

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# **Producto de laboratorio Puesta a punto de reactor de torrefacción para biomasa**

Julián Andrés Betancur Martínez

Ingeniería Electromecánica

## **Asesores**

Qco. MSc, PhD, Pedro Nel Alvarado Torres  
Ing. Biológica, Carolina Restrepo Londoño

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de  
Antioquia  
Medellín, Colombia  
2023

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

El objetivo de este trabajo fue realizar actividades para poner a punto un reactor de tornillo para la torrefacción de biomasa. La torrefacción es un pretratamiento termoquímico que ocurre en un rango de temperaturas entre 200 y 300 °C a presión atmosférica en atmósferas inertes y oxidantes, cuyo fin está asociado a descomponer y despolimerizar los componentes macromoleculares lábiles de la biomasa. Mediante este pretratamiento, se obtiene una biomasa más resistente a la degradación biológica, se logra incrementar el contenido de carbono fijo y por consiguiente, se logra incrementar el poder calorífico; de esta manera se puede obtener un material viable para su valorización energética.

En el trabajo de grado, bajo la modalidad de producto obtenido en laboratorio, se utilizó un reactor a escala de banco compuesto por un motor de inducción trifásico conectado a un reductor de velocidad y acoplado a través de una transmisión por cadena a un tornillo sin fin confinado en un tubo de acero inoxidable. El reactor cuenta con cuatro controladores de temperatura y cuatro resistencias eléctricas, sensores de temperatura RTD Pt 100, un variador de velocidad para controlar la velocidad de avance del tornillo sin fin y de la biomasa, trampas de líquidos o alquitranes y un recipiente de recolección de sólidos.

En el producto obtenido en el laboratorio se realizaron las siguientes actividades para poner a punto el reactor de torrefacción: acople del recipiente de recolección y de las trampas de alquitranes, elaboración de curvas de calibración de flujo del gas de torrefacción y del flujo másico de la biomasa, ajuste de los parámetros PID de los controladores de temperatura, y torrefacción de una biomasa reportando los rendimientos másicos y líquidos. La biomasa que se estudió es un residuo de la producción de champiñones conocida como champiñonaza o compost agotado de champiñones y al finalizar este trabajo se obtuvo un montaje de puesta a punto de un sistema de torrefacción el cual quedó plasmado mediante un instructivo que indica cual es el paso a seguir para que el reactor funcione en óptimas condiciones.

**Palabras clave:** Torrefacción, Rendimiento, Biomasa, Compost, Temperatura, Champiñonaza, Instructivo, Oxidante y Poder calorífico.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Son muchas las personas que han ayudado y contribuido a finalizar este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer a Pedro Nel Alvarado Torres director, docente y asesor del trabajo de grado él fue el primero que creyó en esta investigación, me apoyo de manera personal e institucional y me alentó para que concluyera el estudio. También agradezco a Carolina Restrepo estudiante de maestría y segunda asesora del proyecto.

Gracias a la institución universitaria ITM por haberme permitido formar en ella, gracias a todas las personas que fueron participes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos ustedes con sus aportes para que se viera reflejado la culminación de mi paso por la Institución universitaria. Gracias a mis padres, que fueron mis mayores promotores durante este proceso. Gracias a Dios, que fue mi principal apoyo y motivador para cada día continuar sin tirar la toalla.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## ACRÓNIMOS

---

**A:** Amperios

**AEBIOM:** Asociación Europea de Biomasa

**Co:** Monóxido de carbono

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**DSC:** Calorimetría diferencial de barrido

**DTA:** The Dutch Torrefaction Association (Asociación Neerlandesa de Torrefacción)

**Entalpía (H):** Es una medida de la cantidad de energía térmica (calor) en un sistema químico. Se mide en J mol<sup>-1</sup> o kJ mol<sup>-1</sup>.

**FTIR:** Espectroscopia por transformada de Fourier

**Hp:** Caballos de fuerza

**HZ:** Hertz

**N:** Nitrógeno

**NO<sub>x</sub>:** Óxido nítrico

**O:** Oxígeno

**PC:** Poder calorífico

**PID:** Controlador proporcional integral y derivativo

**RETIE:** Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

**RTD:** Detector de temperatura resistivo

**SMC:** Spent mushroom compost (Compost de champiñones usado)

**SO<sub>x</sub>:** Óxido de azufre

**T:** Temperatura

**TGA:** Análisis termogravimétrico

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## TABLA DE CONTENIDO

---

1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
3. METODOLOGÍA.....	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	30
REFERENCIAS .....	31
ANEXOS.....	32

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

El presente trabajo de grado nace al observar la necesidad de poner a punto un reactor de torrefacción la cual radica en optimizar su funcionamiento y obtener resultados consistentes y deseables en la producción de biocarbón y otros productos durante el proceso de torrefacción. Algunas de las razones clave que se tuvieron en cuenta al momento para llevar a cabo esta puesta a punto fueron:

- **Eficiencia Energética:** Ajustar y optimizar los parámetros del reactor puede ayudar a maximizar la eficiencia energética del proceso, reduciendo el consumo de recursos como el combustible o la electricidad.
- **Calidad del Producto:** La puesta a punto permite controlar y mejorar la calidad del producto final, como el biocarbón o los gases liberados durante la torrefacción, asegurando que cumplan con los estándares deseados.
- **Reducción de Residuos:** Optimizar el proceso puede minimizar la generación de residuos y subproductos no deseados, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental.
- **Seguridad:** Asegurar que el reactor esté funcionando de manera segura es fundamental para prevenir accidentes y riesgos para los operadores y el entorno.
- **Costos de Producción:** La puesta a punto puede ayudar a controlar los costos de producción al minimizar desperdicios y maximizar la eficiencia, lo que puede ser especialmente importante en aplicaciones industriales y comerciales.
- **Cumplimiento Normativo:** Garantizar que el reactor cumpla con las regulaciones y estándares de seguridad y ambientales es esencial para evitar sanciones legales y garantizar la operación ética.
- **Investigación y Desarrollo:** En entornos de investigación, la puesta a punto permite ajustar el reactor para experimentos específicos y la obtención de datos confiables.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

En otras palabras, la puesta a punto de un reactor de torrefacción es esencial para lograr resultados consistentes, eficiencia y calidad del producto, al tiempo que se garantiza la seguridad y el cumplimiento normativo en diversas aplicaciones, desde la producción comercial de biocarbón hasta la investigación en el campo de la biomasa.

Por otro lado, el efecto del hombre en el planeta ha ocasionado consecuencias perjudiciales en el equilibrio natural, lo que nos lleva a pensar que el desarrollo y el crecimiento poblacional no va a un ritmo sustentable con el medio ambiente. El uso de combustibles fósiles conlleva a las emisiones de gases a la atmósfera los cuales presentan efectos negativos en la salud de las personas, así como en el medio ambiente, por lo cual se hace necesario la transición hacia fuentes más limpias de obtención de energía. “La biomasa residual se usa para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a que es material “neutro”, una opción destacada es la conversión de biomasa residual a energía, pues la biomasa constituye un combustible con impacto menor respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>”. (Fredy E. Jaramillo P. N., 2022) y además, permite solucionar problemas asociados a su disposición final, ya que existen varias fuentes de generación de biomasa residual, que pueden ser aprovechables. Sin embargo, la biomasa respecto al carbón presenta inconvenientes asociados a su menor poder calorífico, mayor contenido de humedad, mayor degradación biológica y dificultad en el almacenamiento. En este sentido procesos termoquímicos como la torrefacción, permiten aportar a la solución de estas dificultades vía la modificación de algunas de las propiedades de biomasa cruda. En este producto de laboratorio se realizaron actividades para poner a punto un reactor de torrefacción de biomasa (Austin, 2010) a escala de banco que opera con un tornillo sin fin. Las actividades comprendieron la construcción de curvas de calibración del controlador de flujo para el ingreso de gases a la atmósfera de la torrefacción, así como la calibración del flujo másico para el compost agostado de champiñones en función de la velocidad de giro del tornillo (Awasthi, 2020). También se realizaron montajes mecánicos del sistema de recolección de líquidos y sólidos del reactor, ajuste de parámetros PID (Controlador proporcional integral y derivativo) de los controladores de temperatura y ensayos experimentales de torrefacción que incluyeron caracterizaciones fisicoquímicas de la biomasa posterior a este proceso.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.2 Objetivo general

Poner a punto un reactor de tornillo a escala de banco para la torrefacción de biomasa.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Afinar el control de temperatura y de tiempo de residencia en un reactor de torrefacción de biomasa.
- Ajustar sistemas de recolección de muestras y de caracterización de corrientes de entrada y de salida de materiales en el reactor de torrefacción de biomasa.

