



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Balance termo energético de la cámara de combustión del horno de tambor rotatorio de la empresa de nombre comercial D'SIT perteneciente al grupo Siderúrgica Acinox S.A.

AUTOR: Yunier Jesús Lanuez García

TUTORES: M.Sc. Ever Góngora Leyva

Ing. Luis Domínguez Vargas

“Año 50 de la Revolución”
Moa- 2008



Declaración de autoridad

Yo, autor de este trabajo de Diploma y los tutores Msc. Ever Góngora Leyva, Ing Luis Domínguez Vargas, declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Yunier J. Lanuez García.

Tutor: M.sc. Ever Góngora Leyva.

Tutor: Ing. Luis Domínguez Vargas.



DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo:

En especial a mi abuela Aurora que aunque no está a mi lado estaría orgullosa de verme realizado un profesional.

A mis Padres Jesús y Paula que de los tres hijos que tienen el único que faltaba por ser profesional era yo.

A mis hermanos Yailenis y Manuel que siempre se han preocupado por mí y nos queremos tanto.

A mis amistades y vecinos que siempre estuvieron cerca y presentes en las buenas y malas conmigo (Eduardito).

A los profesores que durante estos cinco años me han ayudado a formarme como profesional, en especial a mis tutores que se preocuparon y me atendieron cuando me hacía falta dar solución a un problema (Ever).

A todos "les dedico este éxito"

Yunier Lanuez García



Pensamiento

El hombre que va adelante impulsa a los demás a que lo alcancen, atrae a los demás hacia su nivel mucho más que aquel que desde atrás empuja con la palabra solamente.

Che.



Resumen

En el presente trabajo de diploma, se realiza un balance termo energético a la cámara de combustión del horno de tambor rotatorio, destinado al secado de carbón en la empresa de nombre comercial D´SIT perteneciente al grupo Siderúrgica Acinox S.A.

El trabajo comienza con el análisis de los trabajos precedentes y principios técnicos del secado, presentándose además la descripción del flujo tecnológico y sus partes principales. También se incluye la metodología de cálculo permitiendo evaluar el trabajo actual y las pérdidas de energía. Por último se hace una valoración económica sobre los resultados obtenidos y se abordan aspectos medioambientales importantes en la planta analizada.

Abstract

Presently diploma work, is carried out a balance energy water heater to the camera of combustion of the oven of rotational drum, dedicated to the drying of coal in the company of commercial name D´SIT belonging to the group Siderúrgica Acinox S.A.

The work begins with the analysis of the precedent works and technical principles of the drying, being also presented the description of the technological flow and its main parts. The calculation methodology is also included allowing to evaluate the current work and the energy losses. Lastly an economic valuation is made on the obtained results and important environmental aspects are approached in the analyzed plant.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
<i>Introducción</i>	1
Capítulo I <i>Marco teórico- metodológico de la investigación</i>	3
1.1 <i>Introducción</i>	6
1.2 <i>Trabajos precedentes</i>	6
1.3 <i>Descripción del flujo tecnológico de la planta</i>	8
1.4 <i>Hornos para la tostación y secado de materia prima y semiproductos</i>	8
1.4.1 <i>Partes principales del horno</i>	9
1.4.2 <i>Aspectos generales de la teoría integral de hornos</i>	10
1.5 <i>Principios técnicos del secado</i>	11
1.5.1 <i>Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios</i>	13
1.5.2 <i>Eficiencia del secado en cilindros rotatorios</i>	13
1.6 <i>Ladrillos refractarios aislantes</i>	16
1.7 <i>Características técnicas de la cámara de combustión en el proceso de secado</i>	17
1.8 <i>Métodos empleados para la investigación</i>	17
1.9 <i>Combustible y combustión</i>	17
1.10 <i>Conclusiones del capítulo I</i>	18
Capítulo II <i>Materiales y métodos</i>	19
2.1 <i>Introducción</i>	19
2.2 <i>Método de cálculos</i>	19
2.3 <i>Materiales empleados</i>	19
2.4 <i>Cálculo de la combustión del combustible</i>	19
2.4.1 <i>Balance material de la combustión</i>	22
2.5 <i>Balance térmico</i>	22
2.6 <i>Rendimiento de la instalación</i>	27



2.7	<i>Conclusiones del capítulo II</i>	27
Capítulo III	Análisis de los resultados	28
3.1	<i>Introducción</i>	28
3.2	<i>Análisis del diagnóstico térmico</i>	28
3.3	<i>Resultados del balance de masa y energía</i>	29
3.4	<i>Valoración económica</i>	30
3.5	<i>Impacto ambiental</i>	31
3.5.1	<i>Principales problemas ambientales detectados en la planta</i>	31
3.5.2	<i>Influencia del polvo en el medio ambiente</i>	31
3.5.3	<i>Influencia del ruido en el medio ambiente</i>	34
3.6	<i>Conclusiones del capítulo III</i>	35
	Conclusiones generales	36
	Recomendaciones	37
	Bibliografía	38



Introducción

La institución de nombre comercial D'SIT perteneciente al grupo Siderúrgica Acinox S.A. se encuentra situado en la costa noroeste de la región oriental de Cuba, específicamente en la zona minera metalúrgica de Nicaro. En sus 20 años de fundada brinda una amplia gama de servicios e insumos tecnológicos, soportados en un colectivo de alto nivel técnico profesional, unido a una alta flexibilidad productiva y gran adaptabilidad a los cambios; convirtiéndola en una organización competitiva. Posee actualmente una plantilla de 119 trabajadores; de ellos 32 son técnicos superiores (8 poseen categoría de investigadores), 33 técnicos medios y 63 obreros calificados.

La planta de preparación mecánica de minerales consta de tres secciones caracterizadas por los productos finales obtenidos en la misma, las cuales se denominan:

1. Sección de secado.
2. Sección de trituración y clasificación fina.
3. Sección de clasificación gruesa.

El producto obtenido por el sector Siderúrgico en los procesos de obtención del acero en los hornos de reducción. Esta reserva crece alrededor de 5000 t/año y la entidad procesa unas 4000 t. En la primera sección se secan los productos con granulometría comprendida desde 0.074 mm hasta 10 mm entre éstos se encuentra: carbón de ajuste coque y antracita, carbón de insuflado coque y antracita. El carbón por debajo de 0.074 mm coque y antracita es utilizado como combustible en el proceso de secado, también en el proceso se preparan otras materias prima para las acerías como la cromita de relleno para cerrar correderas de hornos de arco eléctrico ubicados en (antillana de acero y el laminador de las Tuna).

En la segunda sección de trituración y clasificación fina se procesan todos los productos del carbón con una granulometría hasta 19.09 mm las cuales comprenden los descritos en la primera sección.

En la tercera sección el clasificado grueso se inicia con las mismas características granulométrica con que se recibió el carbón, durante esta clasificación se obtienen tres productos uno por encima de 50 mm de granulometría llamado carbón de fundición, el



segundo con granulometría entre 25 y 50 mm llamado carbón de carga y el tercer producto obtenido es llamado rechazo, el cual se traslada para ser secado y procesado en la segunda sección.

La planta de preparación mecánica de minerales se inicia primeramente para moler óxido de níquel, al no resultar el proyecto de investigación se cambia el producto del proceso a la antracita 200 destinada a la fabricación de caja de acumuladores para autos y equipos pesados, destinando esta producción de baterías a los equipos que intervenían en la industria azucarera. Al cerrarse dicha fábrica la instalación es destinada a la clasificación y molienda de diferentes tipos de carbón para incorporarlo a las acerías del país y dar cumplimiento al programa del V Congreso del PCC con respecto a la sustitución de importaciones. El flujo tecnológico se inicia con el secado de la materia prima, luego la misma pasa al proceso de clasificación y trituración donde se obtienen todos los tipos de granulometría solicitadas por las acerías y éste a la vez constituye el producto final del proceso. En el secado se utiliza un secador rotatorio en el cual se logra disminuir la humedad de la materia prima a procesar para que cumpla con los parámetros de calidad que exigen los clientes; esta humedad debe de estar en 1 % o por debajo de éste para los carbones de las acerías.

