



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

# Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título:** Balance térmico y de masa para el  
secado de arena sílice en cilindros rotatorios  
horizontales

**Autor:** Ernesto Tang Figueroa

**Tutor:** Dr. C. Enrique Torres Tamayo

**Moa - 2014**

**“Año 56 de la Revolución”**



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

---

Yo: **Ernesto Tang Figueroa**, autor de este trabajo de diploma y el tutor Dr. C. Enrique Torres Tamayo, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

**Ernesto Tang Figueroa**

---

**Dr. C. Enrique Torres Tamayo**



## PENSAMIENTOS

---

*Lo más importante de todo es no dejar de hacerse preguntas.*

**Albert Einstein**

*Hay muchos que luchan una hora y son buenos, hay otros que luchan un año y son mejores, hay otros que luchan muchos años y son muy buenos, pero poco luchan la vida entera. Esos son los imprescindibles.*

**Beltrolt Breeff**

*Emplearse en lo estéril cuando se puede hacer lo útil; ocuparse en lo fácil cuando se tiene bríos para intentar lo difícil, es despojar de su dignidad al talento.*

José Martí Pérez

**Apóstol Nacional de Cuba**

*Ver después no vale, lo que vale es ver antes y estar preparado.*

José Martí Pérez

**Apóstol Nacional de Cuba**



## **AGRADECIMIENTOS**

---

Durante esta etapa de los cinco años de mi carrera universitaria, en el ISMM de Moa tengo en cuenta el resultado de todo lo que he obtenido junto a tantas personas, temiendo que alguien quede olvidado, doy las gracias de corazón a todos los que me rodean que han tenido que ver de una forma u otra con la realización de este trabajo y a mi formación como profesional.

### **Agradecimientos especiales a:**

- Mi tutor: Dr. C. Enrique Torres Tamayo por las ayudas prestadas en todo momento.
- A mi madre Xiomara Figueroa Hidalgo, por haberme dado buena formación desde mi niñez y en forma general a toda mi familia por su incansable dedicación.
- A mis compañeros de aula que siempre estuvieron a mi lado.
- En fin a nuestra revolución por haberme dado la oportunidad de estudiar desde mi infancia hasta la actualidad.

**A todos “Muchas Gracias”**

**El autor**



## DEDICATORIA

---

Cuando se logra un triunfo y se desea dedicar, siempre se piensa en las personas que más unidas estuvo a uno, en ese que siempre te estuvo observando, aconsejando, brindándote momentos que se quedan plasmados para siempre en la memoria. Por esto yo les dedico este trabajo:

A la Revolución Cubana y a nuestro querido Fidel Castro Ruz por haberme dado la oportunidad de superarme.

A mi madre (Xiomara Figueroa Hidalgo), quien ha sido el motor impulsor para que yo siguiera hasta el final.

A mis abuelas por su entrega incondicional en todos estos años.

A mi padre, a toda mi familia por su gran ayuda y comprensión.

A todas aquellas personas que me ayudaron y dieron su mano y parte de su tiempo.

**A todos “les dedico este éxito”**

**El autor**



## RESUMEN

---

En la actualidad existen elevadas pérdidas de calor en los secaderos cilíndricos rotatorios pero no se han realizado hasta el momento trabajos encaminados a la determinación de estas pérdidas en estos equipos para las condiciones de explotación existentes en la instalación.

En el trabajo se tuvieron en cuenta expresiones teóricas y empíricas relacionadas con los métodos de balance termoenergético obtenidos a partir de la consulta realizada en las bibliografías existentes. Se estableció el método de balance térmico que relaciona los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad específica del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de arena sílice húmedo, humedad de entrada).

A partir de procedimientos estadísticos se establecieron los diferentes límites de tolerancia e intervalos de confianza para un nivel del 95 % de los parámetros de eficiencia. Finalmente se realizó una valoración económica, que muestra un costo por consumo de combustible de 10 216 800 USD, en el período que se evalúa. Se analizó el impacto que tiene el proceso estudiado en el ambiente.

Las pérdidas de calor totales por convección obtenidas en el secadero tuvieron un valor de  $3,539 \cdot 10^5$  W y por radiación ascendieron a  $5,216 \cdot 10^5$  W para las secciones analizadas.



## ABSTRACT

---

At the present time high losses of heat exist in the rotational cylindrical dry but they have not been carried out until the moment works guided to the determination of these losses in these teams for the existent conditions of exploitation in the installation.

In the work they were kept in mind theoretical and empiric expressions related with the methods of balance termoenergético obtained starting from the consultation carried out in the existent bibliographies. The method of thermal balance that relates the parameters of efficiency settled down (thermal yield, I consummate specific of fuel and specific productivity of the dryer) in function of the most influential variables in the process (humid flow of sand silica, entrance humidity).

Starting from statistical procedures the different limits of tolerance and intervals of trust settled down for a level of 95% of the parameters of efficiency. Finally he was carried out an economic valuation that shows a cost for consumption of fuel of 10 216 800 USD, in the period that is evaluated. The impact was analyzed that has the process studied in the atmosphere.

The total losses of heat for convection obtained in the dry had a value of  $3,539 \cdot 10^5$  W and for radiation they ascended  $5,216 \cdot 10^5$  W for the analyzed sections.

**ÍNDICE**

<b>Contenido</b>	<b>Págs.</b>
<i>Introducción.....</i>	<i>1</i>
<b>Capítulo 1</b> <i>Marco teórico- metodológico de la investigación.....</i>	<i>5</i>
1.1- <i>Introducción.....</i>	<i>5</i>
1.2- <i>Trabajos precedentes.....</i>	<i>5</i>
1.3- <i>Descripción del flujo tecnológico de la UEB de fundición.....</i>	<i>10</i>
1.4- <i>Partes principales del secadero.....</i>	<i>16</i>
1.5- <i>Estructura interna de los secaderos.....</i>	<i>18</i>
1.5.1- <i>Teoría del proceso de secado.....</i>	<i>19</i>
1.6- <i>Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos           Horizontales.....</i>	<i>20</i>
1.7- <i>Eficiencia del secado en cilindros rotatorios.....</i>	<i>20</i>
1.8- <i>Conclusiones del capítulo 1.....</i>	<i>23</i>
<b>Capítulo 2</b> <i>Método de balance térmico y de masa para secadores           cilíndricos rotatorios horizontales.....</i>	<i>24</i>
2.1- <i>Introducción.....</i>	<i>24</i>
2.2- <i>Calculo de las propiedades termofísicas del aire.....</i>	<i>24</i>
2.3- <i>Balance térmico y de masa.....</i>	<i>25</i>
2.3.1- <i>Balance de energías.....</i>	<i>26</i>
2.3.2- <i>Balance de masa.....</i>	<i>36</i>
2.3.3- <i>Rendimiento térmico de la instalación.....</i>	<i>39</i>
2.3.4- <i>Índice del consumo de combustible y productividad específica del           secador.....</i>	<i>39</i>





2.4-	<i>Técnicas experimentales para la toma de datos en el proceso de secado.....</i>	40
2.5-	<i>Conclusiones del Capítulo 2.....</i>	41
<b>Capítulo 3</b>	<b><i>Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental .....</i></b>	<b>42</b>
3.1-	<i>Introducción.....</i>	42
3.2-	<i>Análisis de los resultados de la investigación.....</i>	42
3.3-	<i>Principales parámetros medidos en la instalación.....</i>	43
3.3.1-	<i>Principales resultados del cálculo .....</i>	44
3.3.2-	<i>Análisis de las mediciones y los resultados del cálculo.....</i>	45
3.3.3-	<i>Comportamiento de los principales parámetros.....</i>	45
3.4-	<i>Perdidas de energía por transferencia de calor.....</i>	48
3.5-	<i>Valoración económica.....</i>	51
3.6-	<i>Principales problemas ambientales detectados en el taller.....</i>	52
3.6.1-	<i>Influencia del polvo en el medio ambiente.....</i>	53
3.6.2-	<i>Influencia del ruido en el medio ambiente.....</i>	55
3.6.3-	<i>Medidas para la protección del medio ambiente durante el secado de arena sílice.....</i>	56
3.7-	<i>Conclusiones del Capítulo 3.....</i>	56
	<b><i>Conclusiones.....</i></b>	<b>58</b>
	<b><i>Recomendaciones.....</i></b>	<b>59</b>
	<b><i>Referencias Bibliográficas.....</i></b>	<b>60</b>
	<b><i>Anexo.</i></b>	<b>---</b>

## INTRODUCCIÓN

Los secadores rotatorios se usan mayoritariamente en la industria de minerales, para el secado de arenas, piedra caliza, piedras naturales y minerales. Además, se usan para el secado de fertilizantes, trozos de madera, carbón, sulfato de hierro, tortas de filtrado, fangos, etc. Sus características principales son su alta producción, rendimiento, y la habilidad para procesar productos con gran variedad de tamaños, y contenido de humedad, esta es una práctica ampliamente difundida, que origina diversos problemas que afectan los costos y la calidad del mismo. El bloqueo económico norteamericano impuesto hacia nuestro país se muestra particularmente severo en este renglón. En 1987 ante las necesidades que imponía el desarrollo de la industria cubana del níquel existe la empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche donde el área ocupada por las instalaciones corresponden a un poco más de 250 000 m<sup>2</sup>, de las cuales más de la tercera parte son productivas sus instalaciones abarcan 11 unidades empresariales de base productivas y de servicio para la construcción de piezas fundidas, fabricaciones mecánicas, y de estructuras metálicas, reparación de equipamiento eléctrico industrial, vehículos ligeros y camiones de carga pesada y semi-pesadas. La entidad consta de 42 objetos de obras, proyectados fundamentalmente por especialistas soviéticos y cubanos. Desde su puesta en marcha ha sido muy importante para la economía del país, esto ha permitido el desarrollo de la zona y el progreso económico y social al generar empleo e inversiones, favoreciendo la vida de cada ciudadano cubano.

Teniendo en cuenta estos problemas la transmisión del calor se presenta, casi sin excepción, en todas las industrias, existiendo incontables diferencias de detalles a causas de la gran diversidad de su campo de aplicación.

Las leyes de transmisión del calor tienen primordial importancia en el diseño y funcionamiento de múltiples equipos, entre ellos los generadores de vapor, hornos, precalentadores, refrigeradores, evaporadores y condensadores. También tienen diversas aplicaciones para el secado en innumerables industrias.

La transferencia de calor, se efectúa de diferentes formas: por conducción, convección y radiación, la misma se puede manifestar en las producciones de vapor en

termoeléctricas, el enfriamiento y calentamiento de sustancias en intercambiadores de calor, para este trabajo tiene particular interés el secado de arena sílice que se desarrolla en el cilindro rotatorio de la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche.

La arena sílice o cuarzo es un mineral no metálico, inodoro, de granos finos hasta gruesos de forma irregular hasta semiredondo de colores variables en los que se encuentran el blanco, beige y amarilla principalmente, es extraída de los yacimientos ubicados al sur de la provincia de Pinar del Río. El origen geológico de estos yacimientos se corresponde con la formación San Cayetano y con la erosión y arrastre de las partículas hasta la formación de los yacimientos de arenas.

### **Fundamento de la investigación**

El secado es la eliminación del agua que contienen los materiales, el mismo se realiza a través de un proceso de transferencia de calor y masa, también puede efectuarse por medios mecánicos (sedimentación, centrifugación y filtración). Sin embargo, la deshidratación más completa se alcanza mediante el secado térmico (Knoule, 1968).

En la actualidad no se ha logrado implementar de forma eficiente el proceso de secado en el cilindro rotatorio de la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche debido a la falta de instrumentos de mediciones, la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen. El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa, mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que posee este, obteniendo al final un producto diferente, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación dado. Este líquido suele ser agua natural o mezclada, también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico e inorgánico.

Este proceso en la empresa, tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad de la arena sílice hasta valores mínimos, con la mayor eficiencia posible para facilitar la molienda, teniendo en cuenta que este tiene un consumo de combustible de 44 L/h el cual se considera elevado.

A partir de los comentarios antes mencionados se declaran los siguientes aspectos:



**Problema:**

Baja eficiencia del proceso de secado en tambor rotatorio de arena sílice en la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche.

**Objeto de estudio de la investigación:**

El proceso de secado en el tambor cilíndrico rotatorio de arena sílice de la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche.

**Campo de acción:**

El proceso de secado de la arena sílice.

**Hipótesis:**

Mediante un balance térmico y de masa en el proceso de secado de arena sílice en tambor cilíndrico rotatorio de la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche es posible determinar la influencia del contenido de humedad y flujo de arena alimentado en el consumo de combustible y el rendimiento de la instalación.

**Objetivo del trabajo:**

Realizar un balance térmico y de masa en el proceso de secado de arena sílice en tambor cilíndrico rotatorio de la empresa Gustavo Machín Hoed De Beche.

**Objetivos específicos:**

- 1- Establecer las características fundamentales del método de balance térmico y de masa de acuerdo al objeto de estudio.
- 2- Evaluar el comportamiento de los parámetros fundamentales del proceso de secado y su influencia en los indicadores de eficiencia.

**Tareas del trabajo:**

- 1- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de secado que permita el establecimiento del estado actual de la temática en la empresa.
- 2- Instaurar el procedimiento de cálculo para el balance térmico y de masa de los secaderos.



- 3- Establecer el comportamiento de la eficiencia térmica, y el consumo de combustible para diferentes contenidos de humedad en el mineral de entrada.
- 4- Realizar valoración del impacto económico asociado al proceso y las afectaciones medioambientales que el mismo provoca al medio ambiente.

## CAPÍTULO 1

---

### MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 – Introducción

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 de un riguroso análisis teórico.

La importancia de los procesos de secado se puede apreciar a través de los estudios realizados por Franzen *et al.* (1987) quienes estimaron que a nivel mundial se consumen más de  $2 \cdot 10^5$  MJ de energía en el secado de alimentos cada año y por otro lado, Strumillo *et al.* (1995) determinaron que 12 % del consumo mundial de energía a nivel industrial es destinado a los procesos de secado.

A pesar de que los datos anteriores señalan al secado como uno de los procesos más empleado a nivel industrial, todavía se desconocen muchos aspectos relacionados con las etapas y los mecanismos de movimiento de la humedad implicados en el mismo. Esto se debe a la complejidad de la estructura de los materiales sometidos a secado, porque a nivel microscópico son complejos (Hernández y Quinto, 2005).

#### **Objetivo del capítulo:**

Exponer los fundamentos teóricos del proceso de secado térmico en tambores cilíndricos rotatorios.

#### 1.2- Trabajos precedentes

El secado con el empleo de la energía térmica se ha desarrollado vertiginosamente en el mundo, de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Krisher, 1961; Strumillo, 1975) se destacan dos tendencias fundamentales: el secado bajo parámetros controlados y el secado solar. A este trabajo ofrece particular interés la primera de ellas.

Respecto al primer elemento se encontraron numerosos trabajos experimentales encaminados a describir el comportamiento de la transferencia de calor y masa en el

secador y caracterizar la cinética del proceso de secado y la humedad de equilibrio. Los trabajos más pertinentes se analizan a continuación:

Lykov (1954) demostró experimentalmente que el proceso de secado depende del mecanismo de transporte de la humedad en el interior del sólido bajo la acción de un gradiente térmico, de la energía de vaporización y de la difusión del vapor desde la superficie del material hacia los alrededores, a través de la capa límite. Este descubrimiento es válido para el secado de los materiales capilar porosos, grupo al que corresponde la arena sílice según la clasificación dada por Kasatkin (1987).

