido propiamente con HCL al 3%.
3. La tercera de enjuague y neutralización del carbón cargado.

El proceso de lavado ácido del carbón se realiza para eliminar las sales de sulfato y carbonato de calcio que se depositan sobre la superficie del carbón ocupando sus sitios activos disponibles, limitando así su capacidad y cinética adsorción (eficiencia de carga) en cada ciclo.

Proceso de fundición del doré:

El Oro se deposita en los cátodos en forma de lodo electrolítico como resultado del proceso de electrólisis. Posteriormente se separa de la matriz de acero inoxidable mediante un lavado con una ducha a presión mediana. El lodo recuperado se introduce en la estufa a 110 ° C por 2 horas, cuando está completamente seco se retira de la estufa hasta que esté a temperatura ambiente haciéndose varias pesadas hasta masa constante, masa con la cual, se homogeniza, y se extrae una muestra, para análisis químico.

Una vez conocidos los resultados del análisis químico, se procede al cálculo de los fundentes necesarios para la mezcla con los lodos catódicos, y someterlos a fundición.

Toda esta mezcla del lodo con los fundentes se deposita en el crisol del horno. El proceso de fundición se realiza a una temperatura de 1150 a 1200° C, este proceso dura alrededor de 2 a 4 horas, en dependencia del peso de mezcla a fundir. En este proceso el oro contenido se funde y se separa de la escoria acompañante, obteniéndose como producto final el metal DORE en formas de lingotes.

El régimen de trabajo de esta área estará en dependencia de las cantidades de lodo electrolítico que se vaya obteniendo proveniente de los cátodos producto del proceso de electrólisis, o de la acumulación de escoria a refundir para recuperar oro, por lo que puede trabajarse en esta área días alternos o las veces por semana que se haga necesario.

Los lodos electrolíticos provenientes de los cátodos han de ser sometidos a fusión para la obtención del DORÉ que se comercializará como producto final.

Los cátodos de las celdas electrolíticas se limpian primero con agua a presión mediana recogiendo los lodos desprendidos en bandejas, situadas debajo del lavador de cátodos. También se someten a secado en estufa y posterior limpieza manual del cátodo para recoger todo el lodo que pueda quedar aun adherido a su superficie.

Los lodos una vez secos se pesan, homogenizan y se muestrean para su análisis químico (Au, Ag, Cu, Pb, SiO₂). A partir de los resultados de este análisis se calculan los reactivos para la fusión mediante el diagrama de fases correspondiente. El color de la mezcla de los lodos y reactivos debe ser lo más homogénea posible, con un color único antes de introducirla al crisol del horno, para su fusión.

En el proceso de fusión se pretenden dos aspectos fundamentales, primeramente, licuar todo el oro y la plata contenidos en la mezcla a fundir y en segundo lugar escorificar aquellas sustancias que no nos interesen. Los reactivos a utilizar han de seleccionarse de una forma apropiada para obtener un lingote lo más puro posible, con una escoria libre de oro.

De los reactivos a emplear el bórax se utiliza como fundente que es el encargado de bajar el punto de fusión del lodo, el carbonato que con la sílice forman silicatos, además de ser un desulfurante efectivo la sílice es una sustancia escorificante, forma la matriz de la escoria que está compuesta por óxidos y silicatos. Para que las sustancias de poco interés para el proceso de obtención del lingote pasen a la escoria han de ser oxidadas primero. Como agente oxidante se utiliza el nitrato sódico o el MnO₂.

En un inicio, la mezcla lodos-fundentes tendrá una relación de 1 a 1. La mezcla fundente inicialmente estará compuesta por 75% de bórax, 10% carbonato de sodio, 5% de nitrato de sodio y 10% de sílice. Posterior a la puesta en marcha

se reajustará la composición de la mezcla de fundentes, de acuerdo al análisis químico del lodo.

La fusión se realiza en un horno basculante con crisol para 300kg y para temperaturas de 1200 °C. El horno está capacitado para alcanzar los 1260 °C de temperatura superior a la de fusión del oro. (P. Fusión Au = 1064 °C). Por ello, la fusión debe realizarse a unos 1150-1200 °C y se da por terminada cuando el oro esté licuado, lo cual en la práctica se determina con una varilla de acero. Una mayor temperatura o un mayor tiempo de fusión provoca el desgaste del crisol.

La colada se efectúa en lingoteras dispuestas en escalera. Una vez que la masa de lodos y fundentes está totalmente licuada se procede a la colada. Se bascula el horno de manera que la materia fundida salga por la boquilla del mismo y vaya cayendo en la primera lingotera, las lingoteras siguientes van llenándose por rebose al llenarse la lingotera que la antecede. Lo primero que sale del horno es la escoria, menos densa que la masa fundida de metales pesados y más viscosa. Cuando termina de salir la escoria comienza a salir el metal licuado de aspecto mucho más fluido y mayor densidad, por lo cual va ocupando el fondo de la lingotera desplazando hacia la superficie la escoria, que va a trasladarse por rebose a las lingoteras siguientes. Así por colada se obtienen normalmente 1 o 2 lingotes de DORÉ en las dos primeras lingoteras, y la escoria emigra hacia las últimas lingoteras.

2.2 Caracterización de los materiales empleados

2.2.1 Caracterización de la mena inicial

La composición química y mineralógica de los principales constituyentes de la mena del yacimiento de lote grande, se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.1. Composición química y mineralógica de la mena de lote grande

Propiedad	Valor y Unidad o Color
Densidad	2.8 kg/m ³
Color	Rojo
Humedad	15 %

Del análisis de la tabla 2.1 se observa el siguiente comportamiento de los elementos principales y las variables que se consideran en el mineral inicial de alimentación a la planta.

2.2.2 Caracterización del agente secador

Para el proceso de secado se utiliza la mezcla gaseosa de aire natural. Esta mezcla posee las características deseadas para el proceso de secado que se analizará en el resto del trabajo, el cual tiene la composición química expuesta en la tabla 2.2

Tabla 2.2. Composición química del aire natural

Elementos	Valor (en por ciento %)
Nitrógeno	78,09
Oxígeno	20,95
Argón	0,93
Dióxido de carbono	0,04
Vapor de agua (al nivel del mar)	1
Vapor de agua (en toda atmósfera)	0,4

2.3 Leyes y ecuaciones empleadas

Para la realización del cálculo de balance de masa y energía del proceso de secado de la mena aurífera se utilizan frecuentemente las leyes siguientes:

2.3.1 Ley de conservación de masa

Plantea que la materia ni se crea, ni se destruye, solo se transforma.

De modo particular se muestra en la expresión siguiente:

$$m_{Mp} = m_{\text{producto}} + m_{\text{acumulado}} \quad (1)$$

donde:

m_{Mp} : masa de la materia prima, kg;

m_{producto} : masa del producto, kg;

$m_{\text{acumulada}}$: masa acumulada durante el proceso, kg.

2.3.2 Ley de conservación de energía

La ley de conservación de energía significa que la energía ni se genera, ni se pierde, solo se transforma.

se caracteriza por la expresión siguiente:

$$\sum Q_{\text{entrada}} = \sum Q_{\text{salida}} + \sum Q_{\text{pérdidas}} \quad (2)$$

donde:

$\sum Q_{\text{entrada}}$: sumatoria de los calores que entran al proceso, kJ;

$\sum Q_{\text{salidas}}$: sumatoria de los calores que salen del proceso, kJ;

$\sum Q_{\text{pérdida}}$: sumatoria de los calores de pérdidas, kJ.

2.4 Metodología para realizar balances de masa y energía del proceso de secado

Los cálculos para los balances de masa y energía para el proceso de secado se apoyaron fundamentalmente en la ley de contenido de los elementos, así como los cálculos estequiométricos, en la ley de conservación de la masa y de energía.

2.4.1 Balance de masa

Uno de los pasos importante de la metodología de balance es la esquematización del sistema material, el cual para el caso del secador rotatorio utilizado para el proceso de secado se representa en la figura siguiente:



Figura 2.4. Representación esquemática del horno para el proceso de secado

En la figura 2.4, se observa que los principales componentes que se alimentan al secador son: la materia prima húmeda y el aire seco como elemento secador y los productos son: el producto mineral seco, el aire húmedo y el polvo.

2.4.1.1 Contenido de humedad del mineral, en base seca

Se describe como la cantidad de humedad sobre la cantidad de sólido seco en función de del porcentaje en peso. la expresión que lo describe se muestra a continuación:

$$H_s = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de mena seca}} = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de mena seca}} \cdot 100 \quad (3)$$

Con el apoyo en los datos de las composiciones química y mineralógica de la mezcla de mineral y del análisis previo del sistema material, se realiza el primer paso del establecimiento de la base de cálculo del balance para 80 000 kg (material que se procesa diariamente en la UEB producciones mineras "Placetas"), a través del cálculo de la composición de los elementos y compuestos de los minerales de mena seca.

2.4.1.2 Cálculo de la humedad del mineral, en base húmeda

Se sobreentiende como el porcentaje en peso de la cantidad de humedad/la cantidad de masa sólido húmedo (Treybal, 1980). se describe por la expresión:

$$H_h = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de mena húmeda}} = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de mena seca} + \text{kg de humedad}} \cdot 100 \quad (4)$$

El mineral alimentado al secador tiene una humedad entre 17 y 30 %, mientras los cálculos anteriores se realizaron para el mineral seco, por tanto, se necesita determinar la masa de agua libre contenida.

2.4.1.3 Balance del proceso de secado

Al cilindro rotatorio entra mineral húmedo, formado por sólido y agua.

