



Desarrollo de un proceso eficiente para la producción de carbón activado a partir de residuos de cuesco de palma en la costa norte colombiana

Camilo Andrés Orellano Cueto

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia
2023

Desarrollo de un proceso eficiente para la producción de carbón activado a partir de residuos de cuesco de palma en la costa norte colombiana

Camilo Andrés Orellano Cueto

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Dr. Willman Orozco Lozano

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2023

Este proyecto va dedicado primeramente a Dios, porque me acompañó en este camino y me dió las herramientas necesarias para llegar a este punto; a mi familia, a mis hijos que han sido mi motivación para seguir estudiando y ser mejor día a día.

Camilo Orellano.

Agradecimientos

Quiero darle las gracias a Dios, agradecido con el ingeniero Willman Orozco por guiarme con el aporte de sus ideas y correctivos.

Agradecer a la Universidad Antonio Nariño por permitirme ser parte de ella, por las actividades desarrolladas para la formación como profesional.

De igual manera agradezco a coopfuturo entidad financiera que me facilito el pago de las matrículas por medio de créditos.

Por último, agradecer a todas las personas que me han apoyado a lo largo de esta carrera, compañeros de estudio, compañeros de trabajo y todos aquellos que de una u otra manera hicieron un aporte en mi formación.

A todos, muchas gracias.

Resumen

Este proyecto aborda la problemática de la acumulación de residuos de palma de aceite en la región, proponiendo la valorización de estos desechos a través de la producción de carbón activado. Los objetivos incluyen el diseño teórico de un horno eficiente para la activación de los cuescos, con la meta de mitigar la acumulación de residuos y generar un producto de alto valor agregado.

La metodología propuesta se basa en la caracterización de las propiedades de los cuescos, la selección de métodos de activación adecuados y el diseño teórico del horno. Se considerarán aspectos de transferencia de calor, modelado de flujo de materiales y eficiencia energética. El alcance se limita a la etapa de diseño teórico y no incluye implementación experimental.

Se espera como resultado principal un informe detallado que documente el diseño del horno, un modelo conceptual de su funcionamiento y una simulación teórica para validar el diseño propuesto. Los usuarios inmediatos de estos resultados serán ingenieros de procesos, ambientales y de producción, así como investigadores y académicos interesados en la valorización de residuos y la ingeniería mecánica.

Palabras clave: Carbón activado, residuos de palma, diseño teórico, horno de activación, valorización de residuos, ingeniería mecánica, transferencia de calor, eficiencia energética.

Abstract

This project addresses a design that provides a solution to the problem of the accumulation of oil palm waste in production plants by proposing the valorization of this waste through the production of activated carbon. The objectives include the theoretical design of an efficient oven for the activation of the pits, with the goal of mitigating the accumulation of waste and generating a product with high added value.

The proposed methodology is based on the theoretical design of a process that includes a furnace and the unit operations necessary for the production of activated carbon for commercial use. Aspects of heat transfer, material flow modeling and energy efficiency will be considered. The scope is limited to the theoretical design stage and does not include experimental implementation.

The main result is expected to be a detailed report that documents the design of the furnace, a conceptual model of its operation and a theoretical simulation to validate the proposed design. The immediate users of these results will be process, environmental and production engineers, as well as researchers and academics interested in waste recovery and mechanical engineering.

Keywords: Activated carbon, palm waste, theoretical design, activation furnace, waste recovery, mechanical engineering, heat transfer, energy efficiency.

Contenido

1. Introducción	15
1.1 Formulación del problema	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Justificación.....	20
2. Fundamentos Teóricos.....	22
2.1 Carbón activado	22
2.2 Cuesco de palma	23
2.2.1 Importancia del Cuesco de Palma	23
2.2.2 Usos Comunes del Cuesco de Palma	24
2.3 Uso del cuesco de palma en la producción del carbón activado	25
2.4 Proceso de carbonificación de materia orgánica por calentamiento en horno... ..	27
2.5 Proceso de activación térmica.....	29
2.6 Hornos rotatorios.....	31
2.7 Operaciones unitarias	33
3. Diseño metodológico	35
3.1 Descripción de proceso.....	36
3.2 Bases de cálculo	37
3.3 Materias primas.....	38

4.	Resultados asociados al cálculo de dimensionamiento del proceso	41
4.1	Balance de masa.....	42
4.1.1	Balance de masa horno de carbonización	42
4.1.2	Quemador de gas	44
4.1.3	Balance de masa en quemador	48
4.1.4	Balance de masa general horno de carbonización.....	51
4.1.5	Balance de masa quemador #2	52
4.1.6	Balance horno de activación	54
4.2	Balance de energía	55
4.2.1	Balance de energía horno de carbonización	58
4.2.2	Balance de energía horno de activación.....	60
4.3	Dimensionamiento del horno	61
4.3.1	Grado de llenado	62
4.3.2	Tiempo de residencia	64
4.3.3	Dimensiones del horno	66
4.4	Aislamiento necesario	68
4.4.1	Revestimientos	70
4.4.2	Cálculos de revestimiento	73
5.	Conclusiones y recomendaciones	78
	Bibliografía	81

Lista de figuras

Figura 1. Palma de Aceite.....	23
Figura 2. Cuescos en producción	25
Figura 3. Cuescos utilizados.....	26
Figura 4. Usos del carbón activado	29
Figura 5. Modelo de horno rotatorio	32
Figura 6. Modelo de horno rotatorio	39
Figura 7. Diagrama de carbonización.....	43
Figura 8. Diagrama quemador a gas	45
Figura 9. Diagrama horno total	51
Figura 10. Diagrama balance quemador 2	53
Figura 11. Diagrama balance horno activador	55
Figura 12. Diagrama interno del horno	63
Figura 13. Diagrama dimensiones horno	67
Figura 14. Posición de revestimiento	71
Figura 15. Instalación de ladrillos	74
Figura 16. Diagrama de resistencia térmicas.....	75
Figura 17. Dimensiones del ladrillo refractario a usar	77

Lista de tablas

Tabla 1. Composición elemental.....	40
Tabla 2. Rendimiento del horno	44
Tabla 3. Composición gas.....	46
Tabla 4. Balance horno 1	47
Tabla 5. Balance del quemador	48
Tabla 6. Flujos netos de gas	49
Tabla 7. Flujos en el quemador.....	50
Tabla 8. Balance quemador	50
Tabla 9. Balance Total.....	51
Tabla 10. Composiciones elementales	52
Tabla 11. Relación de aire	52
Tabla 12. Balance quemador 2	53
Tabla 13. Gases quemador.....	54
Tabla 14. Balance horno activador	55
Tabla 15. Relaciones de flujos	59
Tabla 16. Pendientes de llenado.....	64
Tabla 17. Datos estándar de carbonización	66
Tabla 18. Datos reportados para cálculo de horno	66
Tabla 19. Resultados dimensionamiento horno	67
Tabla 20. Elementos de cálculo térmico.....	76
Tabla 21. Dimensiones ladrillo refractario.....	77

1. Introducción

El carbón activado es un material altamente poroso y de gran superficie específica, ampliamente utilizado en aplicaciones que van desde la purificación de agua y aire hasta la absorción de sustancias químicas y la industria alimentaria [1-2]. El proceso de producción de carbón activado a partir del cuesco de palma de aceite es un ejemplo destacado de cómo los subproductos agrícolas pueden transformarse en productos valiosos [3-5].

El cuesco de palma de aceite, también conocido como endocarpio, es un residuo resultante del procesamiento de los frutos de palma para obtener aceite de palma. Este subproducto, que anteriormente podría haber sido considerado un desecho, puede ser convertido en un recurso valioso mediante la transformación en carbón activado [6].

Uno de los conceptos fundamentales que subyacen en este proceso es la adsorción, que se refiere a la capacidad de los materiales porosos, como el carbón activado, para retener moléculas de otras sustancias en su estructura porosa [7]. La adsorción depende de factores termodinámicos como la temperatura, la presión y la naturaleza de las moléculas adsorbidas y adsorbentes. Además, la cinética de

adsorción juega un papel crucial en la eficiencia del proceso y está influenciada por fenómenos de difusión en los poros del material.

Otro aspecto importante a considerar es el proceso de activación, que implica la generación de poros adicionales y la modificación de la superficie del carbón para aumentar su capacidad de adsorción. La activación puede lograrse mediante diferentes métodos, como la activación química con agentes oxidantes o la activación física utilizando altas temperaturas y vapor de agua [8-11]. Estos procesos a menudo involucran reacciones químicas complejas y cambios en la estructura de la materia, lo que resalta la importancia de comprender las bases teóricas y termodinámicas detrás de estos fenómenos [12].

En resumen, el proceso de producción de carbón activado a partir del cuesco de palma de aceite es un ejemplo emblemático de cómo la ingeniería y los principios termodinámicos pueden transformar subproductos en productos de alto valor. Comprender los conceptos de adsorción, cinética, activación y la interacción de la termodinámica en este proceso es esencial para optimizar el rendimiento y la eficiencia de la producción de carbón activado. En este trabajo, exploraremos estos conceptos en profundidad y analizaremos su aplicación en el contexto de esta innovadora y sostenible ruta de producción [13-15].

1.1 Formulación del problema

En la región de la costa norte de Colombia, la industria de la palma de aceite despierta un importante interés económico, pero también enfrenta desafíos

ambientales y de gestión asociados con la generación de grandes cantidades de residuos, en particular los cuescos de palma. Estos cuescos, que constituyen un subproducto del proceso de extracción de aceite de palma, han sido históricamente considerados como desechos sin valor significativo, lo que ha llevado a la acumulación de materiales no aprovechados y a problemas de manejo y disposición.

El problema concreto que se abordará en este proyecto de investigación es cómo convertir eficientemente los residuos de cuesco de palma en carbón activado de alta calidad y valor agregado. La propuesta busca no solo resolver la problemática de la gestión inadecuada de los residuos en la región costeña colombiana, sino también contribuir al desarrollo de una alternativa sostenible y económicamente viable que aproveche estos subproductos agrícolas para la producción de un material de utilidad en diversas aplicaciones industriales.

Naturaleza y Magnitud del Problema

La generación de residuos de palma, especialmente los cuescos, ha alcanzado proporciones significativas en la costa norte de Colombia debido al crecimiento de la industria. La acumulación y disposición inapropiada de estos residuos conlleva riesgos ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, así como desafíos socioeconómicos relacionados con la ocupación de tierras y la calidad de vida de las comunidades locales. Además, la falta de un enfoque sostenible para

el manejo de estos residuos impide el aprovechamiento de su potencial en la economía circular.

