

REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALÚRGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECANICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de
Ingeniero Mecánico

**TITULO: BALANCE TERMO – ENERGÉTICO DEL
PROCESO DE ACTIVACIÓN DEL CARBÓN VEGETAL.**

AUTOR: Javier Gaspar Rodríguez Navarro

TUTOR: Ing. Carlos Salazar Oliva

**MOA, Junio 2015
Año 57 de la Revolución**

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Javier Gaspar Rodríguez Navarro

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa” Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Javier Gaspar Rodríguez
Navarro

Ing. Carlos Zalazar Oliva

Agradecimientos.

Mis agradecimientos a quienes de forma desinteresada ayudaron a la realización de este trabajo, y en especial:

A mis tutores: Ing. Carlos Salazar

Dr. Ms. Ever Góngora Leiva.

Ing. Nico

*A mi familia que me ha apoyado mucho en estos momentos
A mis amistades y compañeros de estudio.*

A nuestro comandante Raúl Castro Ruz y a la Revolución Cubana, por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.

A todos, muchas gracias.

Pensamiento.

“Educar es depositar en cada hombre toda obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive: es ponerlo a nivel de su tiempo, para que flote sobre él, y no dejarlo debajo de su tiempo, con lo que no podrá salir a flote; es prepara al hombre para la vida”.

José Martí.

Dedicatoria.

Con todo mi amor:

Para mis tíos:

➤ *Arlennis Rodríguez Blanco.*

➤ *Alexis Duran Batista.*

Para mi familia en especial mi madre que aunque no esté presente le dedico con todo mi amor este trabajo, mi abuela y mi hermano:

➤ *María Julia Navarro Jiménez.*

➤ *Georgina Jiménez Santana.*

➤ *Jairon Rafael Rodríguez Navarro.*

Para mi papa y mis primos:

➤ *Fidel Gaspar Rodríguez Blanco.*

➤ *Carlos Delva Jiménez.*

➤ *Alexis Duran Rodríguez.*

➤ *Alexey Duran Rodríguez.*

RESUMEN

El interés en el mejoramiento de la eficiencia en instalaciones térmicas amerita el desarrollo de investigaciones que aporten soluciones para la explotación racional de los procesos de activación del carbón, teniendo en cuenta factores técnicos y económicos que, junto a consideraciones de carácter subjetivo, conforman los criterios generales de eficiencia. Sobre la base de la bibliografía consultada y el marco teórico establecido en este trabajo, se describen los principios técnicos de la activación, el flujo tecnológico de la planta y del horno para la activación del carbón. Se caracterizó el carbón vegetal y los parámetros que identifican el proceso de activación. A través del procedimiento establecido para el balance térmico y de masa, se determinó que el consumo de combustible real es menor que el calculado. Se hizo la valoración económica sustentada en los resultados obtenidos y del impacto del proceso sobre el medioambiente.

SUMMARY

The interest in the improvement of the efficiency in facilities thermal amerita the development of investigations that you/they contribute solutions for the rational exploitation of the processes of activation of the coal, keeping in mind technical and economic factors that, next to considerations of subjective character, they conform the general approaches of efficiency. On the base of the consulted bibliography and the theoretical mark settled down in this work, the technical principles of the activation are described, the technological flow of the plant and of the oven for the activation of the coal. It was characterized the vegetable coal and the parameters that identify the activation process. Through the established procedure for the thermal balance and of mass, it was determined that the consumption of real fuel is smaller than the calculated one. The economic valuation was made sustained in the obtained results and of the impact of the process on the medioambiente.

Contenido

Introducción	1
1.1- Introducción	4
Exponer los aspectos teóricos y contextuales del proceso de activación de carbón y el análisis térmico del proceso.....	4
1.2- Breve historia del carbón activo	7
1.3- Generalidades del proceso de activación del carbón.....	9
1.3-1 El carbón activado	9
1.3-2 Materiales de Partida.....	9
1.3-3 Tipos de activación.	10
1.3-4 Tipos de carbones activados.....	12
1.3-5 Importancia de la estructura porosa de los carbones activados	13
1.3-6 Aplicaciones del carbón activo:	13
1.4- Flujo tecnológico.....	14
1.5- Descripción de los principales procesos que ocurren durante la activación.	17
1.6- Análisis de la transferencia de masa	19
1.7- Principales variables que intervienen en el proceso.....	20
1.8- Conclusiones del capítulo:.....	20
CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES EMPLEADOR PARA EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DEL CARBÓN	21
2.1- Introducción	21
2.2- Instalación experimental.....	21
2.3- Análisis energético de los calores que entran y salen en el sistema.....	22
2.4- Balance de masa y energía	23
2.5- Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor en la cámara de combustión	28
2.6- Balance de masa y energía en el cilindro.....	31
2.7- Cálculo de las pérdidas de calor por transferencia de calor en el secadero rotatorio.....	33
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA Y DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DEL CARBÓN.....	37
3.1- Introducción:	37
3.2- Resultados experimentales:	37
3.3- Análisis de los resultados	39
3.4- Valoración Económica:	42
3.5- Conclusiones del capítulo 3.....	45

CONCLUSIONES GENERALES:.....	46
RECOMENDACIONES	47
BIBLOGRAFIA:	48
Anexos.....	50

Introducción

El carbón activado es un tipo de material que por sus características, extremadamente poroso, posee un área superficial muy alta, con una gran capacidad de adsorción y de reacciones químicas, por ello son empleados en numerosas aplicaciones como la extracción de metales, la purificación del agua, en medicina, para el tratamiento de aguas residuales, clarificación y eliminar algunos olores , purificación de glicerina, en máscaras antigás, en filtros de purificación y en controladores de emisiones de automóviles, entre otros muchos usos.

Cuba cuenta desde 1997 con una planta industrial de producción de carbón activado con capacidad de producción de 600 a 700 t/a, está situado en Rivera Mabujabo carretera Moa km 5 ½, Baracoa, Guantánamo. Esta entidad forma parte de la Empresa Producciones Varias PROVARI en la UEB Provari Guantánamo que fue constituida mediante Resolución No. 110 del 2 de junio de 1996 dictada por el MINBAS; así mismo la UEB Carbón Activado fue creada mediante Resolución No. 142 /2002 del 8 de abril del 2002 como resultado de la aplicación del Perfeccionamiento Empresarial, todas subordinadas a la Unión Geominera, actualmente Grupo Empresarial GEOMINSAL del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS).

La fábrica cuenta con cinco áreas fundamentales el área de recepción y pesaje, el área de trituración y clasificación, el área de activación , área de caldera , depuración, extracción de gases y área de clasificación secundaria y envase.

En el área de activación es donde se realizan las operaciones fundamentales de la fábrica, los cuales deciden la calidad del producto final y el rendimiento de la misma. La activación del carbón se realiza en un horno cilíndrico horizontal rotatorio en el cual se su ministra gases producto de la combustión de flui oil en un quemador y son suministrado al interior del cilindro a través de un ventilador de tiro inducido. Para que se produzca el proceso de activación se emplea como

agente activante el vapor saturado de agua el cual también es suministrado en el cilindro junto con los gases.

El carbón se somete a temperaturas de 900 a 1000 °C, en una atmósfera inerte o reductora, casi siempre saturada con vapor de agua. En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO₂, y otros se recombinan y condensan en forma de placas grafiticas. Estas placas tienden a ser pequeñas e imperfectas.

El grado de activación y el rendimiento del mismo dependen de las condiciones de operación del horno de activación como la temperatura, la composición de los gases, el tiempo de residencia y el flujo volumétrico del vapor.

Hoy día, en la en la fábrica de Carbón activado en Baracoa existe como **situación problemática**

- No se garantiza el perfil térmico a lo largo del interior del horno de activación por el desconocimiento del flujo de gases necesarios que se debe suministrar a través de las toberas.
- Baja eficiencia en el proceso de activación
- Desconocimiento de los parámetros óptimos de explotación de la instalación

Por tales motivos se define en la presente tesis como **problema:** el desconocimiento del comportamiento de las principales variables en el proceso de activación del carbón

Para darle solución al problema planteado se propone como **objetivo del trabajo:** evaluación termo-energética del proceso de activación del carbón vegetal en la Empresa de Producciones Varias PROVARI.

Para ello se toma como **objeto de estudio:** horno rotatorio de para la activación del carbón.

Y su **campo de acción:** balance termo energético.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:**

Si se realiza un balance de masa y energía al horno cilíndrico rotatorio para la activación del carbón vegetal en la Empresa de Producciones Varias PROVARI se podría evaluar el comportamiento de la temperatura en el interior, el flujo de entrada y salida de los gases, el flujo de carbón activado y la interrelación de cada una de estas variables.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes tareas del trabajo.

- 1- Realización una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de la obtención del carbón activado
- 2- Caracterización las principales variables que intervienen en el proceso de activación del carbón.
- 3- Establecimiento de un de las ecuaciones fundamentales que describa térmicamente el proceso de activación del carbón en el horno cilíndrico horizontal rotatorio
- 4- Evaluación económica y ambiental de los procesos de activación del carbón vegetal.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

Para la obtención del carbón activado en la Empresa de Producciones Varias PROVARI este producto debe pasar por diferentes procesos, donde el más importante es el proceso de activación, este tiene lugar en el horno cilíndrico rotatorio. En el desarrollo de este capítulo se exponen los aspectos teóricos contextuales del proceso y su análisis térmico, en este se realizó una búsqueda bibliográfica sobre los principales procesos y equipos similares como por ejemplo secadores, enfriadores entre otros.

El objetivo del capítulo es:

Exponer los aspectos teóricos y contextuales del proceso de activación de carbón y el análisis térmico del proceso.

1.1. Estado del arte y trabajos precedentes:

Una investigación científica, de acuerdo con lo planteado por Aróstegui (1978), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica.

Para el desarrollo de la presente investigación se consultaron numerosas bibliografías, revistas, publicaciones, libros y trabajos que se relacionan con los procesos de activación y caracterización del carbón activado, los fenómenos de transferencia de calor y de masa en instalaciones como hornos, secadores y enfriadores cilíndricos rotatorios y la modelación matemática en instalaciones similares.

Procesos de activación y caracterización del carbón activado

En relación al tema de la activación y caracterización del carbón la mayoría plantea el carbón activado es el mejor absorbente de uso general para remoción, reducción de muchos compuestos orgánicos y aun algunos inorgánicos del agua y de aguas residuales. El mismo posee la virtud de retener o adherir en su superficie

uno o más componentes (átomos, moléculas e iones), del líquido que está en contacto con él. Este fenómeno se denomina poder adsorbente, (Salas et al., 2009; Ortiz., 2003).

Según (Herrera et al, 2004) La activación mediante el método físico con vapor de agua, solo alcanza los niveles mínimos comerciales de índices de yodo en todas las maderas, a altas temperaturas; presentando bajos rendimientos que las hace poco atractivas para su aplicación industrial. Además los carbones obtenidos de las maderas de pino pátula, pino tecunumani y otros pueden ser utilizados como descolorantes para jarabes simples, azúcar líquido y en aplicaciones que requieren de alta velocidad de filtración y tratamientos de aguas.

Según Sarmiento et al (2004), el carbón activado es un material poroso carbonaceo con una gran área superficial, es capaz de absorber una gran diversidad de sustancias tanto gaseosas como líquidas y es conocido desde principios del siglo pasado por sus propiedades absorbentes.

Actualmente el 60% de los carbones activados producidos a nivel mundial se obtienen a partir de carbón mineral. La cantidad de carbón utilizado para producir carbones activados se estima para 1998 en 2.10^5 t/año. Una parte de este carbón activado se destina a la eliminación de contaminantes procedentes de sectores muy variados. (Sarmiento et al, 2004).

A partir de la cascara del coco es posible obtener diferentes tipos de carbones activados para aplicaciones diversas variando las condiciones de preparación. Una ventaja importante que te ofrecen los carbones activados obtenidos de materiales orgánicos, en relación a los obtenidos con materiales inorgánicos, es que en los primeros, el porcentaje de cenizas es menor, (Luna, 2007).

Según (Taylor et al; 2005) El carbón activado en su sentido más amplio incluye una gran variedad de tratado amorfo. Tiene una estructura porosa que determina su aptitud de adsorción, tiene una estructura química que afluencia su interacción con adsorbentes polares y poco polares.

En la actualidad una de las actividades más interesantes dentro de la formación a nivel de Ciencias es el estudio de los materiales, (Ullman's, 1986) (Bansal,

Donnet, Stoeckli 1988). Esto se debe a su amplia aplicabilidad en diversas áreas como la Química ambiental, la industria y la Medicina. El carbón activo es utilizado en la industria como filtro, especialmente en la recuperación de gases, control de emisores, eliminación de olores en aguas industriales y residuales (Marsh, 1989). Sin embargo dichos carbones varían de acuerdo a sus propiedades texturales y químicas.

Los fenómenos de transferencia de calor y de masa

Dada la importancia que tiene los fenómenos de la transferencia de calor en el proceso de activación del carbón fue de interés del autor del trabajo realizar una revisión bibliográfica en relación a esta rama de la ciencia donde se destacan algunos trabajos los cuales se referencian a continuación.