Actualmente el 60 % de la materia prima procesada en la planta proviene de la industria del níquel, que se obtiene del rechazo de la planta que prepara el carbón para el proceso de Sinterización en las Fábricas de producción de níquel que actualmente cuenta con una reserva de 20.000 a 30.000 t aproximadamente entre las dos fábricas. El nivel de importación entre ellas es de 15.000 t/año anualmente y el 30 % es rechazado anualmente.

Dentro de los equipos mencionados, se encuentra la cámara de combustión que para construirla se tomó como referencia el diseño de la cámara de combustión de la planta piloto del CEINNIQ ubicada en la Empresa René Ramos Latour de Nicaro. La cual a criterio de varios técnicos está sobredimensionada; debido a esto es necesario realizar un estudio que permita realizar un balance termo energético para determinar las pérdidas de calor y conocer a través de las ecuaciones de la termodinámica el volumen óptimo de la cámara para el trabajo que realiza actualmente.



El régimen de trabajo es de 24 horas distribuidas en 4 turnos de trabajo y se emplea en el proceso de secado el diesel tecnológico (directo) como el principal portador energético y el de mayor demanda en el centro.

El secado incluye otra materia prima como la cromita, de ahí que la temperatura de operación oscile en la cámara en los rangos de 820 a 720 °C en la cámara donde se produce la combustión. Al eliminarse del proceso de secado el carbón antracita 200 que requería un por ciento de humedad igual a cero e introducir los carbones de las acerías que su porcentaje no debe ser mayor de uno y cambiar el quemador por uno más moderno se tuvieron ahorros significativos, logrando disminuir el índice de consumo de litros por toneladas de 50 a 18; pero se presentaron problemas no resueltos y los mismo afectan la eficiencia del proceso de secado actualmente.

Situación Problemática

1. Se alargó el tiempo de calentamiento de la cámara.
2. Existe caída de temperatura de forma brusca al apagarse el quemador y durante el trabajo con este.
3. Pérdidas de calor por estado técnico de la cámara al existir variaciones bruscas de temperatura.
4. Variación de temperatura en la salida del secadero indicando que el producto puede salir sin la humedad requerida.
5. No se usa el polvo de antracita como combustible en el proceso de secado.
6. No se tiene controlado el flujo de aire caliente y calor generado durante la combustión para lograr un proceso eficiente durante la combustión.

Es imprescindible realizar el balance termo energético de la cámara de combustión para establecer parámetros de eficiencia.

Problema

Poca salida de calor de la cámara de combustión al horno de tambor rotatorio de la empresa Siderúrgica Acinox S.A. de Nicaro.



Objeto de Estudio

Cámara de combustión.

Objetivo de general

Realizar el balance termo energético de la cámara de combustión que interviene en el proceso de secado del carbón en la planta del D'SIT de Nicaro.

Hipótesis del Trabajo

Estableciéndose un balance de masa y energía en la cámara de combustión del horno de tambor rotatorio de la empresa Siderúrgica Acinox S.A. de Nicaro nos permitirá evaluar el comportamiento de la entrada y salida de calor con vista a mejorar los parámetros de este proceso.

Tareas a realizar

1. Realizar una búsqueda bibliográfica y establecer el estado del arte sobre la temática tratada.
2. Realización de un análisis económico y medioambiental que este provoca al medio ambiente.
3. Establecer los cálculos para realizar el balance de de masa y energía.

Métodos

El proceso de investigación científica se relaciona directamente con el objeto de trabajo y mediante éste se pueden seleccionar los métodos a aplicar según la información obtenida sobre el tema a investigar:

Métodos aplicados:

1. Investigación documental y bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Cálculos para determinar las características y particularidades de la cámara a emplear en el proceso de combustión.
3. Técnicas computacionales existentes para la solución del procedimiento de cálculo.



Dada la importancia de una concepción sistémica del objeto de estudio, lo específico del problema y el objetivo propuesto se establece en el campo de acción para alcanzar el resultado de todas las tareas a realizar así como calcular los diferentes parámetros de la cámara de combustión.

Resultados esperados de la investigación

Establecer los parámetros de trabajo y eficiencia que indiquen el estado actual de la cámara.



Capítulo I: Marco teórico

1.1 Introducción del capítulo I

El secado está destinado a eliminar el agua presente en el mineral para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos. El proceso de secado está caracterizado simultáneamente por una transferencia de calor y de masa, que se manifiesta de forma compleja cuyo comportamiento físico es difícil de predecir, es por ello que el estudio del proceso requiere análisis teórico.

Este capítulo tiene como objetivo exponer los fundamentos teóricos del proceso de secado térmico en las cámaras de combustión que permita el balance térmico de la misma.

1.2 Estado del arte y trabajos precedentes

Luikov (1966), propuso que la transferencia de humedad en un material poroso es el resultado del gradiente de contenido de humedad, temperatura y presión.

Fulford (1969) en cuanto a la cinética de secado y la humedad de equilibrio, proporciona una buena cantidad de modelos de la literatura rusa para describir este comportamiento.

Baker (1988) aborda los modelos de transferencia de calor y masa para secadores rotatorios en cascada y los clasificó en dos categorías. La interpretación de los datos en un gran número de secadores rotatorios se realiza de forma aproximada en términos del coeficiente global de transferencia de calor, basado en el área efectiva de contacto entre el gas y el sólido y el cociente de esta área con relación al volumen del secador. Las relaciones empíricas que se obtienen de esta aproximación son generalmente insatisfactorias. Baker, realizó para ello el diseño de un secador industrial operando con una velocidad del aire de 3 m/s.

Las ecuaciones se obtienen con el fin de determinar la cantidad de calor transferido usando un coeficiente de transferencia de calor pelicular, pero en este caso se hace más dudosa el área en que se estima la ocurrencia de la transferencia de calor.

V. Ojotin, V. Zhidkij, V. Laviguin, F. Salomzoda (1988) en el libro Fundamentos de termotecnia realizan un estudio sobre la termodinámica, transmisión del calor, combustible energético.



Papadakis et al. (1994) para estimar el coeficiente de transferencia de calor pelicular usaron las relaciones propuestas por Langrish et al. (1988), sus aproximaciones son básicamente las mismas que las de Schofield y Glikin, pero realizan gran cantidad de experimentos para eliminar las debilidades del método.

Dr.C Chang Cardona y Dr.C Yuzhaninov; (1997) en el libro de texto Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos se estudia la aplicación de la teoría de los procesos: tecnológicos, aerodinámico, mecánico, transmisión de calor y energético en los cálculos y proyecto de los hornos metalúrgicos, incluyendo sus instalaciones auxiliares.

Toirac et al. (1997) obtiene el tonelaje de combustible por mineral secado y agua evaporada para un flujo de mineral alimentado de 140 t/h.

Mora. (1999) realiza un balance térmico y de masa de los secadores de mineral considerando los gases de hornos y el aire frío como aire secundario o de disolución.

También se realizó una valoración económica del proceso para demostrar como influye el empleo de gases calientes como aire secundario en el costo de producción. También reduce el consumo de combustible.

También Bachir (2001) realiza un balance térmico y de masa para determinar el consumo de combustible tomando el aire frío y los gases de hornos como aire secundario.

López (2001) realiza dos balances térmicos y de masa, uno para determinar el consumo de combustible en ese momento y el otro teniendo en cuenta un incremento de la productividad como el fin de determinar el comportamiento de los diferentes parámetros al aumentar el flujo de mineral húmedo a la entrada del secadero.

Columbié (2001) estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno tubular rotatorio, quedando éste conformado por 9 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico del objeto, determinó la dirección del proceso definiéndose como criterio de calidad, el mantenimiento del perfil térmico del horno, este trabajo también aporta ecuaciones importantes que por primera vez aparecen en la bibliografía para el análisis de los procesos de transferencia de calor de gran complejidad.



Aportaron considerablemente los conceptos de Incropera (2003), que abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de transferencia de calor con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como en otras empresas donde se encuentran la ocurrencia de fenómenos térmicos.

Castillo (2007) realizó un trabajo relacionado con la influencia del contenido de humedad del mineral laterítico en el consumo de energía y combustible de los secadores cilíndricos rotatorios.