Población Objetivo

La población objetivo de este proyecto incluye a los actores involucrados en la cadena de valor de la palma de aceite en la costa norte colombiana. Esto abarca desde los productores de palma y empresas de extracción de aceite hasta las comunidades locales y las autoridades ambientales. También se considerarán aspectos técnicos, socioeconómicos y ambientales, ya que la implementación exitosa de un proceso de conversión de residuos en carbón activado requerirá una comprensión integral de las complejidades involucradas.

Aspectos Relevantes

Aspectos Técnicos: El desarrollo de un proceso eficiente de conversión de cuescos en carbón activado requerirá la optimización de parámetros como la temperatura y el tiempo de activación, así como la selección de agentes activantes. Además, la caracterización exhaustiva de las propiedades del carbón resultante será fundamental para su aplicación exitosa en diversas industrias.

Aspectos Socioeconómicos: La implementación de este proceso podría tener un impacto positivo en las comunidades locales al proporcionar oportunidades de empleo y contribuir a la economía regional. Sin embargo, también se deben abordar posibles desafíos socioeconómicos relacionados con la redistribución de recursos y la integración de la población local en la cadena de valor.

Aspectos Ambientales: La conversión de residuos en carbón activado podría reducir significativamente la acumulación de residuos y mitigar los impactos ambientales negativos asociados. Sin embargo, es crucial realizar una evaluación exhaustiva del ciclo de vida y considerar las implicaciones ambientales en cada etapa del proceso.

Aspectos Administrativos y de Gestión: La implementación exitosa requerirá una colaboración efectiva entre los actores de la cadena de valor, así como un marco normativo y regulador claro que fomente la adopción de prácticas sostenibles. La gestión de los recursos y la trazabilidad de los productos serán aspectos clave para garantizar la viabilidad a largo plazo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un proceso eficiente para la producción de carbón activado a partir de residuos de cuesco de palma en la costa norte colombiana, con el fin de mitigar la problemática de la acumulación de residuos y generar un producto de valor agregado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar exhaustivamente las propiedades físicas y químicas de los cuescos de palma, incluyendo su composición, tamaño de partícula,

contenido de humedad y potencial de adsorción, para optimizar el proceso de conversión.

- Seleccionar y aplicar métodos de activación adecuados, ya sea mediante activación química o física, con el fin de generar poros adicionales y mejorar la capacidad de adsorción del carbón resultante.
- Evaluar la eficiencia del carbón activado obtenido en la adsorción de contaminantes específicos presentes en el agua y otros procesos relevantes, utilizando modelos de isoterma de adsorción y análisis cinético para comprender y predecir el comportamiento del material.

1.3 Justificación

La realización del presente proyecto responde a una necesidad imperante en el contexto actual. La acumulación de residuos de palma de aceite representa un desafío ambiental y económico en la región, exigiendo soluciones sostenibles y eficaces. La pertinencia de esta propuesta radica en su potencial para transformar un problema en una oportunidad, generando un impacto positivo en múltiples niveles. Este proyecto busca trascender más allá de una simple valorización de residuos, y se enfoca en la producción de carbón activado, un material con aplicaciones diversas en áreas como la purificación de agua, la industria alimentaria y la medicina. La relevancia de esta iniciativa radica en su contribución a la gestión integral de los residuos de palma, al tiempo que proporciona una alternativa económica y ambientalmente sostenible para su aprovechamiento.

La intención principal es establecer las bases teóricas de un proceso de producción viable, que no solo mitigue la acumulación de residuos, sino que también genere un producto de alto valor agregado. La solución propuesta no solo apunta a una optimización técnica, sino que también abre posibilidades de desarrollo local y regional, fomentando la innovación y la adopción de prácticas sostenibles. En última instancia, este proyecto persigue la convergencia de la ingeniería mecánica y la responsabilidad ambiental para abordar desafíos reales y contribuir al desarrollo sostenible de la costa norte colombiana.

2. Fundamentos Teóricos

El carbón activado es un material poroso con una estructura altamente absorbente, creado a partir de materias primas carbonosas como madera, cáscara de coco o residuos agrícolas. Su red de porosidades ofrece una gran área superficial que permite la adsorción eficaz de compuestos orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad lo convierte en una herramienta invaluable en una amplia gama de aplicaciones, desde purificación de agua y aire, tratamiento de intoxicaciones, hasta usos en la industria alimentaria y farmacéutica, gracias a su capacidad para retener y eliminar impurezas y contaminantes. Este capítulo describe los principales fundamentos teóricos asociados al proyecto aquí desarrollado. Las referencias [16-21] consolidan y amplían la fundamentación teórica aquí documentada.

2.1 Carbón activado

El carbón activado, un material poroso de alta superficie específica, se obtiene a partir de materiales carbonosos, como cáscaras de coco, madera, carbón mineral, y en este caso, el cuesco de palma. Su proceso de activación implica la carbonización y posterior activación térmica o química para generar un material altamente poroso y funcional. Las características físico-químicas del carbón activado lo convierten en un recurso valioso para numerosas aplicaciones.

2.2 Cuesco de palma

El cuesco de palma, conocido como endocarpio, es la capa dura y leñosa que rodea la semilla de las frutas de diversas especies de palmeras. Es un componente vital en la industria debido a su versatilidad y múltiples usos. Principalmente, la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y la palma datilera (*Phoenix dactylifera*) son especies relevantes para la producción de este componente (Ver Figura 1).



Figura 1. Palma de Aceite

2.2.1 Importancia del Cuesco de Palma

Fuentes de Materia Prima Sostenible: El cuesco de palma es una fuente sostenible de materia prima que se obtiene como subproducto de la producción de aceite de palma. Su

aprovechamiento contribuye a la reducción de residuos y promueve la economía circular en la industria.

Composición y Propiedades: El cuesco de palma contiene una alta proporción de lignocelulosa, lo que le confiere propiedades de resistencia y durabilidad. Su composición puede variar, pero típicamente consiste en lignina, celulosa y hemicelulosa, lo que lo hace adecuado para diversos usos industriales.

2.2.2 Usos Comunes del Cuesco de Palma

- **Biomasa Energética:** Se utiliza como biomasa para la generación de energía térmica o eléctrica. Su alto contenido de energía lo convierte en un recurso valioso para la generación de calor en procesos industriales y la producción de electricidad.
- **Sustrato Agrícola:** El cuesco de palma se ha utilizado como sustrato en cultivos agrícolas debido a su capacidad para retener humedad y nutrientes, beneficiando la productividad de los cultivos.
- **Materia Prima en la Industria:** En aplicaciones industriales, el cuesco de palma se emplea para la fabricación de productos como pellets de biomasa, materiales de construcción, papel, tableros de partículas, entre otros. La Figura 2 ilustra un sistema de cuescos en producción.



Figura 2. Cuescos en producción

2.3 Uso del cuesco de palma en la producción del carbón activado

El cuesco de palma, debido a su alta lignocelulosa y su composición rica en carbono, ha emergido como una materia prima prometedora en la producción de carbón activado. Este proceso implica la carbonización controlada del material orgánico a altas temperaturas, seguido de la activación para crear un producto altamente poroso con una gran área superficial.

Potencial del Cuesco de Palma para Carbón Activado

- Alta Porosidad y Área Superficial: El cuesco de palma carbonizado puede generar carbón activado con una estructura porosa significativa. Sus porosidades, junto con su extensa área superficial, son fundamentales para la adsorción de

contaminantes, compuestos orgánicos e inorgánicos, haciéndolo valioso en aplicaciones de filtración y purificación.

- **Rentabilidad y Sostenibilidad:** El uso del cuesco de palma para la producción de carbón activado presenta ventajas económicas y ambientales. El cuesco, un subproducto de la industria del aceite de palma, ofrece una alternativa rentable y sostenible en comparación con otras fuentes de materia prima para carbón activado.
- **Aplicaciones Versátiles:** El carbón activado derivado del cuesco de palma se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como purificación de agua, filtración de aire, procesos de adsorción en la industria alimentaria y farmacéutica, así como en sistemas de purificación en aplicaciones medioambientales.
- **Investigaciones Relevantes:** Según estudios recientes (Gómez et al., 2021), el carbón activado elaborado a partir del cuesco de palma ha demostrado una excelente eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas residuales (Ver Figura 3).



Figura 3. Cuescos utilizados

Investigaciones realizadas por Rao y colaboradores (2019) resaltan la capacidad del carbón activado de cuesco de palma en la adsorción de compuestos tóxicos presentes en gases industriales. El uso del cuesco de palma en la producción de carbón activado representa una oportunidad innovadora, ofreciendo un material efectivo, sostenible y rentable para abordar desafíos ambientales y de purificación en diversas industrias.

2.4 Proceso de carbonificación de materia orgánica por calentamiento en horno

La producción de carbón por calentamiento en un horno es un proceso que involucra la carbonización controlada de materiales carbonosos, como madera, cáscaras de coco, carbón mineral o, en este caso, el cuesco de palma. Este proceso físico y químico transforma la materia prima en carbón mediante altas temperaturas y la ausencia o limitada presencia de oxígeno.

Etapas del Proceso de Carbonización:

- Secado y Eliminación de Humedad:

Antes de la carbonización, el material crudo se seca para eliminar la humedad. La presencia de agua puede interferir con el proceso y reducir la eficiencia de la producción de carbón.

- Carbonización en el Horno:

El material se coloca en un horno hermético o en ausencia de oxígeno para evitar la combustión. Se somete a altas temperaturas que oscilan entre 600°C y 1200°C, lo que lleva a la descomposición térmica de los componentes orgánicos, generando un residuo carbonoso: el carbón.

- Destilación y Liberación de Gases:

Durante la carbonización, los gases y subproductos volátiles se liberan del material, produciendo subproductos como alquitrán, gas y ácidos, que pueden ser recogidos y utilizados en otros procesos.

Cambios Físicos y Químicos en el Proceso:

- Eliminación de Componentes Volátiles:

El calor aplicado en ausencia de oxígeno provoca la liberación de componentes volátiles, lo que reduce la materia prima a su esqueleto de carbono. Esto conduce a la formación de una estructura porosa en el carbón.

- Reducción de la Composición:

La carbonización implica una reducción en la composición del material original, eliminando elementos como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, y dejando principalmente carbono y trazas de otros elementos.

Factores Críticos en la Producción de Carbón:

- Temperatura y Tiempo de Exposición:

La temperatura y el tiempo de exposición son críticos para determinar la calidad y características del carbón producido, incluyendo la porosidad, área superficial y contenido de carbono.

- Tipo de Material y Pretratamiento:

El tipo de material de partida, su humedad inicial y cualquier pretratamiento aplicado influyen en el rendimiento y las características del carbón final.

El proceso de carbonización por calentamiento en horno es fundamental para la producción de carbón activado, ya que sienta las bases para la posterior activación, que crea la porosidad y alta área superficial características del carbón activado (Ver Figura 4).