Las ecuaciones de conservación de masa son:

La ecuación 5 muestra la variación de la masa sólida del mineral y su dinámica

$$\frac{d(M_{m_2})}{dt} = F_{m_1} - F_{m_2} \quad (5)$$

donde:

M_{m_2} : masa de mineral a la salida del secador, kg

t: tiempo de secado, s

F_{m_1} , F_{m_2} : flujo másico de mineral a la entrada y salida del secador kg/s

El comportamiento del agua y su dinámica se expresan en la ecuación 6

$$\frac{d(M_{am_2})}{dt} = F_{a_1} - F_{a_2} - W \quad (6)$$

donde:

Mam₂: masa de agua contenida en el mineral a la salida del secador, kg

Fa₁, Fa₂: flujo másico de agua contenido en el sólido a la entrada y salida del secador, kg/s

W: flujo másico de agua evaporada, kg/s

El balance de masa del aire seco se describe en la ecuación 7

$$\frac{d(M_{gas_2})}{dt} = Fg_1 - Fg_2 \quad (7)$$

donde:

Mgas₂: masa de gas a la salida del secador, kg

Fg₁, Fg₂: flujo másico de gas a la entrada y salida del secador, kg/s

En la ecuación 8 se expresa el balance de la masa del vapor de agua

$$\frac{d(M_{va_2})}{dt} = Fv_1 - Fv_2 + W \quad (8)$$

donde:

Mva₂: masa de vapor de agua contenida en el gas a la salida del secador, kg

Fv₁, Fv₂: flujo de vapor de agua contenido en el gas a la entrada y salida del secador.

2.4.1.4 Cálculo del polvo

El objetivo del proceso de secado es eliminar cierta cantidad de agua de la mena inicial, es decir, el producto sólido de arrastre con el aire (polvo), sin tener en cuenta la humedad, tiene la misma composición racional que la de la mena seca inicial.

En la industria por lo general el contenido de polvo se determina por la cantidad del mismo retenido en los equipos colectores, con respecto a la cantidad total de los productos sólidos que salen del horno. La composición de polvo se determina a través del contenido de elementos y compuestos en el producto final que contiene el polvo.

Según los datos experimentales obtenidos en la práctica, el arrastre de polvo es de 5 a 10 % respecto a la masa total de los productos sólidos obtenidos del proceso.

2.4.1.5 Cálculo del producto final

La masa del producto final del proceso se determina de la siguiente forma:

$$m_{\text{producto final}} = m_{\text{producto con polvo}} - m_{\text{polvo}} \quad (9)$$

2.4.1.6 Cálculo de gases salientes del secador

El gas tecnológico del proceso de secado no es más que el vapor de agua generado por la eliminación de humedad del mineral inicial.

Una vez determinada la cantidad del vapor de agua que sale del secador finalmente, se integra en la tabla de composición racional real de los productos de combustión.

Obtenida la composición racional de todos los materiales que entran y salen del proceso se confecciona la tabla general del balance de masa y posteriormente se realizan los diagnósticos necesarios para evaluar el problema propuesto.

2.4.2 Balance de energía

Al igual que el balance de masa, el de energía puede considerarse como una técnica fundamental de la ingeniería en general o de la ingeniería metalúrgica en particular. En este caso, para el balance de energía para el proceso de secado se caracteriza a través de la figura 2.5.

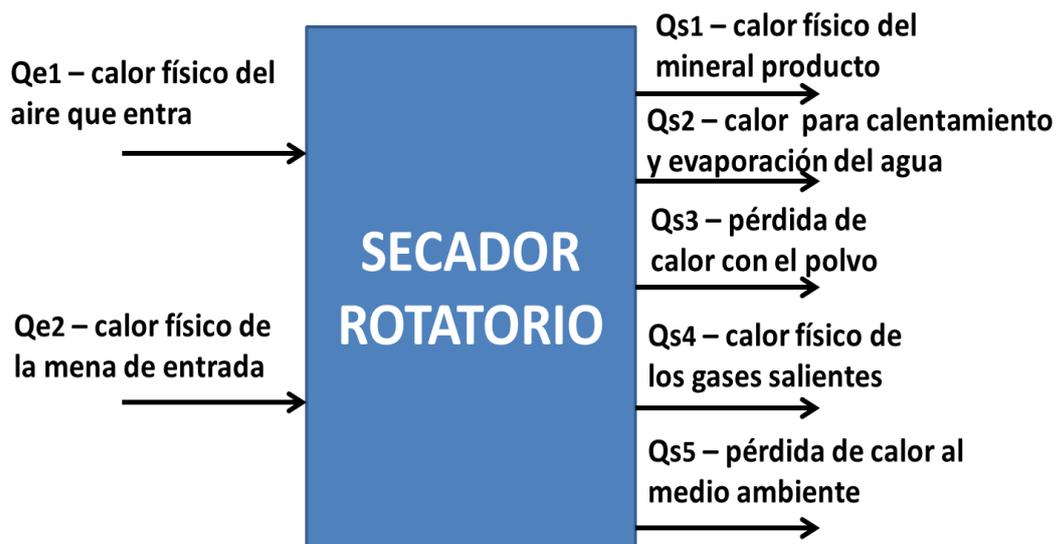


Figura 2.3 Flujos energéticos del proceso de secado

En la figura 2.5 se observa que el sistema energético de este proceso está, fundamentalmente, integrado por los índices de entrada y de salida. El acápite de entrada está compuesto por fuentes de energía como: calor físico del aire para el secado y calor físico del mineral que entra al horno (sin humedad). Mientras que los índices de salida, como calores útiles son: calor físico del mineral producto, el calor para el calentamiento y evaporación del agua, como calores de pérdidas están las pérdidas de calor con el polvo, con los gases salientes y al medio ambiente.

El procedimiento de realizar los cálculos para determinar cada uno de estos calores se muestran a continuación.

2.4.2.1 Calor físico del aire para el secado (Q_{e1})

$$Q_{e1} = L_{\text{pract}} \cdot C_{p\text{aire}} \cdot T_a \quad (10)$$

L_{prac} : cantidad práctica de aire para el secado, m^3/kg ;

$C_{p\text{aire}}$: capacidad calorífica media específica del aire, $\text{kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$;

T_a : temperatura del aire que entra al secador, K

2.4.2.2 Calor físico de la mena que entra al secador (Q_{e2})

$$Q_{e2} = m_{\text{MP}} \cdot C_{p\text{MP}} \cdot T_{\text{MP}} \quad (11)$$

donde:

m_{MP} : masa de la materia prima que entra al secador, kg;

T_{MP} : temperatura de la materia prima que entra al secador, K;

$C_{p\text{MP}}$: capacidad calorífica promedio de la materia prima, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$,

2.4.2.3 Calor físico del mineral producto (Q_{s1})

$$Q_{s1} = m_{\text{producto}} \cdot C_{p\text{producto}} \cdot T_{\text{producto}} \quad (12)$$

donde:

m_{producto} : masa del mineral producto del proceso de secado, kg;

T_{producto} : temperatura del mineral producto que sale del horno de secado, K;

$C_{p\text{producto}}$: capacidad calorífica promedio del producto, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$,

2.4.2.4 Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Q_{s2})

$$Q_{s2} = m_{\text{H}_2\text{O libre}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O líquida}} \cdot (T_{\text{ebullición}} - T_{\text{inicial}}) + m_{\text{H}_2\text{O eliminar}} \cdot \lambda \quad (13)$$

donde:

$m_{\text{H}_2\text{O libre}}$: es la masa de H_2O libre en la mena húmeda inicial, kg;

$m_{\text{H}_2\text{O eliminar}}$: es la masa de H_2O libre a eliminar de la mena inicial, kg;

$C_{p\text{H}_2\text{O líquida}}$: es la capacidad calorífica del H_2O en forma líquida, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$;

$T_{\text{ebullición}}$: temperatura de ebullición del H_2O , según Perry's (7th edition) el valor de esta temperatura es de $100\text{ }^\circ\text{C}$ o 373 K ;

T_{inicial} : temperatura del H_2O en la mena inicial, K;

λ : calor específico de cambio de estado, según Chang y Yuzhaninov, (1997) el valor de este coeficiente es de $2260\text{ kJ}/\text{kg}$.

2.4.2.5 Pérdida de calor con el polvo (Q_{s3})

$$Q_{s3} = m_{\text{polvo}} \cdot C_{p\text{polvo}} \cdot (T_{\text{polvo}} - 273) \quad (14)$$

donde:

m_{polvo} : masa del polvo que sale con gases, kg;

T_{polvo} : temperatura del polvo que sale del horno, K;

$C_{p\text{polvo}}$: capacidad calorífica promedio del polvo, kJ/kg·K,

2.4.2.6 Calor físico de los gases salientes (Q_{S4})

$$Q_{S4} = V_{\text{gases}} \cdot C_{p\text{gases}} \cdot (T_{\text{gases salientes}} - 273) \quad (15)$$

donde:

$C_{p\text{gases}}$: capacidad calorífica del gas, kJ/m³·K, en este caso el gas saliente es el vapor de agua, y su capacidad calorífica es de 1,610 kJ/m³·K, según Chang y Yuzhaninov, (1997).

$T_{\text{gases salientes}}$: temperatura de los gases salientes del secador, K;

V_{gases} : volumen de los gases de salida, m³.

2.4.2.7 Pérdida de calor al medio ambiente (Q_{S5})

Según datos experimentales de otros investigadores, el valor de la cantidad de calor que se pierde al medio ambiente es de 10 a 14 % respecto al calor total de entrada, y se determina por la siguiente fórmula:

$$Q_{S5} = Q_e \cdot \text{PMA}/100 \quad (16)$$

donde:

Q_e : es la cantidad total de calor que entra al proceso, kJ;

PMA: es el porcentaje de pérdida al medio ambiente, %.