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

Fulford (1969) y Boizán (1991) proporcionan varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado. Estos modelos reportados por diferentes autores (Filonenko, 1958; Rezchikov *et al.*, 1966; Kuroshkina, 1972) fueron establecidos considerando la velocidad de secado ( $N$ ) constante. En todos los casos  $N$  se expresa en forma de una función empírica de los parámetros fundamentales del proceso. Estas expresiones no pueden ser aplicadas al secado de la arena sílice porque en este proceso la velocidad de secado varía y no existe fluidización, además, los materiales experimentados (semillas de tomate, granos y partículas de papa, respectivamente) tienen propiedades termofísicas diferentes a la del sólido estudiado en este trabajo.

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.

Whitaker (1977) obtuvo ecuaciones aproximadas para el secado continuo de diferentes materiales; Huang (1979) usó un sistema de ecuaciones para la etapa del secado en el cual el movimiento del líquido debido al flujo capilar es dominante y un sistema diferente de ecuaciones para el estado, donde el movimiento de la humedad ocurre a través de la difusión del vapor.

Thomas *et al.* (1980) resolvieron las ecuaciones expuestas por Lykov (1954) usando el método de elementos finitos, ellos resolvieron las ecuaciones diferenciales parciales no lineales para los casos donde es posible variar las propiedades de los materiales y también ecuaciones lineales con propiedades constantes de los materiales; compararon los resultados de ambos casos con los de un análisis lineal del secado de una sección de madera y constataron que no había diferencia con los resultados no lineales, de ahí que asumir las propiedades del material constante se justifique en algunos casos. De los resultados obtenidos por estos investigadores se deduce que es posible simplificar el estudio del proceso al asumir constantes las propiedades del material, siempre que el rango de error no exceda las especificaciones propias del proceso estudiado.

Dinulescu *et al.* (1985) presentan una solución analítica para la migración unidireccional de humedad bajo gradientes de contenido de humedad y temperatura asumiendo propiedades de transporte constante, obtuvieron relaciones para la temperatura y campos de humedad en forma adimensional. Estos resultados no tienen aplicación práctica para el caso estudiado debido a las simplificaciones realizadas por los autores.

Plumb *et al.* (1985) desarrollaron sistemas de ecuaciones que describen tanto el transporte capilar como difusivo de humedad y calor para el secado de madera, sus predicciones numéricas se basaron en funciones empíricas para predecir la transferencia de calor por convección en la superficie como una función del contenido de humedad de dicha superficie. A pesar de que los resultados obtenidos son



satisfactorios para el secado de madera, los mismos no pueden ser generalizados hacia la arena sílice por las diferencias notables que existe entre las propiedades térmicas de ambos sólidos.

Delgado (2013) investigó específicamente el secado de materiales porosos; los cuales están sometidos a régimen de trabajo intenso con alta variabilidad en sus parámetros de operación. En los referidos equipos se han realizado varios estudios sobre la transferencia de calor y masa presente durante el secado de mineral laterítico cuyo objetivo principal fue desarrollar la evaluación termoenergética del proceso de secado de mineral laterítico en los secadores cilíndricos horizontales rotatorios mediante el método de balance térmico y de masa. En el mismo se tuvieron en cuenta expresiones teóricas y empíricas relacionadas con los métodos de balance termoenergético donde estableció el método de balance térmico que relaciona los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad específica del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de mineral húmedo, humedad de entrada).

Ferguson *et al.* (1995) Derivaron las ecuaciones de conservación para líquido y aire haciendo aproximaciones continuas para el secado de madera por debajo del punto de ebullición del agua; utilizando la técnica del volumen de control como un punto de referencia validaron los resultados obtenidos con el empleo del método de elementos finitos; encontraron ligera diferencia en los resultados de ambos métodos durante la última etapa de secado.

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 cómo influye el empleo gases calientes como aire secundario en el costo de producción. Comprobándose que se reduce el consumo de combustible.

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.

Schofield y Glikin (1978) auxiliándose de esta aproximación, usaron una ecuación teórica para predecir el área de la superficie y una relación empírica para la transferencia de calor en materiales esféricos.

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.

Peishi *et al.* (1989) usaron diferentes formulaciones matemáticas para la región húmeda, en estas el mecanismo de transferencia es el flujo capilar de agua libre y la región de sorción en la que el transporte de humedad es debido al movimiento del agua no estructural y la transferencia de vapor, usando el modelo desarrollado estudiaron el comportamiento del secado de ladrillos, madera y granos de maíz, haciendo predicciones en cuanto a la temperatura y distribución del contenido de humedad para esos materiales. Ilic *et al.* (1989) utilizaron la forma integral de las ecuaciones de conservación de la masa y energía considerando un elemento de volumen promedio, el que consta del sólido poroso, agua y vapor de agua para describir el secado del material en las regiones húmedas y secas.

En cuanto a la modelación matemática, Smith *et al.* (1997) plantean que la modelación matemática de un proceso industrial usualmente parte con el balance de una cantidad conservada: masa y energía, por lo que el balance puede ser escrito como:

$$\begin{array}{l} \text{Total masa / energía} \\ \text{que entra al volumen} \\ \text{de control.} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Total masa / energía} \\ \text{que sale} \\ \text{del volumen de control.} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Total masa / energía} \\ \text{acumulada en el} \\ \text{volumen de control.} \end{array}$$

Por otra parte Fitt (1996) afirma que muchos modelos matemáticos de procesos industriales pueden ser escritos como sistemas  $n \times n$  de leyes de conservación en términos de  $n$  variables independientes.

Eich-Soellner *et al.* (1997) señalan que la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas químicas, ofreciendo un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivados de la modelación de una planta de producción.

Kallel *et al.* (1993) estudiaron el efecto del contenido de humedad inicial y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de ladrillos; emplearon ecuaciones de conservación para líquidos, aire y vapor de agua, similar a las utilizadas por Whitaker (1977). El efecto del flujo capilar en la primera etapa de secado y difusión gaseosa en la última etapa son dados en términos de coeficientes difusivos para los líquidos y vapores. Este aporte no es satisfactorio para predecir el comportamiento del secado de arena sílice debido a que las expresiones fueron obtenidas para el proceso continuo y el caso estudiado corresponde al secado periódico.

También se ha investigado el comportamiento del arrastre de partículas finas en los gases de los secadores; la influencia que tienen la humedad de equilibrio, la constante de secado y el coeficiente de transferencia de masa en el secado de las menas lateríticas y a los problemas que limitan la productividad de los secadores (Torres, 1999; Torres *et al.* 2000, 2003; Aldana *et al.* 2004).

Como se puede observar de este análisis, en Cuba la literatura recoge pocos intentos de estudios experimentales de los secadores rotatorios al parecer por la dificultad de hacer mediciones en dicho agregado, particularmente en condiciones industriales, ya que carecen de una data precisa y adecuada de la transferencia de calor, masa y del movimiento de la partícula por el interior del equipo, todos estos aspectos son los que han motivado la realización de esta investigación con vista a profundizar en la influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible y el rendimiento térmico de los secaderos cilíndricos.

### **1.3- Descripción del flujo tecnológico de la UEB de Fundición**

La UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel comienza a trabajar el día 27 de Diciembre de 1986. Situado al fondo de la parte izquierda del área central de la Empresa y ocupando un área de 10062 m<sup>2</sup>, tiene como objetivo la obtención de piezas fundidas en hierros, aceros y aleaciones no ferrosas.

El proceso tecnológico se inicia desde dos direcciones diferentes: Con la preparación de los materiales necesarios para la carga de los hornos con el metal líquido por un

lado y por el otro la selección de la arena y la fabricación de machos y moldes en los cuales se verterá el metal para la obtención de la pieza fundida.

Los materiales de carga preparados y clasificados, así como el retorno de la propia producción del taller (Sistemas de alimentación, mazarotas y piezas rechazadas) se descargan y almacenan en los fosos con ayuda de la grúa de puente con electroimán, las ferroaleaciones y materiales formadores de escoria se colocan en contenedores identificados para evitar que se contaminen.

La carga metálica que se introducirá en los hornos se prepara en el área de preparación de carga, para lo cual los braceros colocan un cesto con ayuda de la grúa puente al lado de la balanza electrónica y guiándose por lo que indica la receta para la preparación de la carga prevista pesan la proporción indicada de cada material y la colocan dentro del cesto en el orden que indica la instrucción auxiliándose de la grúa, después de terminada la carga se identifica mediante una tarjeta, se registra y se envía para el área de fusión usando la carretilla eléctrica. Los materiales de moldeo se transportan en camiones y se guardan en el almacén, la arena se recibe en camiones y con ayuda de una grúa jaiba se deposita en fosos previstos para tales propósitos.

La arena se seca en un horno de tambor rotatorio de 1m de diámetro y de 4m de largo equipado con dos quemadores de fuel, para lo cual se llena con ayuda de la grúa jaiba la tolva situada encima del horno, se prenden los quemadores y se calienta el tambor rotatorio hasta lograr 120°C, luego se comienza a dosificar arena usando un dosificador de sinfín. La arena a la salida del tambor sale seca y usando un sistema de transportadores de banda se envía a las tolvas donde se deberá enfriar hasta una temperatura inferior a 40°C para luego enviarla usando un transportador neumático con capacidad de 5 Ton/h al silo de doble cámara del mezclador continuo y a las tolvas del área de preparación de mezclas para el moldeo en verde.

Las mezclas de moldeo se preparan en diferentes puntos atendiendo al uso y las aplicaciones de las mismas. Para el moldeo en verde se utilizan dos tipos de mezclas: de cara y de relleno; la mezcla para cara se elabora en un mezclador hormigonera donde se agrega arena sílice, bentonita y melaza según las proporciones que indique la receta y luego de realizado el análisis de los parámetros reglamentarios y comprobado que están en regla (si están fuera de parámetros se rectifican), se evacua en

contenedores y con ayuda de la grúa puente de 15/3 ton se envía a los puesto de trabajo de moldeo manual y mecanizado.

La mezcla de relleno se elabora en mezcladoras de rodillos y se usa 80 % de arena recuperada mezclada con arena nueva bentonita, agua y melaza, luego de estar en parámetros, según análisis de laboratorio se descarga a un transportador de bandas que la lleva hasta las tolvas receptoras de arena de relleno ubicada encima de los puestos de trabajo de moldeo manual y mecanizado.

Para el moldeo manual se coloca el modelo, luego se le coloca la caja encima, se le deposita la arena de cara de forma tal que cubra el modelo, se le deposita la arena de relleno y se le aplica apisonado con un pisón neumático manual, luego se alisa el molde usando una regla metálica o pala, se vira la caja con ayuda de la grúa se coloca la otra mitad del modelo, se aplica arena sílice seca y fina o grafito para separar las dos mitades del molde y se repite la operación anterior. Una vez terminada la caja superior con ayuda de la grúa se separan las dos tapas y se extrae el modelo, el molde se verifica y se envía para el área de fusión. Para el moldeo mecanizado se fija la placa portamodelo al portaplaca de la máquina, con ayuda de la grúa se coloca la caja, se deposita la arena de cara, luego la arena de relleno y se coloca la máquina en la posición de trabajo encargándose esta de compactar la arena, virar y bajar para la extracción del modelo, dejando el molde en la plataforma, estas máquinas trabajan en pareja para hacer una mitad en una máquina y la otra en la segunda, los moldes terminados se envían para el área de fusión.

Para el moldeo químico la arena seca y fría se envía de las tolvas del área de secado a través de un transportador neumático a la tolva del turbo mezclador continuo, la arena recuperada del silo de arena se envía a la tolva del turbo mezclador y se colocan las resinas y catalizadores en los depósitos de este equipo, según la receta programada el turbo mezclador mezcla la arena con resina y el catalizador en las proporciones necesarias y la entrega a la caja que previamente se encuentra situada con el molde dentro encima de la mesa compactadora, aquí se realiza la compactación de la mezcla mediante vibraciones programadas en la mesa, se espera el tiempo necesario para el fraguado se extrae el modelo y se envía el molde para fusión. En casos excepcionales donde la tecnología indique el uso de arena de cara con cromita u otro tipo de arena el

mezclador se realiza en la mezcladora de paletas y se transporta en contenedores al área de moldeo, se aplica primero la arena de cara, luego la arena única y se sigue el proceso explicado anteriormente. Los moldes que por sus dimensiones no pueden ser realizados en la mesa compactadora se moldean en el área de moldeo manual usando el mismo método, solo que la compactación se realiza golpeando la caja por fuera con un martillo o aplicando un apisonado manual.

Algunos moldes se fabrican con mezclas de secado químico aplicándole gas carbónico para el secado, para este tipo de moldeo se prepara la mezcla en el mezclador hormigonera usando arena sílice ligada con silicato de sodio en las proporciones que indica la receta, luego de certificada se transporta a los puesto de moldeo o de machería y se sigue el procedimiento explicado para el moldeo manual, al virar la caja se aplica gas carbónico para secar la mezcla y luego se extrae el modelo.

Para la fabricación de los machos se usan dos métodos. Los machos con secado térmico y lo de secado químico.

Para la fabricación de machos con secado térmico se elabora mezcla con arena y melaza en el mezclador hormigonera según la receta que indique la carta tecnológica, se le hacen pruebas de laboratorio y cuando están los parámetros en regla se evacua en contenedores y se transporta al área de machería con ayuda de la grúa. La caja de macho se coloca sobre un tablero, se le deposita arena se apisona y luego se alisa con una regla de madera, se retira la caja de macho y el tablero con el molde del macho se coloca en una estufa eléctrica donde se seca a una temperatura que se indica en la carta y que oscila entre 190 y 220 °C, los machos secos se almacenan en estantes y según necesidad se envían al área de fusión.

Para los machos de secado químico se usan dos métodos los de secado con gas carbónico y los autofraguantes. Para los machos de secado con gas carbónico se elabora la mezcla en el mezclador hormiguero usando arena sílice, silicato de sodio y desarenate, la mezcla se retransporta luego de estar certificada por el laboratorio a los puestos de macheria, se coloca la caja de macho, se deposita la arena, se aplica el gas y cuando está seca se retira la caja de macho quedando el macho listo para ser usado.

La mezcla para la elaboración de machos mezclas autofraguantes se elabora en el mezclador de paletas usando arena, desarenate, resina y catalizador en las

proporciones indicadas en la instrucción, luego de certificada la mezcla se evacua y se transporta en contenedor para los puestos de los macheros, se coloca la caja de macho, se coloca el herraje en caso de que lo necesite, se deposita la arena, se espera el tiempo necesario para el fraguado y luego se extrae la plantilla, el macho después de verificado se almacena hasta su uso, que será transportado al área de fusión.

En el área de fusión se ejecuta el ensamblaje y vertido de los moldes, para lo cual los moldes se destapan y se alinean a lo largo del área de vertido, se soplan con aire comprimido para eliminar las posibles inclusiones de arena, se le aplica pintura anticostra, se coloca el macho (si lo lleva) según indica la documentación tecnológica y se tapan usando las guías para que no exista corrimiento, luego son aseguradas con grapas quedando listos los moldes para ser fundidos.

Las cargas son introducidas en los hornos según establece la instrucción tecnológica, el proceso de fusión del metal se realiza según instrucción para cada tipo de horno y aleación, luego que el metal está en estado líquido el fundidor extrae una probeta que envía al laboratorio para verificar la composición, si hay algún elemento fuera de rango se llevará a parámetro usando el cálculo para el afino y se sacará otra probeta que se enviará nuevamente al laboratorio, cuando todos los parámetros estén en rango el metal se calienta hasta temperatura indicada en la carta tecnológica, se evacua la escoria a un contenedor, se mide y registra la temperatura y cuando está en parámetros queda listo para el vertido.