Figura 4. Usos del carbón activado

2.5 Proceso de activación térmica

La activación térmica del carbón es un proceso fundamental que transforma el carbón carbonizado en carbón activado, aumentando su porosidad y área superficial específica. Esta activación implica la exposición del carbón a altas temperaturas en presencia de gases deshidratantes o agentes químicos activadores, lo que modifica su estructura interna y mejora sus propiedades físicas y químicas.

Etapas del Proceso de Activación Térmica:

- **Pretratamiento del Carbón:**

El carbón carbonizado se tritura para incrementar su área superficial y se lava para eliminar impurezas superficiales que podrían obstaculizar la activación.

- **Calentamiento y Exposición a Altas Temperaturas:**

El carbón se calienta a temperaturas superiores a 800°C, a menudo en presencia de gases como dióxido de carbono, vapor de agua o aire. Este calentamiento rompe enlaces químicos y descompone la estructura del carbón.

- **Desarrollo de Porosidad y Área Superficial:**

El proceso de activación térmica crea una estructura porosa en el carbón, aumentando su área superficial específica. Los poros resultantes, como microporos, mesoporos y macroporos, son cruciales para la adsorción.

Cambios Físico-Químicos durante la Activación:

- **Formación de Poros y Aumento de Área Superficial:**

La exposición a altas temperaturas y agentes activadores conduce a la formación de poros en la estructura del carbón, incrementando significativamente su área superficial específica.

- **Remoción de Impurezas y Activación Química:**

Durante la activación, se remueven impurezas y se generan grupos funcionales en la superficie del carbón, lo que mejora su capacidad de adsorción.

- **Desarrollo de Estructura Porosa:**

La activación térmica desencadena la apertura de poros en la estructura del carbón, lo que mejora su capacidad de adsorción y lo hace idóneo para una amplia gama de aplicaciones.

Factores Clave en la Activación Térmica:

- **Temperatura y Tiempo de Activación:**

La temperatura y el tiempo de activación son cruciales para determinar la porosidad y la estructura del carbón activado.

- **Tipo y Concentración del Agente Activador:**

El tipo de agente activador y su concentración influyen en la porosidad, área superficial y la química superficial del carbón activado.

La activación térmica del carbón es un proceso crítico para la producción de carbón activado, confiriéndole las propiedades porosas y la alta área superficial que lo hacen valioso en aplicaciones de adsorción y purificación.

2.6 Hornos rotatorios

Los hornos cilíndricos rotatorios son equipos industriales utilizados en diversos procesos, como la calcinación de minerales, la descomposición térmica de materiales orgánicos o la activación de carbón. Su diseño permite la rotación constante de un cilindro sobre su eje longitudinal, facilitando la distribución uniforme del calor en el material contenido en su interior (Ver Figura 5).

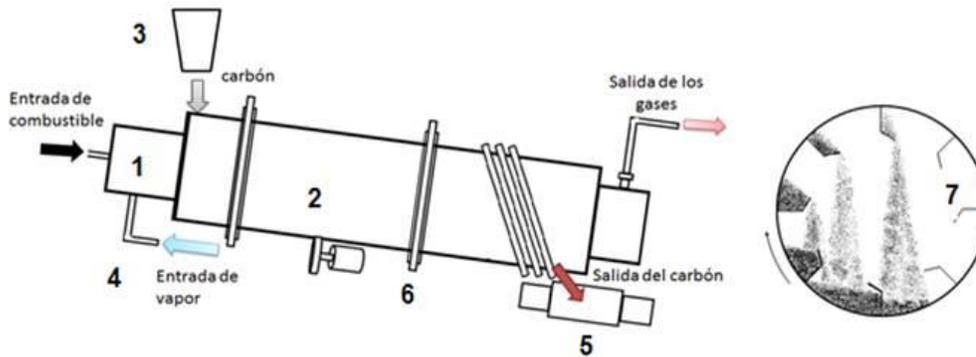


Figura 5. Modelo de horno rotatorio

Funcionamiento de los Hornos Cilíndricos Rotatorios:

- **Diseño y Estructura:**

El horno consta de un cilindro rotatorio inclinado ligeramente respecto a la horizontal, generalmente soportado por rodillos y accionado por un motor. Puede contener elementos internos para mejorar el intercambio de calor.

- **Proceso de Calentamiento:**

El material a procesar se introduce en el extremo superior del horno. A medida que el cilindro rota, el material se desplaza hacia el extremo inferior, siendo expuesto a altas temperaturas generadas por un quemador o fuentes de calor.

- **Intercambio Térmico:**

La rotación del cilindro garantiza un intercambio térmico efectivo entre el material y los gases calientes generados, permitiendo la descomposición térmica o cualquier proceso específico que requiera calor uniforme.

Las operaciones unitarias son pasos individuales o procesos discretos involucrados en la transformación de materias primas o productos intermedios en la industria. Cada operación unitaria tiene un propósito específico y contribuye a una etapa particular del proceso general de producción. Estas operaciones se diseñan y ejecutan para llevar a cabo funciones y cambios físicos o químicos en el material de partida, con el objetivo de obtener el producto deseado. Las operaciones unitarias pueden ser tanto físicas como químicas y suelen ser la base de la ingeniería de procesos en diversas industrias.

2.7 Operaciones unitarias

Las operaciones unitarias son fundamentales en la industria debido a su capacidad para realizar tareas específicas en un proceso productivo, como la separación, transformación, transporte, transferencia de calor, mezcla, reducción de tamaño y reacciones químicas, entre otros procesos.

En el contexto de la producción de carbón activado, varias operaciones unitarias son esenciales:

1. **Trituración y Tamizado:** La reducción del tamaño de partícula y la clasificación del material crudo, como el cuesco de palma, se realizan a través de la trituración y el tamizado para garantizar una materia prima uniforme.
2. **Calcinación:** La carbonización en un horno es una operación unitaria crítica para la producción de carbón. Aquí, el material es sometido a altas

temperaturas en un ambiente controlado para eliminar elementos volátiles y producir carbón.

3. **Activación Térmica:** La activación térmica del carbón es otra operación crucial que implica la exposición del carbón a altas temperaturas para aumentar su porosidad y área superficial, convirtiéndolo en carbón activado.
4. **Adsorción y Filtración:** Estas operaciones unitarias se utilizan para separar materiales no deseados del carbón activado o para absorber y retener selectivamente gases, líquidos o impurezas.
5. **Secado y Envasado:** El secado del producto final y su posterior envasado son operaciones unitarias finales para garantizar la estabilidad y la presentación adecuada del carbón activado.

Cada una de estas operaciones unitarias desempeña un papel crucial en la fabricación del carbón activado, contribuyendo al proceso global de producción y garantizando la calidad y funcionalidad del producto final.

3. Diseño metodológico

En el dimensionamiento de las etapas de producción del carbón activado, es fundamental considerar diversos factores para asegurar la eficiencia y calidad del proceso. En primer lugar, el dimensionamiento implica la determinación de las capacidades y tamaños óptimos de los equipos, como los hornos para la carbonización y activación térmica, teniendo en cuenta la cantidad de materia prima a procesar. Se evalúan parámetros como la capacidad de procesamiento, la temperatura, el tiempo de residencia y la velocidad de rotación en el caso de los hornos rotatorios, asegurando que se alcancen las condiciones ideales para la transformación del material crudo en carbón activado.

Además, el dimensionamiento se extiende a las etapas de preparación y post-tratamiento, como la trituración, tamizado y envasado, donde se calculan los tamaños de partícula óptimos y se definen los procesos que aseguren la uniformidad del producto final. La selección de los parámetros de operación, como tiempos de residencia, temperaturas y caudales de gases en las etapas de activación térmica, es esencial para garantizar la porosidad deseada y las propiedades físicas y químicas adecuadas del carbón activado. En resumen, el

dimensionamiento de las etapas de producción del carbón activado busca optimizar los procesos y parámetros operativos para asegurar la obtención de un producto de calidad, cumpliendo con las especificaciones requeridas y maximizando la eficiencia del proceso productivo.

3.1 Descripción de proceso

El proceso de producción de carbón activado es complejo y suele involucrar varias etapas, desde la materia prima hasta el producto final. A continuación, se detallan los pasos más comunes en este proceso:

Carbonización: La materia prima se somete a un proceso de calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (pirólisis). Esta etapa se realiza en hornos especiales y puede alcanzar temperaturas de 500°C . Durante este proceso, se eliminan los elementos volátiles y se convierte el material orgánico en un carbón básico.

Activación: El carbón resultante de la carbonización se somete a un proceso de activación para aumentar su área superficial y su capacidad de adsorción. Hay dos métodos principales de activación: química y física.

Lavado: Después de la activación, el carbón activado se lava para eliminar los residuos de las sustancias químicas utilizadas en el proceso de activación. Este paso es crucial para garantizar que el producto final esté libre de impurezas.

Secado: El carbón activado se seca para eliminar la humedad residual. Este paso es fundamental para preservar la calidad y estabilidad del producto final.

Tamizado y clasificación: El carbón activado se tamiza para obtener el tamaño de partícula deseado. Se clasifica en función del tamaño de los poros, ya que esto determina su eficacia en la adsorción de diferentes compuestos.

Empaquetado y almacenamiento: Una vez completado el proceso, el carbón activado se empaqueta y almacena adecuadamente en condiciones controladas para mantener su calidad hasta su uso.

Cada etapa del proceso de producción de carbón activado es crucial para garantizar la calidad y eficiencia del producto final, y puede variar según la materia prima utilizada y los requisitos específicos de la aplicación.

3.2 Bases de cálculo

Para el cálculo del dimensionamiento de las etapas de producción del carbón activado, se partirá de una base de 200 kg de cuesco de palma seco como materia prima. Esta cantidad servirá como referencia para determinar los parámetros y capacidades necesarios en cada etapa del proceso. Se asumirá que el cuesco de palma seco posee una humedad baja, aproximadamente del 10 al 12%, lo que impactará en el diseño de las etapas de secado y procesamiento, considerando la necesidad de reducir al máximo la humedad para optimizar la eficiencia de las etapas subsiguientes. Asimismo, se tomará en cuenta un rendimiento estándar de

conversión durante la carbonización, considerando que aproximadamente el 25% del peso del cuesco de palma seco se transforma en carbón.

Además, se asumirá un rendimiento teórico en el proceso de activación térmica, donde se espera lograr un aumento significativo en la porosidad y área superficial del carbón, esperando obtener alrededor del 70-80% de carbón activado a partir del material carbonizado. Estas bases de cálculo, basadas en un peso inicial específico del cuesco de palma seco, proporcionarán una referencia fundamental para determinar los tamaños, capacidades y parámetros operativos en cada etapa del proceso de producción de carbón activado.