La transferencia de calor en instalaciones como horno, secadores y enfriadores en cilindros horizontales puede llevarse a cabo por medio de uno o más procesos como: Conducción, Convección y Radiación. Se ha observado que el mecanismo físico de la convección está relacionado con la conducción de calor a través de una capa delgada de fluido adyacente a la superficie de transferencia de calor. Tanto en la conducción como en la convección se puede aplicar la Ley de Fourier, aunque el problema de convección se tiene que poner en el juego la mecánica de los fluidos a fin de establecer el gradiente de temperatura. (Treybal. 1985)

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

Los trabajos realizados por Boateng y Barr (1996), pone un gran interés al comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, ellos realizaron un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento reológico de materiales en cilindros rotatorios. En este caso fueron medidas características de flujo tales como: la velocidad de las partículas, la temperatura granular y la concentración de sólido para diferentes materiales, teniendo un amplio rango de los coeficientes de restitución.

Con respecto al segundo elemento se han realizado estudios con profundidad de la mecánica de movimiento del material en cilindros rotatorios, Sverdlik y Gregoreu (1979), establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio.

Sai y otros (1992) reportaron los datos experimentales para la respuesta transitoria de los cilindros rotatorios en término de la variación en la velocidad de descarga del sólido para un tiempo en el intervalo en las condiciones de operación; la velocidad en la alimentación del sólido, la velocidad de rotación y la inclinación del cilindro.

1.2- Breve historia del carbón activo

El uso de los materiales de carbón se pierde la historia, de forma que es prácticamente imposible determinar con exactitud cuando el hombre comenzó a utilizarlos. Lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad denominamos carbones activos, es decir carbones con una estructura porosa altamente desarrollada, ya se emplearon como adsorbentes el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente desvolatilizadas o quemadas.

Los primeros usos de estos primitivos carbones activos, generalmente preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal), parecen haber tenido aplicaciones médicas. Así, en Tebas (Grecia) se halló un papiro que data del año 1550 a.C. en el que se describe el uso de carbón vegetal como adsorbente para determinadas prácticas médicas. Con posterioridad, en el año 400 a.C.,

Hipócrates recomienda filtrar el agua con carbón vegetal para eliminar malos olores y sabores y para prevenir enfermedades. En relación al tratamiento del agua con carbón activo, se sabe que ya 450 años a.C. en los barcos fenicios se almacenaba el agua para beber en barriles con la madera parcialmente carbonizada por su cara interna. Esta práctica se continuó hasta el siglo XVIII como medio para prolongar el suministro de agua en los viajes transoceánicos. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas no tiene lugar hasta el año 1793, cuando el Dr. D.M. Kehl utiliza el carbón vegetal para mitigar los olores emanados por la gangrena. El mismo doctor también recomienda filtrar el agua con carbón vegetal.

La primera aplicación industrial del carbón activo tuvo lugar en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorante en la industria del azúcar. Esta aplicación permaneció en secreto por 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

Sin embargo el término adsorción no fue utilizado hasta 1881 por Kayser para describir como los carbonizados atrapaban los gases. Aproximadamente por estas fechas R. von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activo, desarrolla varios métodos para producir carbón activo tal y como se conoce en nuestros días, más allá de simples carbonizados de materiales orgánicos o del carbón vegetal. Así, en 1901 patentó dos métodos diferentes para producir carbón activo. El primero consistía en la carbonización de materiales lignocelulósicos con cloruros de metales; lo cual resultó la base de lo que hoy en día es la activación química. En el segundo, proponía una gasificación suave de materiales previamente carbonizados con vapor de agua o CO₂; es decir una activación física, o más correctamente térmica.

La Primera Guerra Mundial, y el uso de agentes químicos durante esta contienda, trajeron como consecuencia la necesidad urgente de desarrollar filtros de carbón activo para máscaras de gas. Sin duda este acontecimiento fue el punto de partida para el desarrollo de la industria de carbón activo y de un buen número de carbones activos usados no solo en la adsorción de gases tóxicos sino en la potabilización de agua. A partir de este momento tuvo lugar el desarrollo de multitud de carbones activos para las aplicaciones más diversas: depuración de gases y aguas, aplicaciones médicas, soporte de catalizadores. (Manual de carbón activado).

1.3- Generalidades del proceso de activación del carbón.

1.3-1 El carbón activado

El carbón activado, o carbón activo, es un material de carbón poroso. Un material carbonizado que se ha sometido, a reacción con gases oxidantes (como CO_2 o aire), o con vapor de agua; o bien a un tratamiento con adición de productos químicos como el H_3PO_4 , durante (o después) de un proceso de carbonización, con el objeto de aumentar su porosidad. Los carbones activados poseen una capacidad de adsorción elevada y se utilizan para la purificación de líquidos y gases. Mediante el control adecuado de los procesos de carbonización y activación se puede obtener una gran variedad de carbones activados que posean diferentes distribuciones de tamaño de poros. (Manual del carbón activo)

1.3-2 Materiales de Partida

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado. Los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. Existen, no obstante, algunas limitaciones. Así, desde un punto de vista estructural los carbones activados son carbones muy desordenados e isótropos. Por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activados aquellos materiales carbonosos que

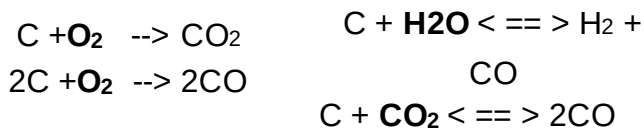
pasen por un estado fluido o pseudo-fluido durante su carbonización; dado que durante la re solidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. No resultan adecuados, por tanto, los carbones coquizables, salvo que se eliminen sus propiedades coquizantes, mediante una oxidación previa, por ejemplo. Del mismo modo, tampoco resultan adecuados los residuos termoplásticos. Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son: buena disponibilidad y bajo coste, bajo contenido en materia mineral y que el carbón resultante posea unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción. Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados. (Manual del carbón activado).

1.3-3 Tipos de activación.

Activación térmica.

La activación térmica llamada también activación física, a pesar de que la activación se produce por la reacción (química) del agente activante (un oxidante como el aire, vapor de agua, CO_2 , etc.) con el carbono del material que está siendo activado. Este tipo de activación consta de varias etapas. Así, a veces son necesarios ciertos pre tratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800 a 900 °C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante la des- volatilización, la salida de los gases y vapores del

precursor produce una porosidad “incipiente” en el carbonizado, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial) aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas que eliminan algunos átomos de carbono produciendo así la porosidad, (Luna, 2007).



Activación química

Este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900 °C. No obstante, en este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo los más usados industrialmente son el cloruro de zinc (ZnCl₂), el ácido fosfórico (H₃PO₄) y el hidróxido de potasio (KOH). La activación química con ZnCl₂ fue el método más usado hasta 1970, especialmente para la activación de residuos de madera. Su uso, sin embargo, se ha restringido mucho en la actualidad debido a los problemas medioambientales que conlleva el uso del ZnCl₂. No obstante algunos países como China aún siguen usando este método para producir carbón activado.

La activación química con H₃PO₄ prácticamente ha desplazado al ZnCl₂ y los precursores usados en este tipo de activación son en su mayoría, como en el caso

del ZnCl_2 , residuos forestales (madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc.). La activación con H_3PO_4 implica las siguientes etapas: (i) molienda y clasificación del material de partida, (ii) mezcla del precursor con H_3PO_4 (reciclado y fresco), (iii) tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200 °C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h, seguido de un nuevo tratamiento térmico hasta 400 – 500 °C, manteniendo esta temperatura en torno a 1h, (iv) lavado, secado y clasificación del carbón activado, y reciclado del H_3PO_4 . La proporción H_3PO_4 : precursor más empleada suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50%. La activación química con KOH se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “*carbones superactivados*”, con superficies específicas del orden de los 3000 m^2/g . A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles par la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc. En esta activación el KOH se mezcla con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones KOH: precursor entre 2:1 y 4:1. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas bajas, pero superiores a los 200 °C (que se utiliza solo para evaporar el agua y dispersar el KOH) y el segundo entre 700 y 900 °C. En el caso de una mezcla física no es necesario llevar a cabo el primer tratamiento (Luna, 2007).

1.3-4 Tipos de carbones activados

Los carbones activos pueden clasificarse atendiendo al tamaño de las partículas en carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG). Los CAP presentan tamaños menores de 100 μm , siendo los tamaños típicos entre 15 y 25 μm . Los CAG presentan un tamaño medio de partícula entre 1 y 5 mm. Los CAG pueden dividirse en dos categorías: (i) carbón activado troceado (o sin forma) y (ii) carbón activado conformado (o con una forma específica, cilindros, discos, etc.). Los carbones activados troceados se obtienen por molienda, tamizado y

clasificación de briquetas de carbón o de trozos más grandes. Los carbones conformados pueden obtenerse por politización o por extrusión de carbón en polvo mezclado con distintos tipos de aglomerantes. Existen además otras formas de adsorbentes de carbón, como las fibras de carbón activadas, las telas y los fieltros de carbón activado, las estructuras monolíticas, las membranas de carbón, etc. (Manual del carbón activado).

1.3-5 Importancia de la estructura porosa de los carbones activados

Los carbones activados, pueden presentar elevadas superficies específicas, del orden de $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ e incluso llegar a los $3000 \text{ m}^2/\text{g}$. Los elevados valores de superficie específica se deben en gran medida a la porosidad que presentan los materiales carbonosos, siendo los micros poros los que mayor contribución tienen en la superficie específica. En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, puesto que también deberíamos tener un mayor número de centros para adsorber el adsorbato. Sin embargo, esto no siempre es cierto, ya que hemos de tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Así, dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato, puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros y por tanto no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas. Por otro lado también hay que tener en cuenta tanto la geometría del poro como la del adsorbato. Así, por ejemplo, determinadas moléculas pueden penetrar en poros con geometría del “tipo rendija” y no hacerlo en poros de dimensiones similares y geometría cilíndrica. (Manual del carbón activado)

1.3-6 Aplicaciones del carbón activo:

El carbón activado tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en polvo como granular en medio líquido y gaseoso.

Sus aplicaciones en medio líquido abarca la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, tratamientos de aguas residuales, decoloración de aguas para uso en la

fabricación de bebidas refrescantes, decoloración y mejoras de bebidas alcohólicas (vinos, ron), purificación de grasas y aceites comestibles, purificación de proteínas, como medicamento en la desintoxicación de personas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos (oro, plata), entre otras.

Por su parte, en medio gaseoso encuentra sus aplicaciones en el almacenamiento y separación de gases, en mascarar antiguas, protección anti radiactiva en plantas nucleares, desodorizantes de productos alimenticios. Además hoy tiene amplias perspectivas de aplicaciones como soporte catalítico y como catalizador.

Entre otras aplicaciones, de forma general, se pueden mencionar su utilización en filtros de cigarrillos y plantillas de calzados, entre otras, (Luna, 2007).

1.4- Flujo tecnológico

El Establecimiento Provari Carbón Activado, está situado en Rivera Mabujabo carretera Moa km 5 $\frac{1}{2}$, Baracoa, Guantánamo. Esta empresa cuenta con cinco áreas principales para la obtención de carbón activado las cuales se muestra en la siguiente figura (ver figura 1.1).

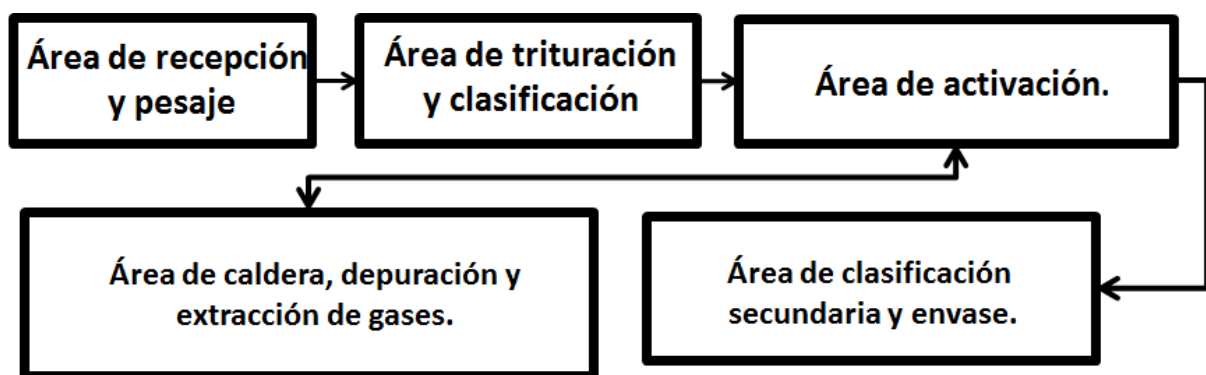


Figura 1.1. Áreas principales de la instalación.

Área de Recepción y Pesaje de la Materia Prima, esta etapa comprende la recepción y el pesaje de la materia prima que se procesará en todo el proceso productivo.

Área de Trituración y Clasificación, esta etapa comprende la trituración primaria y clasificación del producto triturado, hasta alcanzar la granulometría óptima para el proceso de activación.

Durante este proceso se somete el material a un proceso de trituración utilizando para ello 2 trituradores de rodillos que le reducen el tamaño para luego pasar a una zaranda de un paño con orificios de 4 mm de diámetro.

Trituración Secundaria, Este se ejecuta en otro triturador de rodillos, donde se trituran las fracciones que rechaza la zaranda producto de la clasificación según el paño de la misma, o sea, las fracciones mayores de 4 mm.

Clasificación, La clasificación de las partículas será según el número de paños que posea la zaranda y las dimensiones de los orificios.