La cuchara para el vertido se coloca en el secador de cuchara aproximadamente 30 minutos antes del vertido y se calienta a una temperatura de 650-700 °C, luego se saca del secador y con ayuda de la grúa se coloca en la canal de evacuación del horno. El horno se inclina usando el mecanismo hidráulico y el metal pasará a la cuchara, luego la grúa mueve la cuchara hasta donde se encuentra el molde que será vertido, se extrae la escoria que queda en la cuchara y se verifica la temperatura, luego de lo cual se vierte la pieza cumpliendo con la temperatura de fusión y el tiempo de vertido indicado en la carta tecnológica. Los moldes después de fundidos deben reposar el tiempo necesario para la solidificación, luego se les quitan las grapas, se recogen con ayuda de la grúa y se transportan para el área de desmoldeo.

Los moldes fundidos tienen establecidos en la documentación el tiempo mínimo para el desmoldeo, pasado este tiempo el molde se sitúa con ayuda de la grúa en la zaranda vibratoria la cual se pone en funcionamiento, la arena va pasando a través de la rejilla al sistema de recuperación y la pieza libre de arena se coloca en un contenedor que pasa para el área de acabado con ayuda de la grúa y la carretilla eléctrica.

Los moldes deben ser bien clasificados y desmoldeados en su zaranda correspondiente, ya que la arena de mezcla autofraguante y la de moldeo en verde no pueden mezclarse en el sistema.

La arena de los moldes con el sistema de moldeo en verde pasa de la rejilla a un transportador de bandas horizontal en el cual hay instalado un separador magnético que extrae las partículas metálica, luego a través de un elevador de cangilones pasa por un tamiz poligonal para eliminar los terrones después de lo cual mediante un transportador de bandas se envía a la tolva de la mezcladora de rodillo para ser usada nuevamente.

La arena de los moldes elaborados usando el proceso de moldeo autofraguante pasa de la desmoldeadora a un desterronador, luego por el sistema para la depuración donde se retira la máxima cantidad posible de aglutinante sin romper los granos incorporando una cortina de aire separadora de polvo que asegura que el mismo no se adhiera a los granos de arena, posteriormente pasa por el separador magnético para separar las partículas metálicas y por último se hace pasar por una cama de aire fluidizado para la clasificación, la arena cae mientras las partículas finas y el polvo son extraídos por el aire y recogidos en un recipiente, la arena ya depurada se envía a través de un transportador neumático para el silo de arena recuperada y de allí a la tolva del mezclador continuo para volver a ser usada en el proceso.

A las piezas que llegan al área de acabado se termina de extraer los machos usando el equipo o instrumentos adecuado según el caso (pistolete, cincel, barreta, etc.), luego se transportan al equipo de limpieza que indica la carta tecnológica y que está en dependencia de la configuración, dimensiones y peso de la pieza, usando para esto la grúa y la carretilla eléctrica. Se pone a funcionar el equipo y se les da el tiempo indicado en la carta tecnológica, luego se para el equipo, se extraen las piezas y se trasladan al área de corte usando la carretilla y la grúa.



El corte de los canales de alimentación y las mazarotas se realiza por la zona indicada en la documentación y se usa el método que especifica la carta tecnológica que puede ser por arco eléctrico, por oxicorte o por golpeo, la pieza pasa para el área de limpieza final y los sistemas y mazarotas se recogen en contenedores separados por tipo de aleación y enviada al área de carga.

A las piezas se les eliminan las rugosidades superficiales usando muelas abrasivas, discos, cepillos, etc. Terminada la limpieza final las piezas pasan al área de tratamiento térmico donde con ayuda de la grúa las piezas se cargan en el horno y se le aplica el tratamiento térmico indicado en la tecnología.

Las piezas limpias y tratadas, conjuntamente con la documentación tecnológica se presentan al control de la calidad el cual verifica y certifica la pieza si cumple con los parámetros o la rechaza si tiene no conformidades.

Las piezas certificadas son entregadas por el personal de servicio al departamento de ventas para su entrega al cliente y las rechazadas se retienen en el área para la depuración de la no conformidad por un tiempo no mayor de 72 horas y luego se pasan al área de preparación de carga para su uso como retorno.

Las piezas fundidas en el área de fundición no ferrosa cumplen con el mismo proceso de moldeo explicado anteriormente y usan los machos elaborados por el área de machería, se transportan al área de fusión no ferrosa y siguen el mismo proceso de ensamblaje y fusión que se realiza en el área de fusión ferrosa, las partículas metálicas se recogen en un contenedor, la arena se descarga en la desmoldeadora y las piezas pasan para el área de acabado donde siguen el mismo proceso que las piezas de aleaciones ferrosas.

#### **1.4- Partes principales del secadero**

Para el secado de arena sílice en este taller se emplean los tambores rotatorios. Los secaderos son cilindros alargados formados por una cámara de combustión (donde se producen los gases calientes que secan la arena sílice), y un cilindro (donde la arena sílice recibirá el proceso de secado).

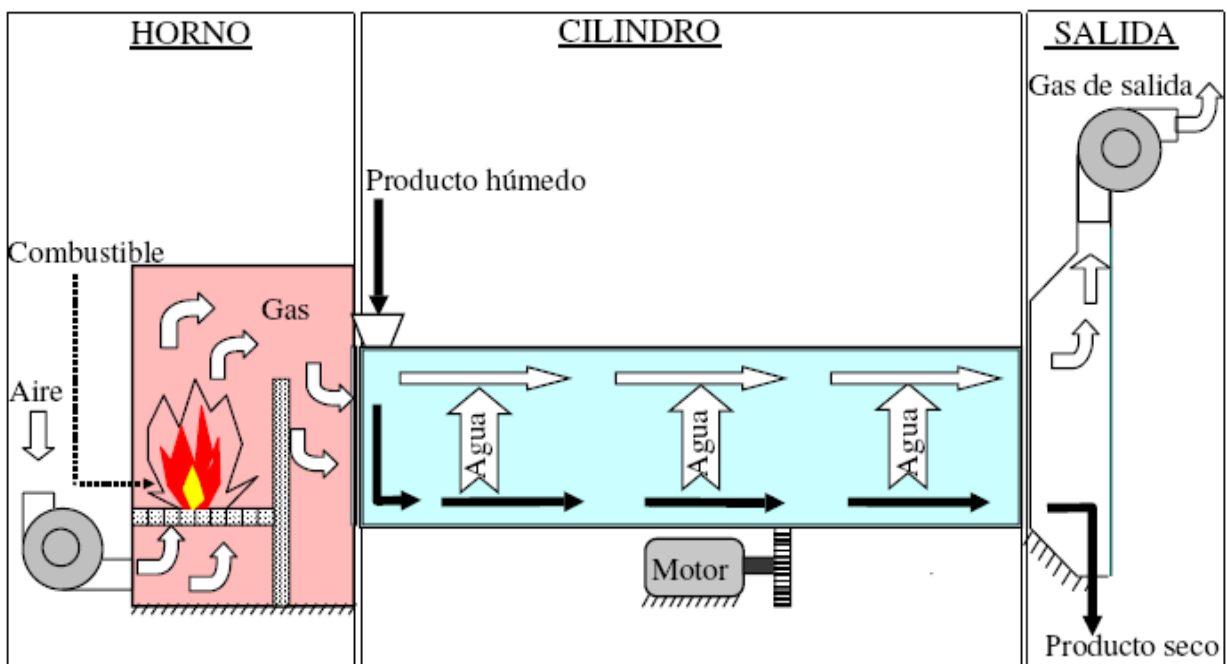
El tambor secador posee un sistema motriz, acoplado al cuerpo de este, que le permite rotar alrededor de su eje. El mismo se apoya exteriormente en dos llantas que posee

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 la arena sílice 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 la arena sílice y con ello el proceso de secado. Estos levantadores dividen al tambor en 6 partes, lo que favorece el proceso de secado porque:

Permite que la carga alimentada al tambor sea repartida uniformemente en el interior del mismo.

Evita sobrecargar un levantador más que otros, provocando la formación de cortinas de la arena sílice durante la caída del mismo, debido a la rotación del tambor.



**Figura 1.1.** Esquema básico de un secador cilíndrico horizontal rotatorio.

**Fuente:** Castaño *et al.*, (2009).

Posibilita un mayor contacto entre los gases calientes – arena sílice y una mayor evaporación de la humedad que trae la arena sílice.

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

### 1.5- Estructura interna de los secadores

En el interior del cilindro se colocan elementos encargados de suspender la arena sílice y dejarlo caer en forma de cortinas uniformes, durante este recorrido es donde se produce el secado con mayor efectividad. Los gases calientes se ponen en contacto con la superficie de las partículas que caen, una parte se queda en el fondo del cilindro y es sometido a otro procedimiento de intercambio térmico y el resto se esparce en forma de torrentes, el número de torrentes que se forma en el cilindro secador depende del número y forma de las paletas.

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 ellas son: periféricos, sectoriales, sectoriales con anillos interiores y en forma de cruz.

Para los materiales en pedazos o húmedos que no se rompen al caer, se instala un sistema de levantadores periféricos que garantiza la elevación del material y su caída desde una altura próxima a la magnitud del diámetro del tambor.

Para los materiales en pedazos pero quebradizos, se emplean los levantadores sectoriales, en estos la caída se produce desde una altura pequeña y disminuye el peligro de hendidura en los mismos.

Para los materiales granulados sin una gran cantidad de partículas pequeñas y polvo se emplean los levantadores sectoriales con anillos interiores o en forma de cruz. Finalmente, para los materiales tan pequeños como el polvo se utilizan levantadores en forma de volteo que constan de mayas de pequeña sección, aisladas unas de otras, en las cuales el traspaso del material se efectúa desde una altura pequeña debido a que en las rejillas de volteo está la superficie; con su utilización mejoran las condiciones de sedimentación del polvo.

Durante el secado de los materiales se puede cambiar el tipo de levantadores a lo largo del secador con vista a lograr mejores características del producto obtenido. En el

secado de arena sílice en la empresa mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche, actualmente se utilizan los levantadores sectoriales, según la literatura estos se emplean fundamentalmente cuando el material tratado no puede caer desde una altura muy elevada y pueda quebrarse, además de dividir en varias porciones el producto alimentado para facilitar la transferencia de calor entre las partículas.

Para el tratamiento de arena sílice se recomienda utilizar levantadores periféricos, la arena puede dejarse caer desde una altura elevada sin que se produzcan hendiduras en los granos, además mientras mayor es la altura de vuelo de las partículas se favorece el proceso de transferencia de calor y masa y ayuda a romper los pelets que se forman debido a que en la medida en que se va secando el producto se incrementa la fuerza de atracción entre las partículas sólidas y se produce la aglutinación de estas.

### **1.5.1- Teoría del proceso de secado**

#### *Generalidades*

El proceso de secado está destinado a eliminar el exceso de humedad para poder ser tratado posteriormente de acuerdo a los requerimientos tecnológicos.

En nuestro caso el secado se efectúa en hornos de tambor rotatorio con cámara de combustión independiente.

Durante el proceso de secado ocurre una transferencia de calor y otra de masa.

Mientras en la superficie de la partícula existe humedad, se produce la evaporación superficial, la velocidad de extracción de la humedad interior depende de la velocidad de transferencia de calor al interior de la partícula y la velocidad de transferencia de masa a la superficie del material.

El secado en hornos de tambor rotatorio se produce cuando los gases calientes generados en la cámara de combustión, interaccionan directamente con la arena sílice húmeda. Estos secaderos poseen en su interior elementos levantadores encargados de favorecer un mejor intercambio de calor entre los gases y la arena sílice. También ayudan al avance de esta por la inclinación del tambor, lo cual se ve favorecidos por el efecto de arrastre de los gases que viajan en la misma dirección.

El efecto de los levantadores se resume en lo siguiente:

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

### **1.6- Descripción del proceso de secado en los secadores cilíndricos horizontales**

La arena sílice se seca en un horno de tambor rotatorio de 1m de diámetro y de 4m de largo equipado con dos quemadores de fuel, esta cuando entra al secadero tiene una humedad de 30 % aproximadamente y debe salir del mismo con 1 - 1,5%. Para lograr esto el secadero posee una cámara de combustión dotada de un quemador de petróleo, a la cual se le suministra aire de combustión, aire de pulverización, y aire secundario.

Los gases quemados dentro de la cámara de combustión alcanzan una temperatura de 1200 °C la cual disminuye al entrar en contacto con el aire en exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar la arena sílice. Los gases entran al tambor secador con una temperatura (700-750 °C) hasta lograr que el tambor secador alcance 120 °C y estos gases salen del mismo a una temperatura de 80 -100 °C.

La entrada de los gases al tambor secador se realiza en dirección a corriente con la arena sílice alimentada, de forma que el contacto entre los gases calientes y la arena sílice permita que este último se vaya secando donde sale con temperatura de 60 °C y usando un sistema de transportadores de banda se envía a las tolvas donde se deberá enfriar a una temperatura inferior a 40 °C

Estos gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crea un ventilador, situado a la salida del electrofiltro que posee el secadero horizontal rotatorio. Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos el 30 % del polvo que entra con la arena sílice o que se forma durante el proceso de secado, y que por lo general posee una granulometría de 0,1–0,6 mm, el cual será introducido al sistema de colección.

### **1.7- Eficiencia del secado en cilindros rotatorios**

La eficiencia del proceso de secado depende de los siguientes factores: Características del mineral alimentado, tiempo de retención del mineral, 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, y otros factores.

#### **Características de la arena sílice alimentada:**

Aquí se tiene en cuenta entre otros casos la granulometría y la humedad. La alimentación del mineral 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 mineral, provocando un aumento de la humedad del producto secador. Con este mineral 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 de la arena sílice:**

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

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

Dónde:

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 arena sílice) lo que conlleva a un secado deficiente de la arena sílice 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.

### **Temperatura del aire o gas**

La temperatura influye directamente en la velocidad, además con gases muy calientes se afecta el sistema de colección de polvo en los electros filtros.

### **Longitud del secadero**

Esta longitud debe ser tal que permita el secado de arena sílice que se alimenta hasta la humedad requerida a la máxima capacidad. En la primera mitad del tambor se elimina en mayor cantidad porque los gases están más calientes, la longitud restante para eliminar una cantidad pequeña de humedad.

### **Pendiente del secadero**

Esto permite que la arena sílice 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 material y dejarlo caer en forma de cortinas, lo que permite el contacto con el gas caliente.

### **Velocidad de rotación del secado**

La arena sílice 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 la arena rodará en forma paralela, no formándose cortinas. De igual forma si la velocidad es muy alta la arena seguirá una trayectoria circular, lo que tampoco permitirá la formación de cortinas y traerá consigo un secado inadecuado.

### **Número de levantadores**

Se tiene presente la arena sílice alimentada, su humedad y el diámetro del tambor. Para aumentar la capacidad de un secadero de diámetro grande con la arena sílice húmeda y quebradiza se debe aumentar el número de levantadores.

### **Otras condiciones**

Los secaderos tienen que ser cargados de forma apropiada, ya que si se recarga de arena sílice este 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 material 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 ( $\text{CO}_2$ ). En una combustión perfecta el contenido de  $\text{CO}_2$  debe ser el 15,2% en volumen. El exceso de aire será por tanto más elevado cuando el porcentaje de  $\text{CO}_2$  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.