## 1.3 Organización del trabajo

El presente trabajo se encuentra dividido en 5 secciones principales en las cuales se describe el proceso paso a paso de lo que se realizó para poder hacer la puesta a punto de reactor de torrefacción para biomasa a entregar; la primera de estas secciones muestra la introducción al trabajo y se expone el por qué es necesario desarrollar este producto de laboratorio. En la segunda sección se plantea el marco teórico del trabajo, en el cual se describen los conceptos necesarios para comprender en un nivel básico de conocimiento, el proceso de puesta a punto de un reactor de torrefacción para la biomasa. En la tercera sección se exhibe la metodología empleada en el cálculo de los balances de masa y balance de energía al igual que los pasos que se siguieron desde su planteamiento como idea, hasta su puesta a punto. La cuarta sección muestra los resultados obtenidos luego de la puesta a punto del reactor de torrefacción de biomasa, la cual deja un producto de laboratorio el cual es un instructivo, que guíara al estudiante para poder poner a punto el reactor. Finalmente, en la quinta sección se presentan las conclusiones del producto de laboratorio y adicionalmente se proponen recomendaciones y trabajos futuros para la optimización del trabajo realizado.



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

El aprovechamiento de biomasa residual por medio de la torrefacción puede traer grandes beneficios económicos y ambientales al someter la biomasa a un tratamiento térmico, con el objetivo de descomponer parcialmente la misma y así obtener como producto final un material sólido, seco y ennegrecido llamado bio char o bio carbón que puede ser utilizado como almacenaje para co-combustión de carbón y gasificación termoquímica. En gran medida, la torrefacción es aún la recién llegada a este sector, pues surgió en torno a 2007 como el método para obtener el «combustible renovable sólido del futuro». Se ha presentado como una alternativa a la combustión de carbón pulverizado y también presenta buenas perspectivas para aplicaciones de calefacción a mediana escala (Cordis, 2014). Al referirnos a este sector hablamos de la bioenergía aprovechable. Recientemente se han hecho muchos estudios para analizar y evaluar las propiedades de los materiales obtenidos mediante la torrefacción para diferentes materias primas o biomasa.

La biomasa es cada vez más considerada como una muy prometedora fuente de energía renovable debido a sus abundantes reservas, fácil disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, las materias primas de biomasa (especialmente la biomasa lignocelulósica) generalmente, poseen algunas deficiencias intrínsecas, tales como alto contenido de oxígeno, alta propensión a la absorción de humedad y problemas de utilización, como la baja eficiencia de conversión, la complejidad de los productos de conversión teniendo en cuenta que la operación que más energía consume es el secado (secado supuesto del 50% al 10% de humedad), que constituye más del 40% de la energía consumida (MarcadorDePosición1) y la dificultad para su utilización a gran escala, así como la alta susceptibilidad a la autoignición. Las anteriores desventajas ocasionan un aumento en el costo de manejo y dificultades para su almacenamiento y transporte, por lo tanto, con el fin de realizar la utilización eficiente se ha encontrado que el pretratamiento de torrefacción es efectivo para realizar la desoxigenación y mejora de las propiedades fisicoquímicas de la biomasa obteniendo sólidos de alta calidad en los productos.

Los productos de la torrefacción de biomasa lignocelulósica son aproximadamente 70% al 90% sólidos 6-35% líquidos 1-10% gas (en masa). Esto debido a que el costo de logística y manipulación de la materia prima puede ser muy elevado y es una de las principales razones del alto costo de producir combustibles líquidos y energía a partir de materias primas lignocelulósicas. En la producción de rastrojos de maíz y etanol, los costos de materia prima y manejo juntos pueden representar hasta el 36% del costo de producción. El tamaño de partícula y la humedad son factores importantes en las reacciones químicas por lo cual se debe realizar procesos de molienda, sí como de secado, ya que, por ejemplo se ha encontrado que con mayor contenido de humedad aumenta la pérdida de masa de la muestra afectando los rendimientos energéticos de los sólidos. La biomasa torrefactada tiende a ser color marrón negro con una apariencia similar a la de la materia prima original con mayor tendencia de fluidez que la biomasa sin procesar.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Otras propiedades físicas de importancia que son promovidas durante la torrefacción son la compresibilidad, triturabilidad e hidrofobicidad; sin embargo, la biomasa torrefactada es más propensa a la dispersión aérea que la biomasa no tratada, lo cual puede representar un riesgo respiratorio o de combustión lo que implica que se deben tomar precauciones adecuadas. Una solución a este problema es densificar las biomásas después de la torrefacción mediante el proceso de peletización, el cuál es un proceso de someter a altas presiones el material sólido. (González Barragán, 2007). Con la finalidad de compactar la biomasa mejorando su manipulación, costos de transporte y almacenamiento (L. A. Rodríguez Romero, 2022), así consume menos energía cuando se realiza con material torrefactado en comparación con la biomasa fresca, por lo cual, se ha propuesto la torrefacción y peletización simultaneas como un posible enfoque que podría reducir el uso total de energía para generar un producto torrefactado y densificado, dado que la hemicelulosa crea enlaces estructurales dentro del material lignocelulósico y su descomposición produce un material con menor resistencia y más fácil de triturar.

El producto torrefactado ideal tendría una pérdida de energía mínima y exhibirá una triturabilidad y una densidad energética mejoradas. Generalmente, las condiciones que favorecen una mayor energía dan como resultado una mayor pérdida de masa y por lo tanto menor retención de energía. Teniendo en cuenta lo anterior, un combustible torrefactado ideal necesitará optimizar estos dos parámetros: la pérdida de masa, y la retención de energía. Aunque se tiene conocimiento de las condiciones óptimas para la torrefacción las cuales consisten en altas temperaturas y bajos tiempos de residencia afectando la descomposición térmica de la biomasa (Luis Ernesto Arteaga-Pérez, 2015) para obtener como resultado un material con buena molienda, bajo costo de procesamiento y alto contenido de energía. De manera alterna para lograrlo los autores querían intentar una combinación de torrefacción con peletización, proceso alternativo para la producción de biopellets más conocido como proceso TOP (Bergman, 2005).

Se han registrado varias patentes relacionadas con la torrefacción de biomasa, sin embargo, aún no hay instalaciones a escala comercial que integren torrefacción y peletización. (Luis Ernesto Arteaga-Pérez, 2015, pág. 8)

Sin embargo, no todos los estudios coinciden en este sentido, especialmente en términos de rendimiento energético de la biomasa torrefactada, debido a que estos estudios teóricos iniciales sobre el proceso TOP revelaron que los costes totales de producción no aumentan necesariamente, mientras que la calidad superior de los biopellets reduce los costes de transporte y transformación en la central eléctrica. (Bergman, 2005, pág. 9)

Por otro lado, los subproductos del proceso de torrefacción consisten en el líquido y

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL</b> <b>TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

los productos gaseosos del proceso, como CO, CO<sub>2</sub> y vapor de agua. Las emisiones de NO<sub>x</sub> deberían de ser insignificantes debido a la baja temperatura de procesamiento, mientras que las emisiones de SO<sub>x</sub> también deberían ser despreciables debido a los niveles bajos de azufre en la mayoría de las biomásas lignocelulósicas. Sin embargo, todavía este tema requiere estudio con el objetivo de determinar los mecanismos de reacción principales.