En la zaranda se obtienen 4 fracciones de tamaño:

- Una con partículas mayores de 4 mm.
- Una fracción con partículas de 4 mm que es enviada al silo de almacenamiento.
- Una fracción que está entre 4 y 2 mm que se envía a otro silo.
- Una última fracción con partículas menores de 1.5 mm que es enviada a otro silo por medio de un sinfín transportador. Dicha fracción tiene uso limitado y no se emplea para activar, recogién dose en sacos como semidesecho.

Área de Activación. En el proceso de activación empleado (método físico) el carbón entra en contacto con el agente activante que en nuestro caso es el vapor de agua, el cual se inyecta en la cámara de combustión del horno.

El vapor de agua (saturado de 170 ° C - 180 ° C y 2 atm de presión) es producido en una caldera de vapor la cual funciona en un sistema que cuenta con una cámara de combustible independiente y su quemador. En esta cámara se alimentan y se queman los gases calientes (aproximadamente 800 ° C) que salen del horno aprovechándose el calor desprendido para la producción de vapor que se utiliza en la activación.

Para suplir la energía requerida en el proceso ya que el mismo se realiza a una temperatura de 850 a 900 ° C se utiliza la combustión de los gases que se generan en el interior del horno (H_2 , CO) mediante la entrada de aire, inducido y distribuido a través de 4 toberas equidistantes colocados a lo largo del horno.

El perfil de temperatura se mide con Termopares y la composición gaseosa se determina por medio de análisis ORZAT.

Para el calentamiento inicial del horno y para suplir cualquier disminución ocasional de temperatura durante el proceso, el horno cuenta con un quemador de gas oil automático el cual esta acoplado a la cámara de combustión del mismo.

El carbón activado sale del horno por medio de un serpentín enfriador de descarga que rodea la superficie exterior final del horno, y de aquí cae en un sinfín enfriador (138 mm de diámetro * 2600 mm de largo) abierto al aire por la parte superior y provisto de una camisa de enfriamiento por agua en la parte inferior, es decir del centro hacia abajo del enfriador. El producto frío se descarga en un elevador de cubos de 8 m de alto que lo eleva a un silo de 5 m³ de capacidad donde se almacena el carbón activado que sale del horno, ante de pasar a la etapa siguiente para su clasificación granulométrica y envase.

Área de caldera, depuración y extracción de gases. El vapor de agua requerido para la activación, se genera en una caldera compacta de tubos de fuego ubicada en un local anexo a la nave del horno, dicha caldera opera automáticamente arrancando y parando entre dos límites de presión prefijados (6 – 8 kg/cm²) siendo la secuencia de arranque programada automáticamente.

La caldera cuenta con una serie de equipos auxiliares para su operación normal tales como: bombas de alimentación de agua, tanque de almacenamiento de agua y un sistema de tratamiento de agua simple con un intercambiador iónico y un tanque de regeneración con salmuera.

Depuración y extracción de gases. Una vez transferido el calor de los gases en la caldera, los mismos se pasan a través de un ciclón lavador para eliminar el polvo y luego son expulsados a la atmósfera empleando un extractor con una capacidad de 8000 m³ / h.

Área de Clasificación secundaria y envase. El carbón activado almacenado en el silo se alimenta a una zaranda circular de dos paños por medio de una válvula de estrella de (198 mm de diámetro). Esta zaranda se obtiene tres fracciones que son: +1.58mm; -1.58mm + 0.5mm; -0.5mm.

Estas tres fracciones serán envasadas independientemente en sacos multicapas. Cada saco llevara 10 Kg. de carbón activado.

En esta área existe tomas para la extracción de polvo en las zonas siguientes:

Zona de descarga del elevador al silo.

- Zona de la zaranda circular.
- Zona de envase de las fracciones.

El flujo de aire y polvo extraído van a un filtro de mangas ($A= 6.4 \text{ m}^2$) acoplado a un sistema que cuenta con un compresor (320 L / min.) para descargar las mangas periódicamente. El aire libre de polvo se expulsa a la atmósfera por medio de un ventilador extractor de 2000 m^3 .

1.5- Descripción de los principales procesos que ocurren durante la activación.

Análisis de la Transferencia de calor:

El análisis de transferencia de calor se abordará sobre los diferentes tipos de transferencia de calor que existen como por ejemplo la transferencia de calor por:

- Conducción
- Convección
- Radiación

Conducción:

La transmisión de calor por conducción, ocurre por contacto directo entre las partículas de un cuerpo y las de otro cuerpo o entre partes de un mismo cuerpo siempre que se encuentre a distintas temperaturas, donde se considera la materia como un medio continuo. Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, ocurre transferencia de energía desde la región a alta temperatura

hacia la región de baja temperatura. Se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

Convección:

El termino convección se utiliza para describir la transferencia de energía entre una superficie y un fluido. Aunque el mecanismo de difusión contribuye a esta transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global o total de las partículas del fluido. Obviamente la convección aparece únicamente en fluidos que es donde puede producirse este movimiento de materia

Radiación:

La radiación térmica es la propagación de ondas electromagnéticas, en determinadas longitudes de ondas, emitidas por un cuerpo como resultado de su temperatura. La transferencia de calor por radiación no requiere de presencia de la materia ya que el calor puede ser transmitido a través del vacío absoluto a diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección.

Estos procesos de transferencia de calor se pueden apreciar en el Horno cilíndrico rotatorio de la siguiente manera (ver figura 1.3):

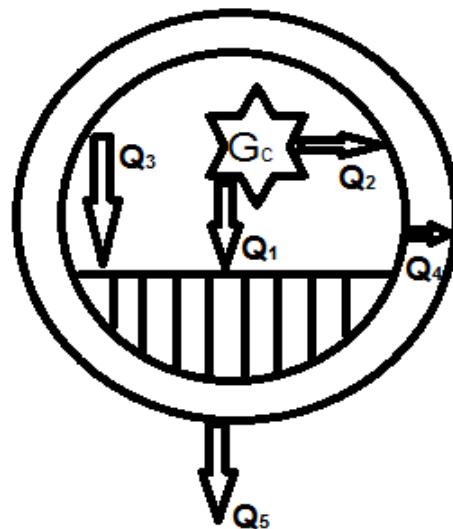


Figura 1.3. Tipos de transferencia de calor.

En la figura se muestra los diferentes tipos de transferencia de calor, los cuales ocurren en el proceso de activación en el cilindro. En la cual Q_1 es el proceso de transferencia de calor por Convección y Radiación del gas al sólido, donde este

entra en cilindro a altas temperaturas y mediante la convección y radiación le cede calor al solido que en este caso es carbón vegetal, Q_2 ocurre mediante el proceso de transferencia de calor por Convección y Radiación del gas a la pared no cubierta del cilindro, en este caso el gas al cederle calor al solido también le otorga calor de la misma manera a la pared no cubierta del cilindro. En Q_3 se pueden apreciar los tres procesos por Radiación, Convección y Conducción que ocurren desde la pared no cubierta hacia el sólido, en el caso de Q_4 ocurre por Conducción desde la pared interior hasta la pared exterior del cilindro, Q_5 es el último proceso que ocurre ya que este ocurre desde la pared exterior hacia el medio ambiente.

1.6- Análisis de la transferencia de masa

A demás de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el horno para la activación del carbón están presentes la transferencia de masa entre el gas suministrado desde la cámara de combustión y el carbón vegetal, este proceso ocurre debido a la reacción química de las moléculas del carbón que interactúan con los gases de la combustión y el vapor saturado para la activación (donde algunos átomos de carbono (C) reaccionan y se gasifican) y la humedad contenida en el carbón que se evapora producto a las altas temperatura del gas ocurriendo el secado del sólido (ver figura 1.4).

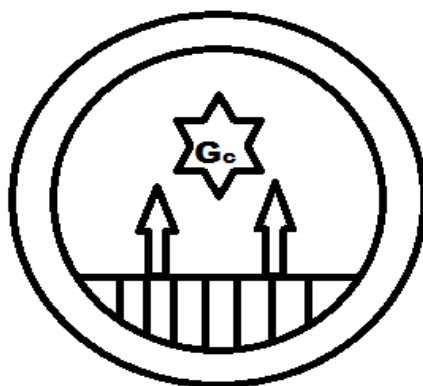


Figura 1.4. Análisis de la transferencia de masa.

1.7- Principales variables que intervienen en el proceso

Para el análisis termo energético del proceso de activación del carbón es necesario conocer las principales variables que intervienen en el proceso. Según el manual de operaciones de la instalación las principales variables que se controlan se pueden apreciar en la siguiente tabla (ver tabla 1.1).

Tabla 1.1. Principales variables que intervienen en el proceso:

Variables del proceso	Rango de valores	Unidad
- Flujo de material al horno	150 a 200	kg/h
- Flujo de vapor	300 a 350	kg/h
- Velocidad de rotación	0.6	rev/min
- Tiempo de permanencia	3 a 4	h
- Temperatura del vapor	123 a 140	°C
- Presión del Vapor al Horno	2	kgf/cm ²
- Temperatura de la cámara de combustión	1100 a 1400	°C
- Temperatura P1 Horno	900 a 950	°C
- Temperatura P2 Horno	850 a 950	°C
- Temperatura P3 Horno	850 a 900	°C
- Temperatura P4 Horno	700 a 800	°C
- Temperatura de salida de los gases	750 a 800	°C
- Presión interna del horno (tiro)	2.5 a 6	kgf/cm ²

1.8- Conclusiones del capítulo:

- En el siguiente capítulo se aborda sobre los aspectos teóricos contextuales y el análisis térmico del proceso de activación del carbón.
- En la realización del capítulo se pudo encontrar todo lo relacionado con lo de transferencia de calor y de masa al igual que los equipos similares, no siendo así sobre lo relacionado sobre carbón activado.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES EMPLEADOS PARA EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DEL CARBÓN

2.1- Introducción

Los métodos de cálculo teórico de un proceso son fundamentales para describir el comportamiento de las variables que intervienen en dicho proceso; en él se establecen los procedimientos que describen el análisis de resultados experimentales aplicado sobre la evaluación de un balance térmico y de masa, en los cuales la descripción de estos debe ser comparada con los teóricos. Por tales motivos en el presente capítulo se plantea como objetivo: Establecer los procedimientos para realizar el balance térmico y de masa en el proceso activación del carbón en la empresa PROVARI de Baracoa.

2.2- Instalación experimental

Para la realización de los experimentos el horno de activación del carbón cuenta con un sistema de adquisición de datos CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso, en la figura 2.1 se muestra una imagen del programa utilizado en la Empresa (ver figura 2.1).

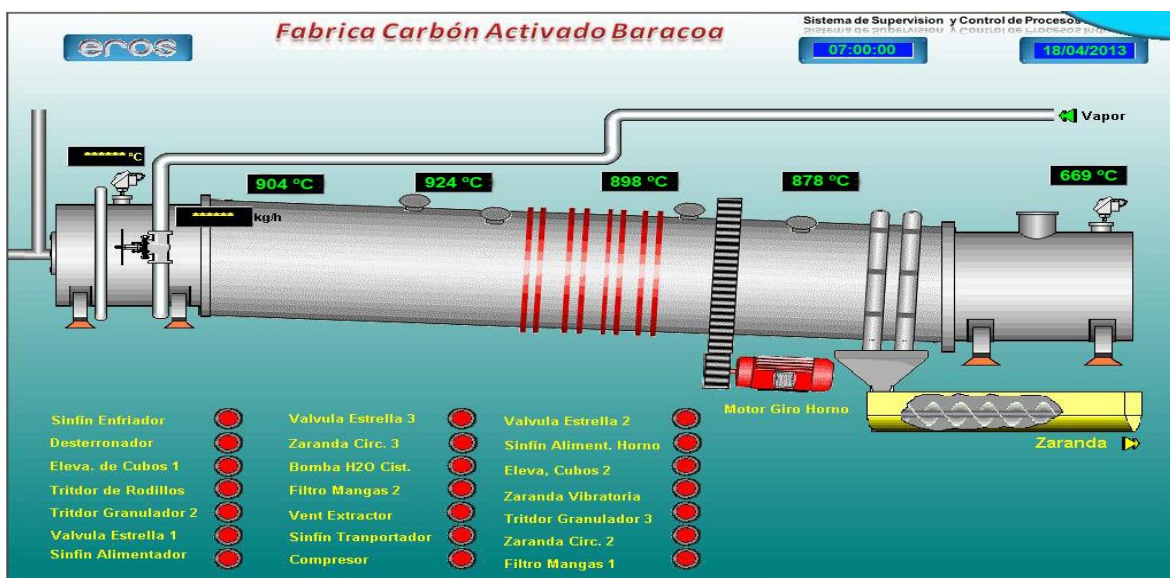


Figura 2.1. Ventana de control de las principales variables que intervienen en el proceso de activación.

Los instrumentos de medición empleados en la instalación experimental para la mediciones de temperatura son Termopares de tipo K los mismos se representan en la figura (2.2).



Figura 2.2. Termopar Tipo K

Las características y especificaciones de los termopares son las siguientes:

- **Tipo K** (Cromo (Ni-Cr) Chromel / Aluminio (aleación de Ni -Al) Alummel): con una amplia variedad de aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. Tienen un rango de temperatura de -200°C a $+1372^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aprox. Posee buena resistencia a la oxidación.

2.3- Análisis energético de los calores que entran y salen en el sistema.