## 1.8- Conclusiones del capítulo 1

1. El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el diagnóstico térmico del proceso de secado en el secadero cilíndrico rotatorio de la empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche.
2. Se han realizado múltiples investigaciones a los secadores cilíndricos rotatorios, pero hasta la actualidad, ninguna de ellas han tenido en cuenta la posibilidad real de modernización del proceso de secado, ni la influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible y el rendimiento térmico del secador.





## CAPÍTULO 2

---

### MÉTODO DE BALANCE TÉRMICO Y DE MASA PARA SECADORES CILÍNDRICOS ROTATORIOS HORIZONTALES

#### 2.1- Introducción

En el secado convencional tienen lugar varios fenómenos de intercambio de calor y masa que rigen su comportamiento termoenergético. La literatura científica recoge diversos procedimientos de cálculo para el análisis de este proceso, en el secador de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”; aspecto que ha sido poco valorado en los trabajos precedentes consultados. En tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es establecer el método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado de arena sílice en cilindros horizontales rotatorios.

#### 2.2- Cálculo de las propiedades termofísicas del aire

Estas propiedades son necesarias para el cálculo del intercambio de calor y masa durante el secado de arena sílice. Las mismas pueden ser calculadas a través de las ecuaciones empíricas 2.1-2.8 (Tiwari, 2002), las referidas ecuaciones han sido validadas en diversas regiones del mundo y utilizadas con éxito en múltiples investigaciones precedentes relacionadas con el secado de diferentes materiales (Montero, 2005; Tiwari y Sarkar, 2006; Vinardell, 2011).

$$k_a = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \quad 2.1$$

$$\rho_a = \frac{353,44}{T_p + 273,15} \quad 2.2$$

$$Cp_a = (999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3) \cdot 10^{-3} \quad 2.3$$

$$\mu_a = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \quad 2.4$$

$$v_a = \frac{\mu_a}{\rho_a} = \frac{(1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot (T_p + 273,15)}{353,44} \quad 2.5$$

$$\alpha_a = \frac{k_a}{\rho_a \cdot Cp_a} = \frac{(0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p) \cdot 10^3}{999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3} \cdot \frac{(T_p + 273,15)}{353,44} \quad 2.6$$

$$Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{\left[ (1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot \left( 999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \right) \right] \cdot 10^{-3}}{0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p} \quad 2.7$$

$$\beta_a = \frac{1}{T_p + 273,15} \quad 2.8$$

Donde:

$k_a \Rightarrow$  conductividad térmica del aire; [W/m·K].

$T_p \Rightarrow$  temperatura promedio o de película [ $T_p = (T_s + T_a)/2$ ]; [K].

$\rho_a \Rightarrow$  densidad del aire; kg/m<sup>3</sup>.

$Cp_a \Rightarrow$  calor específico a presión constante del aire; [kJ/kg·K].

$\mu_a \Rightarrow$  viscosidad dinámica del aire; [N·s/m<sup>2</sup>].

$\nu_a \Rightarrow$  viscosidad cinemática del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$\alpha_a \Rightarrow$  difusividad térmica del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$Pr \Rightarrow$  número de Prandtl del aire; [adimensional].

$\beta_a \Rightarrow$  dilatación térmica del aire; [K<sup>-1</sup>].

$T_s \Rightarrow$  temperatura de la superficie de secado; [K].

$T_a \Rightarrow$  temperatura del aire; [K].

### 2.3- Balance térmico y de masa

En el presente epígrafe se expone el procedimientos de cálculo, fundamentado en las leyes que rigen la conservación de la masa y la energía, asociados a los fenómeno de combustión y evaporación que se desarrollan como parte del proceso de secado de arena sílice en cilindros rotatorios horizontales. Para los secadores de la empresa investigada la ecuación de balance general es:

$$E_{CE} + E_{LRQ} = E_{CS} + E_{PTC} \quad 2.9$$

Donde:

$E_{CE} \Rightarrow$  Energía de las corrientes entrantes; [kJ/s].

$E_{LRQ} \Rightarrow$  Energía liberada por reacción química; [kJ/s].

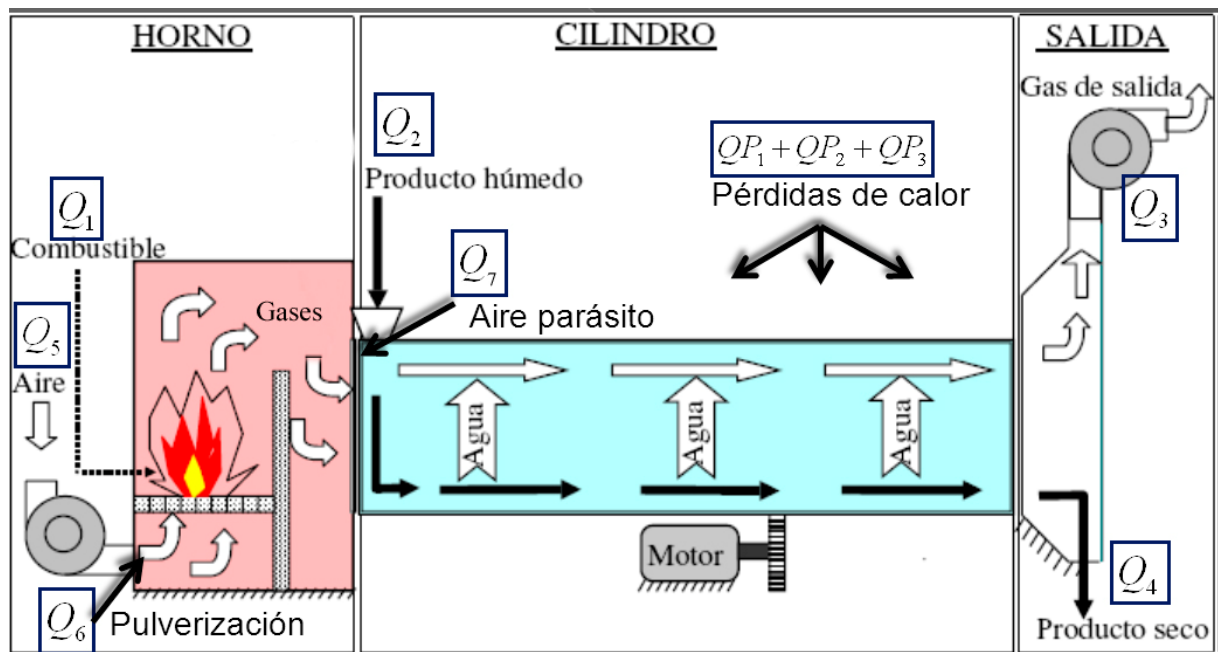
$E_{CS} \Rightarrow$  Energía de las corrientes salientes; [kJ/s].

$E_{PTC} \Rightarrow$  Energía perdida por transferencia de calor; [kJ/s].

El termino energía está referido particularmente a los calores absorbidos y cedidos por las diferentes sustancias de trabajo que intervienen en el proceso a partir de su flujo horario por lo que se expresan en kJ/s.

### 2.3.1- Balance de energías

A través de la ecuación 2.9 se expresa el balance en función de las corrientes que entran y salen en el proceso de secado de arena sílice. Luego, haciendo las transformaciones correspondientes y apoyándose en el esquema de la figura 2.1 se obtiene la ecuación 2.10 que es la general para el balance de energías.



**Figura 2.1.** Esquema básico de un secador cilíndrico horizontal rotatorio de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”. con sus respectivas corrientes energéticas.

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = Q_3 + Q_4 + QP_1 + QP_2 + QP_3 \quad 2.10$$

Donde:

$Q_1 \Rightarrow$  Calor de reacción aportado por el diesel; [kJ/s].

$Q_2 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por la arena sílice húmeda; [kJ/s].

$Q_3 \Rightarrow$  Calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada; [kJ/s].

$Q_4 \Rightarrow$  Calor sensible de la arena seca y el agua retenida a la salida del secadero; [kJ/s].

$Q_5 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire de combustión o primario; [kJ/s].

$Q_6 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire de pulverización; [kJ/s].

$Q_7 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire parásito; [kJ/s].

$QP_1 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en la cámara; [kJ/s].

$QP_2 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en el secador; [kJ/s].

$QP_3 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en la botella; [kJ/s].

### **Calor de reacción aportado por el combustible Diesel**

El combustible (petróleo) además de su calor de reacción aporta calor sensible, entra a una temperatura superior a los 373 K producto del precalentamiento. Las principales características del combustible utilizado se recogen en el anexo 1.

$$Q_1 = Q_{fc} = F_c \cdot \Delta H_1 + F_c \cdot VCI \quad 2.11$$

Donde:

$F_c \Rightarrow$  Flujo de combustible; [kg/s].

$VCI \Rightarrow$  Valor calórico inferior del combustible; [kJ/kg].

$\Delta H_1 = \Delta H_x \Rightarrow$  Variación de entalpía; [kJ/kg].

$$\Delta H_x = \int_{T_i}^{T_f} C_p \cdot dT \quad 2.12$$

Siendo:

$$C_{pc} = \frac{0.383 + 0.00045 \cdot T_0}{ge} \quad (\text{Perry, 1985}) \quad 2.13$$

Donde:

$C_{pc} \Rightarrow$  Calor específico del combustible; [kJ/kg·K].

$T_f$  y  $T_i \Rightarrow$  Temperaturas final e inicial del proceso; [K].

$g_e \Rightarrow$  Gravedad específica; [kg/m<sup>3</sup>].

$T_0 \Rightarrow$  Temperatura de entrada del combustible; [K]

*En este caso no se especifican los subíndices en la ecuación 2.12, debido a que esta ecuación se usará en varios momentos para diferentes componentes. Las variaciones de entalpía se producen por cambios de temperaturas tanto en los gases de aire parásito, aire de pulverización y aire primario para la combustión.*

### **Determinación de las corrientes 2, 5, 6 y 7**

Las temperaturas de cada una de estas corrientes se igualan la temperatura ambiental por lo que las diferencias de entalpías se hacen cero. De ahí que de la ecuación 2.12 la variación de entalpía sea cero; por tanto:

$$Q_2 = Q_5 = Q_6 = Q_7 = 0 \quad 2.14$$

### **Calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada ( $Q_3$ )**

Esta corriente está compuesta por los gases que salen del secador más el agua evaporada de arena sílice.

$$Q_3 = Q_{3(G)} + Q_{3(va)} \quad 2.15$$

Donde;

$Q_{3(G)} \Rightarrow$  Energía aportada por los gases excluyendo el agua evaporada; [kJ/s].

$Q_{3(va)} \Rightarrow$  Energía aportada por el vapor de agua eliminado de la arena sílice; [kJ/s].

El calor aportado por los gases se determina a través de la siguiente expresión:

$$Q_{3(G)} = F_3 \cdot \Delta H_{3(G)} \quad 2.16$$

La variación de entalpía se busca teniendo en cuenta las propiedades (calor específico y densidad) de la sustancia a la temperatura de salida de los gases (Incropera y De Witt, 2003). Estas propiedades se muestran en la Tabla 2.1, y aplicando para cada caso

la ecuación 2.12, se obtiene la entalpia correspondiente a cada sustancia de las que componen los gases de escape.

**Tabla 2.1.** Elementos que componen los gases de combustión

Gases	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
Cp (kJ/kg·K)	1,045	0,942	0,976	1	0,982
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	0,8425	0,9620	1,3961	0,5863	1,58

Quedando la ecuación 2.16 de la siguiente manera:

$$Q_{3(G)} = F_{N_2} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_2} \cdot \Delta H_{3O_2} + F_{SO_2} \cdot \Delta H_{3SO_2} + F_{CO_2} \cdot \Delta H_{3CO_2} + F_{H_2O} \cdot \Delta H_{3H_2O} \quad 2.17$$

**Calor aportado por el vapor de agua durante la reducción del porcentaje del agua en la arena sílice**

$$Q_{3(va)} = F_{(va)} \cdot \Delta H_{3(va)} \quad 2.18$$

Siendo:

$$F_{va} = \left( F_{mh} \cdot \frac{W_{ce}}{100} \right) - \left( F_{cs} \cdot \frac{W_{cs}}{100 \cdot F_4} \right) \quad 2.19$$

$$F_4 = \frac{100 - W_{cs}}{100} \quad 2.19a$$

Donde:

$F_{(va)}$  ⇒ Flujo de vapor de agua; [kg/s].

$F_{mh}$  ⇒ Flujo de arena sílice húmedo alimentado al secador; [kg/s].

$F_{cs}$  ⇒ Flujo de arena sílice seca; [kg/s].

$W_{ce}$  ⇒ Contenido de humedad de entrada de arena sílice; [%].

$W_{cs}$  ⇒ Contenido de humedad de salida de arena sílice; [%].

El cálculo de la variación de entalpía del vapor de agua se determina por:

$$\Delta H_{3(va)} = C_{p_{va}} (T_3 - T_0) + (\tau)_{T_3} \quad 2.20$$

Donde:

$C_{p_{va}} = 4.1868$  ⇒ Calor específico del agua; [kJ/kg·K]. (Iglesias, 1990)

$(\tau)_{102^{\circ}\text{C}} = 2252 \Rightarrow$  Calor latente de vaporización del agua a la presión de trabajo del secador; [kJ/kg]. (Iglesias, 1990)

Luego sustituyendo en la ecuación 2.18 resulta:

$$Q_{3(va)} = \left[ \left( f_{mh} \cdot \frac{W_{ce}}{100} \right) - \left( f_{cs} \cdot \frac{W_{cs}}{100 \cdot F_4} \right) \right] \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T_3}] \quad 2.21$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.17 y 2.19 en la 2.15 se obtiene:

$$Q_3 = F_{N_2} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_2} \cdot \Delta H_{3O_2} + F_{SO_2} \cdot \Delta H_{3SO_2} + F_{CO_2} \cdot \Delta H_{3CO_2} + F_{H_2O} \cdot \Delta H_{3H_2O} + \left( F_{mh} \cdot \frac{W_{ce}}{100} \right) - \left( F_{cs} \cdot \frac{W_{cs}}{100 \cdot F_4} \right) \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T_3}] \quad 2.22$$

#### **Calor sensible de arena sílice seca y el agua retenida a la salida del secador (Q<sub>4</sub>)**

Esta corriente está compuesta por la arena sílice seca y el agua retenida en este, su expresión de cálculo es la siguiente:

$$Q_4 = (F_{ar} \cdot Cp_{H_2O} + F_{cs} \cdot Cp_c) \cdot (T_{cs} - T_0) \quad 2.23$$

Donde:

$F_{ar} \Rightarrow$  Flujo de agua retenida; [kg/s].

$F_{cs} \Rightarrow$  Flujo de arena sílice seca; [kg/s].

$Cp_c \Rightarrow$  Capacidad calorífica de arena sílice; [kJ/kg·K].

$T_{cs} \Rightarrow$  Temperatura de arena sílice a la salida; [K].

$T_0 \Rightarrow$  Temperatura del medio ambiente; [K].

#### **Cálculo del flujo de aire parásito**

En el sistema existe entrada de aire parásito producto a la depresión existente en la cámara de combustión, este flujo de aire penetra a través de la holgura existente en unión de la cámara de paso con el secador, así como por la tolva de alimentación de la arena sílice.

#### **Unión de la cámara de paso con el tambor secador**



En esta unión se calcula la cantidad de aire parásito que penetra por el espacio anular existente entre el tambor secador y la cámara de paso a partir de la siguiente ecuación:

$$G_{ap} = [\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{sc}] \cdot \left[ \frac{29}{R_1 \cdot T_0} \right]^{1/2} \quad 2.24$$

Siendo:

$$A_{sc} = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad 2.25$$

Donde:

$\alpha \Rightarrow$  Eficiencia del orificio; [adimensional].