En cuanto a la aplicación de la tecnología comercialmente, voceros de la industria mencionan que la tecnología de torrefacción está funcionando y está disponible, pero la aceptación no ha sido tan rápida como se esperaba. Expertos, investigadores y fabricantes se reunieron en Bruselas en el año 2014 para discutir el progreso y las perspectivas de la torrefacción en la reciente conferencia de la Asociación Europea de Biomasa (AEBIOM) (CORDIS, 2014). En esta conferencia se describió que es necesario promover estructuras de apoyo de los estados miembros para que la tecnología de torrefacción prospere, además se mencionó que son necesarios estudios para resolver los retos técnicos asociados a su implementación. Teniendo en cuenta lo anterior en este producto de laboratorio se realizaron actividades para poner a punto un reactor de torrefacción de biomasa a escala de banco el cual opera con un tornillo sin fin, para determinar los principales cuellos de botella de este tipo de reactores y los retos asociados a su puesta a punto.

Si bien sabemos que hay un balance de masa que se debe determinar también es necesario determinar el balance de energía debido a varias razones de peso las cuales influyen en la obtención de un producto de calidad para la industria.

1. Eficiencia Energética: El proceso de torrefacción consume energía para calentar y transformar la biomasa. Un balance de energía adecuado ayuda a determinar cuánta energía se consume en relación con la energía contenida en la biomasa torrefactada resultante. Esto es esencial para evaluar la eficiencia del proceso y determinar si es energéticamente viable.

2. Optimización del Proceso: El balance de energía permite identificar posibles pérdidas o fugas de energía en el sistema de torrefacción. Esto puede ayudar a los ingenieros y operadores a optimizar el proceso para reducir el consumo de energía y aumentar la eficiencia.

3. Control de la Temperatura: El equilibrio de energía es necesario para controlar y mantener las temperaturas dentro de los rangos óptimos durante la torrefacción. Esto es crucial porque diferentes temperaturas pueden dar como resultado productos de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

torrefacción con propiedades y calidades diversas.

4. Seguridad del Proceso: Un balance de energía adecuado contribuye a garantizar que el proceso de torrefacción se realice de manera segura y controlada. Evita condiciones de sobrecalentamiento o inestabilidad que podrían generar riesgos para los trabajadores o daños al equipo.

5. Selección de Equipo y Combustible: El balance de energía ayuda a determinar qué tipo de equipo es más adecuado para el proceso de torrefacción y qué fuente de energía (como electricidad o combustibles) es más rentable y eficiente en términos de costo y sostenibilidad.

6. Evaluación Económica: Conocer el equilibrio de energía es esencial para realizar una evaluación económica precisa del proceso de torrefacción. Esto incluye el cálculo de los costos de energía y la determinación de si el valor de los productos de torrefacción justifica estos costos.

7. Cumplimiento de Objetivos Ambientales: Un balance de energía bien gestionado puede contribuir a reducir el impacto ambiental del proceso de torrefacción, al minimizar el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de esa energía.

En otras palabras, un balance de energía en un proceso de torrefacción es esencial para optimizar la eficiencia del proceso, controlar las condiciones de operación, garantizar la seguridad y evaluar la viabilidad económica y ambiental del mismo. Proporciona una comprensión completa de cómo se utiliza y se transforma la energía en el proceso, lo que es fundamental para tomar decisiones informadas y mejorar la calidad y la sostenibilidad de la torrefacción de biomasa.

Para ser mas claro y preciso en la explicación de la obtención del balance de energía comenzare por decir que el balance de energía en un proceso de torrefacción de biomasa se obtiene mediante un análisis completo de todas las entradas y salidas de energía en el sistema. Para realizar este balance, se deben considerar varias fuentes de entrada de energía y cómo se utilizan durante el proceso. Aquí enumero los pasos generales para obtener un balance de energía:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

1. Identificación de fuentes de entrada de energía: en esta parte se enumera todas las fuentes de entrada de energía en el proceso de torrefacción. Estas pueden incluir:

- A) Energía de Calor: La energía necesaria para calentar la biomasa y mantenerla a la temperatura deseada durante la torrefacción. Esto puede provenir de electricidad, gas natural, vapor u otras fuentes de calor.

- B) Energía de Agitación o Mezcla: Si se utiliza agitación o mezcla mecánica en el reactor, esto requerirá energía.

- C) Energía de Transporte: La energía necesaria para alimentar transportadores, cintas transportadoras u otros equipos utilizados para mover la biomasa a través del proceso.

- D) Energía de Extracción de Humedad: Si es necesario eliminar la humedad de la biomasa antes de la torrefacción, se requerirá energía para este proceso de secado.

- E) Energía de Tratamiento de Gases de Escape: Si se capturan y tratan los gases de escape, esto también consume energía.

2. Medición de las Entradas de Energía: Aquí se cuantifica la cantidad de energía que se utiliza desde cada fuente identificada. Esto puede requerir medidores específicos para electricidad, gas, vapor, etc.

3. Identificación de Salidas de Energía: en esta parte se debe considerar cómo se utiliza la energía en el proceso, y cómo se convierte en diferentes formas de energía a medida que interactúa con la biomasa. Esto puede incluir:

- A) Energía de Torrefacción: Se conoce como la energía que se transfiere a la biomasa para torrefactarla.

- B) Energía en Productos de Torrefacción: Esta es la energía contenida en los productos de torrefacción resultantes, como los gases liberados y el material

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

torrefactado.

- C) Pérdidas de Calor: La energía que se disipa como calor en el proceso.

4. Medición de las Salidas de Energía: Aquí se cuantifica la cantidad de energía contenida en los productos de torrefacción y las pérdidas de calor. Esto puede requerir análisis calorimétricos u otros métodos de medición de energía.

5. Calcular el Balance: en esta parte se realiza la resta entre las entradas y salidas de energía para obtener un balance neto de energía. Si las entradas son mayores que las salidas, se considera un balance positivo, lo que indica un consumo neto de energía. Si las salidas son mayores, se tiene un balance negativo, lo que sugiere que el proceso puede generar energía.

6. Análisis y Optimización: en esta parte se utiliza el balance de energía para evaluar la eficiencia del proceso. Si se busca una mayor eficiencia energética, puedes considerar la optimización de las fuentes de energía, la mejora del aislamiento térmico, o la recuperación de calor residual, entre otras medidas.

Es importante realizar mediciones precisas y considerar todas las fuentes de entrada y salida de energía para obtener un balance de energía confiable en un proceso de torrefacción de biomasa. Esto no solo permite comprender mejor el consumo de energía, sino también tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso.

Para este proyecto de grado el balance de energía se obtuvo teniendo en cuenta la potencia eléctrica de entrada en el reactor de torrefacción y el poder calorífico de entrada y salida de la biomasa.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

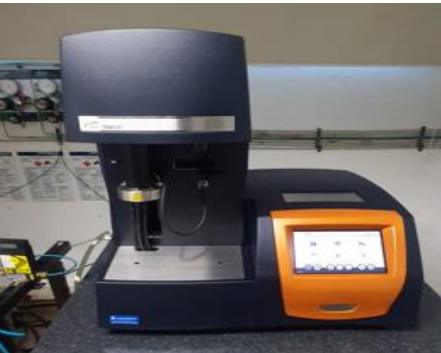
Para dar inicio a esta sesión es necesario señalar que en este proceso de torrefacción se comenzó con la búsqueda de actividades para poner a punto un reactor de tornillo para la torrefacción de biomasa. A continuación, en la metodología utilizada podrán encontrar todo el trabajo experimental que se realizó y el cual conllevó a la realización de un instructivo en el que se explica paso a paso como poner a punto el reactor de torrefacción de biomasa.