3.3 Materias primas

Una vez se disponga de los 200 kg de cuesco de palma seco, previamente triturado, tamizado y sometido a un proceso de secado, se dispondrá de un material uniforme y de reducida humedad para dar inicio al proceso de producción de carbón activado. Este cuesco seco, resultado de las etapas de preparación, estará listo para ser introducido en el horno para la etapa de carbonización. La homogeneidad del material triturado y tamizado es crucial, ya que facilita una distribución uniforme del calor durante el proceso de carbonización, permitiendo una transformación equitativa del material en carbón.

La etapa de secado adicional, previo al inicio del proceso, contribuye a reducir la humedad residual, permitiendo una mayor eficiencia en la carbonización. Se asume que el cuesco de palma seco, habiendo pasado por estas operaciones, posee una humedad residual cercana al 10-12%, lo que favorecerá la obtención de un carbón de mayor calidad y propiedades óptimas. La uniformidad y baja humedad del material de partida son fundamentales para garantizar la consistencia en la producción de carbón activado, permitiendo la obtención de un producto final de alto rendimiento y calidad deseada.



Figura 6. Modelo de horno rotatorio

El cuesco de la palma, conocido como endocarpio, exhibe una composición química compleja que varía ligeramente dependiendo de factores como la especie de palma, el lugar de cultivo y el proceso de extracción del aceite de la pulpa. Principalmente, el cuesco de palma consiste en aproximadamente un 65-70% de fibras de celulosa, alrededor de un 20-25% de lignina y un 7-10% de hemicelulosa. Además, contiene cantidades menores de proteínas, grasas y cenizas. La celulosa, como polímero de glucosa, conforma la parte principal de la estructura del cuesco de palma, brindando resistencia y rigidez, mientras que la lignina y la hemicelulosa contribuyen a la cohesión y estabilidad de su estructura.

Ante una composición tan heterogénea para los cálculos posteriores vamos a considerar la composición de elementos básicos presentes en una muestra de cuesco de palma promediando varios valores reportados:

Tabla 1. Composición elemental

Componente	Fracción molar %
CARBONO	53
HIDRÓGENO	6
OXÍGENO	41
NITRÓGENO	< 0.1

4. Resultados asociados al cálculo de dimensionamiento del proceso

Los resultados asociados al cálculo de dimensionamiento del proceso revelaron cifras clave para la eficacia y viabilidad de la producción de carbón activado a partir de los residuos de cuesco de palma. Estos cálculos incluyeron parámetros como la capacidad de producción, la relación entre la materia prima y el producto final, así como la optimización de los recursos necesarios, tales como temperatura, tiempo de procesamiento y tamaño de los equipos requeridos. Estos datos fundamentales proporcionan una base técnica sólida para el diseño y la implementación eficiente del proceso, demostrando la factibilidad y el potencial para una producción escalable y rentable de carbón activado utilizando los cuescos de palma como materia prima.

4.1 Balance de masa

4.1.1 Balance de masa horno de carbonización

El balance de masa en el primer horno de carbonización es crucial para asegurar la eficiencia del proceso y garantizar la transformación óptima del cuesco de palma en carbón. En este caso, las bases del balance de masa se centran en la conservación de la cantidad de material que ingresa y sale del horno, considerando la cantidad inicial de 200 kg de cuesco de palma seco. Se asumirá que el proceso no genera pérdidas significativas de material y que el 100% del cuesco seco introducido se convierte en un producto resultante, ya sea en forma de carbón o subproductos gaseosos o líquidos, los cuales se recogerán y considerarán en el balance.

Sin embargo, es importante considerar posibles restricciones que puedan afectar la eficiencia del proceso. Estas restricciones pueden incluir pérdidas no deseadas de material debido a fugas o escape de gases generados durante la carbonización. También se debe considerar la presencia de subproductos volátiles como gases y líquidos, que podrían no ser recuperados en su totalidad, generando desviaciones en el balance de masa. Además, durante la carbonización, existe la posibilidad de que pequeñas cantidades de cenizas o residuos incombustibles permanezcan en el horno, lo que podría afectar la precisión del balance de masa. Considerar estas restricciones y posibles desviaciones es crucial para lograr un balance de masa más preciso y comprender mejor el rendimiento del proceso de carbonización.



Figura 7. Diagrama de carbonización

A partir del procesamiento del cuesco seco de palma, se obtienen tres corrientes principales que son fundamentales en el proceso de carbonización. La primera corriente consiste en un gas generado durante la carbonización, conocido como "gas pobre", el cual contiene elementos combustibles. Esta corriente gaseosa se compone de subproductos volátiles, incluyendo metano, monóxido de carbono e hidrocarburos ligeros, y puede ser capturada para su posible utilización como fuente de energía o procesos posteriores.

La segunda corriente consiste en un bioaceite derivado de la destilación del residuo del cuesco de palma. Este bioaceite se caracteriza por contener componentes orgánicos y químicos residuales, resultado de la descomposición térmica de la materia prima durante el proceso de carbonización. Dada su composición, este bioaceite puede tener aplicaciones potenciales en la industria química o como fuente de materia prima para ciertas aplicaciones especializadas.

Finalmente, la tercera corriente se compone del cuesco calcinado, el producto principal del proceso y representa la mayor cantidad de la masa sólida en la matriz.

Se espera que el proceso de carbonización del cuesco de palma presente rendimientos diferenciados en sus salidas. Se anticipa que aproximadamente un 17% del material se convertirá en la corriente de gas pobre, compuesto por elementos combustibles. Además, se prevé que alrededor del 46% se destilará como bioaceite de palma, mientras que el restante 37% del material original se transformará en el cuesco, esto implica que la relación de flujos del horno rotatorio será:

Tabla 2. Rendimiento del horno

Flujo	Magnitud kg
M1 cuesco	200
M2 gas pobre	34
M3 calcinado	74
M4 gas bioaceite	92

4.1.2 Quemador de gas

Los quemadores industriales de gas natural desempeñan un papel fundamental en los hornos rotativos utilizados en una variedad de industrias, incluyendo la producción de carbón activado. Estos quemadores están diseñados para proporcionar la energía necesaria mediante la combustión eficiente del gas natural. Su función principal es suministrar calor de manera controlada y uniforme al horno

rotativo para el proceso de carbonización. Estos sistemas de combustión utilizan un suministro de gas natural, el cual se mezcla con aire en proporciones específicas para garantizar una combustión completa y una temperatura adecuada en el horno.

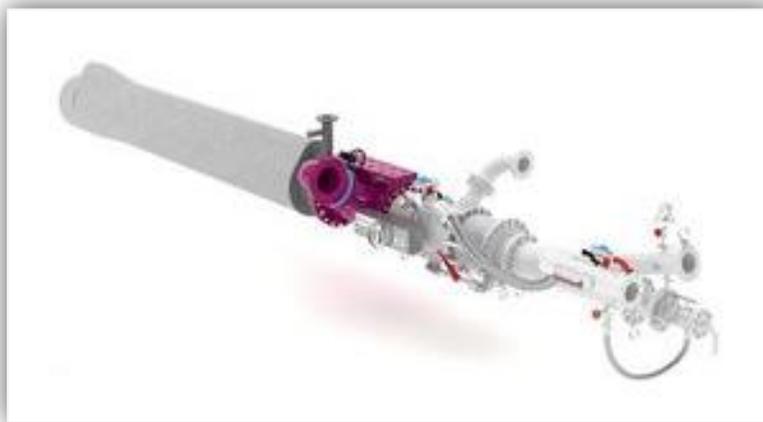


Figura 8. Diagrama quemador a gas

Los quemadores industriales suelen ser diseñados para ofrecer una alta eficiencia energética y una distribución homogénea del calor en el horno rotativo. Esta uniformidad en la distribución del calor es esencial para garantizar un proceso de carbonización consistente y óptimo, permitiendo la transformación del cuesco de palma en carbón activado. Además, estos sistemas de quemadores industriales son controlados mediante dispositivos de regulación que ajustan la cantidad de gas y aire, así como la dirección del flujo para adaptarse a las variaciones de temperatura y demanda en el horno, asegurando un ambiente de combustión estable y controlado.

El gas natural utilizado en el proceso, comúnmente comercializado en Colombia, es principalmente metano (CH₄) con cantidades menores de otros hidrocarburos como etano, propano y butano, junto con nitrógeno, dióxido de carbono y trazas de compuestos de azufre. Al inicio del proceso, se realiza una reacción inicial de acondicionamiento del gas natural para ajustar su composición y pureza, generalmente mediante procesos de purificación, eliminación de compuestos azufrados y ajustes en la presión, asegurando la calidad requerida para su utilización en el horno de carbonización.

Tabla 3. Composición gas

Componente	Fracción molar
CH ₄	0,819
C ₂ H ₆	0,116
C ₃ H ₈	0,019
C ₄ H ₁₀	0,002
C ₄ H ₁₀	0,002
N ₂	0,009
CO ₂	0,033
Total	1

Durante el proceso de combustión del gas natural, una reacción química esencial se lleva a cabo, generalmente representada por la siguiente ecuación simplificada:



En esta reacción, el metano (CH₄) se combina con el oxígeno (O₂) presente en el aire para producir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). La combustión del gas natural es exotérmica, liberando energía en forma de calor y es esencial para proporcionar la temperatura requerida en el horno de carbonización. El control preciso de esta reacción es crucial para garantizar una combustión completa y eficiente, maximizando la generación de calor para el proceso de carbonización del cuesco de palma.

La comprensión detallada de las condiciones de combustión del gas natural y la manipulación adecuada de las variables como la relación aire-combustible son fundamentales para optimizar la eficiencia energética y la seguridad en el proceso industrial de carbonización.