$\psi \Rightarrow$  Coeficiente flujo; [adimensional].

$R_{ap} \Rightarrow$  Constante particular de los gases; [J/kg·K].

$\Delta P \Rightarrow$  Variación de presión en el secadero; [Pa].

$T_{a_0} \Rightarrow$  Temperatura del aire parásito; [K].

$A_{sc} \Rightarrow$  Área; [m<sup>2</sup>].

$R_1 \Rightarrow$  Radio de la cámara de paso; [m].

$R_2 \Rightarrow$  Radio del tambor; [m].

### Sección de entrada de arena sílice

Esta sección es la que corresponde a la sección de la tolva de alimentación al secadero. El flujo de aire parásito se determina a partir de la ecuación:

$$G_{ia} = [\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{ta}] \cdot \left[ \frac{29}{R_1 \cdot T_0} \right]^{1/2} \quad 2.26$$

Luego se determina el flujo de aire parásito total por:

$$GT = G_{ap} + G_{ia} \quad 2.27$$

### Cálculo de las pérdidas de calor

En la instalación de secado existen pérdidas de calor por convección y radiación, los flujos de calor deben determinarse para las diferentes secciones del equipo (cámara de

paso, tambor secador y la botella), a continuación se relacionan las expresiones de cálculo fundamentales para el análisis de la transferencia de calor.

### **Pérdidas de calor en la cámara de paso**

$$QP_1 = q_{conv} + q_{rad} \quad 2.28$$

En esta sección la convección es libre producto a que el movimiento de fluido se realiza principalmente atendiendo a su densidad, además este recinto cerrado se comporta como una cavidad y el flujo de calor por convección se determina por la ecuación 2.29, mientras que el calor por radiación por la expresión 2.30:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_0) \quad 2.29$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad 2.30$$

Donde:

$q_{conv} \Rightarrow$  Flujo de calor por convección; [kJ/s].

$q_{rad} \Rightarrow$  Flujo de calor por radiación; [kJ/s].

$h \Rightarrow$  Coeficiente de transferencia de calor por convección; [W/m<sup>2</sup>·K].

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor; [m<sup>2</sup>].

$T_s \Rightarrow$  Temperatura de la superficie exterior de la cámara; [K].

$T_0 \Rightarrow$  Temperatura del ambiente; [K].

$\varepsilon \Rightarrow$  Emisividad de la superficie exterior de la cámara; [adimensional].

$\sigma \Rightarrow$  Constante de Stefan-Boltzman; W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>.

Luego las diferentes áreas que intervienen en el proceso de transferencia de calor en esta sección se calculan por las ecuaciones desde 2.31 hasta 2.33 mostradas a continuación.

$$A_0 = 2 \cdot (a \cdot H + a \cdot L + H \cdot L) \quad 2.31$$

$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 \quad 2.32$$

$$A = A_0 - (A_1) \quad 2.33$$

Donde:

$a \Rightarrow$  Ancho de la cámara de paso; [m].

$H \Rightarrow$  Altura de la cámara de paso; [m].

$L \Rightarrow$  Longitud de la cámara de paso; [m].

$d_1 \Rightarrow$  Diámetro del orificio 1; [m].

$A_0 \Rightarrow$  Área total de la cámara de paso; [m<sup>2</sup>].

$A_1 \Rightarrow$  Área del orificio del diámetro 1; [m<sup>2</sup>].

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor en la cámara de paso; [m<sup>2</sup>].

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh ( $R_{al}$ ), el cual se determina por la ecuación 2.34.

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad 2.34$$

Donde:

$G_r \Rightarrow$  Número de Grashof; [adimensional].

$P_r \Rightarrow$  Número de Prandls; [adimensional].

$g \Rightarrow$  Aceleración de la gravedad; [m/s<sup>2</sup>].

$\beta \Rightarrow$  Coeficiente de dilatación volumétrica; [K<sup>-1</sup>].

$\nu \Rightarrow$  Viscosidad cinemática del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$\alpha \Rightarrow$  Coeficiente de difusividad térmica; [m<sup>2</sup>/s].

Los parámetros del fluido se buscan a la temperatura pelicular ( $T_p$ ) en la Tabla A-4 del Incropera y De Witt (2003).

$$T_p = \frac{T_s + T_0}{2} \quad 2.35$$

Luego el coeficiente de transferencia por convección se determina por la ecuación 2.43:

$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} \quad 2.36$$

Donde:

$k \Rightarrow$  Conductividad térmica del aire; [W/m·K].

$L \Rightarrow$  Longitud de la cámara; [m].

$N_{UL} \Rightarrow$  Número de Nusselt calculado por la expresión 2.37:

$$N_{UL} = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot R_{al}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( 0,492 / P_r \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad 2.37$$

Luego sustituyendo  $H$ , las respectivas áreas de transferencia de calor y los restantes parámetros en las ecuaciones 2.29 y 2.30 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en la cámara de paso.

### **Pérdidas de calor en el tambor secador**

Las pérdidas en el tambor secador se producen al salir los gases a una alta temperatura que arrastran gran cantidad de calor hacia la atmósfera, además de interactuar con la superficie metálica del mismo.

Las pérdidas de calor en esta sección se determinan por convección forzada debido a que el aire se mueve con velocidad promedio de 2,3 m/s. A partir de la ecuación 2.38

$$QP_2 = q_{conv} + q_{rad} \quad 2.38$$

Donde:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{sec} - T_0) \quad 2.39$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sec}^4 - T_0^4) \quad 2.40$$

Donde:

$T_{sec} \Rightarrow$  Temperatura de la superficie exterior del tambor secador; [K].

El área de transferencia de calor en esta sección se calcula por la siguiente expresión:

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad 2.41$$

Donde:

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor del tambor secador; [m<sup>2</sup>].

$D \Rightarrow$  Diámetro del tambor secador; [m].

$L \Rightarrow$  Longitud del tambor secador; [m].

Excepto el número de Prandtl;  $Pr_s$  (que se determina a la temperatura de la superficie), todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido en la Tabla A-4 del Incropera y De Witt (2003).

El número de Reynolds ( $R_e$ ) se obtiene mediante la expresión:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad 2.42$$

Donde:

$V \Rightarrow$  Velocidad del aire ambiente; [m/s].

El número de Nusselt ( $N_{UL}$ ) para esta sección del secadero se determina por la expresión 2.43. Se seleccionan los valores de los coeficientes  $C$  y  $m$  en la Tabla 7.4 del Incropera y De Witt (2003) en correspondencia con el número de Reynolds calculado.

$$N_{UD} = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \cdot \left( \frac{P_{r0}}{P_{rs}} \right)^{1/4} \quad 2.43$$

Luego, al sustituir la ecuación 2.43 en la 2.44 se determina el coeficiente de transferencia por convección para esta sección.

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{D} \quad 2.44$$

Sustituyendo la ecuación 2.44 y los parámetros físicos relacionados con el tambor secador en las ecuaciones 2.39 y 2.40 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en esta sección.

### **Pérdidas de calor en la Botella**

Las pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección en esta sección se calculan igual al tambor secador, el área de transferencia se determina por la ecuación 2.45:

$$QP_3 = q_{conv} + q_{rad}$$

$$A = \pi \cdot S \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \quad 2.45$$

Donde:

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor en la botella; [m<sup>2</sup>].

$S \Rightarrow$  Generatriz del cono; [m].

$d_1$  y  $d_2 \Rightarrow$  Diámetro mayor y menor de la botella; [m].

El número de Reynolds se determina utilizando la expresión 2.42, pero considerando el diámetro asociado a esta sección, los coeficientes  $c$  y  $m$  se determinan de forma análoga a la sección anterior a partir del valor del número de Reynolds obtenido. El número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor por convección se calculan por las expresiones 2.43 y 2.44 respectivamente.

Luego las pérdidas de calor totales por transferencia de calor en el secador se obtienen sumando las pérdidas locales por convección y radiación en todas las secciones (cámara de paso, tambor secador y la botella).

Sustituyendo las ecuaciones los valores de los calores conocidos en la expresión 2.10 se obtiene la ecuación para el balance de las energías entrante y saliente.

$$\begin{aligned}
 F_1 \cdot \Delta H_1 + F_1 \cdot VCI = & F_{N_{23}} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_23} \cdot \Delta H_{3O_2} + F_{SO_23} \cdot \Delta H_{3SO_2} + F_{CO_23} \cdot \Delta H_{3CO_2} + \\
 & + F_{H_2O_3} \cdot \Delta H_{3H_2O} + \left[ \left( Fmh \frac{Wce}{100} \right) - \left( Fcs \frac{Wcs}{100 F4} \right) \right] \cdot \\
 & \left[ Cp_{va} (T_3 - T_0) + (\tau)_{T3} \right] + \\
 & + (F_{ar} \cdot Cp_{H_2O} + Fcs Cp_c) \cdot (T_{cs} - T_0) + QP_1 + QP_2 + QP_3
 \end{aligned} \quad 2.46$$

### 2.3.2- Balance de masa

#### Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión

El volumen de un mol, que en las mismas condiciones es igual para todos los gases perfectos, en condiciones normales es 22,4 m<sup>3</sup>/kmol. Los números en el denominador corresponden a la masa molecular de cada componente.

$$F_{O_2} e = 22,4 F_c \cdot \left( \frac{C \cdot 0,01}{12} + \frac{H \cdot 0,01}{4} + \frac{S \cdot 0,01}{32} + \frac{O \cdot 0,01}{32} \right) \quad 2.47$$

$$F_{CO_2}e = 22.4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{C_t \cdot 0.01}{12} \right) \quad 2.48$$

$$F_{H_2O}e = 22.4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{H_t}{2} + \frac{W_t}{18} \right) \quad 2.49$$

$$F_{SO_2}e = 22.4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{S_t}{32} \right) \quad 2.50$$

## **Cálculo del flujo de los componentes de cada una de las corrientes**

### Corriente 5 (aire primario para la combustión)

Se conoce:

$\lambda_{ac} = 12.5 \Rightarrow$  Relación aire combustible.

$W_{aire} = 0.026 \Rightarrow$  Porcentaje de humedad en el aire.

$A_{seco} = 0.974 \Rightarrow$  Porcentaje de aire seco.

$O_{as} = 0.21 \Rightarrow$  Porcentaje de oxígeno en el aire seco.

$N_{as} = 0.79 \Rightarrow$  Porcentaje de nitrógeno en el aire seco.

$$F_5 = \lambda_{ac} \cdot F_C = 12.5 \cdot F_C \quad 2.51$$

$$F_{H_2O} = W_{aire} \cdot F_5 \quad 2.52$$

$$F_{As} = A_{seco} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.53$$

$$F_{O_2as} = A_{seco} \cdot O_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.54$$

$$F_{Nas} = A_{seco} \cdot N_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.55$$

### Corriente 6 (aire para la pulverización)

$\rho_a = 1.134776 \text{ kg} / \text{m}^3 \Rightarrow$  Densidad del aire a temperatura ambiente (Incropera y De Witt, 2003).

$$F_{a_6} = F_6 \cdot \rho_a \quad 2.56$$

$$F_{H_2Oa} = W_{aire} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.57$$

$$F_{Aseco} = A_{seco} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.58$$

$$F_{O_2as} = O_{as} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.59$$

$$F_{N_2as} = Nas \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.60$$

### Corriente 7 (aire parásito)

$$GT = F7 \quad 2.61$$

$$F_{H_2Oap} = Waire \cdot F_7 \quad 2.62$$

$$F_{A_{sec o}ap} = A_{sec o} \cdot F_7 \quad 2.63$$

$$F_{O_2asap} = Oas_{sec o} \cdot F_7 \quad 2.64$$

$$F_{N_2asap} = Nas \cdot F_7 \quad 2.65$$

Para determinar el flujo de los componentes se realiza un balance de cada uno de ellos a la salida del secador en el cual se incluyen los componentes de cada corriente.

### **Balance de oxígeno y nitrógeno:**

$$F_{O_23} = (F_{Oas} + F_{O_2as} + A_2 + F_{O_2asap}) - F_{O_2e} \quad 2.66$$

$$F_{N_23} = F_{(Nas)} + F_{(N_2as)} + A_1 + F_{(N_2)asap} \quad 2.67$$

### **Balance de vapor de agua excluyendo el agua evaporada de la arena sílice:**

$$F_{H_2O3} = F_{H_2O_{comb}} + F_{H_2Oa} + A_4 + F_{H_2Oap} + F_{H_2Oe} \quad 2.68$$

### **Balance del SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>:**

$$F_{SO_23} = A_6 + F_{SO_2e} \quad 2.69$$

$$F_{CO_23} = A_3 + F_{CO_2e} \quad 2.70$$

Considerando la combustión completa y sustituyendo en 2.46 los flujos de los componentes de los gases a la salida del secador se obtiene la ecuación general de balance de masa y energía de la siguiente forma:



$$\begin{aligned}
F_1 \cdot \Delta H_1 + F_1 \cdot VCI = & [F_{(Nas)} + F_{(N2as)} + A_1 + F_{(N2)asap}] \cdot \Delta H_{N_2} + \\
& + [(F_{Oas} + F_{O2as} + A_2 + F_{O2asap}) - F_{O2e}] \cdot \Delta H_{3O_2} + \\
& + [A_6 + F_{SO_2e}] \cdot \Delta H_{3SO_2} + [A_3 + F_{CO_2e}] \cdot \Delta H_{3CO_2} + \\
& + [F_{H_2Oa} + A_4 + F_{H_2Oap} + F_{H_2Oe}] \cdot \Delta H_{3H_2O} + \\
& + \left[ \left( fmh \cdot \frac{Wce}{100} \right) - \left( fcs \cdot \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}] \right] + \\
& + (F_{ar} \cdot Cp_{H_2O} + Fcs \cdot Cp_c) \cdot (T_{cs} - T_0) + QP_1 + QP_2 + QP_3
\end{aligned} \tag{2.71}$$

### 2.3.3- Rendimiento térmico de la instalación

El rendimiento de la instalación se determina a través de la relación entre el calor útil y el calor disponible para el proceso de secado y se plantea según la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{Q_{3va}}{Q_1 + Q_7} \cdot 100 = \frac{\left( fmh \cdot \frac{Wce}{100} \right) - \left( fcs \cdot \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}]}{Fc \Delta H_1 + Fc VCI} \cdot 100 \tag{2.72}$$

### 2.3.4- Índice de consumo de combustible y productividad específica del secador

El índice de consumo de combustible ( $Icb$ ) se establece como la relación que existe entre las toneladas de combustible consumido y las de arena sílice seca y se determina por la ecuación siguiente en t/t (tonelada de combustible consumido por cada tonelada de arena seca):

$$Icb = \frac{Fc}{Fcs} \tag{2.73}$$

Este parámetro también se puede obtener a partir del empleo del consumo de combustible teórico estimado a partir de la ecuación 2.70 resultando así el índice de consumo teórico.

En sentido inverso, es decir relacionando la cantidad de arena sílice seca con el consumo de combustible se obtiene la productividad específica del secador, por la ecuación 2.74 en t/t (tonelada de arena sílice seca por tonelada de combustible consumido); a la cual también se le puede obtener un valor teórico resultado de la sustitución de combustible teórico consumido.

$$I_c = \frac{F_{cs}}{F_c}$$

2.74

Las ecuaciones 2.71 ,2.72, 2.73, 2.74 representan el resultado final del método de balance térmico y de masa, en las mismas se establece la relación de los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad específica del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de arena sílice húmeda, humedad de entrada,).