Para medir y registrar cambios en la masa de una muestra a medida que se calienta utilizamos un Termogravimetric Analyzer (TGA) o Analizador Termogravimétrico el cual se utiliza normalmente en los procesos que se desarrollan de torrefacción.

Esto es importante porque la torrefacción es un proceso térmico en el que la biomasa se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. El TGA puede proporcionar información clave sobre cómo se descompone la biomasa durante este proceso, incluyendo la pérdida de humedad, la descomposición de componentes orgánicos y la formación de residuos sólidos.

El TGA es una herramienta valiosa para monitorear y controlar el proceso de torrefacción al proporcionar datos sobre la composición y la evolución de la muestra a medida que se calienta. Esto ayuda a los investigadores y operadores a comprender mejor cómo se está llevando a cabo la torrefacción y a optimizar el proceso para obtener los resultados deseados, como la producción de biocarbón de alta calidad.

En la siguiente tabla podrá encontrar información básica del TGA utilizado

Equipo Utilizado	Características
Termogravimetric Analyzer (TGA) o Analizador Termogravimétrico 	Marca: Discovery™ Modelo: TGA 550 Serie: 330xm Especificaciones: el sistema TGA tiene alto rendimiento que ofrece la mayor precisión máxima sensibilidad y máxima fiabilidad. Rendimiento premium con opciones avanzadas y flexibilidad de configuración

**Tabla 1:** Información importante del Analizador Termogravimétrico (TGA)  
(Fuente propia)

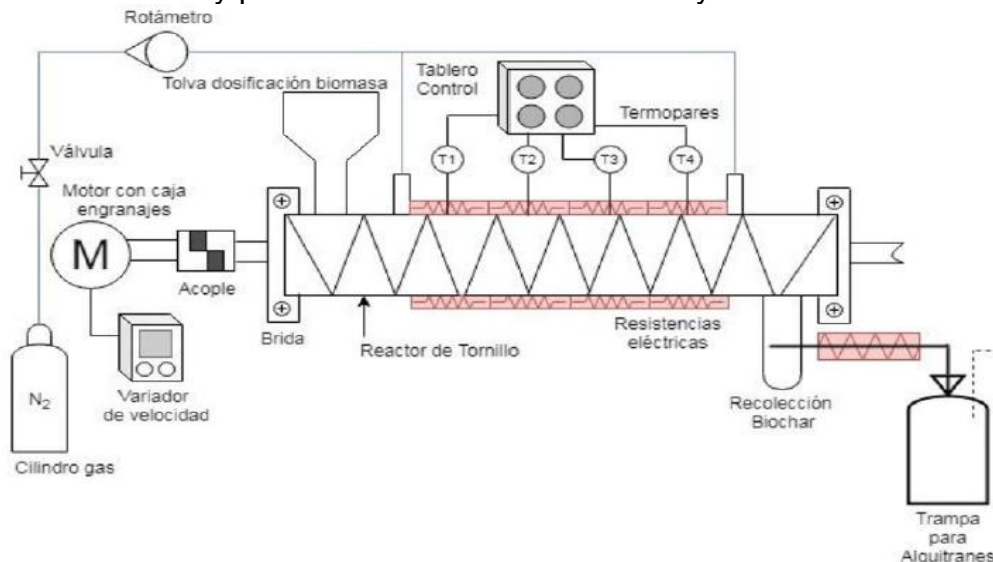


 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 -Sistema experimental

En la Figura 1 y Figura 2 se presenta el esquema y fotografía del reactor de torrefacción y sus accesorios. Este consta de un controlador de flujo para el ingreso del gas del proceso alimentado por una fuente de poder a 24 V a 0,19 A, un motor de inducción trifásico a 220 V junto con caja reductora tamaño 25 y un variador de frecuencia, un reactor en acero inoxidable recubierto en sus paredes externas por fibra de vidrio además de resistencias tubulares de 5/16 in de 1700 W, cada una a 220 V. El motor hace girar un tornillo sin fin el cual transporta la biomasa, al variar la frecuencia se pueden obtener diferentes tiempos de residencia de la biomasa dentro del reactor. Las temperaturas externas del reactor son medidas por 4 termopares tipo J ubicados de manera equidistante cuya temperatura es controlada por controladores de temperatura Maxthermo. En la salida del reactor se acondicionó un recipiente de vidrio roscado para disponer la biomasa sólida que sale del mismo, así como dos recipientes tipo Dressler, ordenados de manera consecutiva para recoger los gases condensables. Los gases no condensables son dirigidos hacia una campana de extracción. En el tablero de control hay protecciones de sobre corriente y tensión.



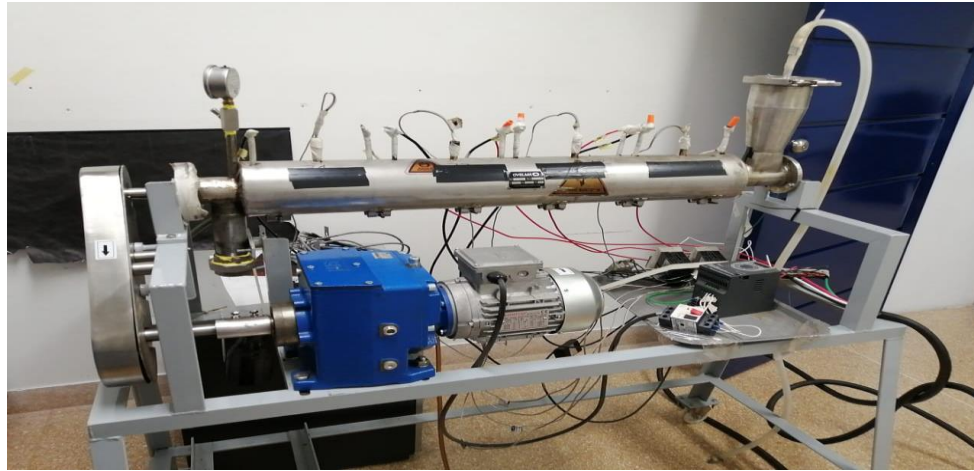
**Figura 1.** Representación esquemática de reactor de torrefacción a escala de banco. <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/2269/2449>).



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

La Figura 2 muestra algunos componentes del sistema de torrefacción, estos incluyen variador de velocidad, interruptor diferencial, motor con su placa, controlador de temperatura, controlador de flujo, así como equipos de medición usados, cámara termográfica, medidor de la calidad de la energía y termobalanza.



**Figura 2.** Fotografía de reactor de torrefacción a escala de banco.  
(Fuente: propia)

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

**Figura 3.** Algunos componentes del sistema de torrefacción incluyendo la biomasa y sistemas de medición. (Fuente: propia)

<p>Biomasa seca</p> 	<p><b>Características de la biomasa seca:</b> La biomasa es un término amplio que se refiere a la materia orgánica de origen vegetal o animal utilizada como fuente de energía o materia prima para diversos fines. A continuación, se mencionan algunas de las características importantes de la biomasa: Origen Natural, Sostenibilidad, Variedad de Fuentes, Conversión Energética, Baja Emisión de CO2, Reducción de Residuos, Aplicaciones Diversas, e Investigación Continua. Esta biomasa se obtuvo de setas Colombia, quien hizo la recolección de la biomasa que se utilizó en este proyecto.</p>
<p>Controlador de flujo</p>  <p>MARCA: Omega REFERENCIA: FMA5400</p>	<p><b>Características del controlador de flujo:</b> MARCA: Omega REFERENCIA: FMA5400 Flujos: 0 – 20 L/min</p>
<p>Motor</p>  <p>MARCA: Ectop REFERENCIA: motor trifásico de inducción, a 220 V</p>	<p><b>Características del motor:</b> MARCA: Ectop REFERENCIA: motor trifásico de inducción, a 220 V</p>
<p>Interruptor diferencial</p> 	<p><b>Características del Interruptor diferencial:</b> MARCA: Schneider Electric REFERENCIA: Capacidad de 2.5 a 4 A</p>
<p>Controlador de temperatura</p> 	<p><b>Características del Controlador de temperatura:</b> MARCA: Autonics REFERENCIA: TK 4L</p>
<p>Variador de frecuencia</p> 	<p><b>Características del variador de frecuencia:</b> MARCA: Holip REFERENCIA: HLP C100</p>

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

La figura 4 muestra las características mas relevantes del sistema de torrefacción y los instrumentos de medición que se utilizaron.