La metodología escogida para la realización de los balances de masa y energía, estuvo acorde con las utilizadas por otros investigadores.

2.5 Dimensionamiento del secador

Previamente hay que realizar cálculos a partir de datos experimentales, en el trabajo se realizarán partir del trabajo de otros investigadores.

2.5.1 Cálculo de la velocidad de secado; W_T

Es la pérdida de humedad del sólido en la unidad de tiempo operando en condiciones constantes de secado. Es la sumatoria de las velocidades constante (Crítica) y la decreciente (poscrítica).

$$W_T = W_C + W_D \quad (17)$$

donde:

W_C : velocidad para el periodo constante, kg/m²h;

W_D : velocidad para el periodo decreciente, kg/m²h;

Es necesario efectuar ensayos de velocidad de secado del material para determinar la capacidad del equipo y el tiempo de secado.

2.5.1.1 Velocidad periodo contante; W_c

Se caracteriza porque la velocidad de secado en este periodo es constante. Este periodo va desde la humedad inicial X_0 , hasta la humedad crítica X_c .

$$W_c = \frac{S}{A} \cdot \left[-\frac{\Delta x}{\Delta \theta} \right] \quad (18)$$

donde:

A: superficie expuesta al secado, m^2 ;

S: solido seco, kg;

Δx : variación de humedad en base seca, %;

$\Delta \theta$: variación del tiempo de secado, h;

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el valor de la velocidad de secado desde una humedad inicial hasta la humedad crítica.

2.5.1.2 Velocidad poscritica o decreciente; W_D

En general este período puede dividirse en dos tramos: uno en la que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico (primer período poscrítico), y otro en que no se cumple esta variación lineal (segundo período poscrítico), aunque no puede presentar esta separación neta entre ambos tramos.

$$W_D = \frac{S}{A} \cdot \left[-\frac{X_c - X^*}{\Delta \theta} \right] \quad (19)$$

donde:

X_c : humedad crítica en base seca, %;

X^* : humedad final o de equilibrio, %;

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el valor de la velocidad de secado desde una humedad crítica hasta la humedad final o de equilibrio.

2.5.1.3 Cálculo de tiempo total de secado; θ_T

Es la sumatoria de los tiempos constante (antecrítico) y la decreciente (poscrítico).

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p \quad (20)$$

Donde

θ_a : tiempo para el periodo antecritico o constante, h;

Θ_p : tiempo para el periodo poscritico o decreciente, h;

2.5.1.4 Cálculo del tiempo de secado en el periodo constante; θ_a

Es el tiempo que se determina durante el periodo de velocidad constante.

$$\theta_a = \frac{S}{A} \cdot \left[\frac{X_i - X_c}{W_c} \right] \quad (21)$$

donde:

θ_a : tiempo de secado antecritico, h;

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el tiempo durante el periodo de velocidad constante.

2.5.1.5 Cálculo del tiempo de secado poscritico; θ_p

Es el tiempo que se determina durante el periodo de velocidad decreciente.

El Método Analítico si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final.

$$\theta_p = \frac{S}{A} \cdot \left[\frac{X_c - X_f}{W_c - W_D} \right] \cdot \ln \frac{W_c}{W_D} \quad (22)$$

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el tiempo durante el periodo de velocidad decreciente.

2.6 Cálculo del volumen del secador

Para un buen dimensionamiento, la cantidad de material debe ser alrededor del 7 al 8% del volumen del secador o hasta 15 % en ciertos casos.

Para el diseño del secador rotatorio, donde el contenido de humedad inicialmente es alto ($X_{\text{inicial}} \gg 1$) el volumen se determina por:

$$V = \frac{\Theta \cdot m_{\text{inicial}}}{0,075 \cdot \rho} \quad (23)$$

donde

V: Volumen total del secador, m³

Θ : Tiempo de residencia del producto, s

m_{inicial} : Flujo de entrada del material al secador, kg/s.

ρ : Densidad del material húmedo, kg/m³.

X_{inicial} : humedad inicial del material en base seca, kg H₂O/kg seco.

2.7 Cálculo del diámetro del secador

La máxima velocidad másica de gas permisible es usualmente el valor en cual ocurre el arrastre de partículas. En base a las temperaturas del gas de entrada y salida, el flujo volumétrico de gas puede ser obtenido a través de los balances de masa y de calor.

Entonces, si se asume que el área transversal de flujo disponible para el gas es 85 % del área total, el diámetro del secador puede ser calculado por la ecuación 24:

$$D_{\text{secador}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{0,85 \cdot \pi \cdot F}} \quad (24)$$

donde:

D: diámetro del secador, m

G: Velocidad másica del aire, kg/s

F: Flujo másico por unidad superficial que ocurre mínimo arrastre del material, kg/s m²

Para el secador rotatorio el aire no tiene función de arrastre, ya el material avanza por gravedad por la superficie del cilindro. Se cumple para materiales no pegajosos, como es el caso del mineral aurífero.

2.8 Cálculo de la longitud del secador.

La razón entre la longitud y el diámetro de un secador rotatorio directo común puede ser calculada por la ecuación 25.

$$\frac{L}{D} = R \quad (25)$$

donde:

L: longitud del secador, m

R: razón del diámetro y longitud, L/D

Para un secador rotatorio directo común, la ecuación 19 es útil en estimar este parámetro. Definido la razón L/D y el diámetro por lo que la longitud se calcula:

2.8.1 Potencia requerida para rotar el secador

La potencia requerida para hacer rotar la carcasa del secador está dada por la ecuación 26.

$$W = 0,45 \cdot W_t \cdot V_r + 0,12 \cdot B \cdot D \cdot f \cdot N \quad (26)$$

donde:

W: Potencia, kW.

W_t: Masa total de las partes de rotación del secador., kg.

V_r: Velocidad periférica de los rodillos, m/s.

B: Masa de material dentro del secador, kg.

D: Diámetro del secador, m.

f: número promedio de elevadores por revolución de la carcasa del secador.

N: Velocidad de rotación, rpm.

Para hallar la potencia requerida del motor se debe proceder a calcular los siguientes datos:

2.8.2 Cálculo de las revoluciones por minuto del cilindro

De la tabla 3 se tiene que el parámetro rpm*D está normalmente entre 7 y 10. Escogiendo el límite superior se tiene que las rpm del cilindro rotatorio se calculan como:

$$\text{rpm}_{\text{del cilindro rotatorio}} = \frac{10}{D} \quad (27)$$

2.9 Calculo de la masa de las partes en movimiento.

2.9.1 Masa del material dentro del secador

Al secador entran 800 kg/h de material, y salen 217.4 kg/h de producto total, tomando en cuenta q la rapidez del secado es constante a lo largo de la malla, se puede calcular la masa total del material dentro del secador por la ecuación 28

$$\text{Carga del secador real} = \frac{(\dot{m}_{\text{entrada}} + \dot{m}_{\text{salida}})}{2} \cdot \theta \quad (28)$$

donde:

\dot{m}_{entrada} : flujo másico total de entrada de material al secador, kg/h.

\dot{m}_{salida} : flujo másico total de salida del producto, kg/h.

θ : tiempo de residencia del material, h.

2.9.2 Masa del cilindro

El cilindro hecho con acero inoxidable, tiene una masa de 7,854 kg por metro cuadrado.

$$m_{\text{cilindro}} = P_{\text{cilindro}} \cdot \text{espesor} \cdot k_{\text{acero}} \cdot L_{\text{cilindro}} \quad (29)$$

donde:

P_{cilindro} : perímetro del cilindro, m.

2.9.3 Masa de elevadores del producto

Los elevadores dejan caer el producto en cascada con el fin de aumentar el coeficiente de convección entre el aire caliente y el producto. Son hechos de plancha de acero inoxidable doblada. Su masa es determinada por la expresión 30.

$$m_{\text{elevadores}} = n_{\text{elevadores}} \cdot V_{\text{elevadores}} \cdot k_{\text{acero}} \quad (30)$$

donde:

$n_{\text{elevadores}}$: cantidad de elevadores

$V_{elevadores}$: volumen de elevadores, m^2

k_{acero} : grosor de la chapa de acero kg/m^2

$$M_T = \text{Carga del secador real} + \text{masa del cilindro} + \text{masa de elevadores} \quad (31)$$

2.9.4 Cálculo de la velocidad periférica de los rodillos

Tomando como base funcionamiento sin deslizamiento, la velocidad periférica de los rodillos es aproximadamente la misma que para el cilindro rotatorio, y se la calcula como:

$$V_r = w \cdot r \quad (32)$$

donde:

V_r : Velocidad periférica de los rodillos, m/s

w : Velocidad angular del cilindro (rad/s)

r : radio del cilindro, m

2.9.5 Cálculo del motor de giro del cilindro

La selección del motor dependerá del conocimiento de la cantidad de inercia que debe vencer para que produzca el momento necesario y del cilindro de secado al momento de girar (Kraige, 1996).

Las siguientes ecuaciones propuestas por Kraige permitirán conocer la potencia requerida para girar el cilindro, y para determinar se debe realizar los siguientes cálculos:

2.9.6 Inercia del cilindro de secado

La inercia del cilindro de secado se obtendrá de la siguiente ecuación cuya geometría es un cilindro circular

$$I_{cilindro} = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho_{SAE36} \cdot (D_{ext}^4 - D_{int}^4)}{64} \quad (33)$$

donde

L = longitud del cilindro $0,86 \text{ m}$

ρ_{sae36} = densidad del acero, SAE 36= 7832 kg/m^3

$D_{ext.}$ = diámetro externo del cilindro de secado, m

$D_{int.}$ = diámetro interno del cilindro de secado, m

Las condiciones con las cuales se realizan los cálculos son en casos extremos con la finalidad de encontrar un factor de seguridad que de un buen funcionamiento y no existan fallas.