1.3 Descripción del flujo tecnológico de la planta

El objetivo de esta planta es el secado de carbón haciéndolo apto para su utilización. La línea de secado consta del siguiente equipamiento: un quemador de diesel, la cámara de combustión (anexo 3), donde se genera calor al tambor rotatorio en el cual se logra disminuir el por ciento de humedad de la materia prima para que cumpla con los parámetros de calidad que exigen nuestros clientes. Esta humedad debe de estar por debajo de un 1 %. Luego mediante los transportadores la materia prima pasa al proceso de clasificación y trituración donde se obtienen todos los tipos de granulometría solicitadas por las acerías y éste a la vez constituye el producto final del proceso.

1.4 Hornos para la tostación y secado de materia prima y semiproductos

Hornos de soleras múltiples. Es un cilindro vertical de 4 a 8 m de diámetro 4 a 12 m de alto, dividido verticalmente por soleras horizontales. La carga inicial la suministran en la solera superior y continuamente es agitada de solera en solera por los brazos con rastrillos. El combustible y el aire en el horno lo suministran a través de las ventanas que se tienen en cada solera.

Hornos de tambor rotatorios. Es un cilindro de 2 a 5 m de diámetro y 20 entre 200 m de largo, el cual rota sobre su eje bajo un pequeño ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, la carga y el combustible se suministran al horno generalmente a contracorriente.



Máquinas de aglomeración. Compuesta por una estera que se mueve continuamente, la cual tiene una longitud de 10 a 50 m y un ancho de 1 a 4 m; dicha estera se construye con láminas de acero. La carga se suministra en forma de capas uniformes sobre la superficie de las parrillas en la cabeza de la máquina; el aire, necesario para el proceso de tostación se succiona a través de la capa de mineral sobre las parrillas.

Hornos para la tostación de cama fluidizada. Representa una cámara con 2 a 8 m de sección transversal y 3 a 15 m de altura. El aire, entrante en el horno a través de la solera con un gran número de orificios, mantiene el material procesado en estado de movimiento continuo muy parecido a un líquido en estado de ebullición.

1.4.1 Partes principales del horno

Para el secado del mineral en esta planta se emplean los tambores rotatorios. Los secaderos son cilindros alargados formados por una cámara de combustión (donde se producen los gases calientes que secan el mineral) y un cilindro (donde el mineral recibirá el proceso de secado).

El tambor secador posee un sistema motriz, acoplado al cuerpo de éste, que le permite rotar alrededor de su eje. El mismo se apoya exteriormente en dos llantas que posee sobre dos pares de rodillo. Internamente el secadero está formado, cerca de la cámara de combustión, por unas guías o deflectores soldados al cuerpo del tambor que son los que dirigen el mineral hacia el interior de la parte cilíndrica.

En esta parte cilíndrica existen levantadores de mineral, estos están soldados al cuerpo del tambor y son los encargados de permitir la transferencia de calor entre el gas caliente y el mineral y con ello el proceso de secado.

Estos levantadores dividen al tambor en 6 partes, lo que favorece el proceso de secado porque:

1. Permite que la carga alimentada al tambor sea repartida uniformemente en el interior del mismo.
2. Evita sobrecargar un levantador más que otros, provocando la formación de cortinas de mineral uniformes durante la caída del mismo, debido a la rotación del tambor.



3. Posibilita un mayor contacto entre los gases calientes, el mineral y una mayor evaporación de la humedad que trae el mineral.

4. Permite que el motor trabaje más establemente y se requiera de menor potencia para mover el secadero, debido a la uniformidad de la carga.

En la construcción de las instalaciones internas de los secadores cilíndricos se tiene en cuenta el grosor, la densidad y las propiedades de dispersión del material sometido al secado, además de garantizar la distribución uniforme de este en la sección transversal del cilindro.

Existen diferentes formas de construir los elementos interiores del secador.

- Sectoriales.
- Periféricos.
- En forma de cruz.
- Sectoriales con anillos interiores.

1.4.2 Aspectos generales de la teoría integral de hornos

El trabajo de los hornos de la metalurgia no ferrosa consta de cinco procesos fundamentales estrechamente interrelacionados.

1. Proceso tecnológico.
2. Proceso energético.
3. Proceso aerodinámico.
4. Proceso mecánico.
5. Proceso de transferencia de calor.

El principal de los procesos citados, es el proceso tecnológico, todos los demás se subordinan a este y el desarrollo de los mismos debe ser tal que el proceso tecnológico ocurra con los mejores índices cualitativos y cuantitativos.



Proceso tecnológico: consiste en las transformaciones físico-químicas de los materiales iniciales en productos finales. La realización del proceso se determina por la velocidad de las transformaciones físicas químicas y de difusión.

Proceso energético: se utiliza para suministrar al horno (o extraer del horno), determinadas cantidades de energía térmica ya sea por defecto o por exceso durante las transformaciones tecnológicas. Este proceso compensa las pérdidas de calor del horno.

Proceso aerodinámico: en gran medida determina el curso de los procesos de combustión del combustible y de intercambio térmico en los hornos, lo cual garantiza el normal desarrollo del proceso tecnológico. Del movimiento de los gases depende la distribución de la temperatura y la presión en el horno. De esta forma, la aerodinámica con frecuencia se convierte en un medio de dirección del trabajo del horno.

Proceso mecánico: las principales formas son:

1. Agitación mecánica y espolvoreo del material, lo cual se realiza en los hornos de tambor rotatorio y hornos de hogares múltiples.
2. Arrastre de material con el flujo gaseoso, lo cual tiene lugar durante la tostación y la fusión del material en suspensión o transportado.

Proceso de transferencia de calor: es el proceso de propagación del calor de un cuerpo a otro, cuyas tres formas fundamentales son: conductividad térmica, convección y radiación térmica. En los hornos metalúrgicos la transmisión de calor se realiza de forma combinada durante el desarrollo del proceso tecnológico, localizándose en sistemas específicos (paredes del horno, materiales sólidos y líquidos).

1.5 Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y transferirla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto y su grado de sequedad) y de las características físico mecánicas del producto (su composición, contenido de humedad y el tamaño de las partículas). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, considerablemente de su temperatura. A

medida que el aire se calienta, su humedad relativa decrece y por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata rápidamente. Cuanto mayor sea el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto a secar (Zazhin, 1984).

De acuerdo con Boizán (1991) una de las formas más eficiente de describir el proceso de secado es mediante las curvas de velocidad de secado contra humedad promedio en un sistema de coordenada $(du/d\tau) = f(u)$. En la figura 1.1 se representan de forma general las etapas de secado por los que transita un sólido.

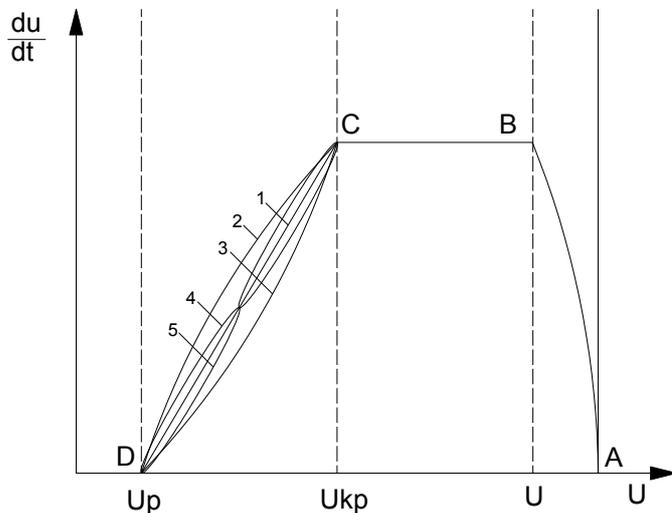


Figura 1.1 Curva de velocidad de secado

Fuente: Boizán, 1991.

El tramo AB corresponde al periodo de calentamiento. En ésta la temperatura del material se eleva hasta la temperatura de bulbo húmedo y su humedad descende. La velocidad de secado crece y en B alcanza su máximo valor.

El periodo de velocidad de secado constante corresponde a la recta BC. En esta etapa tiene lugar una intensa evaporación de la humedad libre. La velocidad del proceso es máxima y depende fundamentalmente de la resistencia externa a la difusión y en menor cuantía de la resistencia interior del sólido a la difusión.



El periodo de velocidad de secado decreciente, según sea el caso, puede describirse con una de las curvas (1, 2, 3, 4 ó 5) que van desde C hasta D.