<p>Termobalanza</p> 	<p>Características de la termobalanza:</p> <p>MARCA: Precisa</p> <p>REFERENCIA: XM-60-HR</p>
<p>Cámara termográfica</p> 	<p>Características de la cámara termográfica:</p> <p>MARCA: FLUKE THERMAL IMAGER</p> <p>REFERENCIA: Ti90</p>
<p>Analizador de calidad de energía</p> 	<p>Características del analizador de energía:</p> <p>MARCA: FLUKE 1735</p> <p>REFERENCIA: 5087868</p> <p>Voltaje de entrada hasta 600 V</p>
<p>Medidor para gas patrón</p> 	<p>REFERENCIA: medidor para gas patrón MR10. Flujo volumétrico entre 0 - 20 L/min</p>

**Figura 4.** Algunos componentes del sistema de torrefacción incluyendo los sistemas de medición. (Fuente: propia)

En este producto de laboratorio se construyó la curva de calibración del controlador de flujo másico de aire, inicialmente con la ayuda de un medidor de gas patrón. En los experimentos se incrementó desde 0,5 hasta 10 a intervalos de 0,5 en el controlador del flujo másico, mostrando el valor numérico en el display del controlador y se midió el flujo real de este equipo por medio del medidor del gas patrón. Se aclara que estas

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

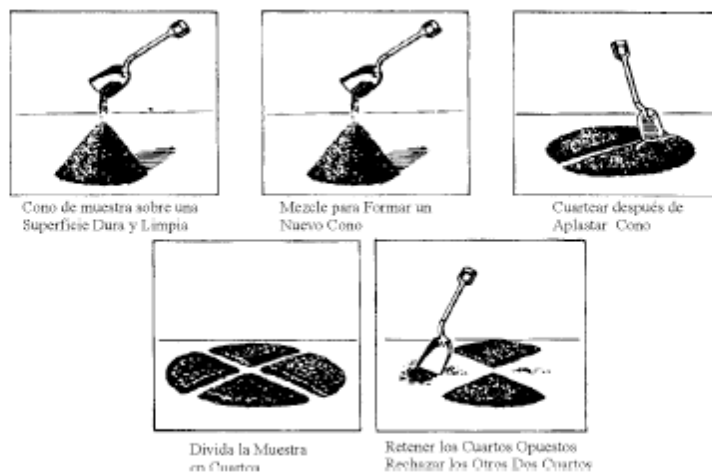
### 3. METODOLOGÍA

mediciones se hicieron por triplicado. Adicionalmente, se midió el comportamiento térmico del reactor a una temperatura de 220 °C y se realizó un paso a paso del funcionamiento del reactor el cual constituye un resultado del producto obtenido en laboratorio.

En un proceso de torrefacción de biomasa, un sello seco se utiliza para controlar la entrada del aire en el reactor. El objetivo principal de utilizar un sello seco es crear y mantener estas condiciones específicas dentro del reactor durante todo el proceso de torrefacción. A continuación, se explican las razones clave para el uso de un sello seco en la torrefacción de biomasa:

#### 3.3 Tratamiento de biomasa previo a ensayos de torrefacción

La biomasa residual que se utilizó fue la champiñonaza. Esta biomasa es de origen residual por lo cual su valorización como fuente de suministro de energía limpia hace que sea viable. La biomasa fue proporcionada por la **Compañía Setas Colombianas S.A** y fue almacenada antes de su procesamiento, secado y torrefacción a una temperatura de 4°C para retardar procesos de degradación biológica. Antes del almacenamiento se realizó un cuarteo para obtener una cantidad representativa de biomasa partiendo de un bulto de 20 kg hasta llegar a una cantidad de 2 kg. Luego la biomasa fue secada en una estufa de laboratorio a una temperatura de 105 °C durante 24 h. En la Figura 4 se presenta una representación de los cuarteos sucesivos realizados, y en la Figura 5 fotografías del mismo proceso con la champiñonaza. Los instrumentos de medición y monitoreo fueron suministrados por la Instituto Tecnológico Metropolitano y el laboratorio de investigación de ciencias térmicas.



**Figura 5.** Esquema de cuarteos sucesivos.  
(Fabián. Elizondo Arrieta, 2014)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA




**Figura 6.** Cuarteos sucesivos realizados a la champiñonaza.(fuente:propia)

#### 3.4 Caracterizaciones fisicoquímicas

Las muestras fueron caracterizadas por análisis termogravimétrico para determinar el contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y cenizas. En esta caracterización se usó una rampa de calentamiento de 20 °C/min hasta 105 °C luego una isoterma de 20 minutos para determinar la humedad, posteriormente se incrementó la temperatura hasta 900 °C en atmósfera de nitrógeno y se cambió la atmosfera a aire. Finalmente, la muestra fue sostenida en esa temperatura por 10 minutos para determinar el contenido de carbono fijo. La masa final resultante corresponde al contenido de cenizas.

Por otra parte, se determinó el poder calorífico mediante bomba calorimétrica realizando la combustión completa en una atmosfera de oxígeno; para ello fue necesario cuantificar la capacidad calorífica del sistema, la entalpia H cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, la masa de la muestra y el incremento de temperatura que origina la combustión en la celda de medición del calorímetro. En ocasiones es necesario corregir el valor de poder calorífico mediante la determinación de energía de extraños en la que interviene los medios de ignición como la formación y disolución de ácidos nítrico y sulfúrico, que puede ser cuantificado mediante valorización o por análisis elemental.

Bomba Calorimétrica o calorímetro 	Funcionamiento de temperatura max. 30 °C Resolución de medida de temperatura 0.0001 K Temperatura min. del medio refrigerante 12 °C Temperatura max. del medio refrigerante 28 °C
--	--

**Figura 7.** <https://idsgt.com/portfolio/calorimetro-ika-c2000/>



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 3. METODOLOGÍA

---

Para la caracterización de la biomasa, la bomba calorimétrica se utilizó para medir la cantidad de energía liberada y/o consumida durante la torrefacción, éste es un proceso térmico en el cual se tuestan materiales orgánicos, como biomasa, a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, la biomasa se somete a descomposición térmica y cambios químicos que pueden liberar calor o consumir energía, dependiendo de las condiciones de operación.

### 3.5 Ensayos de torrefacción

Se realizaron ensayos de torrefacción a la champiñonaza en el reactor de torrefacción en condiciones oxidativas, para este caso aire comprimido a una temperatura de 220 °C programada en las 4 zonas de reacción utilizando 148 g y un tiempo de residencia de 30 minutos. Este procedimiento se realizó por triplicado y adicionalmente se realizaron seguimientos a las temperaturas de las zonas de reacción para verificar su estabilidad y control PID ajustado durante el tiempo total del experimento. La biomasa, previo al ingreso al reactor pasó por un proceso de molienda utilizando un molino manual marca Corona con la finalidad de homogeneizar el tamaño de partícula del material y evitar atascamientos al interior del reactor.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Curva de calibración del medidor de flujo de aire.