En este caso se calcula cuando el cilindro este en reposo, ya que ahí el motor requerirá la mayor potencia para el arranque.

Basado en las recomendaciones del libro de Nohebel, 1979, se considera que solo el 40 % del perímetro está ocupado por el mineral, se obtiene la ecuación:

$$P = 0,4 \cdot \pi \cdot D_{int} \quad (34)$$

donde

P = perímetro ocupado por el mineral, m

D_{int} = diámetro interno del cilindro del secado, 0,64 m

Teniendo calculado el perímetro se podrá determinar el ángulo alfa del segmento circular.

$$2\beta = \frac{P \cdot 360}{\pi \cdot D_{int}} \quad (35)$$

Conociendo el ángulo se puede calcular el momento de inercia del área que ocupa el mineral con respecto al eje, este momento de inercia se denomina momento polar de inercia (Kraige, 1996).

$$I_p = I_x + I_y \quad (36)$$

$$I_x = \frac{r^4}{4} \cdot (\beta - \text{sen}\beta \cdot \text{cos}\beta + \text{sen}^3\beta \cdot \text{cos}\beta) \quad (37)$$

$$I_y = \frac{r^4}{12} \cdot (3 \cdot \beta - 3 \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{cos}\beta + 2 \cdot \text{sen}^3\beta \cdot \text{cos}\beta) \quad (38)$$

Obteniendo el momento polar de inercia, se calcula la inercia que ocupa el mineral (Kraige, 1996).

$$I_{\text{mineral}} = \rho_{\text{mineral}} \cdot L \cdot I_p \quad (39)$$

Para luego obtener la sumatoria de las inercias (Kraige, 1996):

$$\sum I = I_{\text{cilindro}} + I_{\text{mineral}} \quad (40)$$

Con la inercia total se podrá determinar el momento que realiza el motor sobre el sistema de rotación (Kraige, 1996)

$$M_T - M_o = \sum I \cdot \alpha \quad (41)$$

M_T = momento de torsión que realiza el motor al sistema, N·m

M_o = momento opuesto a causa del deslizamiento del mineral, N·m

$$M_o = m \cdot g \cdot r_{int} \quad (42)$$

donde:

m: masa del mineral, kg

g: gravedad, m/s²

r_{int} : radio interno del cilindro, m

Para calcular la aceleración angular se toma en cuenta la velocidad angular.

$$\alpha = V_a \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad (43)$$

donde:

V_a : velocidad angular, rpm

De donde se obtiene que la potencia teórica del motor es de (Kraige, 1996):

$$P_{\text{motor}} = M_T \cdot n_2 \quad (44)$$

donde:

P_{motor} : potencia del motor, W

M_T : momento torsor o par de torsión

n_2 : velocidad angular del cilindro de secado, rad/seg

2.10 Cálculo e instalación del ventilador

Por ser el dispositivo encargado de entregar el aire a las condiciones requeridas en el proceso, el ventilador es muy importante en la selección, se debe tener en cuenta el caudal del aire necesario. (CENICAFE, 2012)

Para nuestro diseño es adecuado utilizar un ventilador centrífugo, según Nonhebel, 1979,

Con estos datos se iniciaron los cálculos de flujo de aire a impulsar:

$$Q = V \cdot A \quad (45)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int}}^2 \quad (46)$$

donde:

V : velocidad máxima del aire en el interior del secador, m/s

A : sección transversal del cilindro secador, m^2

2.11 Diseño e instalación del intercambiador de calor

El tipo de intercambiador de calor que se diseñará es un aéreo enfriador, el cual se caracteriza por tener haces de tubos de flujo cruzado dispuestos en forma lineal o triangular, con presencia de aletas.

Ya que el caudal del aire es una variable dependiente del secado, a partir de este dato se obtendrá el calor requerido para calentarlo a la temperatura deseada por medio de:

$$Q_{\text{aire}} = m_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot \Delta T \quad (47)$$

A partir del calor requerido para calentar el aire se calculará el caudal de vapor necesario, se asumirá que a la salida del intercambiador saldrá todo el condensado por lo cual se utilizará la ecuación de calor sensible.

$$m_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{C_{p_{\text{aire}}} \cdot \Delta T} \quad (48)$$

El número de filas de tubos se asocia con la aproximación de temperaturas entre el aire y el vapor, definiéndolo como:

$$Z = \frac{T_{\text{entrada del vapor}} - T_{\text{salida del vapor}}}{T_{\text{entrada del vapor}} - T_{\text{entrada del aire}}} \quad (49)$$

Tabla 2.4 Valores de Z

Z	n _f = números de filas	V _F (m/s)
0,4 ó menos	4	3,3
0,5	5	3
0,6	6	2,8
0,8 a 1	8 a 10	2 a 2,4

Fuentes: (Cao, 2004)

A partir del caudal del aire y la velocidad frontal se calculará el área frontal.

$$A_{\text{frontal}} = \frac{m_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}} \cdot V_{\text{Frontal}}} \quad (50)$$

Se seleccionará el valor de w (ancho aletas) o L (longitud de los tubos), según convenga al cálculo de diseño, (Cao, 2004).

$$w = \frac{A_{\text{Frontal}}}{\text{Longitud de tubos}} \quad (51)$$

Para comprobar que el valor de W es adecuado se utilizarán las ecuaciones de convección, por tanto, se procederá a calcular el MLDT.

$$\text{MLDT} = \frac{(T_{\text{evapor}} - T_{\text{saire}}) - (T_{\text{svapor}} - T_{\text{eaire}})}{\ln \frac{T_{\text{evapor}} - T_{\text{saire}}}{T_{\text{svapor}} - T_{\text{eaire}}}} \quad (52)$$

El valor del coeficiente global de transferencia de calor del vapor de agua se busca en la tabla 5 (Cao, 2004).

Tabla 2.4 Valores comunes de transferencia de calor en aereoenfriadores

Condensación (W/m ² K)		Enfriamiento de gases (W/m ² K)		Enfriamiento de líquidos (W/m ² K)	
Regenerador de aminas	570 - 670	Aire o gas de combustión @ 50 psig Δp= 2 psig	60	Agua de enfriamiento de máquinas	740 - 900
Amoniaco	600 - 700	Aire o gas de combustión @ 100 psig Δp= 2 psig	112	Fuel oil	115 - 170
Refrigerante 12	420 - 500	Aire o gas de combustión @ 100 psig Δp= 5 psig	170	Líquidos de reforming o platforming	480
Nafta pesada	400 - 500	Hidrocarburos gaseosos @ 15-50 psig Δp= 1 psig	170 - 220	Gas oil liviano	450 - 550
Gasolina liviana	540	Corriente del amoniaco	500 - 600	Hidrocarburos livianos	510 - 680
Hidrocarburos livianos	540 - 600	Hidrocarburos gaseosos @ 15-50 psig Δp= 1 psi	170 - 220	Nafta liviana	510
Nafta liviana	450 - 550	Hidrocarburos gaseosos @ 50-250 psig Δp= 3 psi	280 - 340	Agua de proceso	680 - 820
Efluente de reactores reforming, platforming	450 - 550	Hidrocarburos gaseosos @ 250-1500 psig Δp= 5 psi	400 - 500	Residuo	60 - 120
Vapor de agua	800 - 1200			Alquitrán	30 - 60

Fuente: (Cao, 2004)

y el área de transferencia de calor se determina por la expresión 53:

$$A = \frac{Q_{aire}}{U_{MLDT}} \quad (53)$$

A partir de esta área se calculará el número de columnas de tubos por la ecuación 54:

$$N = \frac{A}{\pi \cdot D_{ext} \cdot L} \quad (54)$$

Con este valor se obtendrá el número de tubos totales.

$$n_{ft} = \frac{N}{n_f} \quad (55)$$

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se contabiliza mediante la aplicación del análisis de los balances de masa y energía, alcanzar en los cálculos el mayor acercamiento a las condiciones reales de explotación de la sección de secado de mineral de la UEB producciones mineras “Placetas”.

3.1 Proceso de secado

3.1.1 Resultados del balance de masa para el proceso de secado

Los cálculos del balance de masa para el proceso de secado se realizaron para 80 000 kg de mena alimentada por día (todo el análisis será realizado en función de este valor).

3.1.1.1 Cálculo de la mena seca

Al emplear el procedimiento planteado en el epígrafe 2.4.1.1, se realizaron los cálculos para determinar el contenido de humedad por la expresión 3, como sigue:

Se conoce que el mineral contiene 18 400 kg de H₂O

$$H_{se} = \frac{18\,400 \text{ kg humedad}}{61\,600 \text{ kg de mena seca}}$$

$$H_{se} = 0,29$$

Se desea disminuir la humedad contenida en el mineral producto a un 7 %

Por eso aplicando la misma expresión:

$$H_{ss} = \frac{5\,600 \text{ kg humedad}}{61\,600 \text{ kg de mena seca}}$$

$$H_{ss} = 0,09$$

3.1.1.2 Cálculo de la mena húmeda

Una vez obtenido los resultados de la mena seca, se determinan la cantidad de agua libre que se introduce con el mineral por la expresión 4.

$$H_{he} = \frac{18\,400 \text{ kg humedad}}{80\,000 \text{ kg de mena seca}}$$

$$H_{he} = 0,23$$

De igual manera para el producto de salida se tiene que:

$$H_{he} = \frac{5\,600 \text{ kg humedad}}{80\,000 \text{ kg de mena seca}}$$

$$H_{he} = 0,07$$

Estos resultados muestran que el porcentaje del agua libre en la mena es de 23 %, considerada la humedad inicial de la mena procesada, y que la salida del producto es de 7 %.