A pesar de que en sentido general este es el comportamiento de los sólidos, en ocasiones durante el secado de algunos materiales (los cereales y algunos vegetales como la papa, remolacha y la zanahoria) en el primer periodo su temperatura no se mantiene constante, sino que sigue creciendo hasta alcanzar valores superiores a la del bulbo húmedo. Este comportamiento permite concluir que la proposición realizada por Lykov (1968) de llamar a esta etapa *periodo de temperatura constante* no es satisfactoria. Es más acertado llamarlo *periodo de velocidad de secado constante* ya que se cumple para cualquier material.

1.5.1 Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos rotatorios

El carbón al entrar al secadero tiene una humedad de 13 % aproximadamente y debe salir del mismo con 1 %.

Para lograr esto el secadero posee una cámara de combustión dotada de un quemador de diesel, donde se le suministra aire para lograr la combustión. Los gases quemados dentro de la cámara de combustión alcanzan una temperatura de 820 °C que disminuye hasta 640 °C al entrar en contacto con el aire en exceso que se suministra, que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar (el carbón). Los gases entran al tambor secador con una temperatura (640 °C) y salen del mismo a una temperatura de 80 a 100 °C.

La entrada de los gases al tambor secador se realiza en dirección a corriente con el carbón alimentado, de forma que el contacto entre los gases calientes y el mineral permita que este último se vaya secando para obtener al final del secadero un producto con las características adecuadas.

1.5.2 Eficiencia del secado en cilindros rotatorios

La eficiencia del proceso de secado depende de los siguientes factores: Características del carbón alimentado, tiempo de retención del carbón, velocidad del gas, temperatura del aire o gas, longitud del secador, pendiente del secadero, capacidad de los levantadores del secadero, velocidad de rotación del secador, número de levantadores.

Características del mineral alimentado



Aquí se tiene en cuenta entre otros casos la granulometría y la humedad. La alimentación del carbón muy fino dificulta el proceso de secado debido fundamentalmente a que se elimina solo el agua superficial, quedándose solo el agua reticular o interna que provoca la aglomeración del carbón, provocando un aumento de la humedad del producto secado. Con este carbón alimentado aumenta considerablemente el consumo de petróleo y disminuye la eficiencia operativa de los equipos ya que es necesario disminuir la alimentación para poder obtener el parámetro deseado en el producto.

Tiempo de retención del carbón

Este factor determina el tiempo medio necesario de permanencia del carbón dentro del secadero para que sea tratado de forma adecuada. Este tiempo se determina de forma experimental.

$$T = \frac{0.00783 \cdot L}{Sd \cdot D \cdot N} \quad (1.1)$$

T = tiempo; h

L = longitud; m

Sd = inclinación; m/m

D = diámetro; m

N = velocidad de rotación; rpm

Velocidad del gas

Una velocidad alta de los gases calientes provoca poco contacto entre las fases (gases y carbón), lo que conlleva a un secado deficiente del mineral y aumenta el consumo de petróleo. Una baja velocidad de los gases puede provocar un calentamiento de la superficie del secadero, un deficiente secado debido a la saturación de estos gases y al recalentamiento de la cámara de combustión con posible desprendimiento de ladrillos. Por esto la velocidad del secado debe ser moderada para garantizar una operación de secado adecuada.

Longitud del secado:

Esta longitud debe ser tal que permita el secado del carbón que se alimenta hasta la humedad requerida a la máxima capacidad. En la primera mitad del tambor se elimina en



mayor cuantía porque los gases están más calientes, la longitud restante para eliminar una cantidad pequeña de humedad.

Pendiente del secadero:

Esto permite que el carbón se vaya arrastrando a la velocidad adecuada hasta la descarga del secadero.

Capacidad de los levantadores del secadero

Son los elementos fundamentales que interviene en el secado, mediante ellos es posible elevar el carbón y dejarlo caer en forma de cortinas, lo que permite el contacto con el gas caliente.

Velocidad de rotación del secado:

El carbón recogido por los levantadores debe ser descargado en forma de cortinas uniformes, para esto se necesita de una velocidad adecuada. Si la velocidad es pequeña el carbón rodará en forma paralela, no formándose cortinas. De igual forma si la velocidad es muy alta el carbón seguirá una trayectoria circular, lo que tampoco permitirá la formación de cortinas y traerá consigo un secado inadecuado.

Número de levantadores:

Se tiene presente el carbón alimentado, su humedad y el diámetro del tambor. Para aumentar la capacidad de un secadero de diámetro grande con un carbón húmedo y quebradizo se debe aumentar el número de levantadores.

Otras condiciones:

Los secaderos tienen que ser cargados de forma apropiada, ya que si se recarga de carbón éste quedará sobre la parte superior y no será expuesto a las corrientes de gases calientes y la humedad de salida aumentará. De igual manera ocurre cuando el secadero se carga por debajo de lo establecido, en este caso existe la posibilidad de que el carbón avance muy rápidamente hacia la descarga y por tanto puede que no se seque.

Para quemar completamente 1 kg de gasoil se requiere un mínimo de 15 kg de aire. Como en un quemador no se puede mezclar bien el aire con el combustible es necesario aumentar la cantidad de aire; esto aumenta el volumen de gases de la combustión, los



cuales por estar a una temperatura determinada aumentan las pérdidas de calor, proporcionales al exceso de aire.

Para medir el exceso de aire, se debe obtener una muestra de los gases y medir en ellos el contenido de anhídrido carbónico (CO₂). En una combustión perfecta el contenido de CO₂ debe ser el 15,2 % en volumen. El exceso de aire será por tanto más elevado cuando el porcentaje de CO₂ es menor.

Si la cantidad de aire es insuficiente, parte del carbono será parcialmente quemado, lo que se traducirá en la formación de hollín. Entonces, existe la tendencia a aumentar la cantidad de aire al quemador para asegurar una combustión lo más completa posible, pero un exceso de aire produce, en general, una llama de color amarillo claro.

1.6 Ladrillos refractarios aislantes

Los ladrillos refractarios aislantes se caracterizan por su baja densidad, la cual le confiere una baja conductividad térmica. Esta propiedad los hace óptimos para ser empleados en hornos industriales donde el ahorro energético es una importante condición de diseño.

Son fabricados con materias primas y procesos especiales para obtener alta porosidad, baja densidad y alta refractariedad.

Los ladrillos aislantes se utilizan como respaldo de ladrillos densos de mayores refractariedad y conductividad térmica. Pueden utilizarse como revestimientos de trabajos de hornos, pero únicamente cuando no están sometidos a la abrasión, corrosión o erosión por metales fundidos, escorias o gases a altas velocidades.

De los refractarios aislantes el utilizado en la instalación es el UA - 23 ladrillo refractario aislante del grupo 23. Para utilizar a PCE31 (1683 °C).

En la tabla 1.1 aparece en análisis químico de cada tipo de ladrillo para cada pared.

Tabla 1.1 Propiedades de cada uno de los refractarios de la cámara de combustión donde aparece el análisis químico de cada ladrillo

Análisis químico	Pared exterior	Pared interior	Techo	Piso
Al ₂ O ₃	33.0	50	50	50



SiO ₂	62.2	44	44	44
Fe ₂ O ₃	1.1	2.5	2	2
TiO ₂	1.3	2	2	0.5
CaO	0.3	1	0.5	1
MgO	0.4	0.3	0.5	0.5
Alcalis	1.3	0.2	1	2

1.7 Características técnicas de la cámara de combustión en el proceso de secado

La cámara de combustión actualmente posee 2.3 m de largo, 3.5 m de ancho y una altura de 1.9 m. Esto proporciona un volumen de 15.3 m³. En su interior la cámara cuenta con dos compartimentos producto de una pared que la divide, la cual mide 2.3 m de largo, 0.3 m de ancho o espesor y 1.9 m de altura, para un volumen de pared refractaria de 1.4 m³. Al descontar éste último se tiene que el volumen real de la cámara es de 12.9m³.

1.8 Métodos empleados para la investigación

Tomando como base la carga producida al horno mediante cálculos metalúrgicos se tomaron los consumos reales de combustible diario durante 20 días para la carga producida. De este análisis se deduce que realmente el horno consume 380.68 kg de diésel/t producidas. La base de datos se encuentra en el anexo 2.

Por la importancia que reviste para la empresa determinar con exactitud las pérdidas de energía por los exteriores de la cámara hacia el medio ambiente; se realizaron mediante la utilización de un pirómetro unas series de mediciones de temperatura en la parte exterior de la cámara de combustión y se buscó el promedio de éstas (anexo 1).