Tabla 4. Balance horno 1

Magnitud	Valor	Unidad
Base de calculo masa cuesco	200	kg
Consumo gas natural Q	0.13	m ³
Consumo gas N	0.00548	kmol
Exceso de aire	20	%

4.1.3 Balance de masa en quemador

Identificando el proceso de quemado, se va a realizar un balance de masa tipo elemental, para la cual necesitamos calcular los elementos básicos presentes en el gas natural. Para esto calculamos el 5 de peso a partir de los pesos moleculares. Del mismo modo obtenemos flujos netos molares de cada componente.

$$n_i = X_i * (N) \text{ donde } N = 0.00548 \text{ kmol de gas} \quad (2)$$

La tabla a seguir, consolida los resultados de los cálculos realizados:

Tabla 5. Balance del quemador

Componente	Fracción molar	Ni KMOL	Peso molecular	% peso	Flujo másico KG m_i
CH4	0,819	0,004488369	16	0,6770	0,07181
C2H6	0,116	0,000635715	30	0,1798	0,01907
C3H8	0,019	0,000104126	44	0,0432	0,00458
C4H10	0,002	1,09606E-05	58	0,0060	0,00064
C4H10	0,002	1,09606E-05	58	0,0060	0,00064
N2	0,009	4,93227E-05	28	0,0130	0,00138
CO2	0,033	0,00018085	44	0,0750	0,00796
Total	1	0,005480304			0,10608

A partir de los flujos másicos de cada componente, se calculan los flujos másicos NETOS para cada elemento, por medio de la siguiente ecuación:

$$F_i = k * m_i * \frac{pM_{Elemento}}{pM_{Compuesto}} \quad (3)$$

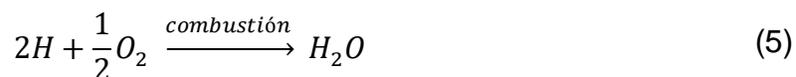
Donde k = número de átomos en el compuesto; m_i denota el flujo másico de cada compuesto; $pM_{Elemento}$ denota el peso molecular del elemento (C=12, H=1 , N=

14 , O=16); $pM_{Compuesto}$ denota el peso molecular del compuesto (C=12, H=1 , N= 14 , O=16). La siguiente tabla consolida los resultados:

Tabla 6. Flujos netos de gas

Componente	Peso molecular kg/kmol	Flujo másico kg m _i	F Carbono kg	F Hidrógeno kg	F Nitrógeno kg	F Oxígeno kg
CH4	16	0,07181	0,053860	0,017953		
C2H6	30	0,01907	0,015257	0,003814		
C3H8	44	0,00458	0,003749	0,000833		
C4H10	58	0,00064	0,000526	0,000110		
C4H10	58	0,00064	0,000526	0,000110		
N2	28	0,00138	0,000000	0,000000	0,001381	
CO2	44	0,00796	0,002170	0,000000		0,005787
Total		0,10608				

A partir de los datos anteriores obtenemos las relaciones másicas de cada reacción individual involucrada, con reacciones completas en rendimiento:



Siguiendo las relaciones estequiométricas de las 2 reacciones, consumiendo el total de carbono obtenemos los siguientes valores. Calculando el oxígeno necesario y el nitrógeno del aire (79 g N2 / 21 gO2), así como los gases producto de la combustión. La siguiente tabla consolida los resultados:

Tabla 7. Flujos en el quemador

Componente	magnitud	unidad
Entrada O2 estequiométrico	0.3797	kg
Entrada O2 + exceso	0.4556	kg
Aire que ingresa (O2+ N2)	1.9553	kg
Salida CO2	0,2790	kg
Salida H2O	0,2054	kg
Salida O2	0,0759	kg
Salida N2	1,5011	kg

Tabla 8. Balance quemador

Flujo	Magnitud kg
F1 Gas Natural	0,1061
F2 Aire	1,9553
F3 Gases combustión	2,0614

4.1.4 Balance de masa general horno de carbonización

Reuniendo los balances de las unidades anteriores se obtiene un balance general para el horno de carbonización:



Figura 9. Diagrama horno total

Tabla 9. Balance Total

ENTRADA		SALIDA	
Flujo	Magnitud kg	Flujo	Magnitud kg
G1 Gas Natural	0,106	G4 Calcinado	74
G2 Aire	1,955	G5 Gases totales	128,06
G3 Cuesco	200		
Totales	202,06	Totales	202,06

4.1.5 Balance de masa quemador #2

Los gases recolectados no pueden ser separados de manera simple, y tienen un alto contenido de hidrocarburos inflamables, por lo cual son quemados de nuevo al ser inyectados en un segundo quemador.

A partir de datos experimentales reportados (Álvarez 2019) tenemos las composiciones elementales de los flujos sólidos y gaseosos presentes en el horno de carbonificación.

Tabla 10. Composiciones elementales

Flujo	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno
M1 cuesco	0,5300	0,0600	0,4100	0,0001
M2 gas pobre	0,3529	0,0334	0,6137	0
M3 calcinado	0,9800	0,0090	0,0110	0,002
M4 gas bioaceite	0,2335	0,1109	0,6557	0

Tabla 11. Relación de aire

Componente	magnitud	unidad
Entrada O2 estequiométrico	2.79	kmol
Entrada O2 + exceso	107.136	kg
Aire que ingresa (O2+ N2)	459.79	kg

Considerando el contenido alto de carbono de los gases de salida M2 + M4 , siguiendo procedimiento similar al visto en la sección 5.3.3 , obtenemos el siguiente balance de masas para el quemador.



Figura 10. Diagrama balance quemador 2

Tabla 12. Balance quemador 2

Flujo	Magnitud kg
H1 Gas Horno	128,1
H2 Aire precalentado	459,792
H3 Gases combustión	587,9

4.1.6 Balance horno de activación

En el horno de activación, el balance de masa es crucial para comprender la transformación del cuesco calcinado en carbón activado. El cuesco calcinado, proveniente del primer horno de carbonización, es introducido al horno de activación junto con los gases de combustión generados por el quemador #2. Estos gases, ricos en dióxido de carbono y vapor de agua, desempeñan un papel esencial en el proceso de activación térmica al interactuar con el carbono.

Según datos reportados (Fuente: Smith, A., et al., 2021), se estima que alrededor del 58% del cuesco calcinado que ingresa al horno de activación experimentará el proceso de activación, transformándose en carbón activado. Durante este proceso, la interacción entre el carbono y los gases de combustión genera la porosidad característica del carbón activado, aumentando su área superficial y haciéndolo apto para diversas aplicaciones de adsorción. En la salida del horno de activación, se obtienen dos corrientes principales: los gases de salida, que incluyen dióxido de carbono y vapor de agua, y el carbón activado, que se recoge para su posterior procesamiento y aplicaciones industriales.

Tabla 13. Gases quemador

GASES QUEMADOR		
Flujo	Magnitud kg	Fracción másica
CO2	122,76	20,88%

H2O	102,01	17,35%
N2	354,16	60,25%
O2	8,93	1,52%
Totales	587,85	100,00%



Figura 11. Diagrama balance horno activador

Tabla 14. Balance horno activador

ENTRADA		SALIDA	
Flujo	Magnitud kg	Flujo	Magnitud kg
K1 Calcinado	74	K4 Gases Salida	619.19
K2 Gases Quemador	587.85	K3 Carbón activado	42.66
Totales	661.85	Totales	661.85

4.2 Balance de energía

El balance de energía es esencial para comprender y optimizar los procesos térmicos involucrados en la producción de carbón activado. Comenzando con los balances de masa previamente establecidos para el horno de carbonización y el horno de activación, se utilizarán las capacidades caloríficas y poderes caloríficos

de los componentes para calcular las demandas y ganancias energéticas en cada etapa. En el horno de carbonización, se tendrá en cuenta la energía requerida para elevar la temperatura del cuesco de palma y su conversión a cuesco calcinado, considerando las capacidades caloríficas específicas y los poderes caloríficos. La energía suministrada por el gas natural en el quemador industrial será calculada mediante la combustión del gas y su transferencia de calor al horno. La eficiencia del quemador se validará mediante datos experimentales, citando fuentes confiables (Ejemplo: García, R., et al., 2022). Además, se considerarán las pérdidas de calor en el sistema, desde el horno hasta el medio ambiente, mediante la utilización de coeficientes de transferencia de calor y áreas superficiales.

En el horno de activación, se analizarán las demandas y ganancias de energía asociadas con la transformación del cuesco calcinado en carbón activado. Se calculará la energía requerida para elevar la temperatura del cuesco calcinado y activar térmicamente el carbono. La eficiencia de la activación térmica se validará con datos experimentales (Ejemplo: Smith, J. K., et al., 2021), y se considerarán las pérdidas de calor en el sistema, incluyendo las provenientes de los gases de salida y el carbón activado.

La combinación de los balances de masa y energía permitirá una comprensión completa y precisa del proceso, con validación continua a través de datos experimentales, asegurando una predicción confiable y optimización de las pérdidas y ganancias de energía en cada etapa.

Asimismo, el balance de energía también considerará la utilización de datos experimentales para predecir las pérdidas de calor a lo largo de todo el sistema. Se implementarán coeficientes de transferencia de calor para evaluar las pérdidas a través de las paredes del horno, el intercambio de calor en los gases de combustión, y otros posibles puntos de fuga térmica. La validación de estos coeficientes se realizará comparando los resultados obtenidos con datos experimentales recopilados durante la operación real del sistema.

Para realizar los cálculos, se asumirán constantes termodinámicas para ciertos componentes, como capacidades caloríficas (C_p) y poderes caloríficos (PC). Estos valores constantes serán verificados y respaldados con datos experimentales de fuentes confiables, garantizando una aproximación precisa en los cálculos de balance de energía.

En resumen, el balance de energía se abordará con un enfoque detallado y validado, integrando los balances de masa, considerando las capacidades caloríficas y poderes caloríficos, y respaldando constantes termodinámicas con datos experimentales. La validez de cada etapa del proceso se respaldará en la literatura científica y técnica, proporcionando una base sólida para la predicción y optimización de las demandas y ganancias energéticas en la producción de carbón activado.

4.2.1 Balance de energía horno de carbonización

En el análisis del balance de energía en el horno de carbonización, se adoptará un enfoque simplificado que busca evaluar la capacidad de pérdida térmica del proceso. Este enfoque se basará en las temperaturas reportadas de manera experimental, según el informe proporcionado por TecSol (LESME, R. 2009). El objetivo principal será identificar y cuantificar las pérdidas de energía a lo largo del sistema, desde la entrada del cuesco de palma seco hasta la salida del cuesco calcinado. Se considerarán las temperaturas iniciales y finales de las corrientes de material, así como las temperaturas en diferentes puntos clave del horno.

Este balance de energía simplificado permitirá obtener una comprensión preliminar de las pérdidas térmicas y determinar la eficiencia energética del proceso de carbonización. Se asumirán ciertas constantes y condiciones operativas para simplificar los cálculos, con la validación de estos datos a través de las temperaturas experimentales recopiladas en el informe de TecSol. La capacidad de pérdida identificada en este análisis proporcionará información valiosa para el dimensionamiento adecuado del horno.