El sistema objeto de estudio al cual se le realizará un balance de masa y energía, que incluye las pérdidas de calor al medioambiente, está constituido por la cámara de combustión (1), tambor donde ocurre el proceso de activación (2), y la descarga y extracción de los gases (3) según se muestra en la (figura 2.3.) para el proceso se le suministra combustible más el aire para la combustión, ambos se suministran a la cámara a temperatura ambiente y a través del quemador, para luego suministrar esa energía (calorífica) que se genera al tambor de activación junto con el carbón vegetal y el vapor saturado de agua como agente activante. El

carbón activado y los gases que se producen durante la combustión más lo que se generan a partir de la reacción del material con el vapor de agua son evacuados en la sección de descarga y escape. (Ver figura 2.3).

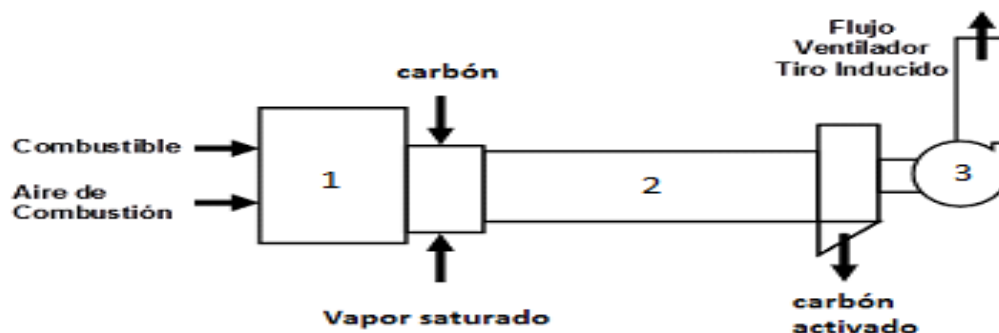


Figura (2.3). Partes componentes de la instalación

La representación de la instalación indica que la dirección del flujo de gases y carbón va en la misma dirección, definiendo que el proceso de activación se realiza en isocorriente.

2.4- Balance de masa y energía

El balance de masa de un proceso industrial se hace con el objetivo de realizar una contabilidad exacta de todas las materias que entran, salen, se acumulan o se agotan en un intervalo de tiempo dado. Basándose en el primer principio de la termodinámica se establece la ecuación 2.1.

La ecuación 2.1 establece el balance de energía para el objeto de estudio, y tiene en cuenta todos calores que entran y salen del sistema.

$$Entra = Esale + Epierde \quad (2.1)$$

Dónde:

- **Entra:** Energía que entra al sistema (Um)
- **Esale:** Energía que sale del sistema
- **Epierde:** Energía que se pierde

2.4. Balance de energía y masa en la combustión.

Para realizar el balance en la cámara de combustión se analizan los calores que entran y que salen del sistema y las pérdidas de calor al medio ambiente que se producen por los procesos de transferencia de calor. De ahí que se obtiene 1 que:

$$Q_c + Q_{fa} = Q_{gc} + Q_{pc}$$

(2.2)

Dónde:

- Q_c : Calor aportado por el aire (W)
- Q_{fa} : Calor aportado por la reacción del combustible en la cámara (W)
- Q_{gc} : Calor que sale en los gases generados por la combustión (W)

Calor añadido por el combustible

Para determinar el calor aportado por el combustible se tienen en cuenta el poder calórico bajo del combustible y su calor físico del combustible según la ecuación 2.3.

$$Q_c = Q_{fc} + Q_b \quad (2.3)$$

Dónde:

- Q_{fc} : Calor físico del combustible; kW
- Q_b : Poder calórico bajo; kW

El calor físico del combustible se determina a través de la ecuación 2.4.

$$Q_{fc} = \dot{m}_t \cdot C_c \cdot T_c \quad (2.4)$$

Dónde:

- $\dot{m}_t$: Flujo de combustible; kg/s
- T_c : Temperatura del combustible; K
- C_t : Calor específico del combustible; kJ/(kg·K)

El calor específico para combustibles líquidos C_t se determina según la ecuación (2.5):

$$C_t = 1,783 + 0,0025T_c \quad (2.5)$$

Para determinar el poder calórico bajo del combustible se utiliza la ecuación 2.6 propuesta por Mendeleiev.

$$Q_b^t = 339C^t + 1030H^t - 109(O^t - S^t) - 24W^t \quad (2.6)$$

Dónde:

- Q_b^t : Poder calórico bajo del combustible; kJ/kg
- C^t : Carbono de trabajo; %
- H^t : Hidrógeno de trabajo; %
- O^t : Oxígeno de trabajo; %
- S^t : Azufre de trabajo; %
- W^t : Humedad de trabajo; %

Para determinar el calor físico del aire suministrado a los procesos tiene en cuenta el aire que se emplea para el proceso de combustión y el aire que se utiliza para impulsar los gases de la combustión hacia el cilindro de ahí que se formula la ecuación 2.7.

$$Q_{fa} = (\dot{m}_{ac} + \dot{m}_{ad}) \cdot C_{pac} \cdot T_a \quad (2.7)$$

Dónde:

- $\dot{m}_{ac}$: Flujo de aire para la combustión; kg/s
- $\dot{m}_{ad}$: Flujo de aire para la dilución; kg/s
- C_{pac} : Calor específico del aire; kJ/(kg·K)
- T_a : Temperatura del aire; K

El flujo de aire para la combustión se determina a través de la ecuación 2.8.

$$\dot{m}_{ac} = V_a \cdot \rho_{aire} \cdot \dot{m}_{coml} \quad (2.8)$$

Dónde:

- $\dot{m}_{ac}$: Flujo de aire para la combustión; kg/s
- ρ_{aire} : Densidad del aire; kg/m³
- $\dot{m}_{coml}$: Flujo de combustible; kg/s

El flujo de gases producto de la combustión se determina a través de la ecuación 2.18.

$$\dot{m}_{gc} = V_g \cdot \rho_{gc} \cdot \dot{m}_{coml} \quad (2.9)$$

Dónde:

- $\dot{m}_{gc}$: Flujo de gases producto de la combustión; kg/s
- ρ_{aire} : Densidad de los gases producto de la combustión; kg/m³

Cálculo de los volúmenes de la combustión

Para determinar los flujos másicos de aire y gases generados en la cámara de combustión es necesario determinar los volúmenes teóricos y reales de los gases producto de la combustión

El volumen de aire teórico necesario para la combustión de un kilogramo de combustible se determina a través de la ecuación 2.10.

$$V_a^o = 0,0889(C + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O \quad (2.10)$$

Volumen total de gases triatómicos que resultan del proceso de combustión de un kilogramo de combustible se determina a través de la ecuación 2.11.

$$V_{RQ} = 0,01866(C + 0,375S^t) \quad (2.11)$$

El volumen teórico de nitrógeno en los gases producto de la combustión de un kilogramo de combustible se determina a través de la ecuación 2.12.

$$V_{N_2}^o = 0,79V_a^o + 0,008N^t \quad (2.12)$$

El volumen teórico de los gases secos presentes en los gases producto de la combustión de un kilogramo de combustible se determina a través de la ecuación 2.12.

$$V_{gs}^o = V_{RQ} + V_{N_2}^o \quad (2.13)$$

El volumen teórico de los vapores de agua producto de la reacción del hidrógeno del combustible con el oxígeno, de la humedad del combustible y del vapor de agua presente en el aire húmedo, se determina a través de la ecuación 2.14.

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^t + 0,0124W + 0,0161V_a^o \quad (2.14)$$

El volumen teórico total de los gases producto de la combustión se determina a través de la ecuación 2.15.

$$V_g^o = V_{gs}^o + V_{H_2O}^o$$

(2.15)

El volumen total real de gases tiene en cuenta el coeficiente de exceso de aire y se determina a través de la ecuación 2.16.

$$V_g = V_g^o + (\alpha - 1) \cdot V_a^o$$

(2.16)

Dónde:

➤ α : Coeficiente de exceso de aire

El volumen real de aire se determina a través de la ecuación 2.17.

$$V_a = V_a^o \cdot \alpha$$

(2.17)

2.5- Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor en la cámara de combustión

Estableciendo los mecanismos que definen la transferencia de calor, debido a que existe energía transmitida por diferencia de temperatura, se calculan las pérdidas de calor en la sección de la cámara de combustión, utilizando la ecuación por convección que en esta sección es libre a través de la ley de Newton del enfriamiento y las pérdidas por radiación que establece Stefan-Boltzmann.

La cantidad de calor transferida al medioambiente por convección y radiación a través de las paredes de la cámara de combustión se determinan a través de las ecuaciones 2.24 y 2.25.

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot A_c (T_s - T_o) \quad (2.24)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_c \cdot (T_s^4 - T_o^4) \quad (2.25)$$

Dónde:

- q_{com} - Calor transferido por convección; kW
- q_{rad} - Calor transferido por radiación; kW
- h_{com} - Coeficiente por transferencia de calor por convección; W/m²·K
- A_c - Área exterior de la cámara; m²
- T_s - Temperatura de la superficie de la cámara de combustión; K
- T_o - Temperatura del medio ambiente; K
- ε - Emisividad de la superficie
- σ - Constante de Stefan Bolsztman; ; W/m²·K⁴

El área de la cámara de combustión se determina a través de la ecuación 2.26.

$$A_r = A_B + A_L \quad (2.26)$$

Dónde:

- A_B - Área del orificio de entrada del flujo de gas a la cámara; m²
- A_L - Área lateral de la cámara; m

El área del orificio se determina a través de la ecuación 2.27.

$$A_B = \pi \cdot r_o^2$$

(2.27)

La temperatura pelicular para la cámara de combustión se determina a través de la ecuación 2.28.

$$T_p = \frac{T_s + T_o}{2}$$

(2.28)

Dónde:

➤ T_p - Temperatura pelicular; K

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convención se realiza a través de la ecuación 2.29.

$$h_{conv} = \frac{N_{UL} \cdot k}{L}$$

(2.29)

Para la estimación del coeficiente de transferencia de calor es necesario determinar el número de Raleigh a través de la ecuación 2.30.

$$R_{al} = G_r \cdot P_r = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_o) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

(2.30)

Dónde:

➤ K - conductividad térmica; W/m.K

➤ P_r - Número de Prandtl

- ν - Viscosidad cinemática del fluido; m²/s
- C_p - Capacidad calorífica del aire; kJ/kg·K
- α - Coeficiente de difusividad térmica; m²/s
- β - Coeficiente de dilatación volumétrica; K⁻¹

Los parámetros del fluido se buscan en la tabla A-6 del (Incropera, 2003) a la temperatura pelicular.

Si: $G_r \cdot P_r > 10^9$ la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es determinado por la ecuación (2.31).

$$N_{UL} = \left[0.825 + \frac{0.387 R_{al}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (2.31)$$

Si: $G_r \cdot P_r > 10^9$, la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt es determinado por la ecuación (2.32).

$$N_{UL} = 0.68 + \frac{0.670 R_{al}^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \quad (2.32)$$

2.6- Balance de masa y energía en el cilindro

A partir de la representación esquemática e los flujos que entran y salen de la sección de activación del carbón en el horno cilíndrico rotatorio (figura) y análisis de las variables fundamentales que intervienen en el proceso de combustión se realizar el balance de masa y energía en la cual se obtiene la siguiente ecuación.

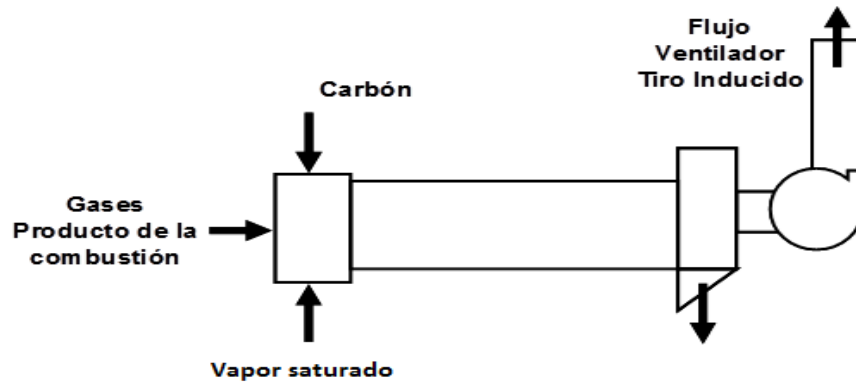


Figura 2.5. Esquema del proceso.

$$Q_{gc} + Q_C + Q_{fv} = Q_{CA} + Q_{ge} + Q_{pt} \quad (2.33)$$

Dónde:

- Q_C : Calor físico aportado por el carbón vegetal (W)
- Q_{fv} : Calor aportado por el vapor de agua (W)
- Q_{CA} : Calor sale en carbón activado (W)
- Q_{ge} : calor que sale en los gases de escape (W)
- Q_{pt} : Pérdidas totales de calor al medio ambiente (W)

El calor aportado por el carbón vegetal se determina a través de la ecuación 2.2, que depende de la productividad del horno de activación y el tiempo de permanencia del carbón en el interior del cilindro.