1.9 Combustible y combustión

Los combustibles pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. En muchos hornos rotatorios se emplean como combustibles una mezcla de sólido y líquido o de líquido y gas. Los combustibles líquidos que son usados para quemar en los hornos rotatorios son casi exclusivamente combustibles residuales después de haber sido separados por destilación los compuestos más volátiles, en las refinerías de petróleo.

En este caso el combustible empleado en el horno es el diésel. Éste llega al quemador por la acción de la gravedad y es atomizado. La presión del diésel en el quemador, que a



su vez influye en la forma de llama, se consigue por medio de una cabeza atomizadora en la cual se fuerza el combustible mediante una presión al salir por un pequeño orificio creando un movimiento turbulento.

La presión del diessel debe ser vigilada constantemente; si es demasiado baja no tiene lugar una buena combustión o en caso contrario no se quema todo el combustible se forma una llama rojiza.

La composición y la potencia calorífica del diessel es importante para cada una de las operaciones relacionadas en el horno, porque son las bases de cálculos de la transferencia de calor y el estudio de la eficiencia o rendimiento del horno.

El funcionamiento correcto del horno rotatorio requiere un suministro adecuado de calor, que primeramente se emplea para aumentar la temperatura de éste hasta alcanzar la temperatura de trabajo deseada y después para compensar las pérdidas de calor del sistema, incluyendo el calor necesario para el proceso, manteniendo la temperatura apropiada.

Para obtener la combustión se requieren dos condiciones:

1. Suficiente cantidad de oxígeno en la mezcla con el combustible.
2. Mantener cierta temperatura para que arda la mezcla combustible – oxígeno, además la combustión en el horno requiere que durante el tiempo que el combustible está en suspensión en la atmósfera de éste, tenga lugar la combustión completa.

1.10 Conclusiones del capítulo I

1. En la bibliografía consultada no se obtuvo suficiente información acerca de cámaras de combustión de hornos.
2. El nivel de automatización de la planta no es bueno, pues no hay equipos que puedan medir los diferentes parámetros de trabajo del horno; y los que existen están defectuosos.



Capítulo II: Materiales y Métodos

2.1 Introducción

El balance de masa y energía de un proceso industrial se hace con el objetivo de realizar una contabilidad exacta de todas las materias que entran, se genera, almacenan y salen, en un intervalo de tiempo dado. El principio fundamental en que se basan los cálculos de balance de materia es establecer un número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas.

Se pretende realizar los cálculos pertinentes para determinar los diferentes flujos que intervienen en el balance con el principal objetivo de conocer el consumo específico de combustible.

2.2 Método de cálculos

El método de cálculo empleado es el concebido por Chang Cardona y Yuzhaninov (1997) basado en el libro de texto básico "Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos", donde se estudia el análisis de las corrientes que entran y que salen del secador; y a partir de las mismas se establece un balance de masa y energía que permite determinar el consumo real de calores y la eficiencia real de la instalación. Para la realización de los cálculos, se utilizó el programa profesional Mathcad 4.5.

2.3 Materiales empleados

Para obtener los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación, se usaron los recursos puestos a disposición en el panel de control de la planta de secado del carbón. En dicho panel se tomaron las medidas de temperatura, esto fue posible usándose termopares en los lugares requeridos en el secador (cámara de combustión).

2.4 Cálculo de la combustión del combustible

Para realizar los cálculos, es necesario conocer el contenido de los elementos en la masa del combustible, (% másico). Los cálculos se pueden observar en el anexo # 5.

$$\begin{array}{lll} C^T = 85.8 & O^T = 0,8 & N^T = 1 \\ H^T = 12.198 & S^T = 0.2 & A^T = 0,001 \\ S^T = 0.2 & W^T = 0.001 & \end{array}$$



1. Potencia térmica del combustible

La potencia térmica del combustible se determina por la ecuación (2.1) y depende de la composición química del combustible en masa de trabajo.

$$Q_{me} = 328 \cdot C^T + 1211 \cdot H^T - 109 \cdot (O^T - S^T) - 25 \cdot (9 \cdot H^T + W^T) \quad (2.1)$$

Q_{me} : Potencia térmica menor (J/kg)

2. Cantidad teórica de aire para la combustión se determina por la ecuación

La cantidad de aire teórica para la combustión se determina por la ecuación (2.2) la cual permite determinar la cantidad de aire teórica necesaria para combustionar 1 kg de combustible.

$$Lo = [0,0889 \cdot C^T + 0,2667 \cdot H^T + 0,0333 \cdot (S^T - O^T)] \cdot (1 + 0,0124 \cdot d_h) \cdot \frac{21}{Os} \quad (2.2)$$

d_h : Contenido de humedad en el aire seco

Lo : cantidad teórica de aire para la combustión (m^3 / kg)

Os : Contenido de oxígeno en el soplado.

3. Cantidad práctica de aire para la combustión

La cantidad de aire real para la combustión se determina por la ecuación (2.3) y esta depende del coeficiente de exceso de aire que puede tomar valores superiores e inferiores a la unidad.

$$La = \alpha \cdot Lo \quad (2.3)$$

α : Coeficiente de exceso de aire se busca en la tabla 10 del libro: Calculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos.

La : Cantidad práctica de aire para la combustión (m^3 / kg)

4. Los volúmenes de los productos de la combustión

Estos volúmenes de los productos de la combustión se determinan por las ecuaciones (2.4 a 2.8a) donde se tiene en cuenta la composición del combustible, el exceso de aire.



$$V_{CO_2} = 0,0187 \cdot C^T \quad (2.4)$$

$$V_{H_2O} = 0,112 \cdot H^T + 0,0124 \cdot W^T + 0,0124 \cdot d_h \quad (2.5)$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^T \quad (2.6)$$

$$V_{O_2} = \frac{O_s}{100} \cdot (\alpha - 1) \cdot L_o \quad (2.7)$$

$$V'_{N_2} = 0,008 \cdot N^T + \left(1 - \frac{O_s}{100}\right) \cdot L_o \quad (2.8)$$

$$V_{N_2} = 0,008 \cdot N^T + \left(1 - \frac{O_s}{100}\right) \cdot L_a \quad (2.8a)$$

$V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{SO_2}, V_{N_2}, V_{O_2}$: Volúmenes de los productos de la combustión (m^3 / kg)

5. Volumen total de los productos de la combustión

Este se determina por la ecuación (2.9) que no es más que la sumatoria de los volúmenes de los gases de los gases que forman mezcla de gases de combustión.

$$V_a = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} \quad (2.9)$$

Donde:

V_a : Volumen total de los productos de la combustión (m^3 / kg)

5. Composición de los productos de la combustión

Se determina por la ecuación (2.10), no es más que la relación entre el volumen de una sustancia y el volumen tota productos de la combustión por el factor (100).

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_a} \cdot 100 \quad (2.10)$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_a}$$

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_a} \cdot 100$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_a} \cdot 100$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_a} \cdot 100$$



$CO_2, H_2O, O_2, N_2, SO_2$: Composición de los productos de la combustión (%)

2.4.1 Balance material de la combustión

Para la determinación de la masa de los productos de la combustión se determina la densidad por la ecuación (2.11).

$$\rho_g = \frac{44 \cdot CO_2 + 18 \cdot H_2O + 28 \cdot N_2 + 32 \cdot O_2 + 64 \cdot SO_2}{22,4 \cdot 100} \quad (2.11)$$

$$\rho_{aire} = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

ρ_{aire} : Densidad del aire

ρ_g : Densidad de los gases producto a la combustión (kg/m^3)

$V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{SO_2}, V_{N_2}, V_{O_2}$: Volúmenes de los productos de la combustión

2.5 Balance térmico

El balance térmico no es más que la evaluación cuantitativa de los diferentes índices de entrada y consumo de calor.

$$\sum Q_{i,ent.} = \sum Q_{i,sal.}$$

En la práctica con frecuencia se hace necesario realizar el balance térmico para el análisis de la eficiencia energética del horno (cámara de combustión).

Sobre la base del cálculo térmico en muchos casos, se determinan los consumos de energía necesarios (consumo de combustible), se hallan las vías para la disminución de este consumo.