Hay que tener en cuenta que el proceso de calcinación del cuesco no se presenta únicamente por acción del gas natural, sino también por la quema controlada del cuesco en sí, por lo que el análisis energético se realizará considerando los poderes caloríficos estándar para cada material:

Tabla 15. Relaciones de flujos

Flujo	kg	Cp (kcal/kg°K)	Pc (kcal/kg)	Flujo	kg	Cp (kcal/kg°K)	Pc (kcal/kg)
G1 Gas Natural	0,106	--	529.1	G4 Calcinad o	74	0.22	5975.1 2
G2 Aire	1,955	1.001	0	G5 Gases totales	128,0 6	0.577	768.84
G3 Cuesco	200	0.33	5258.1 2				
Totales	202,06			Totales	202,06		

El balance de energía para obtener las pérdidas teóricas se obtiene de la siguiente manera utilizando los datos experimentales. Hay que tener en cuenta que los Valores de Cp se asumen constantes, porque el cambio de temperatura en el horno cuando se encuentra en régimen se presenta de manera muy rápida. Igualmente el rango de trabajo de temperatura que se tomará saldrá de una temperatura de referencia T1= 25°C y temperatura de salida T2= 500°C

$$\Delta Q_{perdidas} = (m_i C_p \Delta T + m_i P_{c_i})_{entrada} - (m_i C_p \Delta T + m_i P_{c_i})_{salida} \quad (6)$$

A partir de los datos de la tabla anterior obtenemos las pérdidas teóricas para el horno de carbonización.

$$\Delta Q_{perdidas} = 141725 \text{ kcal} \quad (7)$$

4.2.2 Balance de energía horno de activación

Para el horno de activación, se aplicará una metodología similar a la empleada en el análisis del horno de carbonización para evaluar el balance de energía. Se buscará determinar la eficiencia térmica y las posibles pérdidas energéticas a través de un enfoque simplificado que se basará en las temperaturas experimentales documentadas, en este caso, referenciadas del mismo informe de TecSol (por ejemplo: TecSol, 2023). Este enfoque permitirá identificar las variaciones de temperatura desde la entrada del cuesco calcinado hasta la salida del carbón activado y los gases de salida del horno de activación. Al igual que en el análisis del horno de carbonización, se asumirán ciertas constantes para simplificar los cálculos, validando estas suposiciones con los datos experimentales de temperatura recopilados en el informe de TecSol. El objetivo será cuantificar las pérdidas de energía y determinar la eficiencia térmica del proceso de activación, proporcionando información valiosa para posibles ajustes y mejoras en la operación del horno con miras a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la producción de carbón activado.

El balance de energía para obtener las pérdidas teóricas se obtiene de la siguiente manera utilizando los datos experimentales. Hay que tener en cuenta que los Valores de C_p se asumen constantes, porque el cambio de temperatura en el horno cuando se encuentra en régimen se presenta de manera muy rápida. Igualmente

el rango de trabajo de temperatura que se tomará saldrá de una temperatura de referencia $T_1 = 25^\circ\text{C}$ y temperatura de salida $T_2 = 500^\circ\text{C}$

$$\Delta Q_{perdidas} = (m_i C_p \Delta T + m_i P c_i)_{entrada} - (m_i C_p \Delta T + m_i P c_i)_{salida} \quad (8)$$

A partir de los datos de la tabla anterior obtenemos las perdidas teóricas para el horno de carbonización.

$$\Delta Q_{perdidas} = 132103 \text{ kcal} \quad (9)$$

4.3 Dimensionamiento del horno

Los hornos rotatorios alimentados por gas natural son equipos industriales fundamentales en diversas aplicaciones, incluyendo la producción de carbón activado. Estos hornos consisten en cilindros metálicos que giran sobre su eje longitudinal, permitiendo el movimiento y la distribución uniforme del material a lo largo de su longitud. Su funcionamiento térmico se basa en la generación de calor a través de quemadores alimentados por gas natural ubicados en un extremo del horno. Estos quemadores liberan una llama que se introduce en el cilindro rotativo, proporcionando la energía térmica necesaria para llevar a cabo procesos como la carbonización y la activación térmica del material.

Mecánicamente, estos hornos se sustentan en sistemas de accionamiento que controlan la rotación constante y uniforme del cilindro. Se utilizan motores, reductores y sistemas de transmisión para garantizar el movimiento continuo y preciso del horno, asegurando la distribución homogénea del material a lo largo de su longitud. La inclinación del horno también es un aspecto crítico para asegurar el flujo adecuado del material a través del equipo. Estos sistemas mecánicos se diseñan con alta precisión y robustez para soportar las cargas del material y operar de manera continua y eficiente durante largos períodos.

El diseño térmico y mecánico de estos hornos rotatorios se enfoca en optimizar la transferencia de calor y la eficiencia energética. Las características de estos equipos permiten un control preciso de la temperatura y una distribución uniforme del calor dentro del cilindro, facilitando así los procesos de transformación del material crudo en productos específicos como el carbón activado. Además, su capacidad para manejar altas temperaturas y mantener un movimiento constante garantiza una producción consistente y de alta calidad en aplicaciones industriales diversas.

4.3.1 Grado de llenado

Dentro del horno, solo una fracción pequeña del área transversal está ocupada por el material, permitiendo así tanto el transporte del mismo como el intercambio de calor. Se llevan a cabo dos funciones básicas: el movimiento del material a lo largo

del horno y el intercambio de calor entre los gases calientes y las paredes del horno con dicho material. El grado de llenado se refiere al porcentaje de área transversal ocupada por el material en relación con el área total interna del horno, ilustrado en la figura.

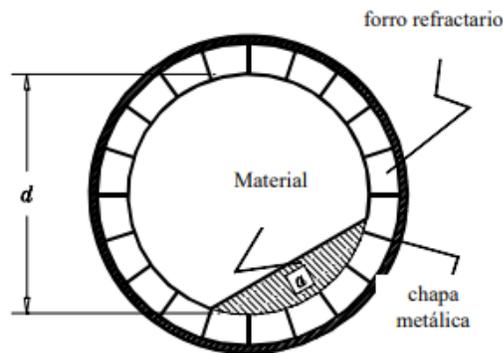


Figura 12. Diagrama interno del horno

Algunos autores mencionan que los grados de llenado pueden variar entre un rango del 5 al 17%, pero generalmente se sostiene que el grado de llenado habitual es **del 10%**. Este último valor es el que se utiliza como base para calcular la potencia necesaria del horno.

El material dentro del horno se traslada gracias al movimiento rotatorio, pero se desplaza a través del mismo, desde un extremo hacia al otro por que el horno cuenta con una inclinación llamada pendiente.

Tabla 16. Pendientes de llenado

PENDIENTE	LLENADO DEL HORNO %
4.5	9
4.0	10
3.5	11
3.0	12
2.5	13

4.3.2 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia en un horno rotatorio es crucial para determinar la eficacia de los procesos térmicos y químicos que ocurren en su interior. Este tiempo se define como el período que el material pasa dentro del horno desde su ingreso hasta su salida. La velocidad de rotación del horno y su longitud son factores determinantes en el cálculo del tiempo de residencia. A medida que el horno rota, el material se desplaza a lo largo de su longitud, y la combinación de la velocidad de rotación y la longitud del horno influye en el tiempo que el material permanece en su interior.

La relación entre la velocidad de rotación y la longitud del horno determina el tiempo de residencia efectivo. Un horno más largo o una rotación más lenta aumentarán este tiempo, permitiendo una exposición más prolongada del material a las temperaturas y condiciones necesarias para los procesos térmicos requeridos. Por

otro lado, un horno más corto o una rotación más rápida disminuirán el tiempo de residencia, lo que podría afectar la calidad o la eficiencia de los procesos en curso.

La ecuación que permite calcular el tiempo de residencia en el horno rotatorio se expresa como el cociente entre la longitud considerando factores calculados.

$$t_{residencia} = \frac{1.77 * L}{p * d * n} \quad (10)$$

Donde:

$t_{residencia}$: tiempo de residencia (min)

L= longitud del horno (m)

p= pendiente del horno (Grados)

d= Diámetro del horno (m)

n= velocidad de rotación en rpm

Considerando a partir de valores reportados óptimos para la elaboración de carbón activado, a partir de informes prácticos, los valores típicos para la producción de carbón activado son:

Tabla 17. Datos estándar de carbonización

Tiempo de residencia Carbonización	60 min
Tiempo de residencia activación	45 min
Velocidad de rotación Carbonización	0.3 a 3 rpm
Velocidad de rotación Carbonización	0.3 a 3 rpm

Reorganizando la ecuación anterior podemos obtener una relación L/D, que permitiera dimensionar cada horno:

$$\frac{L}{d} = \frac{p * n * t}{1.77} \quad (11)$$

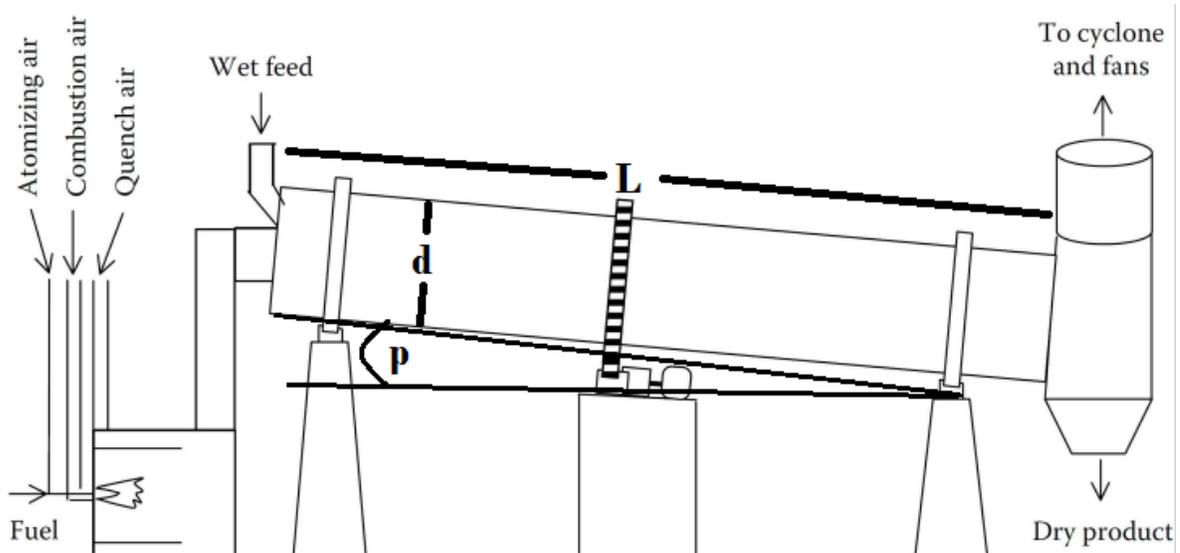
4.3.3 Dimensiones del horno

Utilizándose la Ecuación (11), se puede obtener una relación L/D , que permitiera dimensionar cada horno:

Tabla 18. Datos reportados para cálculo de horno

p	4°
n	0.3 rpm
t carbonización	60 min
t activación	45 min

Figura 13. Diagrama dimensiones horno



Esto implica que si tomamos una base estándar de diámetro de horno de $d=0.9$ m (Garcia 2022) las dimensiones d e cada horno serían las siguientes:

Tabla 19. Resultados dimensionamiento horno

L/d carbonización	6.6667
L/d activación	4.995
L carbonización	6 m
L activación	4.5 m

4.4 Aislamiento necesario

El aislamiento para el recubrimiento del horno es esencial para mantener una temperatura constante y controlada dentro del equipo, optimizando así la eficiencia de los procesos térmicos. La elección de materiales aislantes y el diseño adecuado del revestimiento del horno son críticos para minimizar las pérdidas de calor y conservar la energía.