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot T_c \quad (2.34)$$

Dónde:

- $\dot{m}_t$: flujo másico del carbón vegetal (kg/h)
- C_{pc} : Calor específico del carbón (W)
- T_c : temperatura de entrada del carbón (K)

El Calor añadido por el vapor saturado se determina a partir de las propiedades del vapor.

$$Q_{fv} = \dot{m}_v \cdot C_{pv} \cdot T_{vs} \quad (2.35)$$

Dónde:

- $\dot{m}_t$: flujo másico del vapor saturado (kg/h)
- C_{pc} : Calor específico del vapor saturado (W)
- T_c : temperatura de entrada del vapor saturado (K)

2.7- Cálculo de las pérdidas de calor por transferencia de calor en el secadero rotatorio

Para determinar las pérdidas se utilizan las ecuaciones (2.24) y (2.25), teniendo en cuenta la convección y la radiación por el exterior del cilindro horizontal. A través de la relación entre los números de G_r y Re se establece si la convección es libre, forzada o mixta.

- La convección libre se ignora si $G_r/R_e^2 \ll 1$
- La convección es mixta o combinada $G_r/R_e^2 \approx 1$
- La convección forzada se ignora si $G_r/R_e^2 \gg 1$

El área exterior del cilindro se determina a través de la ecuación 2.36.

$$A_{sec} = \pi \cdot D_{sec} \cdot L_{sec}$$

(2.36)

Dónde:

- A_{sec} Área del cilindro; m²
- L_{sec} Longitud; m
- D_{sec} Diámetro cilindro; m

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-6 del (Incropera, 2003) a la temperatura pelicular.

La temperatura pelicular para el horno se determina a través de la ecuación 2.37.

$$T_{psec} = \frac{T_{sec} + T_o}{2}$$

(2.37)

Dónde:

- T_{psec} Temperatura pelicular para el horno; K
- T_{sec} Temperatura de la superficie del horno; K
- T_o - Temperatura del medioambiente; K

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección en el h es necesario calcular el Número de Reynolds a través de la ecuación 2.38.

$$R_e = \frac{V \cdot D_{sec}}{\nu} \quad (2.38)$$

Dónde:

- R_e - Número de Reynolds
- V - Velocidad del aire; m/s

Para $Re > 2 \times 10^5$ se considera que el régimen es turbulento y se propone la ecuación 2.39 para determinar el número de Nuselt.

$$N_{UD} = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \cdot \left(\frac{P_{r0}}{P_{rs}} \right)^{1/4} \quad (2.39)$$

C, m, n - Constantes que se determinan en la tabla 7.4 (Incropera, 2003) para $Pr < 10$.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección a través de la pared del cilindro al aire exterior se utiliza la ecuación 2.40.

$$h_{sec} = \frac{N_{UD} \cdot k}{D_{sec}} \quad (2.40)$$

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

$$\eta_{tx} = \frac{Q_{gs}}{Q_b + Q_{fa} + Q_{fc} + Q_{f_{H_2O}}} \quad (2.41)$$

Dónde:

Q_b : Poder calórico inferior del combustible. (W)

Q_{fa} : Calor físico aportado por el aire. (W)

Q_{fc} : Calor aportado con el combustible. (W)

Q_{fH2O} : Calor físico aportado por el agua. (W)

2.8. Conclusiones del capítulo 2:

- Se estableció el balance de masa y energía para el proceso de activación, a través de un sistema de ecuaciones que permite determinar los flujos de calor que entran y que salen del sistema.
- Se planteó el procedimiento para el cálculo de las pérdidas de calor del sistema al medio ambiente.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA Y DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE ACTIVACIÓN DEL CARBÓN.

3.1- Introducción:

Para la realización de este capítulo se tuvieron en cuenta los aspectos teóricos y contextuales para la activación del carbón y el análisis térmico del proceso. A través del procedimiento de cálculo propuesto en el Capítulo 2 para la evaluación del proceso de activación del carbón el presente capítulo tiene como objetivo:

Analizar los resultados obtenidos de las principales variables del proceso de activación del carbón.

3.2- Resultados experimentales:

Para balance térmico y de masa en el proceso de activación del carbón vegetal se realizaron unas series de experimentos pasivos en donde registraron los valores de las principales variables que intervienen en el proceso como:

Entrada:

- Flujo de combustible en la entrada de la cámara de combustión.
- Flujo del carbón vegetal.
- Flujo del vapor de agua
- Temperatura del Combustible
- Temperatura del vapor

Salida:

- Flujo del carbón vegetal activado
- Temperatura de los gases de salida del horno.

El proceso de experimentación se realizó de forma aleatoria, se efectuaron experimentos durante 30 días midiendo de forma simultánea las temperaturas en el horno de activación, de valores medidos se tomaron los valores mas representativos para las condiciones máximas medias y mínima de operación (para los flujos de de entrada del carbón vegetal de 120 ,135 y180 kg/h).

Tabla 3.1. Resultados experimentales durante el proceso de medición.

Flujo de Entrada (kg/h)	Flujo de Salida kg/h	Temp Ca	Punt. 1	Punt. 2	Punt. 3	Temp Sal	Flujo Comb kg/h
120	32	111	144	182	164	73	24
		201	470	297	244	108	24
		238	576	379	307	135	24
		265	654	441	348	150	24
		258	654	438	341	205	24
		273	654	475	363	224	24
		291	654	524	363	254	24
		300	654	547	363	257	24
		317	654	560	363	270	24
135	60	705	654	560	363	270	25
		743	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
		705	654	560	363	270	25
180	60	705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26
		705	654	560	363	270	26

Durante el balance termo – energético se tuvo en cuenta las características del carbón a la entrada y a la salida del horno: (Ver tabla 3.2).

Tabla 3.2. Características del carbón

Variables	Carbon primario	Producto final	Unidad
Humedad Relativa	< 10	-	%
Masa Volatil	< 15	< 10	%
Carbono Fijo	75 - 80	> 85	%
Cenizas	10 - 5	5	%
R	> 95	-	%

A demás de las composición química del combustible empleado para la generación de los gases para la activación del carbón.

C= 86,5 % , H= 12,38 % , N= 19,99 % , S= 1 %

3.3- Análisis de los resultados

En la tabla 3.3 se muestra los resultados obtenidos del balance térmico y de masa, para la obtención de los cálculos se empleó el programa profesional Mathcad 13, los mismos se pueden ver en el Anexo 1.

Tabla 3.3. Principales variables calculadas:

Parámetros calculados	Mínimo	Medio	Máximo	UM
Poder calórico inferior del comb.	$2,655 \cdot 10^5$	$2,821 \cdot 10^5$	$2,876 \cdot 10^5$	W
Flujo del agua evaporada	18	16,2	18	kg/h
Flujo del carbón activado	86	86	86	kg/h
Flujo de gases de la combustión	335,455	365,421	363,41	kg/h
Flujo de aire de combustión	385,491	409,584	417,615	kg/h
Flujo succionado por el VTI	$1,75 \cdot 10^3$	$1,746 \cdot 10^3$	$1,745 \cdot 10^3$	kg/h
Calor aportado por el combustible	$5,983 \cdot 10^3$	$6,511 \cdot 10^3$	$6,415 \cdot 10^3$	W
Calor que entra con el carbón	$9,5 \cdot 10^3$	$1,069 \cdot 10^4$	$1,425 \cdot 10^4$	W
Calor que sale con el carbón	$2,008 \cdot 10^4$	$1,897 \cdot 10^4$	$1,852 \cdot 10^4$	W
Calor aportado por el vapor de agua	$1,095 \cdot 10^4$	$9,775 \cdot 10^3$	$1,076 \cdot 10^4$	W
Calor empleado para la activación	$3,215 \cdot 10^5$	$3,181 \cdot 10^5$	$3,15 \cdot 10^5$	W
Calor físico aportado por el aire	30,224	32,114	32,743	kg/h
Perdidas de calor por Convección	$1,877 \cdot 10^3$	$3,734 \cdot 10^3$	$4,427 \cdot 10^3$	W
Perdidas de calor por Radiación	$2,093 \cdot 10^3$	$4,263 \cdot 10^3$	$5,097 \cdot 10^3$	W
Rendimiento	0,784	0,744	0,728	%

Para el balance térmico y de masa es necesario calcular los volúmenes reales de los gases y otros que se muestran en la siguiente tabla, (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4. Principales variables calculadas:

Parámetros Calculados	Valores	Unidad de Medida
Volumen del aire teórico	10,388	m ³ /kg
Volumen total real de los gases triatómicos	1,625	m ³ /kg
Volumen teórico de Oxígeno	2,182	m ³ /kg
Volumen teórico de Nitrógeno	8,212	m ³ /kg
Volumen teóricos de los gases secos	9,837	m ³ /kg
Volumen de los vapores de agua	1,288	m ³ /kg
Volumen teórico total de los gases	11,125	m ³ /kg
Volumen real del aire	11,946	m ³ /kg
Volumen real de los gases	12,917	m ³ /kg
Numero de Nusselt	35,736	
Flujo de gases de la combustión	1,388·10 ⁵	W

En la figura 3.2 se muestra las diferentes pérdidas de calor que ocurren en el sistema, las cuales son las pérdidas de calor por Radiación y las pérdidas de calor por Convección. Como se puede ver en la figura las pérdidas de calor por Radiación son mucho mayores que las pérdidas de calor por Convección, (ver figura3.2).

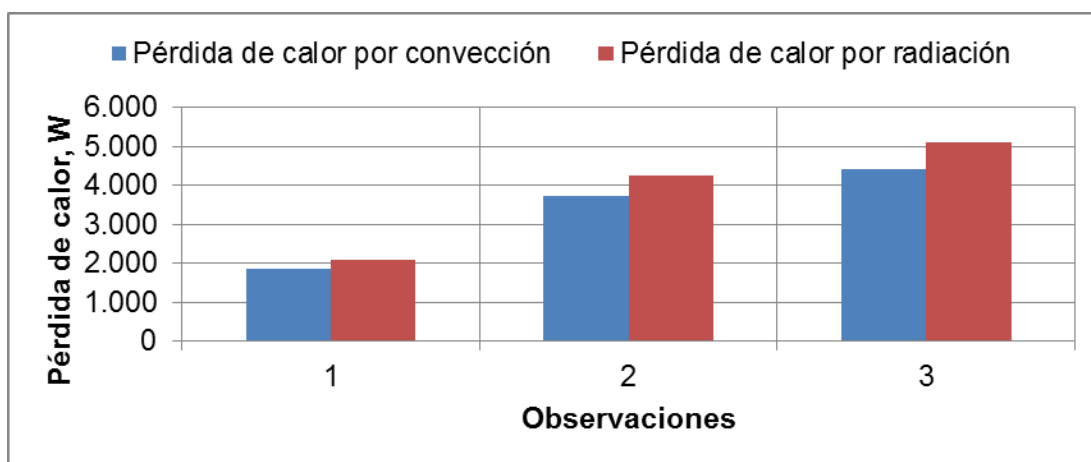


Figura 3.2. Comportamiento de las pérdidas de calor en el sistema.

En la figura se muestra una comparación de los diferentes calores que se suministran al sistema viendo así cuales son los que más influyen en el sistema en comparación con los que no tienen mucha influencia en este, el calor aportado por el combustible en comparación con los otros calores es mucho mayor no siendo así el calor aportado por el aire, mientras que el calor aportado por el vapor de agua, el calor que entra con el vapor y el calor necesario para la activación presentan un comportamiento similar

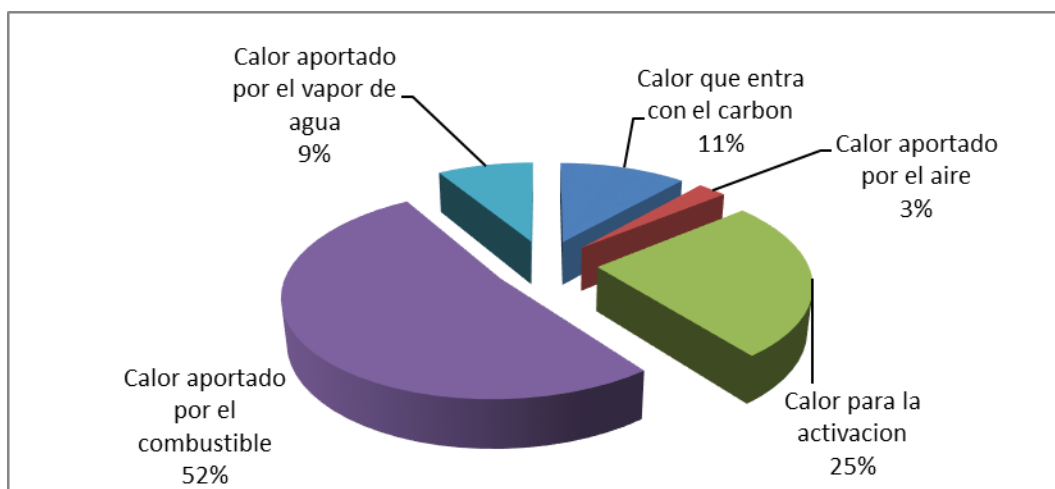


Figura 3.3. Comparación de los diferentes calores que entran al sistema.