En este caso el balance térmico de la cámara está relacionado a determinado intervalo de tiempo. Estos cálculos están representados en el anexo #4.

Mediante la ecuación (2.12) se realiza una comprobación de los calores que entran y los que salen.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (2.12)$$

Q1: calor de combustión del combustible, (W)



Q2: calor físico del combustible, (W)

Q3: calor físico del aire, (W)

Q4: calor perdido con los gases salientes, (W)

Q5: calor perdido al medio ambiente, (W)

Índice de entrada:

1. El calor de combustión del combustible

El calor de combustión del combustible se determina por la ecuación (2.13) donde se tiene en cuenta el consumo de combustible.

$$Q1 = Q_{me} \cdot X \quad (2.13)$$

Q_{me} : Potencia térmica menor del combustible de trabajo (J/kg)

X: consumo de combustible para el tiempo de balance (kg)

Esta potencia térmica es la calculada anteriormente por la ecuación (2.1)

El consumo de combustible para la cantidad de toneladas producida en un día es muy variado el consumo escogido para el cálculo de balance es el promediado en un periodo de 20 días (ver anexo 2)

2. El calor físico del combustible

El calor físico del combustible se determina por la ecuación (2.14) donde se tiene en cuenta la capacidad calorífica promedio de combustible a la temperatura que entra al quemador.

$$Q2 = C_h \cdot T_h \cdot X \quad (2.14)$$

C_h : Capacidad calorífica promedio ($J/kg \cdot ^\circ C$)

t_h : Temperatura del combustible al entrar a la cámara ($^\circ C$)

3. El calor físico del aire

El calor físico del aire se determina por la ecuación (2.15) donde se tiene en cuenta la cantidad real de aire que entra a la cámara.



$$Q3 = L_a \cdot C_a \cdot t_a \cdot X \quad (2.15)$$

L_a : Cantidad real de aire (m^3 / kg)

C_a : Capacidad calorífica promedio del aire [$J/m^3 \cdot ^\circ C$]

t_a : Temperatura del aire que entra al horno ($^\circ C$)

Índices de salida

4. El calor perdido con los gases salientes

El calor perdido con los gases salientes se determina por la ecuación (2.16) no es más que la sumatoria de los volúmenes de los gases producto a la combustión por las capacidades caloríficas de cada unas de las sustancias formadas a la temperatura que éstos salen del horno.

$$Q4 = V_d \cdot C_d \cdot t_d \cdot X \quad (2.16)$$

V_d : Volumen de los gases de combustión por cada kilogramo de combustible (m^3 / kg)

C_d y t_d : capacidad calorífica promedio de los gases de combustión y la temperatura con la cual estos salen del horno ($kJ / m^3 \cdot ^\circ C$) y ($^\circ C$) respectivamente

$$V_d \cdot C_d = (V_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + V_{SO_2} \cdot C_{SO_2} + V_{N_2} \cdot C_{N_2} + V_{O_2} \cdot C_{O_2})$$

$V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{SO_2}, V_{N_2}$: Volúmenes de los productos de la combustión (m^3/kg)

Estos volúmenes son los calculados anteriormente por la ecuación (2.4; 2.5; 2.6 y 2.8a) respectivamente.

5. El calor perdido al medio ambiente se determina por la ecuación (2.27)

En esta sección la transferencia existe pérdidas de calor por convección y radiación. En el caso de la convección es libre libre.

Existen pérdidas de calor por convección y radiación y se determina por la ecuación (2.17 y 2.18) respectivamente. Cada una de las paredes se puede ver en anexo # 4

$$q_{com(1;2;3;4;T)} = h \cdot A_{(1;2;3;4;T)} \cdot T_{s(1;2;3;4;T)} \quad (2.17)$$



$$q_{rad(1;2;3;4;T)} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{(1;2;3;4;T)} \cdot (T_{s(1;2;3;4;T)}^4 - T_0^4) \quad (2.18)$$

$q_{rad(1;2;3;4;T)}$: son las pérdidas de calor por radiación en cada pared de la cámara (W)

$q_{conv(1;2;3;4;T)}$: son las pérdidas de calor por convección en cada pared de la cámara (W)

h : coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²K)

ε : Emisividad

σ : Constante de Stefan Boltzman (W/m²K)

$T_{s(1;2;3;4;T)}$: Temperatura de las superficies uno, dos, tres, cuatro, y la del techo respectivamente (K)

T_0 : temperatura exterior de la cámara (K)

La transferencia de calor se va a determinar por secciones, (ver anexo 3)

Área de la pared 1 y 3 se determina por la ecuación (2.19), en (m²)

$$A_1 = A_3 = L \cdot G \quad (2.19)$$

Área de la pared 2 y 4 se determina por la ecuación (2.20), (m²)

$$A_2 = A_4 = a \cdot G \quad (2.20)$$

Área de la pared del techo se determina por la ecuación (2.21), en (m²)

$$A_r = L \cdot a \quad (2.21)$$

L : Longitud de la cámara (m)

a : Ancho de la cámara (m)

G : Altura de la cámara (m)

El coeficiente de transferencia de calor se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh que se calcula por la ecuación (2.22).

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{s(1;2;3;4;T)} - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (2.22)$$

$T_{s(1;2;3;4;T)}$: Temperatura de cada una de las superficies (K)



Los parámetros del fluido se buscan en la tabla A-4 del Incropera a la temperatura pelicular que se muestra en la en la ecuación (2.23).

$$T_{f(1,2,3,4,T)} = \frac{T_{S(1,2,3,4,T)} + T_0}{2} \quad (2.23)$$

$T_{f(1,2,3,4,T)}$: Temperatura pelicular de cada una de las paredes (K)

K: coeficiente de conductividad térmica (W/m.K)

P_r : Número de Prandtl

ν : Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

C_p : Capacidad calorífica del aire (J/kg.K)

α : Coeficiente de difusividad térmica (m^2/s)

β : Coeficiente de dilatación volumétrica (K^{-1})

σ : Constante de Stefan Boltzman ($W/m^2 \cdot K$)

ε : Emisividad

Si: G_r por P_r ; es mayor que 10^9 la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es determinado por la ecuación (2.24).

Si: G_r por P_r menor que 10^9 , la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es determinado por la ecuación (2.25).

$$N_{UL} = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{al}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (2.24)$$

$$N_{UL} = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra_L^{1/4}}{(1 + (0.492 / Pr)^{9/16})^{4/9}} \quad (2.25)$$

Luego el coeficiente de convección se determina por la ecuación (2.26)



$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} \quad (2.226)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.17) y (2.18), se determinan las pérdidas de calor por convección y radiación respectivamente de cada paré.

Luego se calcula la pérdida de calor total al medio ambiente por la ecuación (2.27).

$$Q_5 = (q_{conv (1;2;3;4;T)} + q_{rad (1;2;3;4;T)}) \cdot t_v \quad (2.27)$$

Sobre la base del balance térmico se calcula el rendimiento térmico.

$$\Sigma \text{ entrada} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\Sigma Q_{salida} = Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$\Sigma Q_{entrada} = \Sigma Q_{salida}$$

2.6 Rendimiento de la instalación

El rendimiento de la instalación se determina por la ecuación (2.28) donde es la relación entre el calor útil y el de entrada por cien. El rendimiento para este tipo de horno es de un 30 % dicho por Chang Cardona y Yuzhaninov (1997) en el libro de texto básico "Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos"

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{ent}}} \cdot 100 \quad (2.28)$$

Q_{útil}: consumos útiles de calor, (W).

Q_{ent}: total de calor de entrada, (W).

2.7 Conclusiones del capítulo II

1. Realizado el balance térmico de la cámara de combustión del secador de carbón, permitió determinar los calores que entran y salen de la cámara actualmente. Donde las pérdidas de calor emitida al medio ambiente es de Q₅=3716W.

2. El rendimiento térmico actual de la cámara de combustión oscila alrededor de un 28.124%.



Capítulo III: Análisis de los resultados

3.1 Introducción

La protección al medio ambiente se ha convertido en los últimos años en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. El grandioso desarrollo tecnológico que ha alcanzado el hombre para explotar las riquezas naturales; es acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, ha dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad; tales como el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, el ruido, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético. No es por lo tanto casual que las organizaciones políticas, sociales, científicas, los estados y gobiernos de tantas partes del mundo se hayan preocupado por tomar medidas de una forma u otra. Están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y a la protección del medio ambiente.