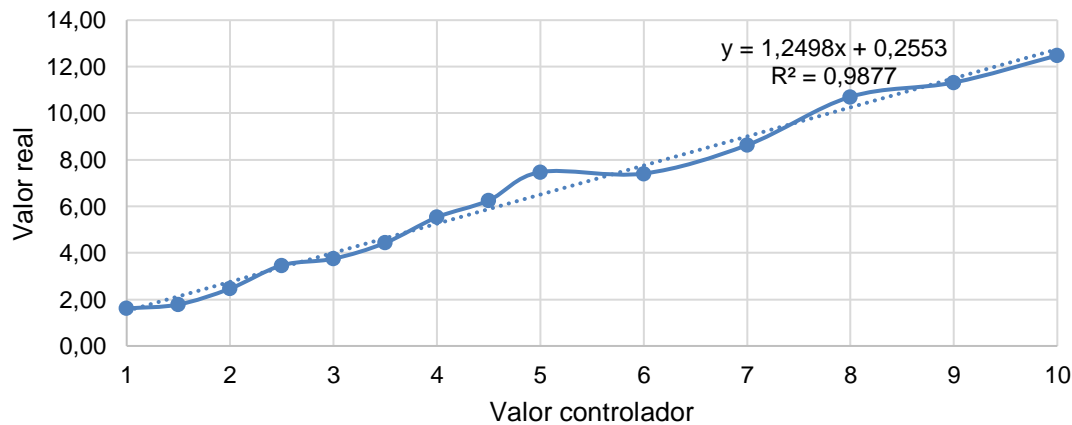
Se realizó una curva de calibración del valor controlado del aire vs el valor real mediante un medidor de flujo de caudal (medidor de gas patrón). La Tabla 1 muestra los valores obtenidos donde la columna de la izquierda es el valor controlado en un controlador de flujo másico y la columna 2 el valor real determinado por el sello seco. El procedimiento para la determinación del flujo volumétrico implicó contabilizar una unidad de volumen en determinado tiempo.

**Tabla 2.** Tabla del valor controlado vs valor real hallado mediante sello seco.

Valor controlado (l/min)	Valor real (l/min)
1,0	1,61
1,5	1,78
2,0	2,46
2,5	3,46
3,0	3,75
3,5	4,43
4,0	5,53
4,5	6,25
5,0	7,47
6,0	7,41
7,0	8,63

En la Figura 7 se muestra que se tiene una tendencia lineal con un alto coeficiente de correlación  $R^2$  cercano a 1 (0,9877). Las mediciones se realizaron por triplicado para tener un control más preciso del flujo de aire al reactor.

### Curva de calibración



**Figura 8.** Curva de calibración del controlador del flujo másico del aire.(fuente: propia)

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.2 Comportamiento térmico en las cuatro zonas de calentamiento.

Una vez se determinó el flujo de aire para el ingreso al reactor el cual se fijó en 2 l/min, se procedió a realizar un experimento para determinar el comportamiento térmico a lo largo del mismo en 4 zonas. Para esto se utilizaron 148 g de biomasa por un tiempo de 54 minutos. La siguiente tabla muestra los valores medidos de la temperatura en las 4 zonas del reactor:

**Tabla 3.** Temperaturas de pretratamiento para la biomasa de estudio a 220°C.

Tratamiento	220°C - 148 g			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
0	225,8	220,3	220,3	220,2
1	225,8	220,3	220,2	219,6
2	224,4	220,3	219,7	219,6
3	222,6	220	219,6	219,7
4	221,7	220	219	219,8
5	216,7	220,3	220,2	220
6	215,9	220,3	220,3	220,2
7	217,5	220,3	220,3	220,2
8	223,2	220	220,5	220,7
9	223,6	220,2	220,3	220,7
10	219,4	220,9	220,3	220,5
11	216,2	221,4	220,3	220,5
12	214,9	222,7	220,3	220,4
13	215	223,1	220,3	220,5
14	217,8	223,5	220,3	220,4
15	223,8	224,7	220,2	220,3
16	225	225,8	220,1	220,3
17	222,5	226,2	220,3	220,4
18	216,4	226,7	220,8	220,5
19	215,5	226,7	220,9	220,4
20	215,6	226,9	221,1	220,3
21	217,3	226,7	221,2	220,3
22	224,4	226,5	221,2	220,2
23	227,8	226,5	221,3	220,3
24	227,3	226,5	221,4	220,5
25	226,4	226,7	221,4	220,7



 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

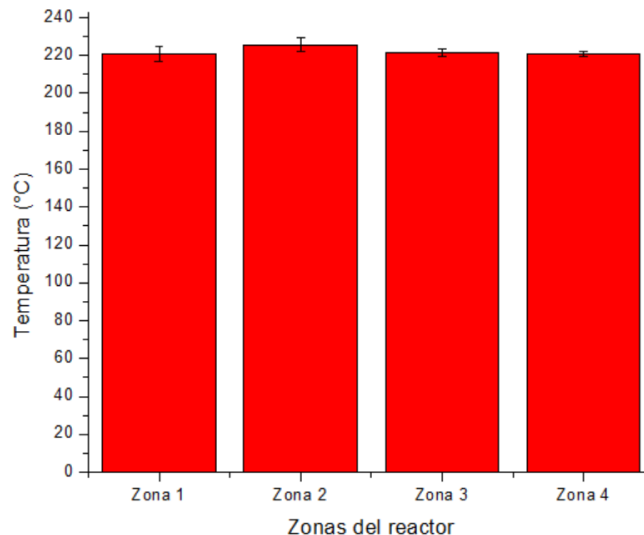
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

26	224,4	226,7	221,2	220,7
27	223	226,8	221,2	220,9
28	220,1	227,6	221,2	220,9
29	218,8	228,3	221,2	220,9
30	216,4	231,4	221,2	221
31	218,1	233,6	221,4	221,1
32	219,7	234	221,4	221,1
33	222,8	234,8	221	221,4
34	223,8	234,8	222	221,2
35	223,4	234,4	222,2	221,2
36	222,3	234	222,5	221,3
37	220,7	233,5	222,9	221,4
38	218,2	232,6	223,8	221,4
39	216,4	230,5	226,7	221,6
40	219,6	229,4	227,6	221,8
41	220,9	228,9	227,6	221,8
42	223,6	226,8	226,7	222,3
43	222,4	225,2	226	222,7
44	221,4	224,6	225,5	223,8
45	218,8	223,4	224,1	224,3
46	215,9	222,4	222,6	224,2
47	215,8	221,9	221,9	224,1
48	218,2	221,6	220,9	223
49	222,2	221,3	220,3	221,5
50	224	221,2	219,6	220,1
51	223,6	221,4	219,4	218,8
52	222,1	221,6	219,4	217,7
53	220	221,8	219,6	217,5
54	217,2	222	219,8	217,2

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 8 muestra las temperaturas en cada una de las zonas, evidenciándose poca variación de la temperatura lo cual muestra que los parámetros de los Maxthermo están bien configurados (ver Anexo 1 de configuración de controladores de temperatura).