#### **2.4- Técnicas experimentales para la toma de datos en el proceso de secado**

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación, se emplearon los recursos puestos a disposición en la UEB de Fundición de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”. En dicho taller se registran las mediciones de temperatura a la salida de la arena sílice, presión de la cámara, temperatura de la superficie la cámara, la botella y el tambor rotatorio, así como otros valores referentes al secador. Se utilizó una cámara termográfica en los distintos puntos requeridos en el tambor secador rotatorio, y en el caso de la temperatura de la superficie, que es la de mayor influencia a la hora de analizar las pérdidas de calor en el tambor secador, se empleó un termómetro de contacto. Para obtener el por ciento de humedad de entrada y salida de arena sílice fue utilizado una estufa.

Para desarrollar el balance termo energético del secador de arena sílice es necesario el conocimiento y la medición de las principales variables que intervienen en el proceso, algunas de ellas son:

- ✓ Flujo de combustible en la entrada de la cámara de combustión,  $F_c$ ; [kg/s].
- ✓ Flujo de arena sílice húmedo alimentado al secador,  $F_{mh}$ ; [kg/s].
- ✓ Flujo de aire para la combustión,  $F_{ac}$  ;[m<sup>3</sup>/s].
- ✓ Contenido de humedad de arena sílice a la entrada y salida,  $W_e$  y  $W_s$ :[%].
- ✓ Tiempo trabajado por el secador,  $Ht$ ; [h].
- ✓ Temperatura del aire ambiente,  $t_o$ ; [K].
- ✓ Temperatura de entrada del combustible; [K].
- ✓ Flujo de arena sílice seca que sale del secador,  $F_{cs}$ ; [kg/s].

- ✓ Temperatura de los gases a la salida del secadero,  $T_{gpc}$ ; [K].
- ✓ Temperatura de arena sílice seca,  $T_{cs}$ ; [K].
- ✓ Temperatura en la superficie exterior del secadero,  $T_{sec}$ ; [K].

Las propiedades termofísicas de las diferentes sustancias de trabajo (aire, gases y arena sílice) se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones expuestas en la literatura consultada (Perry, 1985; Faires, 1991; Mijeeva y Mijeev, 1991; Page et al., 1998; Incropera y De Witt, 1999, 2003).

## **2.5- Conclusiones del capítulo 2**

- Quedó establecido el método integrado de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado de arena sílice en cilindros horizontales rotatorios. El mismo conjuga diversos aspectos teóricos encontrados en investigaciones precedentes, se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor y masa y permite el análisis integral del objeto de estudio.
- En el secador de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche” fueron utilizados instrumentos de medición donde se pudo contemplar un registro y control de los parámetros operacionales en la instalación de preparación de arena sílice, como son el flujo de arena a la entrada y salida, flujo y temperatura del combustible, entre otras variables vitales para el proceso de secado.

## CAPÍTULO 2

### MÉTODO DE BALANCE TÉRMICO Y DE MASA PARA SECADORES CILÍNDRICOS ROTATORIOS HORIZONTALES

#### 2.1- Introducción

En el secado convencional tienen lugar varios fenómenos de intercambio de calor y masa que rigen su comportamiento termoenergético. La literatura científica recoge diversos procedimientos de cálculo para el análisis de este proceso, en el secador de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”; aspecto que ha sido poco valorado en los trabajos precedentes consultados. En tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es establecer el método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado de arena sílice en cilindros horizontales rotatorios.

#### 2.2- Cálculo de las propiedades termofísicas del aire

Estas propiedades son necesarias para el cálculo del intercambio de calor y masa durante el secado de arena sílice. Las mismas pueden ser calculadas a través de las ecuaciones empíricas 2.1-2.8 (Tiwari, 2002), las referidas ecuaciones han sido validadas en diversas regiones del mundo y utilizadas con éxito en múltiples investigaciones precedentes relacionadas con el secado de diferentes materiales (Montero, 2005; Tiwari y Sarkar, 2006; Vinardell, 2011).

$$k_a = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \quad 2.1$$

$$\rho_a = \frac{353,44}{T_p + 273,15} \quad 2.2$$

$$Cp_a = (999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3) \cdot 10^{-3} \quad 2.3$$

$$\mu_a = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \quad 2.4$$

$$v_a = \frac{\mu_a}{\rho_a} = \frac{(1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot (T_p + 273,15)}{353,44} \quad 2.5$$

$$\alpha_a = \frac{k_a}{\rho_a \cdot C p_a} = \frac{(0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p) \cdot 10^3}{999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3} \cdot \frac{(T_p + 273,15)}{353,44} \quad 2.6$$

$$Pr = \frac{\nu_a}{\alpha_a} = \frac{\left[ (1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p) \cdot \left( 999,2 + 0,1434 \cdot T_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \right) \right] \cdot 10^{-3}}{0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p} \quad 2.7$$

$$\beta_a = \frac{1}{T_p + 273,15} \quad 2.8$$

Donde:

$k_a \Rightarrow$  conductividad térmica del aire; [W/m·K].

$T_p \Rightarrow$  temperatura promedio o de película [ $T_p = (T_s + T_a)/2$ ]; [K].

$\rho_a \Rightarrow$  densidad del aire; kg/m<sup>3</sup>.

$C p_a \Rightarrow$  calor específico a presión constante del aire; [kJ/kg·K].

$\mu_a \Rightarrow$  viscosidad dinámica del aire; [N·s/m<sup>2</sup>].

$\nu_a \Rightarrow$  viscosidad cinemática del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$\alpha_a \Rightarrow$  difusividad térmica del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$Pr \Rightarrow$  número de Prandtl del aire; [adimensional].

$\beta_a \Rightarrow$  dilatación térmica del aire; [K<sup>-1</sup>].

$T_s \Rightarrow$  temperatura de la superficie de secado; [K].

$T_a \Rightarrow$  temperatura del aire; [K].

### 2.3- Balance térmico y de masa

En el presente epígrafe se expone el procedimientos de cálculo, fundamentado en las leyes que rigen la conservación de la masa y la energía, asociados a los fenómeno de combustión y evaporación que se desarrollan como parte del proceso de secado de arena sílice en cilindros rotatorios horizontales. Para los secadores de la empresa investigada la ecuación de balance general es:

$$E_{CE} + E_{LRQ} = E_{CS} + E_{PTC} \quad 2.9$$

Donde:

$E_{CE} \Rightarrow$  Energía de las corrientes entrantes; [kJ/s].

$E_{LRQ} \Rightarrow$  Energía liberada por reacción química; [kJ/s].

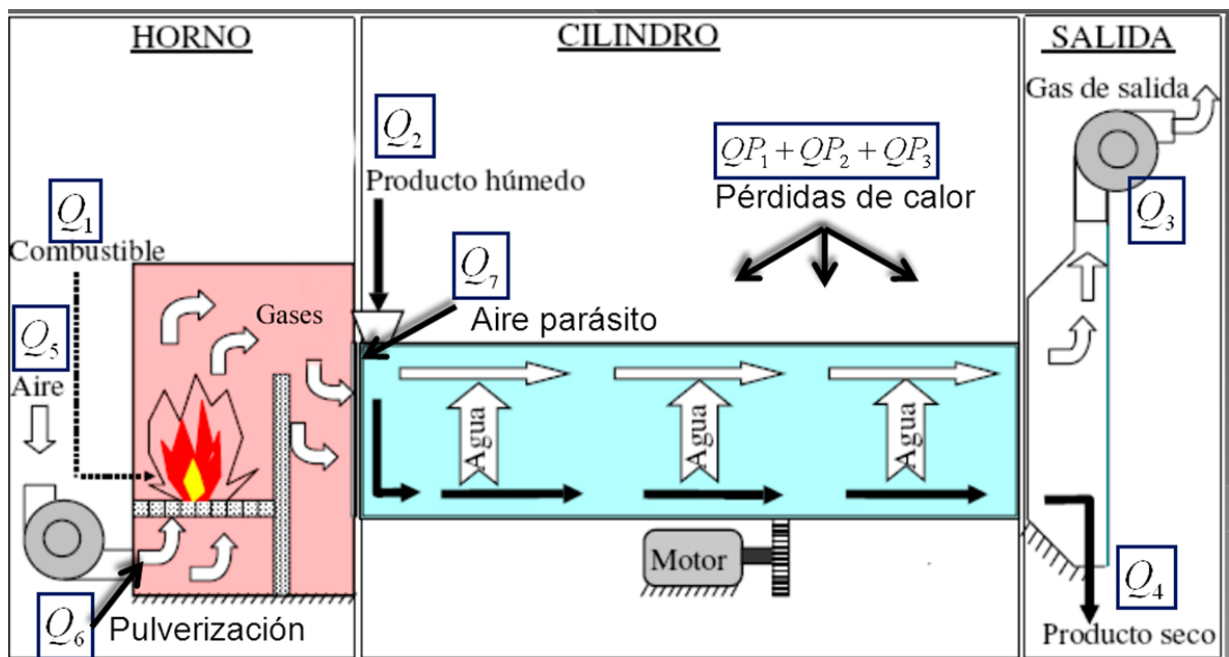
$E_{CS} \Rightarrow$  Energía de las corrientes salientes; [kJ/s].

$E_{PTC} \Rightarrow$  Energía perdida por transferencia de calor; [kJ/s].

El termino energía está referido particularmente a los calores absorbidos y cedidos por las diferentes sustancias de trabajo que intervienen en el proceso a partir de su flujo horario por lo que se expresan en kJ/s.

### 2.3.1- Balance de energías

A través de la ecuación 2.9 se expresa el balance en función de las corrientes que entran y salen en el proceso de secado de arena sílice. Luego, haciendo las transformaciones correspondientes y apoyándose en el esquema de la figura 2.1 se obtiene la ecuación 2.10 que es la general para el balance de energías.



**Figura 2.1.** Esquema básico de un secador cilíndrico horizontal rotatorio de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”. con sus respectivas corrientes energéticas.

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = Q_3 + Q_4 + QP_1 + QP_2 + QP_3 \quad 2.10$$

Donde:

$Q_1 \Rightarrow$  Calor de reacción aportado por el diesel; [kJ/s].

$Q_2 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por la arena sílice húmeda; [kJ/s].

$Q_3 \Rightarrow$  Calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada; [kJ/s].

$Q_4 \Rightarrow$  Calor sensible de la arena seca y el agua retenida a la salida del secadero; [kJ/s].

$Q_5 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire de combustión o primario; [kJ/s].

$Q_6 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire de pulverización; [kJ/s].

$Q_7 \Rightarrow$  Calor sensible aportado por el aire parásito; [kJ/s].

$QP_1 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en la cámara; [kJ/s].

$QP_2 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en el secador; [kJ/s].

$QP_3 \Rightarrow$  Calor perdido por convección y radiación en la botella; [kJ/s].

### Calor de reacción aportado por el combustible Diesel

El combustible (petróleo) además de su calor de reacción aporta calor sensible, entra a una temperatura superior a los 373 K producto del precalentamiento. Las principales características del combustible utilizado se recogen el anexo 1.

$$Q_1 = Q_{fc} = F_c \cdot \Delta H_1 + F_c \cdot VCI \quad 2.11$$

Donde:

$F_c \Rightarrow$  Flujo de combustible; [kg/s].

$VCI \Rightarrow$  Valor calórico inferior del combustible; [kJ/kg].

$\Delta H_1 = \Delta H_x \Rightarrow$  Variación de entalpía; [kJ/kg].

$$\Delta H_x = \int_{T_i}^{T_f} C_p \cdot dT \quad 2.12$$

Siendo:

$$C_{pc} = \frac{0.383 + 0.00045 \cdot T_0}{ge} \quad (\text{Perry, 1985}) \quad 2.13$$

Donde:

$C_{pc}$   $\Rightarrow$  Calor específico del combustible; [kJ/kg·K].

$T_f$  y  $T_i$   $\Rightarrow$  Temperaturas final e inicial del proceso; [K].

$g_e$   $\Rightarrow$  Gravedad específica; [kg/m<sup>3</sup>].

$T_0$   $\Rightarrow$  Temperatura de entrada del combustible; [K]

*En este caso no se especifican los subíndices en la ecuación 2.12, debido a que esta ecuación se usará en varios momentos para diferentes componentes. Las variaciones de entalpía se producen por cambios de temperaturas tanto en los gases de aire parásito, aire de pulverización y aire primario para la combustión.*

### **Determinación de las corrientes 2, 5, 6 y 7**

Las temperaturas de cada una de estas corrientes se igualan la temperatura ambiental por lo que las diferencias de entalpías se hacen cero. De ahí que de la ecuación 2.12 la variación de entalpía sea cero; por tanto:

$$Q_2 = Q_5 = Q_6 = Q_7 = 0 \quad 2.14$$

### **Calor sensible de los gases de salida del secador más calor sensible y latente del agua evaporada ( $Q_3$ )**

Esta corriente está compuesta por los gases que salen del secador más el agua evaporada de arena sílice.

$$Q_3 = Q_{3(G)} + Q_{3(va)} \quad 2.15$$

Donde;

$Q_{3(G)}$   $\Rightarrow$  Energía aportada por los gases excluyendo el agua evaporada; [kJ/s].

$Q_{3(va)}$   $\Rightarrow$  Energía aportada por el vapor de agua eliminado de la arena sílice; [kJ/s].

El calor aportado por los gases se determina a través de la siguiente expresión:

$$Q_{3(G)} = F_3 \cdot \Delta H_{3(G)} \quad 2.16$$

La variación de entalpía se busca teniendo en cuenta las propiedades (calor específico y densidad) de la sustancia a la temperatura de salida de los gases (Incropera y De



Witt, 2003). Estas propiedades se muestran en la Tabla 2.1, y aplicando para cada caso la ecuación 2.12, se obtiene la entalpía correspondiente a cada sustancia de las que componen los gases de escape.

**Tabla 2.1.** Elementos que componen los gases de combustión

Gases	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
Cp (kJ/kg·K)	1,045	0,942	0,976	1	0,982
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	0,8425	0,9620	1,3961	0,5863	1,58

Quedando la ecuación 2.16 de la siguiente manera:

$$Q_{3(G)} = F_{N_2} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_2} \cdot \Delta H_{3O_2} + F_{SO_2} \cdot \Delta H_{3SO_2} + F_{CO_2} \cdot \Delta H_{3CO_2} + F_{H_2O} \cdot \Delta H_{3H_2O} \quad 2.17$$

### Calor aportado por el vapor de agua durante la reducción del porcentaje del agua en la arena sílice

$$Q_{3(va)} = F_{(va)} \cdot \Delta H_{3(va)} \quad 2.18$$

Siendo:

$$F_{va} = \left( F_{mh} \cdot \frac{Wce}{100} \right) - \left( F_{cs} \cdot \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \quad 2.19$$

$$F4 = \frac{100 - Wcs}{100} \quad 2.19a$$

Donde:

$F_{(va)}$  ⇒ Flujo de vapor de agua; [kg/s].

$F_{mh}$  ⇒ Flujo de arena sílice húmedo alimentado al secador; [kg/s].

$F_{cs}$  ⇒ Flujo de arena sílice seca; [kg/s].

$Wce$  ⇒ Contenido de humedad de entrada de arena sílice; [%].

$Wcs$  ⇒ Contenido de humedad de salida de arena sílice; [%].