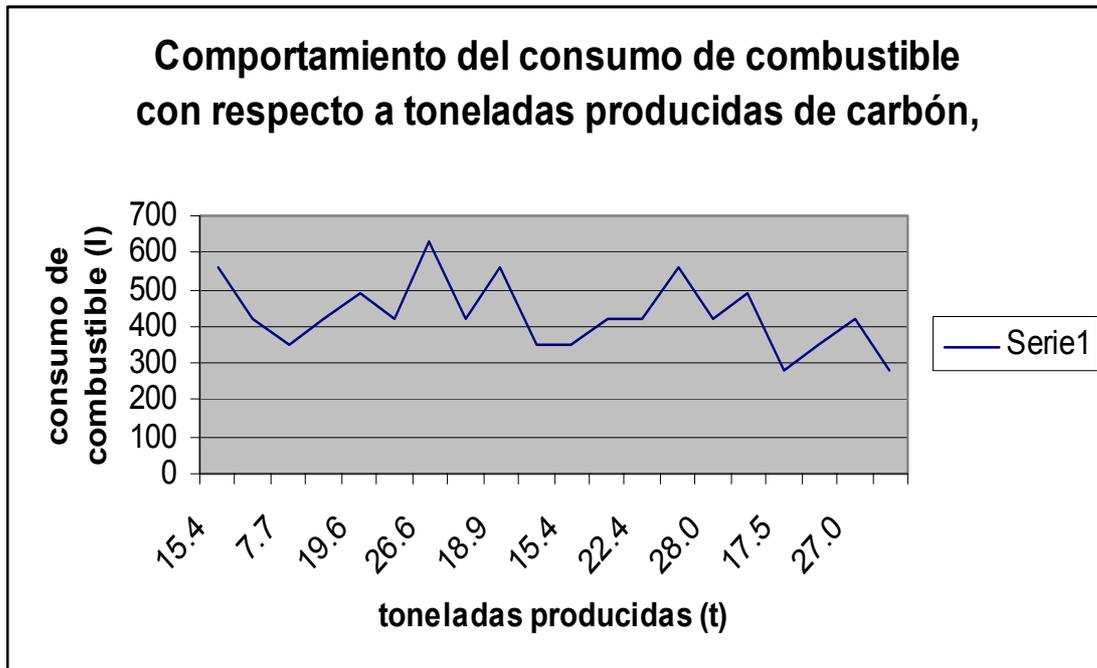
El periodo industrial moderno se ha caracterizado por los procesos de fabricación empleando energía. Las principales fuentes de éstas son los carbones, el petróleo, el gas natural y de alguna otra manera la energía hidráulica y nuclear.

El secado tiene una gran influencia en el cómputo energético final de una determinada estructura económica industrial. En la empresa de nombre comercial D'SIT el secado constituye en unos de los procesos de mayor consumo de energía térmica. En esto influyen una serie de factores estrechamente relacionados con las características del mineral alimentado y con los mecanismos de transferencia de calor establecidos, principalmente el contenido de humedad que el mismo presenta desde su origen.

3.2 Análisis del diagnóstico térmico

EL gráfico número 1 representa el control del consumo de combustible con respecto a las toneladas de carbón secas en un día, donde los picos más altos representa un consumo de combustible elevado y los picos bajos caída de consumo de diésel y es inestable el consumo con respecto a las toneladas producidas debido a la variación y elevadas humedades presentes en el carbón, por lo que si el carbón no sale con la humedad debida vuelven a procesar el carbón.

Gráfico #1: representa el control del consumo de combustible con respecto a las toneladas de carbón secas hasta la humedad requerida.



3.3 Resultados del balance de masa y energía

En la tabla (3.1) aparece la entrada de combustible e aire en la cámara y a la salida los productos de la combustión del combustible expresados en kg realizándose un análisis de balance donde todo lo que entra tienen que ser igual a lo que sale a la cámara. El resultado del balance se considera bueno porque el desbalance no cuantitativo.

Tabla 3.1 Balance material del combustible

Entrada	Unidad de medida
Combustible	1 kg
Aire	14.7453 kg
Total	15.7453
Salida	
Productos de la la combustión	15.5281 kg
Ceniza del combustible	0,001 kg
Total	15.5291 kg
<i>Desbalance</i>	0,2162 kg



En la tabla (3.2) aparecen los calores que entran y salen de la cámara de combustión realizándose un análisis de balance donde no se asume el desbalance.

Tabla 3.2 Balance energético

Entrada	Valor calculado	Unidad de medida
Calor de combustión del combustible	176500	(W)
Calor físico del combustible	271.744	(W)
Calor físico del aire	2091	(W)
Total	178800	(W)
Calor físico de los gases salientes	50290	(W)
Calor perdido a través del revestimiento	124813	(W)
Total	54010	(W)
Q6		(W)

3.4 Valoración económica

Los estudios realizados a partir de los balances de materias y energía mediante los cuales se realizaron los cálculos con el consumo práctico de combustible nos ha demostrado que existe un sobre consumo de combustible, es decir se está suministrando más petróleo al horno del que realmente necesita para el secado de carbón. Cuando aumentamos el coeficiente de exceso de aire disminuye el consumo de combustible es decir:

$Q_6=124813$ para un coeficiente de exceso de aire de 1.05 con un consumo de combustible de 0.0044 kg o lo que es lo mismo 432.6 litros.

$Q''=1.06945.496$ kg para un coeficiente de exceso de aire de 1.5. Por ésta relación el consumo de combustible es de 0.00377 kg o 370.1 litro por lo que existe una pérdida de 62.5 litros.

Efectuando los siguientes cálculos se puede obtener el valor en divisas por concepto del exceso de combustible suministrado.

Análisis para el consumo de diessel.

Valor actual del diessel: 0.40 centavos en CUC el litro

Multiplicando la pérdida de 62.5 por el valor actual del diessel nos ocasiona una pérdida promedio de 25 dólares al día. De continuar trabajando el horno con éste índice de



consumo, el costo total en un año de trabajo continuo es de 9125 CUC de pérdidas económicas para la empresa y el país.

3.5 Impacto ambiental

Un problema ambiental es la percepción de una situación o estado no satisfactorio con respecto a una parte o a la totalidad del medio ambiente. Es el empeoramiento cualitativo del entorno causado por la actividad antropica como la industrialización, la urbanización, la explotación irracional de los recursos, la presión demográfica o por factores naturales.

Los problemas ambientales pueden ser de carácter global, regional, nacional y local atendiendo a la extensión de su impacto. Un problema ambiental global es aquel de alcance planetario por sus causas o manifestaciones y que sólo pueden ser resueltos o paliados por la acción mancomunada de las naciones. Los de carácter regional son aquellos que afectan a varios países, a veces continentes enteros o una parte significativa de ellos o masas de agua que bañan a varios países. Los problemas nacionales como su nombre lo indica son los que producen afectaciones en un territorio considerable de un país, y los locales acusan un impacto en los marcos de una localidad.

Dentro de los principales problemas detectados en la empresa durante las operaciones habituales que en ella se realiza se encuentran los siguientes:

1. Contaminación del aire por emisiones de gases y polvo en la planta de proceso.
2. Incremento de los volúmenes de sedimentos en suspensión de las corrientes superficiales.
3. Alteración de hábito de las especies naturales.

3.5.1 Principales problemas ambientales detectados

La zona de preparación de carbón (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta la sección de molinos), constituyen áreas de contaminación por polvo.

El drenaje en el depósito exterior es insuficiente (hay dos canales que están secos).

En ocasiones se supera la norma de concentración de polvo (de 1 a 4 mg de polvo/m³), por esto se deben realizar determinaciones de polvo en la atmósfera en el área de trabajo.

3.5.2 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 medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial, ruido o gases por citar algunos.

La contaminación del aire es una amenaza aguda para el obrero en la empresa, es acumulativa y crónica para la salud humana constituyendo otro aspecto del bienestar humano y el ambiente.

En el caso de la empresa, originada específicamente por fuentes fijas y móviles de tecnologías obsoletas heredadas de años y que por problemas económicos, muchas de ellas aún siguen funcionando, independientemente de notarse mejorías en los niveles de emisiones contaminantes a lo largo del municipio.