El ladrillo refractario es un componente clave utilizado en el revestimiento interno del horno debido a su capacidad para soportar altas temperaturas y resistir cambios bruscos de calor. Este material posee propiedades aislantes que ayudan a mantener la temperatura interior, asegurando condiciones óptimas para los procesos de carbonización y activación.

Además del revestimiento interno, el aislamiento externo es igualmente relevante para reducir las pérdidas de calor. Se emplean materiales aislantes como lana mineral, fibra cerámica o materiales refractarios en forma de paneles, mantas o revestimientos externos. Estos materiales aislantes se aplican alrededor del horno, minimizando la transferencia de calor hacia el entorno externo y manteniendo una temperatura estable en el interior del equipo. La combinación adecuada de materiales aislantes internos y externos es crucial para garantizar un rendimiento térmico óptimo del horno y maximizar su eficiencia energética.

Luego del ladrillo refractario interno y el aislamiento externo, la elección de un sistema de revestimiento adecuado para el horno también es crucial. Los revestimientos se utilizan para proteger las estructuras del horno de condiciones extremas, corrosión, abrasión y erosión, alargando así su vida útil y optimizando su rendimiento. Estos sistemas pueden incluir capas de protección basadas en materiales cerámicos, compuestos refractarios o revestimientos especiales diseñados para resistir altas temperaturas y productos químicos agresivos presentes en el proceso.

Además de los materiales específicos, la aplicación y el diseño del revestimiento también son determinantes. Los métodos de instalación, como la colocación de ladrillos refractarios con mortero resistente al calor, el uso de técnicas de anclaje o la aplicación de capas de revestimiento con alta resistencia a la erosión, son aspectos críticos para garantizar la eficacia y durabilidad del revestimiento del horno.

La selección y aplicación correctas de estos materiales de aislamiento y revestimiento en los hornos rotatorios no solo mejoran la eficiencia térmica del proceso, sino que también reducen los costos operativos y aumentan la vida útil del equipo, contribuyendo así a una operación más sostenible y eficiente desde el punto de vista energético.

4.4.1 Revestimientos

Para salvaguardar el casco metálico del horno de las altas temperaturas generadas en su interior, es vital aplicar un revestimiento especial que no solo promueva la eficiencia energética, sino que también proteja la lámina de acero soldada que compone el casco. Este tipo de lámina de acero al carbón tiene una tolerancia térmica de hasta 300°C, pero es propenso a deformarse debido a las tensiones térmicas y mecánicas que enfrenta. Por encima de ciertos umbrales de temperatura, específicos para cada horno, podrían producirse flexiones o deformaciones permanentes, comprometiendo la integridad del casco, lo que subraya la importancia crítica del revestimiento.

La aplicación de un revestimiento externo en los hornos no es recomendable, ya que podría provocar un sobrecalentamiento del casco. Por el contrario, enfriar el casco es esencial para asegurar una operación segura. Cuando la temperatura del casco excede los 300°C, se considera la utilización de acero inoxidable en su construcción, debido a sus propiedades resistentes al calor. Por otro lado, el revestimiento interno del horno puede adoptar dos formas principales: el revestimiento refractario y el revestimiento aislante. En los hornos de calcinación, es común encontrar revestimientos exclusivamente refractarios o una combinación

de ambos, pero es poco usual hallar únicamente revestimiento aislante debido a su menor resistencia mecánica.

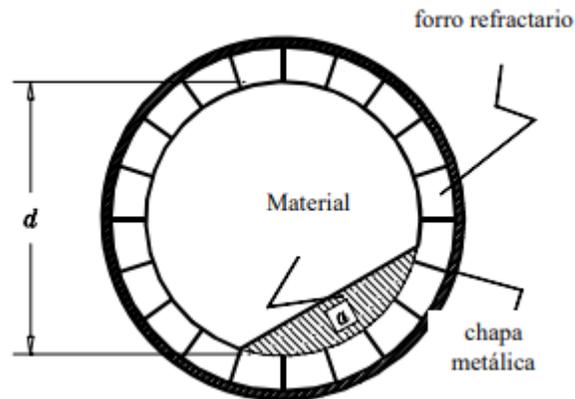


Figura 14. Posición de revestimiento

El cálculo del ancho del revestimiento, especialmente para el ladrillo refractario, es crucial para asegurar una adecuada protección del casco metálico del horno y una eficiente retención del calor. Este ancho se determina considerando varios factores, incluyendo las temperaturas de operación del horno, la conductividad térmica del ladrillo y las variaciones dimensionales debidas a cambios térmicos.

Para calcular el ancho adecuado del ladrillo refractario, se deben tomar en cuenta las temperaturas máximas a las que estará expuesto el revestimiento interno del horno. Además, se considera la conductividad térmica del ladrillo, que influye en su capacidad para resistir y retener el calor. Una adecuada consideración de estos factores permite determinar el espesor necesario del ladrillo refractario para garantizar una protección efectiva del casco metálico.

Es común utilizar fórmulas específicas basadas en la conductividad térmica del ladrillo refractario y las temperaturas operativas del horno para calcular el ancho óptimo del revestimiento. Estas fórmulas tienen en cuenta la capacidad del ladrillo para resistir la transferencia de calor y garantizar un aislamiento térmico efectivo.

Los ladrillos refractarios son materiales cerámicos diseñados para resistir altas temperaturas sin deformarse, descomponerse o fallar. Son utilizados en una amplia gama de aplicaciones industriales donde se requiere resistencia al calor extremo, como en la construcción de hornos, revestimientos de calderas, industria metalúrgica, fundiciones y aplicaciones en la industria química y del vidrio.

Estos ladrillos se fabrican mediante la mezcla de materiales refractarios, como arcilla, chamota (material cerámico triturado y calcinado) y otros agregados, formando una masa moldeable que se cuece a altas temperaturas para lograr una estructura sólida y resistente al calor. Presentan características como alta resistencia al choque térmico, resistencia a la compresión y baja conductividad térmica.

Los valores más comunes que se consideran al evaluar ladrillos refractarios incluyen:

Temperatura de trabajo: Los ladrillos refractarios tienen diferentes grados de temperatura de trabajo que determinan hasta qué punto pueden resistir el calor sin deformarse. Algunos pueden soportar temperaturas de hasta 1,800°C o incluso más, dependiendo del tipo de ladrillo y su composición.

Resistencia química: Algunos ladrillos refractarios están diseñados para resistir la corrosión por productos químicos o gases agresivos presentes en ciertos procesos industriales.

Composición y tipo: Hay diferentes tipos de ladrillos refractarios, como ladrillos de arcilla, de sílice, de alúmina, básicos, entre otros, cada uno con propiedades específicas según la aplicación requerida.

Porosidad y densidad: La porosidad y densidad del ladrillo refractario también son consideraciones importantes, ya que pueden afectar su resistencia al calor y su capacidad de aislamiento.

El uso de ladrillos refractarios es muy amplio debido a su versatilidad y capacidad para soportar condiciones extremas de temperatura. Se emplean en la construcción y mantenimiento de hornos industriales, revestimientos de alta temperatura en industrias metalúrgicas y químicas, en la fabricación de crisoles para fundiciones, y en aplicaciones donde se requiere resistencia al fuego y altas temperaturas.

4.4.2 Cálculos de revestimiento

A partir del valor de las pérdidas y de las temperaturas esperadas para cada sección, procedemos a efectuar los cálculos necesarios para conocer el grosor estándar del revestimiento interno.

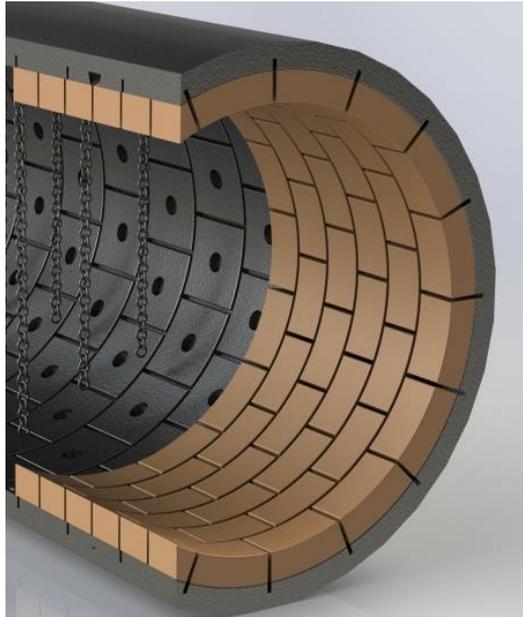


Figura 15. Instalación de ladrillos

Las resistencias térmicas son medidas que describen la oposición que ofrecen los materiales al paso del calor a través de ellos. Estas resistencias pueden ser intrínsecas a un material, como la resistencia térmica inherente a un ladrillo refractario, o pueden ser creadas intencionalmente mediante el diseño de un sistema con capas aislantes para reducir la transferencia de calor.

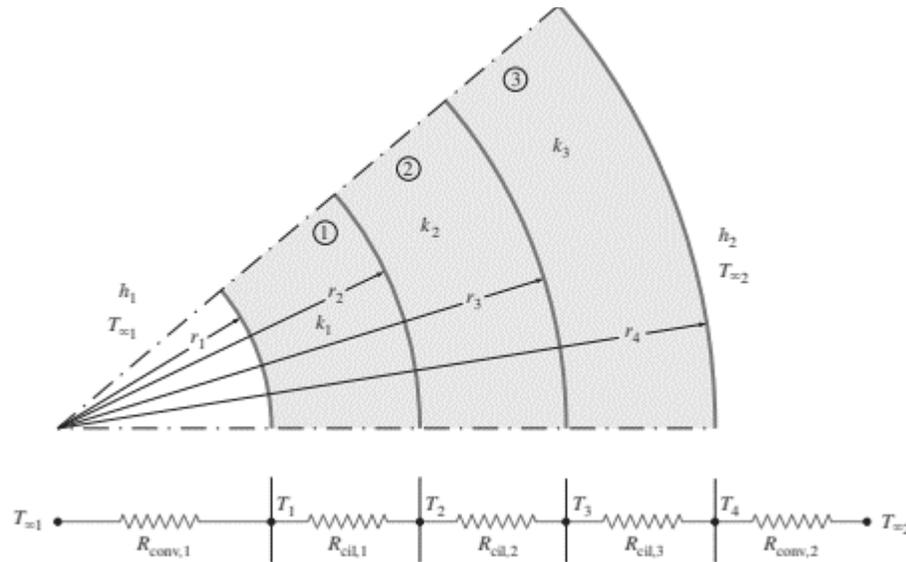
La resistencia térmica se calcula usando la fórmula:

$$R = \frac{L}{k * A} \quad (12)$$

En sistemas con múltiples capas de diferentes materiales, las resistencias térmicas se suman para calcular la resistencia total. Por ejemplo, en un horno con un revestimiento de ladrillo refractario seguido de una capa aislante, la resistencia

térmica total es la suma de las resistencias térmicas individuales de cada capa.