3.1.2 Balance del proceso de secado

Considerando que se desea disminuir la humedad del material a un 7 %, por la ecuación 5, se obtiene que la variación de mena sólida es:

$$dMm_2 = 80\,000 \text{ kg de mineral entrada/día} - 67\,200 \text{ kg de mineral salida/día}$$

$$dMm_2 = 12\,800 \text{ kg/día}$$

Para el caso del agua el comportamiento estuvo regido por la ecuación 6.

$$dMa_2 = 18\,400 \text{ kg de agua entrada/día} - 5\,600 \text{ kg de agua salida/día}$$

$$dMa_2 = 12\,800 \text{ kg/día}$$

El balance de masa del aire seco se describe en la ecuación 7, donde como resultado se obtiene que:

Considerando que la masa de aire seco es diez veces la masa mineral (estudios precedentes)

$$dMaire_2 = 240\,000 \text{ kg de aire/día} - 252\,800 \text{ kg de aire salida/día}$$

$$d(Maire_2) = 12\,800 \text{ kg/día}$$

Por medio de la ecuación 8 se expresa el balance de la masa del vapor de agua:

Teniendo en cuenta que el aire que se añade al proceso tiene un 3 % de humedad, por tanto:

$$dMvapor_2 = 7\,200 \text{ kg de vapor/día} - 20\,000 \text{ kg de vapor salida/día}$$

$$d(Mvapor_2) = 12\,800 \text{ kg/día}$$

3.1.3 Cálculo del polvo

Según los datos experimentales obtenidos en la práctica, el arrastre de polvo es de 5 a 10 % respecto a la masa total de los productos sólidos obtenidos del proceso. Por tanto, tomando que % de arrastre es de 10 % entonces:

$$m_{polvo} = 67\,200 \text{ kg de mineral salida} \cdot 10\% \text{ arrastre}$$

$$m_{polvo} = 6\,720 \text{ kg de polvo}$$

por tanto, por la expresión 9 la masa de producto final sería:

$$m_{producto\ final} = 67\,200 \text{ kg de mineral salida} - 6\,720 \text{ kg de polvo}$$

$$m_{producto\ final} = 60\,480 \text{ kg de mineral}$$

Los resultados de los cálculos realizados se muestran en la tabla 3.1 de balance de masa del proceso de secado:

Tabla 3.1 Balance de masa del proceso de secado

	Mineral	Humedad	Aire	Total	%
ENTRADA					
Mineral	61 600	18 400		80 000	25,00
Aire		7 200	232 800	240 000	75,00
Total	61 600	25 600	232 800	320 000	100,00
%	19,25	8,00	72,75	100	
SALIDA					
Mineral	55 440	5 040		60 480	18,90
Polvo	6 160	560		6 720	2,10
Aire		20 000	232 800	252 800	79,00
Total	61 600	25 600	232 800	320 000	100,00
%	19,25	8,00	72,75	100,00	

3.2 Resultados del balance de energía para el proceso de secado

Para el desarrollo del balance de energía, es necesario definir las temperaturas a las cuales los flujos entran y salen del horno de secado, así como las capacidades caloríficas de cada material o producto empleado. Ver tabla 3.2

Tabla 3.2 Parámetros referenciales para el balance térmico.

Parámetros	valor
Temperatura de entrada del mineral, °C	25
Temperatura de salida del mineral, °C	60
Temperatura de entrada del aire, °C	160
Temperatura de salida del aire, °C	80
Capacidad calorífica del mineral, kJ/kg·K	1.288
Capacidad calorífica del aire, kJ/kg·K	1,215
Capacidad calorífica del agua, kJ/kg·K	41,868
Capacidad calorífica del vapor de agua, kJ/kg·K	1,890
Calor específico de cambio de estado, kJ/kg	2 260

Los cálculos del balance térmico están basados en las expresiones matemáticas planteadas en el capítulo 2, en el epígrafe 2.4.2

Calor físico del aire para el secado (Qe₁)

$$Q_{e_1} = 232\,800 \text{ kg de aire} \cdot 0.2409 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \cdot 4,19 \cdot 160 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_{e_1} = 37\,456\,588,8 \text{ kJ}$$

Calor físico de la mena que entra al secador (Qe₂)

$$Q_{e_2} = 61\,600 \cdot 1,288 \text{ kJ/kg K} \cdot 298$$

$$Q_{e_2} = 23\,643\,558,4 \text{ kJ}$$

Calor físico del mineral producto (Qs₁)

$$Q_{s_1} = 55\,440 \cdot 1.288 \text{ kJ/kg K} \cdot (333 - 298)$$

$$Q_{s_1} = 2.499.235.2 \text{ kJ}$$

Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Qs₂)

$$Q_{s_2} = 18\,400 \cdot 4,19 \text{ kJ/kg K} \cdot (373 - 298) + 12\,800 \cdot 2\,260$$

$$Q_{s_2} = 115\,533,600 + 28\,928$$

$$Q_{s_2} = 34\,710\,200 \text{ kJ}$$

Pérdida de calor con el polvo (Qs₃)

$$Q_{s_3} = 6\,160 \cdot 1,288 \text{ kJ/kg K} \cdot (333 - 273)$$

$$Q_{s_3} = 476\,044,8 \text{ kJ}$$

Calor físico de los gases salientes (Qs₄)

$$Q_{s_4} = 252\,800 \cdot 0,95 \text{ kJ/kg K} \cdot (353 - 273)$$

$$Q_{s_4} = 19\,212\,800 \text{ kJ}$$

Pérdida de calor al medio ambiente (Qs₅)

Según datos experimentales de otros investigadores, el valor de la cantidad de calor que se pierde al medio ambiente es de 10 a 14 % respecto al calor total de entrada, cuando las temperaturas son elevadas, y de 5 a 10 % cuando son bajas temperaturas y se determina por la fórmula 16:

$$Q_{s_5} = 61\,100\,147,2 \cdot 6/100$$

$$Q_{s_5} = 6\,666\,008,83 \text{ kJ}$$

La metodología escogida para la realización de los balances de masa y energía, estuvo acorde con las utilizadas por otros investigadores.

Después de realizar los cálculos del balance de energía, se integran los resultados en la siguiente tabla general del balance de energía.

Tabla 3.3 Resultados del balance de energía para el proceso de secado

INDICADORES	VALOR (kJ/kgK)	%
Calor físico del aire para el secado (Qe ₁)	37 456 588,80	61,30
Calor físico de la mena que entra al secador	23 643 558,40	38,70
TOTAL	61 100 147,20	100
Calor físico del mineral producto (Qs ₁)	2 499 235,20	4,09
Calor para el calentamiento y evaporación del agua (Qs ₂)	34710200,00	56,81
Pérdida de calor con el polvo (Qs ₃)	476 044,80	0,78
Calor físico de los gases salientes (Qs ₄)	19 212 800,00	31,44
Pérdida de calor al medio ambiente (Qs ₅)	3 666 008,83	6,00
Otras perdidas	535 858,37	0,88
TOTAL	61 100 147,20	100

Como resultados del análisis de los procesos energéticos que ocurren en el horno de secado, se comprobó que el calor físico del aire caliente, es el que más aporte de calor de entrada produce en secadero, con 61,30 % y luego el calor generado por la materia prima.

3.3 Dimensionamiento del secador

Velocidad periodo contante; W_c

A partir de datos seleccionados de investigaciones realizadas en la empresa, aplicando la expresión 18 y conociendo que:

la humedad inicial X_i = 0,27

la humedad crítica X_c = 0,12

sólido seco S = 61 600 kg

tiempo a humedad inicial θ_i = 0,06 h

tiempo a humedad crítica θ_c = 0,22

superficie expuesta al secado A = 25 m²

$$W_c = \frac{61\,600\text{ kg}}{25\text{ m}^2} \cdot \left[-\frac{0,12 - 0,27}{0,22 - 0,06} \right]$$

$$W_c = 2\,310\text{ kg/m}^2\text{h}$$

Por lo que el tiempo del periodo constante se determina por la expresión 21

$$\theta_a = \frac{61\,600\text{ kg}}{25\text{ m}^2} \cdot \left[\frac{0,12 - 0,27}{2\,310\text{ kg/m}^2\text{h}} \right]$$

$$\Theta_a = 0,16 \text{ h} = 9,6 \text{ min} \approx 10 \text{ min}$$

Velocidad poscrítica o decreciente; W_D

Para encontrar la velocidad decreciente se utiliza la expresión 19, Para el caso se debe conocer de antemano la información siguiente:

la humedad final $X^* = 0,07$

tiempo a humedad crítica $\theta_c = 0,22$

tiempo a humedad final $\theta^* = 0,45 \text{ h}$

$$W_D = \frac{61\,600 \text{ kg}}{25 \text{ m}^2} \cdot \left[-\frac{0,12 - 0,07}{0,22 - 0,45} \right]$$

$$W_D = 770 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Y el tiempo de secado poscrítico es determinado por la expresión 22.

$$\theta_p = \frac{61\,600 \text{ kg}}{25 \text{ m}^2} \cdot \left[\frac{0,12 - 0,07}{2\,310 \text{ kg/m}^2\text{h} - 770 \text{ kg/m}^2\text{h}} \right] \cdot \ln \frac{2\,310 \text{ kg/m}^2\text{h}}{770 \text{ kg/m}^2\text{h}}$$

$$\Theta_p = 0,105 \text{ h} = 6,3 \text{ min} \approx 6,5 \text{ min}$$

Cálculo de la velocidad de secado; W_T

Por la expresión 17 se determina la velocidad total de secado:

$$W_T = 2\,310 \text{ kg/m}^2\text{h} + 770 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$W_T = 3\,080 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