Los niveles actuales de los contaminantes atmosféricos y su relación con la ocurrencia de enfermedades respiratorias resultan de gran interés por su vinculación directa con la salud humana y con el nivel de vida de la población, esto se clasifican en agudos, acumulativos y crónicos, dependiendo del tipo y grado de exposición y de los factores personales que modifican la acción de los diferentes contaminantes.

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 las 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 tenemos:

- *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, el polvo emitido durante el proceso provoca la contaminación del medio ambiente. En la masa de mineral que se incorpora al secado hay incluidas partículas de pequeños tamaños, o sea, polvo, al secarse el mineral esas partículas se desprenden del mismo y son arrastradas por el flujo de gases que envía la cámara de combustión. Estas partículas se tratan de recuperar ya que un 36% del mineral es arrastrado por los gases. En los cilindros y los ciclones se recupera parte de este, pero a causa de que este mecanismo de limpieza de gases está trabajando a un 150% de su capacidad, es evidente de que se escape por la chimenea gran cantidad de polvo, lo cual es uno de los elementos más contaminantes que afectan al medio ambiente. Además por el estado tecnológico de la planta, hay emisión de polvo hacia el lugar de trabajo, lo cual hace menos favorable las condiciones de trabajo en algunas áreas de la planta.

Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vía:

1. Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.

Absorción de polvos a través de la piel.

2. 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 bellos 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 inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas 0,01 a 0,1 μm que penetran en los

alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

Las partículas pueden tener efecto tóxico de las maneras siguientes:

1. Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características químicas inherentes.
2. Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

Los polvos se clasifican según la forma de acción biológica sobre el organismo humano:

Polvos inherentes: Son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos tóxicos: Ocasionan en uno o varios órganos y sistemas específicos del organismo humano.

Polvos energéticos: Son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.

Polvos fibrógenos: Ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

3.5.3 Influencia del ruido en el medio ambiente

Por el interior del tambor rotatorio se mueve constantemente de un extremo a otro el mineral, el mismo está compuesto por dos elementos fundamentales: limonita y serpentinita. La limonita tiene la característica de ser arcillosa y la serpentinita es rocosa, estas rocas al estar rotando dentro del secador, son levantadas y dejadas caer luego para formar la cortina de mineral que permite que este entre en mayor contacto con los gases. Producto de esta caída, fundamentalmente las rocas impactan contra la pared opuesta del tambor rotatorio, generando un nivel de ruido molesto al oído del ser humano.

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos afectando 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 se encuentra con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de Corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirectos y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardíaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión, las afectaciones al sueño, y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental fundamentalmente.

3.6 Conclusiones del capítulo III

1. Existe un sobre consumo de combustible de 62.5 litros que representa 9125 CUC al año.
3. La mayor afectación al medio ambiente, fundamentalmente al hombre en esta planta es ocasionada por la emisión del polvo.
4. Es imprescindible el cumplimiento de todas las medidas, así como la realización de debates acerca del cuidado del medio ambiente.



Conclusiones generales

1. En la bibliografía consultada no se obtuvo suficiente información acerca de cámaras de combustión de hornos (de tambor rotatorios).
2. La instrumentación de la planta no es bueno, pues no hay equipos que puedan medir los diferentes parámetros de trabajo del horno y los que existen están defectuosos.
3. Cambiar el combustible para disminuir los gastos de la empresa.
4. La mayor afectación al medio ambiente y fundamentalmente al hombre en esta planta es ocasionada por la emisión de polvo.
5. Es imprescindible el cumplimiento de todas las medidas, así como la realización de debates acerca del cuidado del medio ambiente.



Recomendaciones

1. Complementar el estudio para la instalación de una capa termo aislante a la cámara del horno, que permita llevar las pérdidas de energía al medio ambiente a mejores niveles.
2. Cambiar el combustible por uno que tenga menos costo.
3. Evaluar la sustitución de la cámara de combustión por otra más eficiente.
4. Aumentar el exceso de aire hasta valores permisibles que garanticen la combustión eficiente.
5. Instalar equipos de mediciones para tener controlado los diferentes parámetros del horno.
6. Usar siempre los medios de protección para evitar una enfermedad.



Bibliografía

1. Baker, C. G. J.: The design of flights in cascading rotary dryers, *Drying Technology*, 6 (4): 631 – 653, 1988.
3. Chang Cardona y Yuzhaninov; Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos: (1997).
2. Collard, J. M.; Arnaud, G.; Fohr, J. P: The drying induced deformations of a clay plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 35: 102 – 115, 1992.
4. Dinulescu, H. A.; Eckert, E.R.G.: Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 28 (9): 1069 – 1077, 1985.
5. Ferguson, W. J.; Turner, I. W.: A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. *Int. J. Num. Methods Eng.* 38: 451 – 467, 1995.
6. Fortes, M.; Okos, M. R.: Heat and Mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. *A.I. Ch.E. J.* 27 (2): 255 – 262, 1981.
7. Friedman, S. J. and Marshall, W. R.: Studies in Rotary Drying. Part 1. Hold-up and Dusting, *Chem. Eng. Progr.* 45 (8): 482, 1949.
8. Fulford, G.D.: A survey of recent soviet research on the drying of solids. *Can. J Chem. Eng.* 47: 378 – 491, 1969.
9. Huang, C. L.: Multi – Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 22: 295 – 307, 1979.
10. Ilic, M.; Turner, I. W.: Convective drying of a consolidated slab of wet porous materials. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 32 (12): 215 – 262, 1989.
11. Kallel, F.; ... et al: Effects of moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. *J. Heat Transfer, ASME Trans.* 115: 724 – 733, 1993.
12. Kelly, J. J. and Donnell, P.: Residence Time Model for Rotary Drums. *Trans. Instrn. Chem. Engrs.* 55 (4): 243, 1977.



13. Kelly, J. J.: Analysis of Design and Operating Conditions for Rotary Dryers and Coolers. Part II. Introductory Analysis of Residence Time Relationships, Technol. Ireland: 15, 1969.
14. Luikov, A.V.: Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. Pergamon Press, New York, 1966.
15. Matchett, A. J. and Baker, C. G. J.: Particle residence time in cascading rotary driers part 2 – Application of the two – stream model to experimental and industrial data, J. Separ. Proc. Technol: 5 – 13, 1988.
16. Matchett, A. J. and Baker, C. G. J.: Particle residence times in cascading rotary driers part 1- Derivation of the two – stream model. J. Separ. Proc. Technol. 8: 11 – 17, 1987.
17. Matchett, A. J. and Sheikh, M. S.: An Improved Model of Particle Motion in Cascading Rotary Dryers. Trans. Instn. Chem. Engrs. . 68, Part A, March: 139 – 148, 1990.
18. Miranda, J. L. y otros. Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel. Revista Minería y Geología. Moa. 13 (2): 42 – 47, 1996.
19. Mora, E.: Evaluación de los gases residuales en el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. Trabajo de Diploma. ISMM Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 1999.
20. Papadakis, S. E.: Scale – up of cascading rotary dryers. Drying Technology. 12: 259 – 279, 1994.
21. Peishi, C.; and Pei, D. C.: A mathematical model of drying processes. Int. J. Heat Mass Transfer. 32 (2): 297 – 310, 1989
22. Perrin, B.; Javelas, D. A.: Transferts couples de chaleur et de Masse Dans des Materiaux Consolides Utilises en Genie Civil. Int. J. Heat Mass Transfer. 30: 297 – 309, 1987
23. Piet, J. A.: The role of theoretical and mathematical modelling inscale – up. Drying Technology. 12: 1 – 46, 1994.



24. Philip, J.; De Vries, D. A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. unión.* 18: 222 – 232, 1957.
25. Plumb, O, A.; Spolek, G. A.; Olmstead, B.A.: Heat and Mass transfer in Wood during drying. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 28 (9): 169 – 178, 1985.
26. Saeman , W. C. and Mitchell, T. R.: Analysis of Rotary Dryer and Cooler Performance, *Chem. Eng. Progr. .* 50 (9): 476, 1954.
27. Sanches, M. P. y otros: Simulación de secadores de bagazo del tipo tambor rotatorio. CDRom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana, 1997.
28. Schofield, F. R. and Glikin, P. G.: Rotary Dryers and Coolers for Granular Fertilizers, *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 40: 183, 1962.