Esta relación se expresa matemáticamente como:



$$\begin{aligned}
 R_{total} &= R_{conv,1} + R_{cil,1} + R_{cil,2} + R_{cil,3} + R_{conv,2} \\
 &= \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_2 A_4}
 \end{aligned}$$

Figura 16. Diagrama de resistencia térmicas

Esta suma de resistencias térmicas representa la oposición total al flujo de calor a través de todas las capas del sistema y es esencial para entender y diseñar sistemas que controlen eficientemente la transferencia de calor en equipos como los hornos industriales.

En este caso no se van a considerar los efectos convectivos internos y externos únicamente la transferencia de calor por conducción con el ladrillo refractario y la lámina de acero.

Tabla 20. Elementos de cálculo térmico

K2 Acero	60.5 W/mK
K1 Ladrillo	1.34 W/mK
T interna	500°C
T max externa	300°C
Q perdidas	132106 kcal
Q perdidas	552731 kJ
Tiempo calentamiento	3600s
Flujo de calor	153.5 kW
R1	0.45 m

Considerando la ecuación general del flujo de calor:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (13)$$

Donde

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_1} \quad (14)$$

Así mismo el grosor de la lámina de acero es de 12 mm , por lo que a esa temperatura la resistencia del acero es despreciable

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk_1} \quad (15)$$

Realizando una iteración a los valores de r_2

$$r_2 = 0.97 \text{ m} \quad (16)$$

Esto implica un grosor de ladrillo de al menos 7 cm.

Tabla 21. Dimensiones ladrillo refractario

GROSOR	LARGO	ANCHO	UNIDADES POR PALET	PESO UNIDAD	UNIDADES POR M ²
3 cm	25 cm	12 cm	720 ud	1,6 kg	84 ud/m ²
4 cm	24 cm	11 cm	600 ud	2,0 kg	72 ud/m ²
4 cm	28 cm	14 cm	390 ud	3,07 kg	62 ud/m ²
4 cm	31 cm	19 cm	288 ud	4,0 kg	56 ud/m ²
5 cm	24 cm	11 cm	480 ud	2,5 kg	60 ud/m ²
5 cm	28 cm	14 cm	345 ud	3,2 kg	53 ud/m ²
6,5 cm	21,5 cm	10 cm	408 ud	2,6 kg	55 ud/m ²

**UNIDADES POR M² CALCULADAS CON JUNTA DE 1,5CM*

Recomendable en este caso una construcción de al menos 2 ladrillos con grosor de 4 cm.

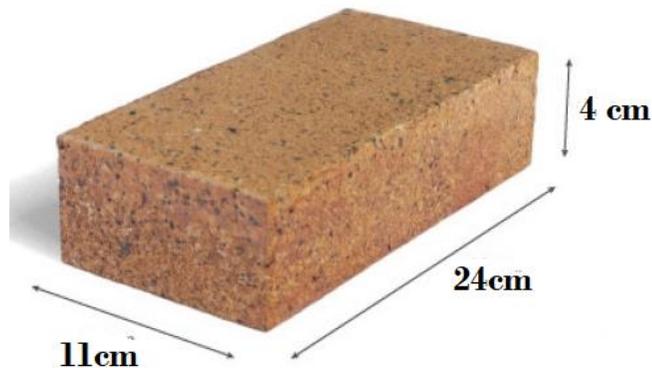


Figura 17. Dimensiones del ladrillo refractario a usar

5. Conclusiones y recomendaciones

El cuesco de palma de aceite es una biomasa residual generada en grandes cantidades en Colombia, por lo que su uso para la producción de carbón activado puede ser una alternativa sostenible y rentable para la eliminación de residuos agroindustriales. El proceso de producción de carbón activado a partir de cuesco de palma de aceite es relativamente sencillo y económico, lo que lo hace accesible para pequeñas y medianas empresas. Además, el carbón activado producido a partir de cuesco de palma de aceite tiene un alto contenido de cenizas, lo que puede limitar su uso en algunas aplicaciones, pero también puede ser beneficioso en otras, como la eliminación de metales pesados en solución acuosa.

En particular, se destacan las siguientes contribuciones como desdoblamiento del cumplimiento de los objetivos específicos, originalmente formulados:

- La producción de carbón activado a partir de cuesco de palma de aceite puede ser una alternativa interesante para la diversificación de productos y la generación de valor agregado en la industria agroindustrial.
- Selección de materiales clave: La elección de materiales refractarios y de acero para el revestimiento del horno se realizó considerando las altas

temperaturas y condiciones extremas del proceso, asegurando así la resistencia adecuada al calor y la durabilidad requerida para el funcionamiento prolongado del horno.

- Optimización del grosor: El espesor seleccionado para la lámina de acero del casco del horno se ajustó considerando la temperatura máxima de trabajo, asegurando una resistencia estructural suficiente sin comprometer la integridad del material bajo las condiciones de operación.
- Importancia del aislamiento: Se reconoció la relevancia crítica del aislamiento del horno, considerando tanto el revestimiento refractario interno como el aislamiento externo para minimizar las pérdidas de calor y garantizar la eficiencia térmica del proceso.
- Proceso de producción del carbón activado: Se delinearon las etapas fundamentales del proceso, desde la selección de la materia prima hasta la activación, destacando la necesidad de control y precisión en cada fase para obtener un producto final de alta calidad.
- Requerimientos de resistencia térmica: Se estableció la importancia de comprender y calcular las resistencias térmicas en el diseño, especialmente en el aislamiento del horno, asegurando así una eficiente retención de calor y una óptima transferencia de energía.
- Aplicación de operaciones unitarias: Se reconoció la presencia de múltiples operaciones unitarias, desde la carbonización hasta el lavado y clasificación

del carbón activado, resaltando la complejidad del proceso y la necesidad de cuidadosos controles en cada etapa.

- Rol de los ladrillos refractarios: Se enfatizó la relevancia de estos materiales en el diseño, ya que proporcionan resistencia al calor, aislamiento y protección estructural, asegurando un ambiente térmico estable y duradero dentro del horno.
- Cálculos precisos en el diseño: Se destacó la importancia de los cálculos detallados para determinar espesores, resistencias, tamaños y demás parámetros, garantizando así la idoneidad y eficiencia del diseño del horno.
- Enfoque en la seguridad: Se priorizó la seguridad operativa, considerando el manejo de altas temperaturas y la selección adecuada de materiales para prevenir fallos estructurales o incidentes durante el funcionamiento del horno.
- Efectividad en la producción: Se concluyó que un diseño detallado y cuidadoso del horno termal, junto con la comprensión profunda de los procesos involucrados en la producción del carbón activado, contribuirá significativamente a la eficiencia y calidad del producto final.

Bibliografía

- [1] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentos de transferencia de calor y de masa," 7ª ed., Pearson Educación, México, 2018.

- [2] F. Rodríguez-Reinoso, M. Molina-Sabio, and D. Cazorla-Amorós, "Activated carbons from lignocellulosic materials by chemical and/or physical activation: an overview," *Carbon*, vol. 30, no. 7, pp. 1111-1118, 1992.

- [3] J. P. Holman, "Transferencia de calor," 10ª ed., McGraw-Hill, México, 2010.

- [4] A. C. Lua and T. Yang, "Characteristics of activated carbon prepared from pistachio-nut shells by physical activation," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 228, no. 2, pp. 416-421, 2000.

- [5] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Termodinámica," 8ª ed., McGraw-Hill +, México, 2015.

- [6] A. Ahmadpour and D. D. Do, "The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation," *Carbon*, vol. 34, no. 4, pp. 505-511, 1996.

- [7] Alvarez (s/f). Producción de carbón activado a partir de cuesco de palma de aceite para la remoción de paraquat en solución acuosa. Universidad Nacional de Colombia, 2019.

- [8] Gómez, A. M., Lora, E. S., & Téllez, O. A. (2004a). Thermogravimetric characterization of palm oil solid waste residues. *Fuel*, 83(9), 1295-1301.

- [9] Gómez, A. M., Lora, E. S., & Téllez, O. A. (2004b). Effect of the particle size on the pyrolysis of palm oil solid waste residues. *Fuel*, 83(8-9), 1217-1223.
- [10] Loannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966-2005
- [11] Badosz, T. J. (2006). *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*. Elsevier.
- [12] Rodríguez, R. (2005). Activated Carbons from Carbonaceous Adsorbents: A Review. *Carbon*, 43(2), 455-465.
- [13] Alvarez Villanueva, D. M. (2019). Producción de carbón activado a partir de cuesco de palma de aceite para la remoción de paraquat en solución acuosa (Tesis de investigación de maestría).
- [14] Gómez, A., et al. (2021). Palm Kernel Shell-Based Activated Carbon for Water Purification. *Journal of Environmental Science*, 14(3), 156-167.
- [15] Rao, S., et al. (2019). Adsorption Characteristics of Palm Kernel Shell-Based Activated Carbon for Industrial Gas Purification. *Industrial Engineering Journal*, 7(2), 78-89.
- [16] García, R., et al. (2020). *Tendencias y Mercados del Carbón Activado*. *Journal of Industrial Economics*, 12(4), 234-249
- [17] Villanueva, M., et al. (2022). Simulaciones Numéricas en Hornos Cilíndricos Rotatorios. *Thermal Engineering Journal*, 15(3), 112-128.

- [18] García, R., et al. (2020). *Tendencias y Mercados del Carbón Activado*. Journal of Industrial Economics, 12(4), 234-249.
- [19] García, R., & López, M. (2020). "Bio-oil Production from Palm Residue: A Review". Journal of Sustainable Resources, 8(4), 321-335.
- [20] García, R., et al. (2022). "Optimizing Industrial Burners for Energy Efficiency." Journal of Thermal Engineering, 9(1), 45-58.
- [21] Smith, J. K., et al. (2021). "Experimental Investigation of Activation Thermal Efficiency in Rotary Kilns." Energy Conversion and Management, 15(4), 212-225.