La grafica muestra el comportamiento de los rendimientos calculados en el sistema presentando así un comportamiento descendente, este descenso del rendimiento es debido a las diferentes pérdidas de calor presentadas en graficas anteriores (ver figura 3.4)

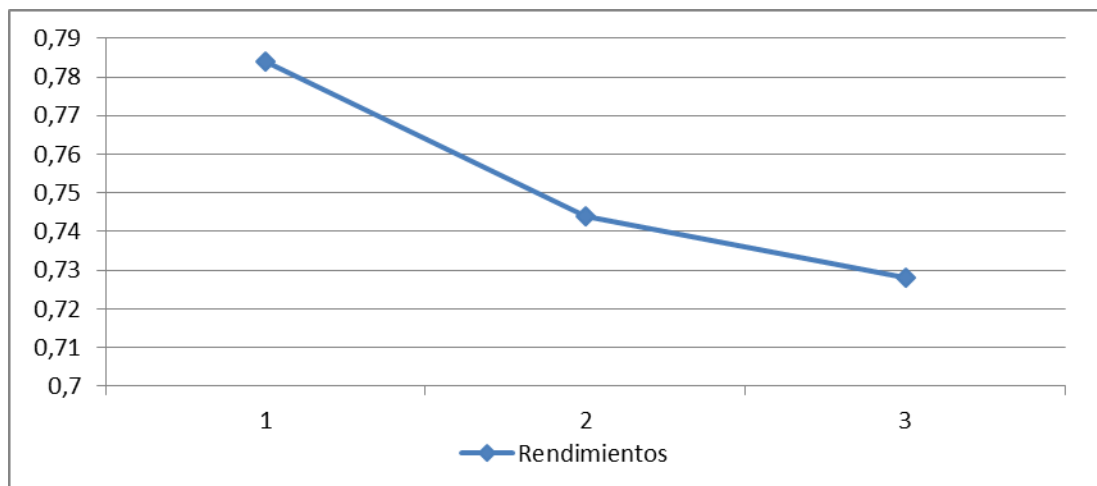


Figura 3.4. Comportamiento de los Rendimientos calculados.

3.4- Valoración Económica:

Los cálculos realizados a partir de los balances de masas y energía han demostrado que existe un sobreconsumo de combustible, es decir se está utilizando más petróleo del que se necesita para el proceso de activación.

Para que haya alta eficiencia en el proceso debe existir correspondencia entre el consumo de combustible y la producción de carbón.

En la tabla 3.5 aparecen los valores mínimo, medio y máximos del consumo de combustible por hora, donde el tiempo de trabajo de dicha instalación es de 24hr y el costo del combustible y de esta forma poder realizar una valoración económica.

Tabla 3.5. Resumen de los índices de consumo y los costos por tonelada de carbón.

Flujo de combustible	Horas de trabajo	Consumo diario t/día	Costo de combustible CUC	Consumo mensual en CUC
24	24	576	512,64	15379,2
25	24	600	534	16020
26	24	624	555,36	16660,8

En la tabla 3.5 se muestra el flujo de combustible diario que presenta la empresa, y este al ser multiplicado por las horas de trabajo se obtiene el consumo diario de combustible en t/día, donde el precio de combustible es de 0.89 CUC al ser multiplicado por el consumo diario se da lugar al costo de combustible diario en CUC obteniendo así el consumo mensual de combustible.

3.4. Impacto Ambiental:

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

Principales problemas ambientales detectados

- La zona de preparación de carbón (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta la sección de molinos), constituyen áreas de contaminación por polvo.
- El drenaje en el depósito exterior es insuficiente (hay dos canales que están secos).
- En ocasiones se supera la norma de concentración de polvo (de 1 a 4 mg de polvo/m³), por esto se deben realizar determinaciones de polvo en la atmósfera en el área de trabajo.

Influencia del polvo en el medio ambiente

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

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

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

Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías:

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

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

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

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas 0,01 a 0,1 μm que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

Influencia del ruido en el medio ambiente:

En la instalación unos de sus principales afectaciones al ser humano es el ruido, este es ocasionado por el horno cilíndrico rotatorio durante el proceso de activación del carbón, estas afectaciones pueden ser muy dañinas para el cuerpo humano.

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

3.5- Conclusiones del capítulo 3

- Se determinaron los parámetros de trabajo de la instalación para el flujo de carbón calculado.
- La emisión de polvo es una de las afectaciones que más incide en el medio ambiente.
- Se analizaron los resultados obtenidos en el balance termo – energético dando así el resultado de las principales variables que intervienen en el proceso.

CONCLUSIONES GENERALES:

- A través del balance térmico y de masa se pudo obtener el Rendimiento de la instalación donde este oscila entre los 0,784 y 0,728%, el comportamiento de este Rendimiento es debido al comportamiento de las perdidas en el sistema donde si las pérdidas de calor aumentan el rendimiento disminuye.
- Se obtuvieron las diferentes perdidas de calor que intervienen en el sistema como por ejemplo las pérdidas de calor por Radiación y las pérdidas de calor por Convección, donde las pérdidas de calor por Radiación son mayores que las pérdidas por Convección estas pérdidas oscilan entre $1.877 \cdot 10^3$ y $2.093 \cdot 10^3$.
- Se abordó sobre el resultado de los diferentes calores que son suministrados en el sistema, donde el calor añadido por el combustible que es de $6.415 \cdot 10^3$ es el mayor no siendo así el calor aportado por el aire que es de 32,743.
- Se dio a conocer el resultado de las principales variables que intervienen en el sistema.

RECOMENDACIONES

- Automatizar la instalación con vista a mejorar su funcionamiento y el control de los parámetros que caracterizan el proceso.
- Dado a que la instalación está resguardada se recomienda aislarla con lana de vidrio para disminuir las pérdidas al medio ambiente.
- Los resultados obtenidos se pueden utilizar como punto de partida para futuras investigaciones donde se analicen otros factores que influyen en el proceso de activación.

BIBLOGRAFIA:

1. Jiménez, H. (1999): Modelamiento Matemático de los procesos de Transferencia de calor y masa en medios porosos. México.
2. Ortiz, A. (2003): Steady state simulation of a rotatory kiln for charcoal activation. Argentina.
3. Ortiz, A. (2007): Optimal operation profit of a pilot rotatory kiln for charcoal activation. Argentina.
4. Donaciano, L. (2007): Obtención de carbón activado a partir de la cascara del coco. México.
5. Sarmiento, C. (2004): Preparación de carbón activado mediante la activación química de carbón mineral. Venezuela.
6. Herrera, F. (2004): Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales. Colombia.
7. Kim, Y. (2012): Development of process model of a rotatory kiln of volatile organic compound recovery from coconut shell. Korea.
8. Faires, V. (1994): Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria, 807p.
9. Fernández, E. (1991): Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial "Félix Varela, Tomo I.
10. Incropera, F. y Witt. D. (2003): "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, II. III.
11. Treybal, R. (1985): Operaciones con transferencia de masa. Capítulo. XII. /pág. 653.
12. Kern, D. (1969): Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana. 980p.
13. Agustini, S. (2006): Regenerative Action of the Wall on the Heat Transfer for Directly and Indirectly Heated Rotary Kilns.
14. Fernando, L. (2003): Aportaciones al modelado y control de secaderos rotatorio. España. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.
15. Agustini, A (2006): Regenerative Action of the Wall on the Heat Transfer for

Directly and Indirectly Heated Rotary Kilns. Indonesia .1-18p.

16. Fernández D.P. (1996): “Ingeniería Térmica de los Fluidos”, <http://www.termica.webhop.info>.
17. Zamora, R (2006): Optimización del proceso de activación de coque de petróleo fosfórico para la remoción de metales pesados .México. <http://D.F. E-mail rmrz@pumas.iingen.unam.mx>.
18. Castillo. A. (2007): Influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM.
19. Domínguez, V.L.A. (2011): “Evaluación del proceso de secado del Carbón Antracita en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas de Nicaro”, Tesis de Maestría. ISMM. Moa.
20. Holan, P. J. (2011): Tránsito del Carbón. México. Editorial Continental, S.A. de C.V.43.
21. 21. Aróstegui, J. M. Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
22. Boateng, A. A; Barr, P.V. Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder. Journal of Fluid Mechanics, January 10, 1997 vol. 330 pp. 233-249.
23. Bui, R. T. Computational modelling of thermo physical processes in the light metals industry. Revue Generale de Thermique, Septiembre 1997 vol. 36 pp. 575-591.
24. Contaminación por ruido. http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm. Junio 2004
25. Sai, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, “Prediction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary kiln”, Can. J. Chem. Eng. 70, 438-44 (1992).
26. Perry, C; J, Perry. Chemical Engineers hand book. University of Oklahoma. La Habana, 1967.

Anexos

ANEXO

DATOS PARA EL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

$x := 0, 1 \dots 2$

Humedad del mineral:

Temperatura:

a la entrada

a la salida

de salida de los gases

de la superficie del secador

$W_{ce_x} :=$

$W_{cs_x} :=$

$T_{g_x} :=$

$T_{sec_x} :=$

15%
12·%
10·%

0.00%
0.00%
0.00%

519.15·K
514.76·K
510.15·K

323.15·K
328.25·K
330.15·K

Flujo de combustible

Flujo de mineral Entrda

Temperatura del combustible

$F_{c_x} :=$

$F_{ch_x} :=$

$T_{c_x} :=$

$24.0 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$25.5 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$26.0 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

$120 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$135 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$180 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

381.15·K
388.15·K
378.15K

Temperatura Carbón

de entrada

de salida

$T_{ch} := 305.15 \cdot \text{K}$

$T_{cs_x} :=$

900·K
850·K
830·K

Composición química del combustible

$C_t := 87$ $H_t := 10.09$ $O_t := 0.8$ $W_t := 0.05$ $A_t := 0.01$ $N_t := 0.7$ $S_t := 0.2$

Gravedad específica del combustible a 25 °C

$ge := 0.986 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Capacidad calorífica del carbón antracita

$$C_{p_c} := 0.934 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_o := 318\text{K}$$

Valor Calórico Inferior del combustible

$$Q_{b_x} := \left[\left[339 \cdot C_t + 1030 \cdot H_t - 109 \cdot (O_t - S_t) - 24 \cdot W_t \right] \cdot \frac{1000 \cdot \text{J}}{\text{kg}} \right] \cdot F_{c_x}$$

$$Q_{b_x} =$$

$2.655 \cdot 10^5$	W
$2.821 \cdot 10^5$	
$2.876 \cdot 10^5$	

Volúmenes de los gases producto de la combustión

Volumen de aire teórico

$$V_{oa} := \left[0.0889 \cdot (C_t + 0.375 \cdot S_t) + 0.265 \cdot H_t - 0.0333 \cdot O_t \right] \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Relación aire combustible

$$V_{oa} = 10.388 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\lambda_{ca} := 1.15$$

Volumen total real de gases triatómicos

$$V_{RO_2} := 0.01866 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot (C_t + 0.375 \cdot S_t)$$

$$V_{RO_2} = 1.625 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de Oxígeno

$$V_{O_2} := 0.21 \cdot V_{oa}$$

$$V_{O_2} = 2.182 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de Nitrógeno

$$V_{N_2} := 0.79 \cdot V_{oa} + 0.008 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot N_t$$

$$V_{N_2} = 8.212 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos

$$V_{gs} := V_{RO_2} + V_{N_2}$$

$$V_{gs} = 9.837 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los vapores de agua

$$V_{H_2O} := (0.111 \cdot H_t + 0.0124 \cdot W_t) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + 0.0161 \cdot V_{oa}$$

$$V_{H_2O} = 1.288 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico total de gases

$$V_{og} := V_{gs} + V_{H_2O}$$

$$V_{og} = 11.125 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen real de aire

$$V_{a_{real}} := V_{oa} \cdot \lambda_{ca}$$

$$V_{a_{real}} = 11.946 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen real de gases

$$V_g := V_{og} + (\lambda_{ca} - 1) \cdot V_{a_{real}}$$

$$V_g = 12.917 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Calor específico del combustible, según Perry (1984)

$$C_{pc_x} := \frac{0.383 \text{ kcal} \cdot \text{K} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K}^2)^{-1} + 0.00045 \cdot \text{ kcal} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K}^2)^{-1} \cdot (T_{c_x})}{\text{ge}}$$

$$C_{pc_x} =$$

$\frac{2.355 \cdot 10^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$\frac{2.368 \cdot 10^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$\frac{2.349 \cdot 10^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Calor específico del agua, según Incropera (2003)

$$C_{p_{H_2O}} := 4.22 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{pc_x} =$$

$\frac{2.355 \cdot 10^3}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$
$\frac{2.368 \cdot 10^3}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$
$\frac{2.349 \cdot 10^3}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$

Calor específico y densidad de los gases producto de la combustión, según Incropera (2003)

$$\rho_{N_2} := 0.9625 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{H_2O} := 0.974 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{CO} := 0.955 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A temperatura ambiente
35,5 °C para Mayarí. Según
Polaina (1987).

$$\rho_{SO_2} := 1.58 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{O_2} := 1.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{CO_2} := 1.49 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{aire}} := 1.17 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{gc} := \frac{\rho_{N_2} \cdot V_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot V_{O_2} + \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + (\rho_{SO_2} + \rho_{CO_2}) \cdot V_{RO_2}}{V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{RO_2}}$$

$$\rho_{gc} = 1.243 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Calor específico de los gases de la combustión

$$C_{p_{N_2}} := 1.042 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{H_2O}} := 2.036 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{CO}} := 1.045 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{CO_2}} := 0.901 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{O_2}} := 0.929 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{SO_2}} := 0.982 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p_{gs}} := \frac{C_{p_{N_2}} \cdot V_{N_2} + C_{p_{H_2O}} \cdot V_{RO_2} + C_{p_{O_2}} \cdot V_{O_2} + (C_{p_{CO_2}} + C_{p_{SO_2}}) \cdot V_{RO_2}}{V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{RO_2}}$$

$$C_{p_{gs}} = 1.274 \times 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor en la cámara

$$L_c := 2 \cdot \text{m} \quad \text{Longitud de la cámara} \quad \text{Radio del orificio entrada cámara de paso}$$

$$D_c := 1.20 \cdot \text{m} \quad \text{Ancho de la cámara}$$

$$H_c := D_c$$

$$A_T := \pi \cdot D_c \cdot L_c + \pi \cdot \frac{D_c^2}{4}$$

$$A_T = 8.671 \text{ m}^2$$

Temperatura de la superficie

$$T_s := 318.15 \cdot K$$

$$T_s = 45^\circ C$$

Temperatura de pelicular

$$T_{p_x} := \frac{T_s + T_o}{2}$$

$$T_{p_x} =$$

318.075	K
318.075	
318.075	

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-4 del Incropera (2003) a la temperatura pelicular

$$K_a := 0.028187 \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

Conductividad térmica del aire

$$Pr := 0.7034$$

Número de Prandtl

$$\nu_c := 18.4553 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{m^2}{sec}$$