El cálculo de la variación de entalpía del vapor de agua se determina por:

$$\Delta H_{3(va)} = C_{p_{va}} (T_3 - T_0) + (\tau)_{T3} \quad 2.20$$

Donde:

$C_{p_{va}} = 4.1868$  ⇒ Calor específico del agua; [kJ/kg·K]. (Iglesias, 1990)

$(\tau)_{102^{\circ}\text{C}} = 2252 \Rightarrow$  Calor latente de vaporización del agua a la presión de trabajo del secador; [kJ/kg]. (Iglesias, 1990)

Luego sustituyendo en la ecuación 2.18 resulta:

$$Q_{3(va)} = \left[ \left( f_{mh} \cdot \frac{Wce}{100} \right) - \left( f_{cs} \cdot \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \right] \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}] \quad 2.21$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.17 y 2.19 en la 2.15 se obtiene:

$$Q_3 = F_{N_2} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_2} \cdot \Delta H_{3O_2} + F_{SO_2} \cdot \Delta H_{3SO_2} + \\ + F_{CO_2} \cdot \Delta H_{3CO_2} + F_{H_2O} \cdot \Delta H_{3H_2O} + \left( F_{mh} \cdot \frac{Wce}{100} \right) - \\ - \left( F_{cs} \cdot \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}] \quad 2.22$$

#### Calor sensible de arena sílice seca y el agua retenida a la salida del secador ( $Q_4$ )

Esta corriente está compuesta por la arena sílice seca y el agua retenida en este, su expresión de cálculo es la siguiente:

$$Q_4 = (F_{ar} \cdot Cp_{H_2O} + F_{cs} \cdot Cp_c) \cdot (T_{cs} - T_0) \quad 2.23$$

Donde:

$F_{ar} \Rightarrow$  Flujo de agua retenida; [kg/s].

$F_{cs} \Rightarrow$  Flujo de arena sílice seca; [kg/s].

$Cp_c \Rightarrow$  Capacidad calorífica de arena sílice; [kJ/kg·K].

$T_{cs} \Rightarrow$  Temperatura de arena sílice a la salida; [K].

$T_0 \Rightarrow$  Temperatura del medio ambiente; [K].

#### Cálculo del flujo de aire parásito

En el sistema existe entrada de aire parásito producto a la depresión existente en la cámara de combustión, este flujo de aire penetra a través de la holgura existente en unión de la cámara de paso con el secador, así como por la tolva de alimentación de la arena sílice.

### Unión de la cámara de paso con el tambor secador

En esta unión se calcula la cantidad de aire parásito que penetra por el espacio anular existente entre el tambor secador y la cámara de paso a partir de la siguiente ecuación:

$$G_{ap} = [\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{sc}] \cdot \left[ \frac{29}{R_1 \cdot T_0} \right]^{1/2} \quad 2.24$$

Siendo:

$$A_{sc} = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad 2.25$$

Donde:

$\alpha \Rightarrow$  Eficiencia del orificio; [adimensional].

$\psi \Rightarrow$  Coeficiente flujo; [adimensional].

$R_{ap} \Rightarrow$  Constante particular de los gases; [J/kg·K].

$\Delta P \Rightarrow$  Variación de presión en el secadero; [Pa].

$T_{a_0} \Rightarrow$  Temperatura del aire parásito; [K].

$A_{sc} \Rightarrow$  Área; [m<sup>2</sup>].

$R_1 \Rightarrow$  Radio de la cámara de paso; [m].

$R_2 \Rightarrow$  Radio del tambor; [m].

### Sección de entrada de arena sílice

Esta sección es la que corresponde a la sección de la tolva de alimentación al secadero. El flujo de aire parásito se determina a partir de la ecuación:

$$G_{ia} = [\alpha \cdot \psi \cdot \Delta P \cdot A_{ta}] \cdot \left[ \frac{29}{R_1 \cdot T_0} \right]^{1/2} \quad 2.26$$

Luego se determina el flujo de aire parásito total por:

$$GT = G_{ap} + G_{ia} \quad 2.27$$

### Cálculo de las pérdidas de calor

En la instalación de secado existen pérdidas de calor por convección y radiación, los flujos de calor deben determinarse para las diferentes secciones del equipo (cámara de paso, tambor secador y la botella), a continuación se relacionan las expresiones de cálculo fundamentales para el análisis de la transferencia de calor.

### Pérdidas de calor en la cámara de paso

$$QP_1 = q_{conv} + q_{rad} \quad 2.28$$

En esta sección la convección es libreproductoa que el movimiento de fluido se realiza principalmente atendiendo a su densidad, además este recinto cerrado se comporta como una cavidad y el flujo de calor por convección se determina por la ecuación 2.29, mientras que el calor por radiación por la expresión 2.30:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_0) \quad 2.29$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad 2.30$$

Donde:

$q_{conv} \Rightarrow$  Flujo de calor por convección; [kJ/s].

$q_{rad} \Rightarrow$  Flujo de calor por radiación; [kJ/s].

$h \Rightarrow$  Coeficiente de transferencia de calor por convección; [W/m<sup>2</sup>·K].

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor; [m<sup>2</sup>].

$T_s \Rightarrow$  Temperatura de la superficie exterior de la cámara; [K].

$T_0 \Rightarrow$  Temperatura del ambiente; [K].

$\varepsilon \Rightarrow$  Emisividad de la superficie exterior de la cámara; [adimensional].

$\sigma \Rightarrow$  Constante de Stefan-Boltzman; W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>.

Luego las diferentes áreas que intervienen en el proceso de transferencia de calor en esta sección se calculan por las ecuaciones desde 2.31 hasta 2.33 mostradas a continuación.

$$A_0 = 2 \cdot (a \cdot H + a \cdot L + H \cdot L) \quad 2.31$$

$$A_1 = \pi \cdot d_1^2 \quad 2.32$$

$$A = A_0 - (A_1) \quad 2.33$$

Donde:

$a \Rightarrow$  Ancho de la cámara de paso; [m].

$H \Rightarrow$  Altura de la cámara de paso; [m].

$L \Rightarrow$  Longitud de la cámara de paso; [m].

$d_1 \Rightarrow$  Diámetro del orificio 1; [m].

$A_0 \Rightarrow$  Área total de la cámara de paso; [m<sup>2</sup>].

$A_1 \Rightarrow$  Área del orificio del diámetro 1; [m<sup>2</sup>].

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor en la cámara de paso; [m<sup>2</sup>].

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula teniendo en cuenta el número de Rayleigh ( $R_{al}$ ), el cual se determina por la ecuación 2.34.

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_0) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad 2.34$$

Donde:

$G_r \Rightarrow$  Número de Grashof; [adimensional].

$P_r \Rightarrow$  Número de Prandls; [adimensional].

$g \Rightarrow$  Aceleración de la gravedad; [m/s<sup>2</sup>].

$\beta \Rightarrow$  Coeficiente de dilatación volumétrica; [K<sup>-1</sup>].

$\nu \Rightarrow$  Viscosidad cinemática del aire; [m<sup>2</sup>/s].

$\alpha \Rightarrow$  Coeficiente de difusividad térmica; [m<sup>2</sup>/s].

Los parámetros del fluido se buscan a la temperatura pelicular ( $T_p$ ) en la Tabla A-4 del Incropera y De Witt (2003).

$$T_p = \frac{T_s + T_0}{2} \quad 2.35$$

Luego el coeficiente de transferencia por convección se determina por la ecuación 2.43:

$$h = \frac{N_{UL} \cdot k}{L} \quad 2.36$$

Donde:

$k \Rightarrow$  Conductividad térmica del aire; [W/m·K].

$L \Rightarrow$  Longitud de la cámara; [m].

$N_{UL} \Rightarrow$  Número de Nusselt calculado por la expresión 2.37:

$$N_{UL} = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot R_{at}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad 2.37$$

Luego sustituyendo  $H$ , las respectivas áreas de transferencia de calor y los restantes parámetros en las ecuaciones 2.29 y 2.30 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en la cámara de paso.

### Pérdidas de calor en el tambor secador

Las pérdidas en el tambor secador se producen al salir los gases a una alta temperatura que arrastran gran cantidad de calor hacia la atmósfera, además de interactuar con la superficie metálica del mismo.

Las pérdidas de calor en esta sección se determinan por convección forzada debido a que el aire se mueve con velocidad promedio de 2,3 m/s. A partir de la ecuación 2.38

$$QP_2 = q_{conv} + q_{rad} \quad 2.38$$

Donde:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{sec} - T_0) \quad 2.39$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sec}^4 - T_0^4) \quad 2.40$$

Donde:

$T_{sec} \Rightarrow$  Temperatura de la superficie exterior del tambor secador; [K].

El área de transferencia de calor en esta sección se calcula por la siguiente expresión:

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad 2.41$$

Donde:

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor del tambor secador; [m<sup>2</sup>].

$D \Rightarrow$  Diámetro del tambor secador; [m].

$L \Rightarrow$  Longitud del tambor secador; [m].

Excepto el número de Prandtl;  $Pr_s$  (que se determina a la temperatura de la superficie), todas las propiedades se buscan a la temperatura del fluido en la Tabla A-4 del Incropera y De Witt (2003).

El número de Reynolds ( $R_e$ ) se obtiene mediante la expresión:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad 2.42$$

Donde:

$V \Rightarrow$  Velocidad del aire ambiente; [m/s].

El número de Nusselt ( $N_{UL}$ ) para esta sección del secadero se determina por la expresión 2.43. Se seleccionan los valores de los coeficientes  $C$  y  $m$  en la Tabla 7.4 del Incropera y De Witt (2003) en correspondencia con el número de Reynolds calculado.

$$N_{UD} = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \cdot \left( \frac{P_{r0}}{P_{rs}} \right)^{1/4} \quad 2.43$$

Luego, al sustituir la ecuación 2.43 en la 2.44 se determina el coeficiente de transferencia por convección para esta sección.

$$h = \frac{N_{UD} \cdot k}{D} \quad 2.44$$

Sustituyendo la ecuación 2.44 y los parámetros físicos relacionados con el tambor secador en las ecuaciones 2.39 y 2.40 se obtiene el flujo de calor transferido por convección y radiación en esta sección.

### **Pérdidas de calor en la Botella**

Las pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección en esta sección se calculan igual al tambor secador, el área de transferencia se determina por la ecuación 2.45:

$$QP_3 = q_{conv} + q_{rad}$$

$$A = \pi \cdot S \cdot \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \quad 2.45$$

Donde:

$A \Rightarrow$  Área de transferencia de calor en la botella; [m<sup>2</sup>].

$S \Rightarrow$  Generatriz del cono; [m].

$d_1$  y  $d_2 \Rightarrow$  Diámetro mayor y menor de la botella; [m].

El número de Reynolds se determina utilizando la expresión 2.42, pero considerando el diámetro asociado a esta sección, los coeficientes  $c$  y  $m$  se determinan de forma análoga a la sección anterior a partir del valor del número de Reynolds obtenido. El número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor por convección se calculan por las expresiones 2.43 y 2.44 respectivamente.

Luego las pérdidas de calor totales por transferencia de calor en el secador se obtienen sumando las pérdidas locales por convección y radiación en todas las secciones (cámara de paso, tambor secador y la botella).

Sustituyendo las ecuaciones los valores de los calores conocidos en la expresión 2.10 se obtiene la ecuación para el balance de las energías entrante y saliente.

$$\begin{aligned} F_1 \cdot \Delta H_1 + F_1 \cdot VCI = & F_{N_2} \cdot \Delta H_{N_2} + F_{O_2} \cdot \Delta H_{O_2} + F_{SO_2} \cdot \Delta H_{SO_2} + F_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + \\ & + F_{H_2O} \cdot \Delta H_{H_2O} + \left[ \left( Fmh \frac{Wce}{100} \right) - \left( Fcs \frac{Wcs}{100 F4} \right) \right] \cdot \\ & \cdot [Cp_{va}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}] + \\ & + (F_{ar} \cdot Cp_{H_2O} + Fcs Cp_c) \cdot (T_{cs} - T_0) + QP_1 + QP_2 + QP_3 \end{aligned} \quad 2.46$$

### 2.3.2- Balance de masa

#### Cálculo del oxígeno estequiométrico y los productos de la combustión



El volumen de un mol, que en las mismas condiciones es igual para todos los gases perfectos, en condiciones normales es  $22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ . Los números en el denominador corresponden a la masa molecular de cada componente.

$$F_{O_2} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{C \cdot 0,01}{12} + \frac{H \cdot 0,01}{4} + \frac{S \cdot 0,01}{32} + \frac{O \cdot 0,01}{32} \right) \quad 2.47$$

$$F_{CO_2} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{C_t \cdot 0,01}{12} \right) \quad 2.48$$

$$F_{H_2O} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{H_2}{2} + \frac{W_t}{18} \right) \quad 2.49$$

$$F_{SO_2} e = 22,4 \cdot F_C \cdot \left( \frac{S_t}{32} \right) \quad 2.50$$

### Cálculo del flujo de los componentes de cada una de las corrientes

#### Corriente 5 (aire primario para la combustión)

Se conoce:

$\lambda_{ac} = 12,5 \Rightarrow$  Relación aire combustible.

$W_{aire} = 0,026 \Rightarrow$  Porcentaje de humedad en el aire.

$A_{seco} = 0,974 \Rightarrow$  Porcentaje de aire seco.

$O_{as} = 0,21 \Rightarrow$  Porcentaje de oxígeno en el aire seco.

$N_{as} = 0,79 \Rightarrow$  Porcentaje de nitrógeno en el aire seco.

$$F_5 = \lambda_{ac} \cdot F_C = 12,5 \cdot F_C \quad 2.51$$

$$F_{H_2O} = W_{aire} F_5 \quad 2.52$$

$$F_{As} = A_{seco} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.53$$

$$F_{O_2 as} = A_{seco} \cdot O_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.54$$

$$F_{N_{as}} = A_{seco} \cdot N_{as} \cdot \lambda_{ac} \cdot F_C \quad 2.55$$

#### Corriente 6 (aire para la pulverización)

$\rho_a = 1,134776 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$  Densidad del aire a temperatura ambiente (Incropera y De Witt, 2003).

$$Fa_6 = F_6 \cdot \rho_a \quad 2.56$$

$$F_{H_2O}a = Waire \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.57$$

$$F_{AsecO} = A_{secO} \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.58$$

$$F_{O_2}as = Oas \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.59$$

$$F_{N_2}as = Nas \cdot F_6 \cdot \rho_a \quad 2.60$$

### Corriente 7 (aire parásito)

$$GT = F_7 \quad 2.61$$

$$F_{H_2O}ap = Waire \cdot F_7 \quad 2.62$$

$$F_{AsecO}ap = A_{secO} \cdot F_7 \quad 2.63$$

$$F_{O_2}asap = Oas_{secO} \cdot F_7 \quad 2.64$$

$$F_{N_2}asap = Nas \cdot F_7 \quad 2.65$$

Para determinar el flujo de los componentes se realiza un balance de cada uno de ellos a la salida del secador en el cual se incluyen los componentes de cada corriente.