Y el tiempo total de secado es la sumatoria de los tiempos constante (antecrítico) y la decreciente (poscrítico), por la expresión 20 se calcula el tiempo total de secado.

$$\theta_T = 0,16 \text{ h} + 0,105 \text{ h} = 9,6 \text{ min} + 6,3 \text{ min} \approx 10 \text{ min} + 6,5 \text{ min}$$

$$\Theta_T = 0,265 \text{ h} = 15,9 \text{ min} \approx 16,5 \text{ min}$$

3.4 Cálculo del volumen del secador

Para un buen dimensionamiento, la cantidad de material debe ser alrededor del 7 al 8 % del volumen del secador, se asume un valor de 7,0 %, además se considera que el tiempo de residencia del mineral en el equipo es del triple del calculado para tener la reserva disponible según demanda del proceso de trituración, se asumirán 40 minutos, equivalente a 2 400 segundos, el volumen se determina por la expresión 23:

$$V = \frac{3\,600 \text{ s} \cdot 0,93 \text{ kg/s}}{0,07 \cdot 2\,860 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 16,72 \approx 18 \text{ m}^3 \text{ (estandarizando)}$$

3.5 Cálculo del diámetro del secador

Asumiendo que el área transversal de flujo disponible para el gas es 85 % del área total, con un flujo másico por unidad de superficie de 6 kg/s m² el diámetro del secador puede ser calculado por la ecuación 24:

$$D_{\text{secador}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10}{0,85 \cdot \pi \cdot 6}}$$

$D_{\text{secador}} = 1,58 \text{ m} \approx 1.50 \text{ m}$ estandarizando valores

Para el secador rotatorio el aire no tiene función de arrastre, ya el material avanza por gravedad por la superficie del cilindro.

3.6 Cálculo de la longitud del secador.

La longitud del secador puede ser determinada por las relaciones trigonométricas de un cilindro donde:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi r^2 L$$

Despejando L sería

$$L_{\text{cilindro}} = \frac{V_{\text{cilindro}}}{\pi r^2}$$

Sustituyendo:

$$L_{\text{cilindro}} = \frac{18 \text{ m}^3}{\pi \left(\frac{1,5 \text{ m}}{2}\right)^2}$$

$$L_{\text{cilindro}} = 10 \text{ m}$$

3.6.1 Potencia requerida para rotar el secador

Primeramente, deben ser calculados las revoluciones por minuto del cilindro.

De la tabla 3 se tiene que el parámetro rpm*D está normalmente entre 7 y 10.

Escogiendo el límite superior se tiene que las rpm del cilindro rotatorio se calculan como:

$$\text{rpm}_{\text{del cilindro rotatorio}} = \frac{10}{1,5}$$

las revoluciones por minuto del secador serán de 6,66 rpm.

Posteriormente se calcula de la masa de las partes en movimiento.

3.6.2 Masa del material dentro del secador

Al secador entran 3333,33 kg/h de material, y salen 2906,66 kg/h de producto total, tomando en cuenta q la rapidez del secado es constante a lo largo del cilindro, se puede calcular la masa total del material dentro del secador por la ecuación 28:

$$\text{Carga del secador real} = \frac{(3333,33 + 2906,66)}{2} \cdot 1 \text{ h}$$

La carga total del secador es de 3 119, 995 kg

3.6.3 Masa del cilindro

El cilindro hecho con acero inoxidable, tiene una masa de 7,854 kg por metro cuadrado, con un espesor de 1 mm, en el caso particular se trabajará con chapas de 20 mm. Mediante la expresión 29 se calcula la masa del cilindro

$$m_{\text{cilindro}} = 4,7124 \text{ m} \cdot 7,854 \text{ kg/m}^2 \cdot 5 \text{ m} \cdot 10 \text{ mm}$$

$$m_{\text{cilindro}} = 7 402,24 \text{ kg}$$

3.7 Masa de elevadores del producto

La masa de los elevadores es determinada por la expresión 30.

Los elevadores están constituidos de chapas de acero de 10 mm, con una longitud y ancho de 0,2 m, distribuidos en el interior del cilindro en forma de espiral soldado en la pared del mismo.

$$m_{\text{elevadores}} = 80 \cdot (0,20 \cdot 0,20) \cdot 7,854 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$m_{\text{elevadores}} = 502,65 \text{ kg}$$

Entonces la masa total de las partes rotante se calcula por la expresión:

$$M_T = 3 119, 995 \text{ kg} + 7 402,24 \text{ kg} + 502,65 \text{ kg}$$

$$M_T = 11 025 \text{ kg}$$

3.7.1 Cálculo de la velocidad periférica de los rodillos

Tomando como base el funcionamiento sin deslizamiento, la velocidad periférica de los rodillos es aproximadamente la misma que para el cilindro rotatorio, y se la calcula como: 0,0166

$$V_r = 0,666 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,75 \text{ m}$$

$$V_r = 0,4995 \text{ rpm}$$

Se deberá tener en cuenta que es la energía que debe ser transmitida al sistema giratorio, por lo que la potencia del motor debe ser mayor para compensar las pérdidas debido a la transmisión que se utilice en este caso.

A partir de los resultados obtenidos se determina entonces la potencia requerida para rotar el cilindro secador, empleando la ecuación 32.

$$W = 0,45 \cdot 7 904,89 \text{ kg} \cdot 0,4995 \text{ rpm} + 0,12 \cdot 3 119, 995 \text{ kg} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 80 \cdot 6,6 \text{ rpm}$$

$$W = 298 301,15 \text{ W} = 298,301 \text{ kW}$$

3.7.2 Cálculo del motor de giro del cilindro

Se parte de determinar la Inercia del cilindro de secado por la expresión 33. el cilindro será construido de chapas de acero SAE 36, de 10 mm de espesor y una densidad de 7832 kg/m³

$$I_{\text{cilindro}} = \frac{\pi \cdot 10 \text{ m} \cdot 7832 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,54 \text{ m}^4 - 1,5 \text{ m}^4)}{64}$$

$$I_{\text{cilindro}} = 153,78$$

El perímetro efectivo será el 40 % que está ocupado por el mineral, por tanto, empleando la expresión 34, este puede ser determinado como sigue:

$$P = 0,4 \cdot \pi \cdot 1,5 \text{ m}$$

$$P = 1,885 \text{ m}$$

Calculado el perímetro puede ser determinado el ángulo alfa del segmento circular por la ecuación 35.

$$2\beta = \frac{1,885 \text{ m} \cdot 360}{\pi \cdot 1,5 \text{ m}}$$

$$\beta = 72^\circ$$

Con las expresiones 36, 37 y 38, se determina el momento polar de inercia como sigue:

$$I_x = \frac{0,75^4}{4} \cdot (72 - \sin 72 \cdot \cos 72 + \sin^3 72 \cdot \cos 72)$$

$$I_x = 0,079 \cdot (72 - 0,95 \cdot 0,31 + 0,86 \cdot 0,31)$$

$$I_x = 5,68$$

$$I_y = \frac{0,75^4}{12} \cdot (3 \cdot 72 - 3 \cdot \sin 72 \cdot \cos 72 + 2 \cdot \sin^3 72 \cdot \cos 72)$$

$$I_y = 0,266 \cdot (3 \cdot 72 - 3 \cdot 0,95 \cdot 0,31 + 2 \cdot 0,86 \cdot 0,31)$$

$$I_y = 57,36$$

$$I_p = 5,68 + 57,36$$

$$I_p = 63,04$$

Entonces la inercia del mineral sería calculada por la ecuación 39

$$I_{\text{mineral}} = 2860 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \cdot 63,04$$

$$I_{\text{mineral}} = 1\ 802\ 944$$

Por tanto, la inercia del sistema sería la sumatoria de las inercias calculadas del cilindro y el mineral, por la ecuación 40.

$$\sum I = 529,484 + 901\ 472$$

$$\sum I = 1803\,097,97$$

Y el momento que realiza el motor sobre el sistema de rotación sería determinado por la expresión 41, pero previamente es preciso determinar algunos factores que la componen.

El momento opuesto a causa del deslizamiento del mineral, se determina por la ecuación 42

$$M_o = 0,926 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,75 \text{ m}$$

$$M_o = 6,813 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La aceleración angular se determina sabiendo que la velocidad angular es de 6,6 rpm, por la ecuación 43, como sigue:

$$\alpha = 6,6 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

$$\alpha = 0,69$$

Ahora aplicando la expresión 41 se determina el momento de torsión que realiza el motor al sistema

$$M_T - 6,813 = 902\,001,484 \cdot 0,69$$

$$M_T = 622\,387,84 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Finalmente, por la expresión 44 se determina la potencia teórica del motor:

$$P_{\text{motor}} = 622\,387,84 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,6864 \text{ rad/s}$$

$$P_{\text{motor}} = 427\,207,03 \text{ W} = 427,207 \text{ kW}$$

El motor produce una potencia adecuada para vencer las fuerzas rotacionales del cilindro secador.

3.8 Cálculo e instalación del ventilador

Con las expresiones matemáticas 45, 46, 47, 48 y 49 se realizan los cálculos necesarios de instalación del ventilador suministrador de aire.

Para el dimensionamiento es adecuado utilizar un ventilador centrífugo, según Nonhebel, 1979, donde la velocidad máxima del aire debe ser de 3,5 m/s, dato que se tomará como referencia.