Viscosidad cinemática del fluido

$$Cp_a := 1008.02 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

Capacidad calorífica del aire

$$\alpha_c := 26.274 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{m^2}{sec}$$

Coefficiente de difusividad térmica

$$\beta_c := 0.003076 \cdot K^{-1}$$

Coefficiente de dilatación volumétrica

ϕ

$$Ra_l := \frac{g \cdot \beta_c \cdot (T_s - T_o) \cdot H_c^3}{\nu_c \cdot \alpha_c}$$

$$Ra_l = 1.612 \times 10^7$$

Como Gr.Pr = Ra_l es mayor que 10⁹ la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt

$$N_{UL} := \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_l^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$N_{UL} = 35.736$$

$$h_{conv} := \frac{N_{UL} \cdot K_a}{H_c}$$

$$h_{conv} = 0.839 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Constante de Stefan Bolsztman

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Emisividad para refractarios con alumina

$$\varepsilon_a := 0.4$$

$$Q_{\text{convc}} := h_{\text{conv}} \cdot A_T \cdot (T_s - T_o)$$

$$Q_{\text{convc}} = 1.092 \text{ W}$$

$$Q_{\text{radc}} := \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot A_T \cdot (T_s^4 - T_o^4)$$

$$Q_{\text{radc}} = 3.797 \text{ W}$$

Secadero Rotatorio

Longitud

Diámetro del secador

Temperatura de pelicular

$$L_S := 12 \cdot \text{m}$$

$$D_S := 1.6 \cdot \text{m}$$

$$T_{pS_x} := \frac{T_{\text{sec}_x} + T_o}{2}$$

$$T_{pS_x} =$$

320.575
323.125
324.075

 K

$$A_S := \pi \cdot D_S \cdot L_S$$

$$A_S = 60.319 \text{ m}^2$$

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-4 del Incropera (2003) a la temperatura pelicular

$$K_S := 0.028187 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Conductividad térmica del aire

$$Pr_{So} := 0.704 \text{ Número de Prandtl}$$

$$\nu_S := 18.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

Viscosidad cinemática del fluido

$$Pr_{Ss} := 0.704 \text{ Número de Prandtl}$$

$$\varepsilon_S := 0.9$$

Emisividad para el acero (No revestimiento)

$$V_a := 2.30 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ Velocidad del aire}$$

Número de Reynolds

$$Re_S := \frac{V_a \cdot D_S}{\nu_S} \quad Re_S = 2 \times 10^5$$

Como el número de Reynolds es mayor que 2×10^5 se considera régimen turbulento

Las constantes C, m, n se buscan en la tabla 7.4 del Incropera (2003) para Pr menor que 10

$$C_S := 0.076 \quad m_S := 0.7 \quad n_S := 0.37$$

$$N_{UDS} := C_S \cdot Re_S^{m_S} \cdot Pr^{n_S} \left(\frac{Pr_{So}}{Pr_{Ss}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$N_{UDS} = 342.767$$

$$h_{\text{convS}} := \frac{N_{UDS} \cdot K_S}{D_S}$$

$$h_{\text{convS}} = 6.038 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$T_{\text{sec}_x} =$$

323.15
328.25
330.15

 K

$$Q_{\text{convS}_x} := h_{\text{convS}} \cdot A_S \cdot (T_{\text{sec}_x} - T_o)$$

$$Q_{\text{radS}_x} := \varepsilon_S \cdot \sigma \cdot A_S \cdot \left[(T_{\text{sec}_x})^4 - T_o^4 \right]$$

$$Q_{\text{convS}_x} =$$

1.876·10 ³
3.733·10 ³
4.425·10 ³

 W

$$Q_{\text{radS}_x} =$$

2.089·10 ³
4.259·10 ³
5.093·10 ³

 W

$$Q_{\text{Trad}_x} := Q_{\text{radc}} + Q_{\text{radS}_x}$$

$$Q_{\text{Tconv}_x} := Q_{\text{convc}} + Q_{\text{convS}_x}$$

Calor aportado por el combustible

$$Q_{fc_x} := F_{c_x} \cdot C_{pc_x} \cdot T_{c_x}$$

$$Q_{fc_x} =$$

$5.983 \cdot 10^3$	W
$6.511 \cdot 10^3$	
$6.415 \cdot 10^3$	

Flujo de carbón seco

$$F_{cs_x} :=$$

$86 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$86 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$86 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$

Calor que entra con el carbón

$$Q_{ch_x} := F_{ch_x} \cdot C_{pc} \cdot T_{ch}$$

$$Q_{ch_x} =$$

$9.5 \cdot 10^3$	W
$1.069 \cdot 10^4$	
$1.425 \cdot 10^4$	

Flujo de agua retenida

$$F_{ar_x} := F_{cs_x} \cdot W_{cs_x}$$

$$F_{ar_x} =$$

0	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
0	
0	

Flujo de agua evaporada

$$F_{va_x} := F_{ch_x} \cdot (W_{ce_x} - W_{cs_x})$$

$$F_{va_x} =$$

18	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
16.2	
18	

Calor que sale con el carbón

$$Q_{cs_x} := F_{cs_x} \cdot C_{pc} \cdot T_{cs_x}$$

$$Q_{cs_x} =$$

$2.008 \cdot 10^4$	W
$1.897 \cdot 10^4$	
$1.852 \cdot 10^4$	

Calor latente de vaporización a la temperatura de salida de los gases

$$\tau := 2252 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Calor aportado por el vapor de agua

$$Q_{va_x} := F_{va_x} \cdot (C_{pH_2O} \cdot T_{g_x})$$

$$Q_{va_x} =$$

$1.095 \cdot 10^4$	W
$9.775 \cdot 10^3$	
$1.076 \cdot 10^4$	

Calor necesario empleado para la activación

$$Q_{gs_x} := Q_{cs_x} - Q_{ch_x} + Q_{va_x} + Q_{\Delta H}$$

$$Q_{gs_x} =$$

$3.215 \cdot 10^5$	W
$3.181 \cdot 10^5$	
$3.15 \cdot 10^5$	

$$Q_{\Delta H} := 300000 \text{ W}$$

Flujo de aire de combustión

$$F_{ac_x} := \rho_{\text{aire}} \cdot V_{a_{\text{real}}} \cdot F_{c_x}$$

$$F_{ac_x} =$$

335.455	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
356.421	
363.41	

Calor específico del aire a la temperatura ambiente

$$C_{pac} := 1.02 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Flujo succionado por el VTI

$$F_{VTI_x} := \frac{Q_{gs_x}}{C_{p_{gs}} \cdot T_{g_x}}$$

$$F_{VTI_x} =$$

$1.75 \cdot 10^3$	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
$1.746 \cdot 10^3$	
$1.745 \cdot 10^3$	

Flujo de gases de la combustión

Calor físico aportado por el aire

$$F_{gc_x} := F_{c_x} \cdot V_g \cdot \rho_{gc}$$

$$Q_{fa_x} := (F_{ac_x}) \cdot C_{pac} \cdot T_o$$

$$F_{gc_x} =$$

385.491	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
409.584	
417.615	

$$Q_{fa_x} =$$

30.224	W
32.114	
32.743	

Flujo de gases de la combustión

$$F_{H_2O} := 300 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$C_{pH_2O} := 4.239 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_{H_2O} := 393\text{K}$$

$$Q_{fH_2O} := F_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot T_{H_2O}$$

$$Q_{fH_2O} = 1.388 \times 10^5 \text{ W}$$

$$F_{cc_x} := \frac{Q_{gs_x} + Q_{Tconv_x} + Q_{Trad_x}}{C_{pc} \cdot T_c + [339 \cdot C_t + 1030 \cdot H_t - 109 \cdot (O_t - S_t) - 24 \cdot W_t] \cdot \frac{1000 \cdot \text{J}}{\text{kg}}}$$

$$F_{cc_x} =$$

27.557	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
27.603	
27.476	

$$F_{c_x} =$$

24	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
25.5	
26	

$$\eta_{sec_x} := \frac{Q_{gs_x}}{Q_{b_x} + Q_{fa_x} + Q_{fc_x} + Q_{fH_2O}}$$

$$\eta_{sec_x} =$$

0.784
0.744
0.728

$$Q_{Tconv_x} =$$

1.877·10 ³	W
3.734·10 ³	
4.427·10 ³	

$$Q_{Trad_x} =$$

2.093·10 ³	W
4.263·10 ³	
5.097·10 ³	

$$Q_{fc_x} =$$

5.983·10 ³	W
6.511·10 ³	
6.415·10 ³	

$$Q_{ch_x} =$$

9.5·10 ³	W
1.069·10 ⁴	
1.425·10 ⁴	

$$Q_{cs_x} =$$

2.008·10 ⁴	W
1.897·10 ⁴	
1.852·10 ⁴	

$$Q_{fa_x} =$$

30.224	W
32.114	
32.743	

$F_{ac_x} =$

335.455
356.421
363.41

$\frac{kg}{hr}$

$F_{gc_x} =$

385.491
409.584
417.615

$\frac{kg}{hr}$

$F_{cs_x} =$

86
86
86

$\frac{kg}{hr}$

$F_{va_x} =$

18
16.2
18

$\frac{kg}{hr}$

$F_{VTI_x} =$

1.75·103
1.746·103
1.745·103

$\frac{kg}{hr}$

$Q_{gs_x} =$

3.215·105
3.181·105
3.15·105

W

$Q_{va_x} =$

1.095·104
9.775·103
1.076·104

W

ANEXO 1

DATOS PARA EL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

$x := 0,1.. 2$

Humedad del mineral: Temperatura:

a la entrada a la salida de salida de los gases de la superficie del secador

$W_{cex} := W_{csx} :=$		T_g	$:=$	T_{sec}
15%	0.00 %	519.15·K		323.15·K
12.·%	0.00 %	514.76·K		328.25·K
10.·%	0.00 %	510.15·K		330.15·K
$:= x$ x				
Flujo de combustible		Flujo de mineral	Entrda	Temperatura del combustible
				T_c

$F_C :=$	$F_{ch} := x$	$:= x$
x		
kg 24.0· hr	kg 120· hr	381.15·K
—	—	388.15·K
kg 25.5· hr	kg 135· hr	378.15 K
—	—	
kg 26.0· hr	kg 180· hr	
—	—	
Temperatura Carbón		
de entrada	de salida	

$T_{ch} := 305.15·K$	$T_{CS} := x$			
900·K				
850·K				
830·K				
Composición química del combustible				
$C_t := 87$	$H_t := 10.09$	$O_t := 0.8$	$W_t := 0.05$	$A_t := 0.01$
			$N_t := 0.7$	$S_t :=$
				0.2
Gravedad específica del combustible a 25 °C				

$$g_e := 0.986 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

Capacidad calorífica del carbón antracita

$$C_{pc} := 0.934 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$T_o := 318 \text{ K}$$

Valor Calórico Inferior del combustible

$$Q_b := \frac{1}{1000} \cdot \left[339 \cdot C_t + 1030 \cdot H_t - 109 \cdot \left(O_t - S_t \right) - 24 \cdot W_t \right] \cdot F_{CX}$$

$$Q_b = x$$

2.655 · 10 ⁵
2.821 · 10 ⁵
2.876 · 10 ⁵

W

Volúmenes de los gases producto de la combustión

Volumen de aire teórico

$$V_{oa} := \frac{1}{0.0889} \cdot \left(C_t + 0.375 \cdot S_t \right) + 0.265 \cdot H_t - 0.0333 \cdot O_t \cdot Relación \text{ aire combustible}$$

$$V_{oa} = 10.388 \text{ m}^3$$

$$V_{RO2} := 0.01866 \cdot \left(C_t + 0.375 \cdot S_t \right) \text{ kg}$$

Volumen total real de gases triatómicos

$$V_{RO2} = 1.625 \text{ kg} \quad \text{m}$$

Volumen teórico de los gases secos

$$V_{gs} := V_{RO2} + V_{N2}$$

$$V_{gs} = 9.837 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

$$V_{H2O} := (0.111 \cdot H_t + 0.0124 \cdot W_t) \cdot + 0.0161 \cdot V_{oa} \text{ kg}$$