### **Balance de oxígeno y nitrógeno:**

$$F_{O_2} = (F_{O_2}as + F_{O_2}asap + A_2 + F_{O_2}asap) - F_{O_2}e \quad 2.66$$

$$F_{N_2} = F_{(N_2)as} + F_{(N_2)asap} + A_1 + F_{(N_2)asap} \quad 2.67$$

### **Balance de vapor de agua excluyendo el agua evaporada de la arena sílice:**

$$F_{H_2O} = F_{H_2O}comb + F_{H_2O}a + A_4 + F_{H_2O}ap + F_{H_2O}e \quad 2.68$$

### **Balance del SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>:**

$$F_{SO_2} = A_6 + F_{SO_2}e \quad 2.69$$

$$F_{CO_2} = A_3 + F_{CO_2}e \quad 2.70$$

Considerando la combustión completa y sustituyendo en 2.46 los flujos de los componentes de los gases a la salida del secador se obtiene la ecuación general de balance de masa y energía de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} F_1 \cdot \Delta H_1 + F_1 \cdot VCI = & [F_{(Nas)} + F_{(N2as)} + A_1 + F_{(N2)asap}] \cdot \Delta H_{N_2} + \\ & + [(F_{Oas} + F_{O2as} + A_2 + F_{O2asap}) - F_{O2e}] \cdot \Delta H_{3O_2} + \\ & + [A_6 + F_{SO_2e}] \cdot \Delta H_{3SO_2} + [A_3 + F_{CO_2e}] \cdot \Delta H_{3CO_2} + \\ & + [F_{H_2Oa} + A_4 + F_{H_2Oap} + F_{H_2Oe}] \cdot \Delta H_{3H_2O} + \\ & + \left[ \left( f_{mh} \frac{Wce}{100} \right) - \left( f_{cs} \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \cdot [C_{Pva}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}] \right] + \\ & + (F_{ar} \cdot C_{pH_2O} + F_{cs} \cdot C_{pc}) \cdot (T_{cs} - T_0) + QP_1 + QP_2 + QP_3 \end{aligned} \quad 2.71$$

### 2.3.3- Rendimiento térmico de la instalación

El rendimiento de la instalación se determina a través de la relación entre el calor útil y el calor disponible para el proceso de secado y se plantea según la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{Q_{3va}}{Q_1 + Q_7} \cdot 100 = \frac{\left( f_{mh} \frac{Wce}{100} \right) - \left( f_{cs} \frac{Wcs}{100 \cdot F4} \right) \cdot [C_{Pva}(T_3 - T_0) + (\tau)_{T3}]}{Fc \Delta H_1 + FcVCI} \cdot 100 \quad 2.72$$

### 2.3.4- Índice de consumo de combustible y productividad específica del secador

El índice de consumo de combustible ( $I_{cb}$ ) se establece como la relación que existe entre las toneladas de combustible consumido y las de arena sílice seca y se determina por la ecuación siguiente en t/t (tonelada de combustible consumido por cada tonelada de arena seca):

$$I_{cb} = \frac{Fc}{Fcs} \quad 2.73$$

Este parámetro también se puede obtener a partir del empleo del consumo de combustible teórico estimado a partir de la ecuación 2.70 resultando así el índice de consumo teórico.

En sentido inverso, es decir relacionando la cantidad de arena sílice seca con el consumo de combustible se obtiene la productividad específica del secador, por la ecuación 2.74 en t/t (tonelada de arena sílice seca por tonelada de combustible consumido); a la cual también se le puede obtener un valor teórico resultado de la sustitución de combustible teórico consumido.

$$I_c = \frac{F_{cs}}{F_c} \quad 2.74$$

Las ecuaciones 2.71 ,2.72, 2.73, 2.74 representan el resultado final del método de balance térmico y de masa, en las mismas se establece la relación de los parámetros de eficiencia (rendimiento térmico, consumo específico de combustible y productividad específica del secador) en función de las variables más influyentes del proceso (flujo de arena sílice húmeda, humedad de entrada,).

#### 2.4- Técnicas experimentales para la toma de datos en el proceso de secado

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación, se emplearon los recursos puestos a disposición en la UEB de Fundición de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche”. En dicho taller se registran las mediciones de temperatura a la salida de la arena sílice, presión de la cámara, temperatura de la superficie la cámara, la botella y el tambor rotatorio, así como otros valores referentes al secador. Se utilizó una cámara termo gráfica en los distintos puntos requeridos en el tambor secador rotatorio, y en el caso de la temperatura de la superficie, que es la de mayor influencia a la hora de analizar las pérdidas de calor en el tambor secador, se empleó un termómetro de contacto. Para obtener el porcentaje de humedad de entrada y salida de arena sílice fue utilizado una estufa.

Para desarrollar el balance termo energético del secador de arena sílice es necesario el conocimiento y la medición de las principales variables que intervienen en el proceso, algunas de ellas son:

- ✓ Flujo de combustible en la entrada de la cámara de combustión,  $F_c$ ; [kg/s].
- ✓ Flujo de arena sílice húmedo alimentado al secador,  $F_{mh}$ ; [kg/s].
- ✓ Flujo de aire para la combustión,  $F_{ac}$ ; [m<sup>3</sup>/s].
- ✓ Contenido de humedad de arena sílice a la entrada y salida,  $W_e$  y  $W_s$ ; [%].
- ✓ Tiempo trabajado por el secador,  $Ht$ ; [h].
- ✓ Temperatura del aire ambiente,  $t_o$ ; [K].
- ✓ Temperatura de entrada del combustible; [K].
- ✓ Flujo de arena sílice seca que sale del secador,  $F_{cs}$ ; [kg/s].

- ✓ Temperatura de los gases a la salida del secadero,  $T_{gpc}$ ; [K].
- ✓ Temperatura de arena sílice seca,  $T_{cs}$ ; [K].
- ✓ Temperatura en la superficie exterior del secadero,  $T_{sec}$ ; [K].

Las propiedades termofísicas de las diferentes sustancias de trabajo (aire, gases y arena sílice) se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones expuestas en la literatura consultada (Perry, 1985; Faires, 1991; Mijeeva y Mijeev, 1991; Page et al., 1998; Incropera y De Witt, 1999, 2003).

## 2.5- Conclusiones del capítulo 2

- Quedó establecido el método integrado de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado de arena sílice en cilindros horizontales rotatorios. El mismo conjuga diversos aspectos teóricos encontrados en investigaciones precedentes, se fundamenta en las leyes que rigen la transferencia de calor y masa y permite el análisis integral del objeto de estudio.
- En el secador de la empresa “Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche” fueron utilizados instrumentos de medición donde se pudo contemplar un registro y control de los parámetros operacionales en la instalación de preparación de arena sílice, como son el flujo de arena a la entrada y salida, flujo y temperatura del combustible, entre otras variables vitales para el proceso de secado.

## CONCLUSIONES

---

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor en el secador de la empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche. Las pérdidas de calor por convección obtenidas fueron:  $3,868 \cdot 10^4$ ;  $9,25 \cdot 10^4$ ;  $2,227 \cdot 10^5$  W y por radiación  $2,187 \cdot 10^4$ ;  $6,771 \cdot 10^4$ ;  $4,321 \cdot 10^5$  W en la cámara de paso, el tambor secador y la botella respectivamente.
- Se estableció el procedimiento de cálculo para el diagnóstico térmico del secadero de la empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed De Beche. Los resultados obtenidos demuestran que el secador analizado tiene rendimientos térmicos igual a 76 % para una productividad hasta 36 t/h.
- El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado a los secadores analizados asciende a 10216800 USD para los cinco meses considerados.
- Las afectaciones medioambientales más importantes en el proceso de secado son las emisiones continuas de polvo, ruido y gases producto de la combustión, las mismas son en ocasiones superiores a las normas internacionales establecidas.



## RECOMENDACIONES

---

- Realizar sistemáticamente evaluaciones térmicas al secador para ajustar los parámetros y facilitar la toma de decisiones de los operarios y el personal administrativo.
- Crear un software que permita el diagnóstico térmico del secador e incorpore el análisis exergético del proceso.
- Automatizar el secadero para lograr no solo la medición y registro de los parámetros fundamentales del proceso, sino además el control de los mismos.
- Impartir curso de capacitación en transferencia de calor a los operarios y personal administrativos, lo que permitirá elevar su preparación técnica y le facilitará la toma de decisiones respecto al proceso.

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Aldana, E.; I. Ramírez; H. Alepuz. *Determinación de la carga y capacidad actuales de la instalación de secado de mineral de la empresa Ernesto Che Guevara*. *Tecnología Química*, 2004, 24(2): 90-96.
2. AZMAN, G. *Diagnóstico térmico del proceso de secado en los tambores cilíndricos rotatorios de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Tesis de Ingeniería. ISMMM. 2008. 52 h.
3. BACHIR, H. *Balance térmico y de masa del secador # 3 en la empresa CMDTE Ernesto Guevara*. Proyecto de curso. ISMMANJ, Moa. 2001. 36p.
4. BAKER, C. G. The design of flights in cascading rotary dryers, *Drying Technology*, 6 (4): 631 – 653, 1988.
5. BOIZAN, M. *Macrocinética del secado de Bagazo*. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.
6. DELGADO, Y. *Método de balance térmico y de masa para la evaluación del proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales*. Tesis de Maestría. ISMMM. 2013.
7. 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.
8. EICH-SOELLNER, E, LONY, P. B, KRONER, A. *Stationary and Dynamic Flowsheeting in the Chemical Engineering Industry*. Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat. Vol. 7, Nro. 1, 1997.
9. FAIRES, V. (1994). *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
10. 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.
11. FILONENKO, G. *Secado de semillas de tomate*. Conferencia nacional de secado- Sección de energética. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.



12. FITT, A. D. *Mixed Systems of Conservation Laws in Industrial Mathematical Modelling*. Industrial Mathematics Institute Johannes Kepler Universitat. Vol.6 Nro. 1,1996.
13. HUANG, C. L. Multi – Phase moisture transfer in porous media subjected to temperature gradient. Int. J. Heat Mass Transfer. 22: 295 – 307, 1979.
14. 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.
15. INCROPERA, F; D. DE WITT. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II y III. 723p.
16. KALLEL, F; ET AL. Effects of moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. *J. Heat Transfer, ASME Trans.* 115: 724 – 733, 1993.
17. KASATKIN, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
18. KNOULE, F. *El secado*. Bilbao. Ediciones Urno. 1968./pág 50-150.
19. KRISHER, O. *Fundamentos científicos de la técnica del secado*. Editorial Izdatinlit. Moscú, 1961.
20. KUROSHKINA, M. *La fluidización en la industria* Editorial XIMIA. Leningrado, 1972.
21. LANGRISH, T. A. G; ET AL. (1988): *An Investigation into Heat Transfer in Cascading Rotary Dryers*, *J. Separ. Proc. Technol.* 9: 15 – 20.
22. LYKOV, A. *Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos*. Editorial gostejizdat. Moscu, 1954.
23. LYKOV, A. *Teoría del secado*. Editorial Energía, 2da edición, Moscú, 1968.
24. MIJEEVA, I; M. MIJEEV. *Fundamentos de termotransferencia*. Santiago de Cuba: ENPES, 1991. 376 p.
25. MONTERO, I. *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Tesis Doctoral. Badajoz, 2005. 262h.
26. 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.

27. MOYA, Y. *Determinación de las pérdidas de calor en los secaderos convencionales de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Tesis de Ingeniería. ISMMM. 2008. 75 h.
28. PAGE, N; D. BISSET; G. DALY; E. KISI . *Ore cooler evaluation. A report for Prior Industries Australia Pty. Ltd. The University of Newcastle research associates limited*. Department of Mechanical Engineering at the University of Newcastle, Australia, 1998. 17p.
29. PAPADAKIS, S. E. Scale – up of cascading rotatory dryers. Drying Technology. 12: 259 – 279, 1994.
30. PEISHI, C; AND PEI, D. C. A mathematical model of drying processes. Int. J. Heat Mass Transfer. 32 (2): 297 – 310, 1989
31. PERRY, J. *Chemical Engineering Handbook*. 6<sup>ta</sup> Edición. Mc Graw Hill, New York 1985.
32. PHILIP, J; DE VRIES, D. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 18: 222-232. 1957.
33. PLUMB, O; G. SPOLEK; B. OLMSTEAD. Heat and Mass Transfer in Wood during drying. *Int.J. Heat Mass Transfer* 28(9): 169-178.1985.
34. REZCHIKOV, V; A. GUINSBURG. *Secado de productos alimenticios en cama fluidizante*. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú, 1966.
35. SCHOFIELD, F. R. AND GLIKIN, P. G. Rotary Dryers and Coolers for Granular Fertilizers, Trans. Instn. Chem. Engrs.. 40: 183, 1962.
36. STRUMILLO, C. *Fundamentos de la teoría y práctica del secado*. Editorial W.N.T. Varsovia, 1975.
37. THOMAS, H; K. MORGAN; R. LEWIS. A Fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. *Int. J. Num. Methods Eng.*15: 381-393.1980.
38. TIWARI, G. *Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International, India, 2002.
39. TIWARI, G; B. SARKAR. *Experimental study of greenhouse Prawn drying under natural convection*. *Agricultural Engineering International*, 2006, 8(16): 1-9.
40. TORRES, E. *Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral en tambores cilíndricos rotatorios*. Tesis de Maestría. ISMMM.81h.

41. TORRES, E.; R. GALANO; E. FERNÁNDEZ; A. GARCÍA. *Comportamiento del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios*. *Minería y Geología*. 2000, 17(2): 73-77. Consultado: 3 de noviembre de 2008. Disponible: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
42. TORRES, E.; R. GALANO; E. GUZMÁN. *Influencia del régimen de temperatura en el secado del mineral laterítico*. *Minería y Geología*, 2003, 1(2): 119-123. Consultado: 3 de noviembre de 2008. Disponible: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
43. VINARDELL, J. *Implementación del secado solar natural de las menas lateríticas en las empresas niquelíferas cubanas*. Tesis de Maestría. ISMMM. 2011. 63 h.
44. WHITAKER, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying. *Adv.Heat Transfer* 13: 119-203.1977.



## Anexo 1

MINISTERIO DE LA INDUSTRIA BASICA  
EMPRESA: Mecánica del níquel Gustavo Machín Hoed De Beche



## REPORTE ANALITICO: LABORATORIO QUIMICO

068-R-1/PO-29

**Producto:** Petróleo      **Clase:** Fuel-Oil.**Entrada de la Muestra al Laboratorio:** 21/02/2012**Emisión de los Resultados:** 22/02/2012**Lugar de almacenaje del producto:** Base de Recepción y Suministro.**Nombre del Barco:** TK - 3

Índice	Unidad	Método Analítico	Especificación Contratada	Resultado Laboratorio Químico ECG
Visc a 50 °C	CSTOK	D-445	450 máx.	419.76
Visc a 80 °C	CSTOK	-	69 máx.	90.90
Densidad API	-	D-1298	10.5 min.	14.3
Punto de Inflamación	°C	D-93	65 min.	160.0
Carbón Conradson	%	D-189	17 máx.	10.40
Cenizas	%	D-382	0.10 máx.	0.07
Agua	%	D-95	1 máx.	0.00
Azufre	%	D-129	3.5 máx.	2.10
Temperatura de Fluidez Crítico	°C	D-97	18 máx.	----
Impurezas mecánicas	%	D-473	0.15 máx.	0.03
Asfáltenos	%	D-1548	13 máx.	6.72
Valor Calórico	KCal/Kg	D-4698	9600 min	10558.18
Sodio	PPM	D-1218	60 máx.	----
Vanadio	PPM	D-1548	400 máx.	----
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	-	0.9846 máx.	0.9699

## Observaciones:

Ing. Nohelvis Garbey  
Esp. Princ. Grupo SGC.

Lic. Elba González  
J. Grupo. Anal. Esp.

Analista

Ing. Beatriz Toirac R  
J. Laboratorio Central