**Figura 9.** Perfil de temperatura en cada una de las zonas del reactor. (fuente:propia)

### 4.3 Funcionamiento de reactor y cálculos de rendimientos

Para proceder a encender el reactor se procede a abrir previamente la válvula del compresor y se pulsa el botón de encendido del compresor (este se encuentra alojado en un cuarto independiente del laboratorio de ciencias térmicas). Posteriormente se ingresa aire al reactor fijando el controlador en el valor teórico teniendo en cuenta la curva de calibración (valor del set point vs valor real). Continuando con el procedimiento se energizan las resistencias de calentamiento se ajustan los valores PID en los 4 controladores de temperatura y se espera a que suba la temperatura del reactor hasta la temperatura de trabajo. Cuando logre alcanzar el set point de temperatura deseada y se estabilice se procede a suministrar la biomasa por la tolva. Luego se prende el variador y se fija el valor dependiendo de la curva de frecuencia vs tiempo de residencia. La biomasa seca que sale de cada tratamiento escogido se somete a pruebas de humedad y se caracteriza mediante análisis termogravimétrico. A continuación, se describe el paso a paso para realizar el balance de masa del proceso de torrefacción:

- 1) Pesar frasco vacío (solo con teflón)
- 2) Pesar la masa inicial de biomasa
- 3) Pesar trampa 1 (inicial) con agua
- 4) Pesar trampa 2 (inicial) con agua

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 5) Determinación de la humedad de la biomasa que ingresa en la termobalanza.  
Nota: los pasos anteriores se hacen antes de la prueba.
- 6) Masa final=peso del frasco + masa final – masa de frasco
- 7) Rendimiento de humedad (%) en termobalanza: Masa final /masa inicial
- 8) Masa inicial seca: (Masa inicial \* humedad)-masa inicial
- 9) Rendimiento Seco: Masa final /masa inicial seca
- 10) Porcentaje de alquitranes: Sumar masa de cada trampa después de las pruebas– masas iniciales de trampas.

Trampa 1: (final)-(inicial)- g Alquitranes

% Alquitranes: g Alquitranes/masa inicial seca

11-Pasar muestra por molino y malla #60: extraer un gramo

Cabe aclarar que todo estudiante que desee realizar una puesta a punto del reactor de biomasa deberá utilizar el instructivo con código **PGR01LAB** en Excel con clave 1 para ingresar, donde hallara el paso a paso para poner a funcionar el reactor.

Como ejemplo se muestran los datos de un proceso de torrefacción con el tratamiento escogido 220°C por 30 min y 148 g:

Masa inicial: 148,28 g

Tara de frasco recolector de muestra sólida: 556,36 g

Trampa 1 inicial: 425,83 g

Trampa 2 inicial: 401,09 g

Humedad %: 1,455 determinada por termo balanza después de sacar 5 g de biomasa torrefactada

Frasco + Masa final= 556,36 g + 101,49 g = 657,85 g

Masa final: 101,49 g

Trampa 1 final: 444,27 g

Trampa 2 final: 402,34 g

Rendimiento de humedad%:  $\frac{101,49}{148,28} = 68,44 \%$

Masa inicial seca: 1,455-148,28= 1-146,12l g

Rendimiento Seco %:  $\frac{101,49}{146,12} = 69,4\%$

Masa Alquitranes: 18,44+1.25=19,69 % (sumas de trampa)

% Alquitranes:  $\frac{19,69}{146,12} = 13,4 \%$

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Tabla 4.** Condiciones de operación y resultados de rendimientos máxicos de productos sólidos y líquidos de torrefacción

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Masa (g)	% Rendimiento sólido R1	% Rendimiento seco sólido R2	% Rendimiento alquitranes
220	30	148	76,98	69,45	13,4

Se evidencia los rendimientos a sólidos y líquidos obtenidos después de descomponer las cadenas poliméricas de la hemicelulosa y celulosa. En la Tabla 4 se presentan la caracterización fisicoquímica de la biomasa obtenida después de la torrefacción

**Tabla 5.** Análisis próximo de biomasa torrefacta

Muestra	Humedad (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo (%)	Cenizas (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Biomasa torrefactada	4,16	42,44	5,13	47,93	9,07

Los resultados obtenidos indican que la biomasa al estar sometida a procesos de torrefacción oxidativa durante un tiempo de residencia de 30 minutos y 220 °C debido a reacciones de descarboxilación y oxidación de los componentes como hemicelulosa y celulosa cambia su configuración estructural y elemental, haciendo que se incremente la cantidad de volátiles, cenizas, carbono fijo y el poder calorífico en comparación con la champiñonaza sin torrefacción (E. Syguła, 2019).

Finalmente, en la Figura 8 se presentan fotografías de la biomasa antes y después del tratamiento de torrefacción aplicado, indicando cambios en su coloración pasando de un color marrón claro a tonos negros como resultado de las reacciones químicas que sucedieron al interior del reactor.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura10** . Resultados de color de champiñonaza sin y con torrefacción.  
(fuente:propia)

### Rendimiento energético del proceso de torrefacción.

El poder calorífico de la biomasa fresca corresponde a 7,71 MJ/kg mientras que el de la biomasa torrefactada incrementó hasta 9,07 MJ/Kg es decir un 17,6 %. El rendimiento energético se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Rendimiento\ energético\ (RE) = RM \times \frac{PCB_{Biomasa\_f}}{PCB_{Biomasa\_i}}$$

Donde  $RM$  corresponde al rendimiento másico el cual es de 69,4 %,  $PCB_{biomasa\_f}$  al poder calorífico de la biomasa torrefactada y  $PCB_{biomasa\_i}$  al de la biomasa inicial. Según los resultados mostrados anteriormente. Teniendo en cuenta lo anterior el rendimiento energético corresponde a:

$$RE = 69,4 * \frac{9,07 \frac{MJ}{kg}}{7,71 \frac{MJ}{kg}} = 81,64 \%$$

Según lo anterior se obtiene un rendimiento energético de un 81,64 %, lo cual significa que se pierde un 18,36 % de la energía contenida en la biomasa inicial. Sin embargo, el material incrementa su poder calorífico y podría ser quemado en un proceso de co-combustión con carbón con algunas ventajas respecto a la biomasa fresca, como son una menor degradación biológica, una mayor densidad energética y mayor friabilidad para un proceso de molienda

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Teniendo en cuenta que el proceso fue realizado en un bache de 148 gramos de biomasa con un poder calorífico de 7,71 MJ/kg, la cantidad de energía de entrada del proceso es de 1,14 MJ. Teniendo en cuenta que el tiempo de operación fue de 10 min es decir 600 s se obtiene una energía por unidad de tiempo en la biomasa de 1,9 kW; por lo tanto, según el rendimiento energético calculado la energía de salida corresponde al 81,69 % de 1,9 kW es decir a 1,55 kW.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL</b> <b>TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- El levantamiento de la curva de calibración del flujo de aire proporcionó información valiosa para la realización de experimentos de torrefacción, pudiendo de esta forma determinar el flujo adecuado para movilizar la atmósfera, biomasa y gases liberados durante la torrefacción a lo largo del sistema evitando acumulaciones de alquitranes en la tolva. Adicionalmente, proporcionó un respaldo a la calidad de los resultados en el experimento llevado a cabo y para futuros trabajos de investigación en esta línea de trabajo.
- Con los ajustes al PID de los controladores se logró tener estabilidad en la temperatura durante la ejecución experimental, siendo este factor de impacto para tratamientos de torrefacción. La verificación realizada minuto a minuto de las 4 zonas de reacción permitió tener información valiosa para entender los fenómenos que sucedieron durante los experimentos y así asegurar la validez de los resultados presentados.
- El trabajo desarrollado durante la experimentación presento ajustes que mejoraron la eficiencia de la torrefacción. En esta fase se fijaron y adecuaron trampas de alquitranes, se realizaron ajustes finos en la hermeticidad del sistema que permitieron un ambiente seguro evitando fugas de gases de torrefacción y asegurando la correcta operación del sistema de extracción.