Volumen teórico total de gases

$$V_{og} := V_{gs} + V_{H2O}$$

$$V_{og} = 11.125 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

$$\lambda_{ca} := 1.15$$

$$V_{H2O} = 1.288 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

Volumen real de aire

$$V_{areal} := V_{oa} \cdot \lambda_{ca}$$

$$V_{areal} = 11.946 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

Volumen real de gases

$$V_g := V_{og} + (\lambda_{ca} - 1) \cdot V_{areal}$$

$$V_g = 12.917 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

Volumen teórico de Oxígeno

$$V_{O2} := 0.21 \cdot V_{oa}$$

$$V_{O2} = 2.182 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

Volumen teórico de Nitrógeno

$$V_{N2} := 0.79 \cdot V_{oa} + 0.008 \cdot N_t \text{ kg}$$

$$V_{N2} = 8.212 \text{ kg} \quad \text{m}^3$$

Volumen teórico de los vapores de agua

Calor específico del combustible, según Perry (1984) Calor específico del agua, según Incropera (2003)

$$C_{pc} := \frac{0.383 \text{ kcal} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} + \frac{0.00045 \text{ kcal} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot T_c \quad \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_{pH2O} := 4.22 \cdot 10^{-3} \text{ kcal} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_{pc} = C_{pc} = x \cdot x$$

$$J2$$

m

$$\frac{2.355 \cdot 10^3}{3 \cdot 2.368 \cdot 10^3} \text{ kg} \cdot \text{K}$$

$$\frac{2.349 \cdot 10^3}{3}$$

2.355 · 10 ³
2.368 · 10 ³
2.349 · 10 ³

2

s · K

Calor específico y densidad de los gases producto de la combustión, según Incropera (2003)

$$\rho_{N_2} := 0.9625 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{H_2O} := 0.974 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{CO} := 0.955 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{A temperatura ambiente } 35,5^\circ\text{C para Mayarí. Según}$$

$$\rho_{SO_2} := \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{O_2} := 1.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{CO_2} := 1.49 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{aire} := 1.17 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Polaina (1987). } \frac{33}{1.58 \cdot 10^3}$$

$$\rho_{O_2} := 1.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{CO_2} := 1.49 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{aire} := 1.17 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3 3 m m m m

$$\rho_{N_2} \cdot V_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot V_{O_2} + \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + (\rho_{SO_2} + \rho_{CO_2}) \cdot V_{RO_2} \quad \text{kg}$$

$$\rho_{gc} := \frac{V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{RO_2}}{\rho_{gc} = 1.243 \text{ m}^3}$$

Calor específico de los gases de la combustión

$$C_{pN_2} := 1.042 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad C_{pvH_2O} := 2.036 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

kg

$$C_{pCO} := 1.045 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad C_{pCO_2} := 0.901 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$C_{pO2} := 0.929 \cdot 10^3 \cdot \frac{J \cdot K}{kg}$

$C_{pSO2} := 0.982 \cdot 10^3 \cdot \frac{J \cdot K}{kg}$

$C_{pN.2} \cdot V_{N2} + C_{pvH2O} \cdot V_{RO2} + C_{pO2} \cdot V_{O2} + (C_{pCO.2} + C_{pSO2}) \cdot V_{RO2}$

$C_{pgs} := \frac{V_{H2O} + V_{N2} + V_{O2} + V_{RO2}}{3}$

$C_{pgs} = 1.274 \times 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$

$L_C := 2 \cdot m$

$D := 1.20 \cdot m$

Longitud de la cámara

Ancho de la cámara

Cálculo de las pérdidas por transferencia de calor en la cámara

Radio del orificio entrada cámara de paso

$H_C := D_C$

$A_T := \pi \cdot D_C \cdot L_C + \pi \cdot \frac{D_C^2}{4}$

$A_T = 8.671 \cdot m^2$

Temperatura de la superficie

$T_S := 318.15 \cdot K$

Temperatura de pelicular

$T_p := \frac{T_s + T_o}{2} = x$

318.075
318.075
318.075

$T_s = 45^{\circ}C^K$

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-4 del Incropera (2003) a la temperatura pelicular

$$k_a := 0.028187 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad térmica del aire}$$

$$\text{Pr} := 0.7034 \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$\nu_c := 18.4553 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}} \quad \text{Viscosidad cinemática del fluido}$$

$$c_{pa} := 1008.02 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Capacidad calorífica del aire}$$

$$\alpha_c := 26.274 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}} \quad \text{Coeficiente de difusividad térmica}$$

$$\beta_c := 0.003076 \text{K}^{-1} \quad \text{Coeficiente de dilatación volumétrica}$$

$$\text{Ra}_L := \frac{g \cdot \beta_c \cdot (T_s - T_o) \cdot H_c^3}{\nu_c \cdot \alpha_c} \quad \text{Ra}_L = 1.612 \times 10^9$$

Como $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \text{Ra}_L$ es mayor que 10^9 la expresión adecuada para calcular el número de Nusselt

$$\text{Nu}_L = 35.736 \left[1 + \frac{0.492 \text{Pr}^{1/4}}{1 + \frac{0.492 \text{Pr}^{1/4}}{1 + \frac{0.387 \text{Ra}_L^{1/4}}{1 + \frac{0.387 \text{Ra}_L^{1/4}}{0.825 + \frac{0.825}{\text{Pr}^{1/4}}}}} \right]^{1/4}$$

$$h_{\text{conv}} := \frac{\text{Nu}_L \cdot k_a}{H_c} = 0.839 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Constante de Stefan Bolsztman

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Emisividad para refractarios con alumina

$$\epsilon_a := 0.4$$

$$Q_{\text{conv}} := h_{\text{conv}} \cdot A \cdot (T_s - T_o) \quad Q_{\text{rad}} := \epsilon_a \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_o^4)$$

$$Q_{\text{conv}} = 1.092 \text{ W} \quad Q_{\text{rad}} = 3.797 \text{ W}$$

Secadero Rotatorio

Diámetro del secador Temperatura de pelicular

Longitud

$$L_S := 12 \cdot \text{m} \quad D_S := 1.6 \cdot \text{m} \quad T_{\text{sec}_x} + T_o$$

$$T_{pS} := T_{pS} = x \cdot \frac{2}{x}$$

$$A_S := \pi \cdot D_S \cdot L_S$$

$$A_S = 60.319 \text{ m}^2$$

320.575
323.125
324.075

Las propiedades del fluido se buscan en la tabla A-4 del Incropera (2003) a la temperatura pelicular

$$k_S := 0.028187 \text{ m} \cdot \text{W} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{Conductividad térmica del aire} \quad \text{Pr}_{So} := 0.704 \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$\frac{P}{r_{Ss}} := \frac{0.704 \text{ Número de Prandtl}}{-6 \text{ m}}$$

$$\nu_S := 18.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{Viscosidad cinemática del fluido} \quad V_a := 2.30 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{Velocidad del aire}$$

$$\epsilon_S := 0.9 \quad \text{Emisividad para el acero (No revestimiento)}$$

Número de Reynolds

Como el número de Reynolds es mayor que 2×10^5 se considera régimen turbulento

$$Re := \frac{V_a \cdot D_S}{\nu_S} = 2 \times 10^5$$

$$S \cdot vS \cdot S$$

Las constantes C , m , n se buscan en la tabla 7.4 del Incropera (2003) para Pr menor que 10

$$CS := 0.076 \quad mS := 0.7 \quad nS := 0.37$$

$$\frac{1}{\dots}$$

$$NUDS = CS \cdot ReS^m \cdot Pr^n$$

$$NUDS = 342.767$$

$$\frac{1}{\dots} \cdot \frac{PrS}{\dots}$$

$$h_{convS} := \frac{NUDS \cdot K_S}{D}$$

$$W$$

$$T_{sec} = \dots$$

$$h = 6.038$$

$$\dots := \dots \cdot \dots \cdot \dots$$

1.876·10 ³
3.733·10 ³
4.425·10 ³

$$\dots \cdot \dots \cdot \dots$$

$$Q_{radS} := \epsilon S \cdot \sigma \cdot A_S \cdot (T_{sec}^4 - T_o^4)$$

$$Q_{convS} = \dots$$

$$Q_{radS} = \dots$$

$$\dots \cdot Q := Q + Q$$

$$4 \cdot 4 \cdot \dots$$

$$W \cdot W \cdot x \cdot x \cdot T_{rad} \cdot radc \cdot radS$$

$$Q_{Tconv} := Q_{convc} + Q_{convS} \cdot x \cdot x$$

2.089·10 ³
4.259·10 ³
5.093·10 ³

convS · 2 · K	323.15
	328.25
	330.15

$$Q_{convS} := h_{convS} \cdot A_S \cdot (T_{sec} - T_o)$$

18
16.2
18

Calor aportado por el combustibe

Calor que entra con el carbón

Flujo de agua evaporada

$$Q_{fc} := F_c \cdot C_{pc} \cdot T_{c_x}$$

$$Q_{ch} := F_{ch} \cdot C_{pc} \cdot T_{ch}$$

$$F_{va} := F_{ch} \cdot (W_{ce_x} - W_{cs_x})$$

Q_{fc}

Q_{ch}

$$F_{va} = \text{kg}$$

= x

= x

W hr

Flujo de carbón seco

Flujo de agua retenida

Calor que sale con el carbón

$$F_{cs} := x$$

$$F_{ar} := F_{cs} \cdot W_{cs_x}$$

$$Q_{cs} := F_{cs} \cdot C_{pc} \cdot T_{cs}$$

5.983·103	W
6.511·103	
6.415·103	

$$Q_{cs} = x \cdot x$$

W

9.5·103	x	x	x	x
1.069·104				
1.425·104				
kg				
86· hr				
—				
kg				
86· hr				
—				
kg				
86· hr				
—				

F_{ar}

=

2.008·104
1.897·104
1.852·104

hr

J Calor latente de vaporización a la temperatura de salida de los gases

$$\tau := 2252 \cdot 10^3$$

kg

Calor aportado por el vapor de agua

Calor necesario pempleado para la activación

$$Q_{va} := F_{va} \cdot C_{pH_2O} \cdot T_{gx} \quad Q_{gs} := Q_{cs} - Q_{ch} + Q_{va} + Q_{\Delta H} \quad Q_{\Delta H} := 300000 \cdot W \cdot x$$

$$Q_{va} = x \cdot x \cdot x \cdot x \quad Q_{gs} =$$

1.095·104	W
9.775·103	
1.076·104	

W

3.215·105
3.181·105
3.15·105

Flujo succionado por el VTl

335.455

356.421
363.41

Flujo de aire de combustión

Calor específico del aire a la

temperatura ambiente

$$F_{ac} := \rho_{aire} \cdot V_{real} \cdot F_c \cdot x$$

$$F_{ac} = x \text{ kg}$$

$$VTI = \text{hr} \cdot x$$

—

$$C_{pac} := 1.02 \cdot \frac{\text{J}}{\text{K kg}}$$

$$FVTI := \frac{Q_{gs}}{T_g \cdot x \cdot C_{pgs}}$$

kg	—
1.75 · 10 ³	hr
1.746 · 10 ³	
1.745 · 10 ³	

Flujo de gases de la combustión

Calor físico aportado por el aire

$$F_{gcx} := F_{cx} \cdot V_g \cdot \rho_{gc} \quad Q_{fa} := \sum F_{acx} \cdot \sum C_{pac} \cdot T_o$$

$$F_{gcx} = Q_{fa} =$$

kg	x
385.491	30.224
409.584	32.114
417.615	32.743

Flujo de gases de la combustión

kg 3 J

$$F_{H2O} := 300 \quad C_{pH2O} := 4.239 \cdot 10$$

$$T_{H2O} := 393 \text{ K}$$

—

—

$$Q_{fH_2O} := F_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O} \quad \text{kg} \cdot \text{K}$$

$$Q_{fH_2O} = 1.388 \times 10^5 \quad \text{W}$$

$$F_{cc} := \frac{Q_{gs} + Q_{Tconv} + Q_{Trad}}{\Delta T_c + 339 \cdot C + 1030 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 24 \cdot W} \cdot \frac{1000 \cdot \text{J}}{\text{W}}$$

$F_{cc} =$

27.557
27.603
27.476

$\cdot C_{pc}$

24
25.5
26

$F_c = x \cdot x$

$\frac{\text{kg}}{\text{t}}$

0.784
0.744
0.728

$\frac{\text{t}}{\text{kg kg kg}}$

hr hr

1.877·103
3.734·103

4.427·10³

gs

Q

η_{sec} :=

+ Q_{fa}

+ Q_{xfc}

+ Q_{fH2O}

Q_b

x

x

x

η_{sec} =

x

Q_{Tconv}

Q_{Trad}

=

Q_{fc}

Q_{ch}

Q_{cs} = x

Q_{fa} = x

=

= x

=

x

x

2.008·10 ⁴
1.897·10 ⁴
1.852·10 ⁴

LEYENDA

- 1 - TOLVA**
- 2 - DESTERRONADOR**
- 3 - SINFIN**
- 4 – ELEVADOR DE CUBOS**
- 5 - MOLINO**
- 6 – ZARANDA DE UN PAÑO**
- 7 – ZARANDA DE TRES PAÑOS**
- 8 – SILO DE CARBON PRIMARIO**
- 9 – SILO DE CARBON DE DESECHO**
- 10 – HORNO DE ACTIVACION**
- 11 – SILO DE PRODUCTO FINAL**
- 12 – ZARANDA DE DOS PAÑOS**
- 13 – CALDERA**
- 14 – FILTROS DE MANGAS**
- 15 – COMPRESOR**
- 16 – TANQUE DE AGUA DE LA CALDERA**
- 17 – CICLON HUMEDO**
- 18 – VENTILADOR EXTRACTOR**