Para determinar el flujo de aire a impulsar es preciso determinar el área de sección transversal del cilindro secador:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot 1,5^2$$

$$A = 1,77 \text{ m}^2$$

Por tanto, el flujo volumétrico sería

$$Q = 3,5 \frac{m}{s} \cdot 1,77m^2$$

$$Q = 6,18 m^3/s$$

Para convertir a caballos de fuerza

$$6,18 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{60 s}{1 min} \cdot \left(3,2808 \cdot \frac{ft^3}{1m^3} \right) = CFM$$

$$CFM = 1\ 216,52\ HP$$

y la potencia de freno por

$$BPH = \frac{1\ 216,52\ HP \cdot 1,5}{6556 \cdot 0,5}$$

$$BPH = 0,5566\ HP$$

Para este tipo de motor de ventilador se asume 20 % de perdida de potencia externa o llamado "factor de servicio".

$$HP = 0,5566\ HP \cdot 0,2$$

$$HP = 0,111\ HP$$

3.9 Diseño e instalación del intercambiador de calor

Para la construcción del intercambiador de calor se propone un diseño preliminar y luego verificar su capacidad de transferencia de calor a través de los coeficientes de transferencia. (Cao, 2004). Para dar inicio a los cálculos de diseños se dispondrá de los siguientes datos:

Tabla 3.4 Condiciones del fluido caliente (vapor saturado):

PROPIEDADES	VALOR	UNIDADES
Presión	10	psi
Temperatura de entrada	180	°c
Temperatura de salida	90	°c
Densidad, ρ	0,614	kg/m ³
Viscosidad, μ	4,49E-02	kg/hm
Coefficiente de transferencia de calor K	2,071	kcal/hm °C
Calor específico Cp	0,496	kcal/hm °C
Calor latente λ	540	Kcal/KG

Tabla 3.5 Condiciones de proceso del fluido frío (aire):

PROPIEDADES	VALOR	UNIDADES
Caudal volumétrico	755`073.14	m ³ /h
Caudal másico	800 000	Kg/h
Temperatura de entrada	30	°C
Temperatura de salida	160	°C
Densidad, ρ	1,0595	kg/m ³
Viscosidad, μ	7,21E-02	kg/hm
Coeficiente de transferencia de calor K	0,02479	kcal/hm °C
Calor específico Cp	0,2409	kcal/kg °C

Tabla 3.6 Características de la bancada de tubos a utilizar:

PROPIEDADES	VALOR	UNIDADES
Longitud de tubos	1,0	m
Diametro exterior de los tubos	0,0127	m
Diametro interior de los tubos	0,0121	m
espesor	0.0003	m
aletas		
Altura	0.28	m
Espesor	0.005	m

El calor requerido para calentar el aire a la temperatura deseada se realiza por medio de la ecuación 47:

$$Q_{\text{aire}} = 800\,000 \text{ kg} \cdot 0,2409 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \cdot 4,19 \cdot (160 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{aire}} = 105\,005\,289,92 \text{ kJ})$$

La cantidad de vapor necesaria para que ocurra la transferencia de calor se determina por la expresión 48

$$m_{\text{vapor}} = \frac{105\,005\,289,92 \text{ kJ}}{0,2409 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \cdot 4,19 \cdot (160 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

$$m_{\text{vapor}} = 800\,000 \text{ kg}$$

con la expresión 49 se determina el número de filas de tubos.

$$Z = \frac{180 \text{ } ^\circ\text{C} - 90 \text{ } ^\circ\text{C}}{180 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$Z = 0,6$$

Empleando los valores de Z en la tabla 4, el número de filas es de 6, que desarrollan una velocidad en su interior de 2,8 m/s.

El área frontal de paso del aire es calculada por la expresión 50

$$A_{frontal} = \frac{0.925 \text{ kg/s}}{1,0595 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,8 \text{ m/s}}$$

$$A_{frontal} = 0,31 \text{ m}^2$$

Se seleccionará el valor de w (ancho aletas) según la expresión 51.

$$w = \frac{0,31 \text{ m}^2}{1 \text{ m}}$$

$$W = 0,31$$

Para comprobar que el valor de W es adecuado se utilizarán las ecuaciones de convección (52).

$$MLDT = \frac{(180 - 160) - (90 - 30)}{\ln \frac{180-160}{90-30}}$$

$$MLDT = \frac{(20) - (60)}{\ln \frac{20}{60}} = \frac{-40}{\ln 0,33}$$

$$MLTD = 36,36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor del coeficiente global de transferencia de calor se lo leerá en la tabla 5 (Cao, 2004), el cual será escogido el valor medio de condensación de vapor agua que es de 1000 W/m²K.

Con los valores calculados se determina el área de transferencia de calor (53)

$$A = \frac{25 \cdot 078 \cdot 884.62 \text{ kcal}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot \frac{3 \text{ 600 s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ kcal}}{4187 \text{ J}} \cdot 36,36 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$A = 802 \text{ m}^2$$

Por tanto, la cantidad de columnas de tubos se determina por la expresión 54 como sigue:

$$N = \frac{802 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 1 \text{ m}}$$

$$N = 20 \text{ 106,25}$$

y la cantidad de tubos totales se determina por la expresión 55 será:

$$n_{ft} = \frac{20 \text{ 106,25}}{6}$$

$$n_{ft} = 3 \text{ 351 tubos}$$

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE SECADO DE MINERALES

Para la realización de la inversión de un secador rotatorio en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas se partió de conocer la producción de oro y plata anual así como los precios de ambos metales en la Bolsa de Metales de Londres. Los ingresos por ventas mensuales y anuales son mostrados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Ingresos por venta de oro y plata en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas

Oro Metálico					
DETALLE	Producción kg	Producción oz	Precio De Venta USD/oz	IngresoS	
Producción Mensual	2,5	88,175	\$ 1 337,0	Mensual	\$ 117 888,21
Producción anual	27,5	969,925	\$ 1 337,0	Anual	\$ 1 296 770,33

Plata Metálica					
DETALLE	Producción kg	Producción oz	Precio De Venta USD/oz	Ingreso	
Producción Mensual	5	176,35	\$ 14,8	Mensual	\$ 12 154,4
Producción anual	55	1 939,85	\$ 14,8	Anual	\$ 145 853,1

INGRESO TOTAL	
Oro y Plata mensual	\$ 130 042,6
Oro y Plata anual	\$ 1 442 623,5

En la tabla 3.9 muestra un resumen de los costos en que se incurre durante la producción de oro y plata, a partir del análisis y cálculos de los costos fijos y variables de la misma.

Tabla 3.9. Costos en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas

COSTOS FIJOS	\$ 349 632,00
Mano de Obra Directa	\$ 86 160,00
Mano de Obra Indirecta	\$ 33 072,00
Costo de transporte	\$ 230 400,00
COSTOS VARIABLES	\$ 204 000,00
Materiales Directos	\$ 201 600,00
Materiales Indirectos	\$ 2 400,00
COSTOS TOTALES	\$ 553 632,00

Los gastos administrativos son considerados dentro del flujo de caja en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas. Los cálculos son mostrados en la tabla 3.10

Tabla 3.10. Gastos Administrativos

DESCRIPCIÓN	TOTAL MENSUAL	TOTAL ANUAL
Sueldos Administrativos	\$ 9 936,00	\$ 119 232,00
Servicios Básicos	\$ 10 294,88	\$ 123 538,61
Electricidad 2000 Kv por mes	\$ 10 290,38	\$ 123 484,61
Agua	\$ 4,50	\$ 54,00
Total Gastos Administrativos	\$ 20 230,88	\$ 242 770,61

Para la confección del flujo de caja para la inversión del secador rotatorio, se consideró la información siguiente:

Costo de la inversión inicial: \$ 15 000,00

Costo del capital de trabajo: \$ 7 000,00

Depreciación de intangibles: \$ 15 348,12

Taza de descuento: 15 %

En la tabla 3.11 se muestra el flujo de caja para la inversión del secador en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas

Tabla 3.11 Flujo de caja del proyecto de inversión de un secador en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO, (\$)						
Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		1 442 623,46	1 471 475,93	1 500 905,45	1 530 923,56	1 561 542,03
Egresos		798 402,61	833 752,31	871 751,17	912 646,39	956 709,53
Costos de Venta		553 632,00	564 704,64	575 998,73	587 518,71	599 269,08
Coste de Fabricación		553 632,00	564 704,64	575 998,73	587 518,71	599 269,08
Gasto Administrativo		242 770,61	267 047,67	293 752,44	323 127,68	355 440,45
Gasto de Venta y Publicidad		2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00	2 000,00
Flujo Operacional		644 220,85	637 723,62	629 154,28	618 277,17	604 832,50
Amortización Intangible		209,70	209,70	209,70	209,70	209,70
Depreciación		15 138,42	15 138,42	15 138,42	15 138,42	15 138,42
Utilidad antes de Impuesto		628 872,73	622 375,50	613 806,16	602 929,05	589 484,38
Impuesto a la Renta, 25%		157 218,18	155 593,88	153 451,54	150 732,26	147 371,10
Participación de Trabajadores, 15%		94 330,91	93 356,33	92 070,92	90 439,36	88 422,66
Utilidad Neta		377 323,64	373 425,30	368 283,70	361 757,43	353 690,63
Depreciación y Amortización Intangible		15 348,12	15 348,12	15 348,12	15 348,12	15 348,12
Inversión Inicial	-15 000,00					
Capital de Trabajo	-7 000,00					
Flujo neto del proyecto	-22 000,00	392 671,76	388 773,42	383 631,82	377 105,55	369 038,75
TIR	17,84 %					
tasa de descuento 15 %	15,00					
VAN	4 160,40					

Como paso final del cálculo económico se llegó a la conclusión que es posible realizar las inversiones de un secador rotatorio horizontal de mineral en la Unidad Empresarial de base de Producciones Mineras de Placetas debido a que el VAN obtenido es de \$ 4 160,4 con una tasa de descuento de un 15 %, además de corroborar tal posibilidad, a partir de tener un TIR del 46,19 %.

VALORACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE SECADO DE MINERALES

Influencia del polvo en el medio ambiente

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este gran medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial y ruido e otros.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración de partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0,1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales están:

Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes, representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo, cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías:

- Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.
- Absorción de polvos a través de la piel.

Las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

Las partículas de tamaño superior a 5 µm de diámetro, quedan retenidas en los vellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 µm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio depositándose en los bronquios. De ahí que, en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

Influencia del ruido en el medio ambiente

Las emisiones continuas de ruido son uno de los impactos directos que afecta al hombre en su medio laboral. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que, como resultado de su operación, emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es uno de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando no se cuenta con los medios de protección individuales.

Medidas para la protección del medio ambiente durante el secado del mineral

Para evitar problemas ambientales en el proceso de secado se proponen las siguientes medidas:

1. Construcción de un transportador de enlace entre el secador y la primera trituradora.
2. Aprovechamiento de los gases calientes del secadero a la cámara de combustión.
3. Mantenimiento constante del equipo.

CONCLUSIONES

Se concluye un dimensionamiento de un secador rotatorio de minerales auríferos con un diámetro de 1,50 m, una longitud de 10 m, una velocidad total de secado de 3080 kg/m²h, un volumen del secador de 18 m, un diámetro externo del cilindro de secado de 1,54, un diámetro interno del cilindro de secado de 1,5 m, un área de sección transversal del cilindro secador de 1,77 m y una potencia del motor de 427,207 kW, apto para el procesamiento de los minerales auríferos de la UEB producciones mineras “placetas”.

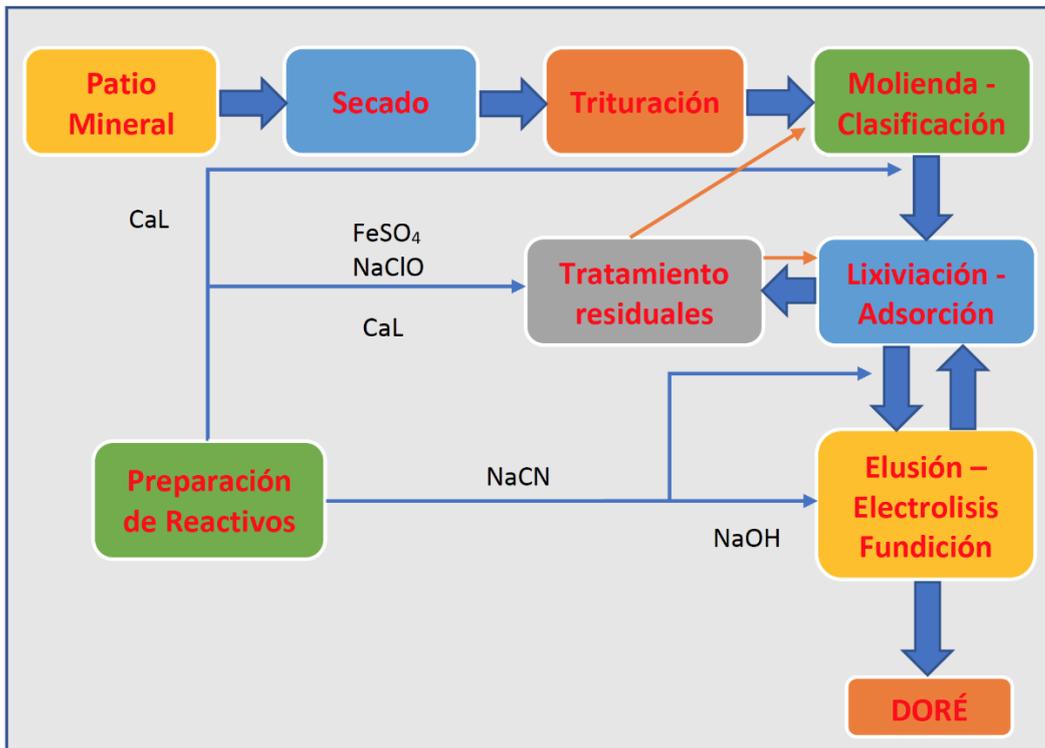
RECOMENDACIONES

- Se recomienda que este trabajo sea una referencia para el diseño de un secador rotatorio a escala industrial.

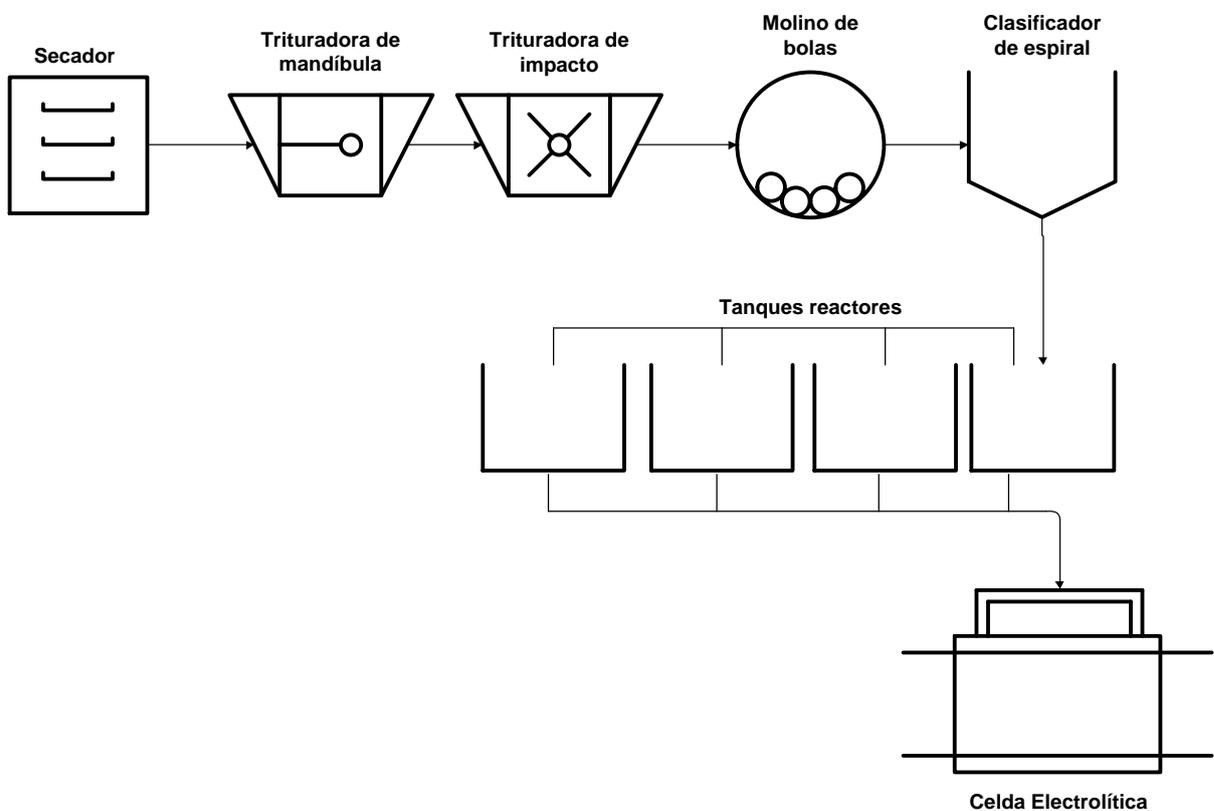
BIBLIOGRAFÍA

- TREYBAL, R. E. (1989). *Trasferencia de Masa*. México: McGraw-Hill
- CHANG C. Y R. YUZHANINOV. (1997). *Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos*. Cuba. Editorial Félix Varela
- KRAIGE. J. L. (1996). *Mecánica para Ingeniería Estática*. Reverte S.A.
- CAO. E. 2004. *Transferencia de Calor en Ingeniería de Procesos*. Argentina.
- Kern. D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Continental S.A
- CENGEL, Y. A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México: McGraw Hill
- NONHEBEL. (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. Reverte S.A.
- Perry, R. H. (2001). *Manual de Ingeniero Químico*. España: Interamericana de España.
- CENICAFÉ. (2012). *El Ventilador. Ventiladores para secado de café: Diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos*.
- MOSTAFA. (1977). *Secado de silica gel en un lecho fluidizado*. Ecuador
- SÁNCHEZ Y FLORES. (2014). *Diseño y construcción de un secador rotatorio para la obtención de escamas pet*. Ecuador
- JIMÉNEZ Y PINOS. (2014). *Diseño y Construcción de un Secador Tipo Bandejas Para Biomasa Requerido por el Cestta-Espoch*. Ecuador
- GUTIÉRREZ. (2013). *Diseño Integral de un Secador Experimental de Túnel*. México.
- RIVAS. (2015). *Diseño de Secadores Convectivos Zonales para Procesamiento de Paletas y Productos de Álamo*. Chile
- CASTRO. (2008). *Rediseño de un Secador de Moldes de Yeso*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. México
- MARÍN Y TORRES. 2011. *Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala*. Ecuador
- LENIS Y CÓRDOVA. (2015). *Re-Ingeniería de un Secador Rotatorio Didáctico Para el Laboratorio de Operaciones Unitarias*. Ecuador
- ALBERTO Y MARCELO. (2009). *Diseño de una Máquina Secadora de Hojas Aromáticas*. Ecuador.
- BOAYA. 2014. *Distribución de equipos especializados en lavandería industrial*. España. Madrid

ANEXOS



Anexo 1: Propuesta del flujo tecnológico incluyendo el secadero



Anexo 2: Propuesta del mismo flujo tecnológico dibujado