### Recomendaciones para trabajos futuros en el área de investigación

- Se recomienda que el montaje del reactor a escala de laboratorio contenga un gabinete certificado según RETIE (**Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas**) para instalaciones en laboratorio donde se aloje el variador de frecuencia circuito de potencia y de control.
- Se sugiere para el reactor un visor que indique si la biomasa avanza con normalidad por las 4 zonas de calentamiento, esto debido a que durante puesta a punto y ensayos preliminares se presentaron atascamientos al interior del sistema.
- Se recomienda que la disposición de los termopares sea intercambiable para verificar que cada zona garantice la temperatura correcta. Se sugiere que el reactor tenga accesos más amplios para su correcta limpieza y evitar contaminación en cada experiment

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

---

## Referencias

- Austin, A. (2010). French torrefaction firm targets North América.
- Bergman. (2005). Combined torrefaction and pelletisation (Combinación de torrefacción y peletización). *ECN report, ECNC-C-05-073*, 7.
- Cordis, U. E. (2014, Mayo 30). *cordis.europa.eu*. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/article/id/36589-torrefaction-the-bioenergy-newcomer/es>
- Fabián. Elizondo Arrieta, M. J. (2014). Método de cuarteo tipo B, AASHTO T 248. *Lanamme UCR*, 2..
- Fredy E. Jaramillo, P. N. (2022). Torrefacción de biomasa en un reactor de tornillo a escala de banco: efecto de la temperatura y del tipo de biomasa. *Scielo*, 1.
- González Barragán, D. T. (2007). Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante peletizado. *Agricultura*, 2.
- Gregory Marin, J. P. (2019). Propuesta de densificación energética de residuos y recursos biomásicos mediante peletización. *Portal de revistas academicas UTP* , 3.
- Klein E. Ikleji, S. S. (2010). Biocombustibles a partir de residuos y subproductos agrícolas (Blaschek/Biocombustibles a partir de residuos y subproductos agrícolas) || Entrega desde la granja hasta la planta de materias primas lignocelulósicas a partir de biomasa vegetal para la produ. *Blackwell Publishing*, 131.
- L. A. Rodríguez Romero, C. G.-A.-p. (2022). Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *Tecnológicas*, vol. 25, no. 53, e2142, 15.
- Luis Ernesto Arteaga-Pérez, C. S. (2015). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos, Analisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica . *CORE* , 5.



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## ANEXO

Como producto de laboratorio de todo este proyecto se obtiene un instructivo, el cual guiará al estudiante para poner a punto el reactor de torrefacción.

### **ANEXO 1. INSTRUCTIVO PARA LA OPERACIÓN DEL REACTOR DE \*TORREFACCIÓN**

#### **Pasos para el funcionamiento de reactor de torrefacción en el laboratorio de ciencias térmicas**








En el laboratorio de ciencias térmicas del ITM sede fraternidad, se encuentra el reactor a escala tipo tornillo de aproximadamente 1 metro de longitud, hecho en acero inoxidable, el compresor se encuentra alojado en un recinto a parte del laboratorio por lo que hay que dirigirse hasta el lugar para desbloquearlo del paro de emergencia, acá hay que verificar que una vez abierto el paro de emergencia se encienda un indicativo de luz led indicando que el compresor está en servicio y listo para abrir la válvula.

Luego se da servicio de aire al reactor en el laboratorio de trabajo por medio de la apertura de la válvula principal del laboratorio, verificando la presión que arroja el flujómetro, se deberá fijar al controlador de flujo OMEGA en la presión correspondiente para la atmosfera de trabajo.




Luego se deberá verificar la conexión con la fuente de poder y la corriente dependerá del caudal deseado siempre subiendo los valores por debajo de la indicación del flujómetro.

Para no quemarlo o tener lectura fallidas en el momento de la experimentación con la biomasa.

Continuando con el procedimiento se energizan las resistencias de calentamiento controladas por los 4 controladores de temperatura y se espera a que suba la inercia de T del reactor cuando logre alcanzar el set point de temperatura deseada y estable, teniendo en cuenta los siguientes ajustes:

- El estudiante deberá ajustar la temperatura con las siguientes teclas   
- El estudiante deberá fijar el rango ya que está dentro SV limite bajo [L-5U], y para SV limite alto [H-5U], ejemplo: en un cambio de temperatura de ajuste poner de 210° C hasta 250°C
- Presione cualquier tecla entre    en el modo RUN para entrar en el modo de ajuste de SV, una vez parpadee fijar el set point o SV.
- El estudiante deberá presionar la tecla  para mover el dígito (10°, 10<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup>, 10<sup>3</sup>, 10°)

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Luego el estudiante deberá presionar la tecla   para subir o bajar el valor de ajuste.
- El estudiante deberá presionar la tecla  para guardar el valor de ajuste, si no hay operaciones de tecla en 3 segundos SV se guardara automáticamente.

Se deberá revisar que todos los termopares estén alcanzando una inercia de temperatura pareja observando que donde entran al reactor estén libres y sin contacto con alguna superficie ya que puede alterar las mediciones.

Para mayor seguridad en el momento de realizar este paso se recomienda utilizar una cámara termográfica, ya que permite visualizar las zonas frías o calientes donde se alcanza una mejor temperatura por lo tanto corregir las zonas donde la temperatura no es pareja.

Luego de esto se procede a suministrar la biomasa por la tolva inmediatamente se fija el tiempo en cero se prende el variador y se toma como referencia para cuando salga la biomasa por el recipiente de salida para saber el tiempo transcurrido y que tanto carbonizo la muestra allí con a los tiempos de residencia fijados ,la biomasa seca que sale de cada tratamiento escogido se somete a pruebas de humedad y se selecciona según el tratamiento los mayores rendimientos másicos líquidos y de alquitranes según la temperatura y tiempos escogidos.

Para energizar el variador se deberá verificar que la alimentación este dentro de sus fases, lo recomendable es observar con un multímetro dicho balance de entre fases, luego de esto con el potenciómetro propio del variador establecer una frecuencia de trabajo, previamente determinada por un tratamiento escogido y se procede a darle HAND para que corra el variador, es importante verificar que en el reactor el tornillo sin fin tenga movimiento, y esto se logra introduciendo una pequeña bola en cerámica en la tolva con la finalidad de limpiar residuos de biomasa anteriores.

Una vez que la bola en cerámica sale y ha limpiado todo el reactor se comienza a suministrar biomasa por la tolva, previamente molida y triturada para evitar atascamientos en el momento del avance del tornillo y por ende lecturas faltas o pesos que no son a la salida del reactor donde se aloja el recipiente que contiene el biocarbono, realizado este paso se deberá tomar un tiempo inicial que va acorde con la frecuencia escogida en el tratamiento.

Cuando sale la biomasa se presiona la tecla off para que el reactor detenga su funcionamiento y después de verifica los frascos tipo Dressler Da la salida del reactor, tanto para el producto final de la biomasa como para los alquitranes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

---

**Pasos experimentales a proceder en el reactor:**

- 1) 1- Pesar frasco vacío (solo con teflón)
- 2) Pesar la masa inicial de biomasa
- 3) Pesar trampa 1 (inicial) con agua
- 4) Pesar trampa 2 (inicial) con agua
- 5) Determinación de la humedad de la biomasa que ingresa en la termobalanza.  
Nota: los pasos anteriores se hacen antes de la prueba.
- 6)  $Masa\ final = peso\ del\ frasco + masa\ final - masa\ de\ frasco$
- 7) Rendimiento de humedad (%) en termobalanza:  $Masa\ final / masa\ inicial$
- 8) Masa inicial seca:  $(Masa\ inicial * humedad) - masa\ inicial$
- 9) Rendimiento Seco:  $Masa\ final / masa\ inicial\ seca$
- 10) Porcentaje de alquitranes: Sumar masa de cada trampa después de las pruebas – masas iniciales de trampas.

Trampa 1:  $(final) - (inicial) - g\ Alquitranes$

% Alquitranes:  $g\ Alquitranes / masa\ inicial\ seca$

11- Pasar muestra por molino y malla #60: extraer un gramo

Cabe aclarar que todo estudiante que desee realizar una puesta a punto del reactor de biomasa deberá utilizar el instructivo con código **PGR01LAB** en Excel con clave 1 para ingresar, donde hallara el paso a paso para poner a funcionar el reactor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES Julían Andrés Betancur Martínez.

FIRMA ASESORES Pedro Nel Alvarado T.

Carolina Restrepo L

FECHA ENTREGA: 21/09/2023