

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# **Diseño y Construcción de un Reactor a Escala de Laboratorio para la Torrefacción de Biomasa**

Cristian Camilo García Cano

Wilson Alexander Zapata Sánchez

Ingeniería Electromecánica

Pedro Nel Alvarado Torres

Fredy Esteban Jaramillo Ramírez

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**15 de febrero de 2019**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El proceso de torrefacción es un pretratamiento de la biomasa, el cual pretende eliminar las barreras tecnológicas referentes a su utilización como fuente de energía. Consiste en exponer la biomasa a una atmósfera inerte a baja temperatura (200-300 °C) y a una baja velocidad de calentamiento para convertir la biomasa en un material carbonoso con mejores propiedades fisicoquímicas. En términos generales, la hemicelulosa la cual es un componente importante de la biomasa es parcial o totalmente descompuesta dando lugar a un sólido más hidrófobo, quebradizo y térmicamente estable. Como consecuencia, son liberados algunos compuestos orgánicos volátiles, además de la humedad, mejorando la densidad de la energía y las propiedades mecánicas, del sólido resultante. En adición, se incrementa el tiempo de almacenamiento sin degradación de la biomasa, lo cual reduce el costo para su manipulación y almacenamiento. En este estudio se realizará una revisión de la literatura para determinar los diseños de reactores más apropiados para realizar el proceso de torrefacción. Posteriormente se realiza un estudio de viabilidad técnica, para determinar el reactor a construir. Se realizan los planos del reactor y se construye en el laboratorio de ciencias térmicas del ITM. Finalmente, se realizan experimentos preliminares de funcionamiento del mismo utilizando una biomasa: *pino ciprés*.

*Palabras clave: torrefacción, reactor de torrefacción, pino ciprés.*

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPITULO</b>	<b>PAG</b>
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MARCO TEÓRICO	7
3. METODOLOGÍA	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	23
REFERENCIAS	24

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## Valorización energética de maderas

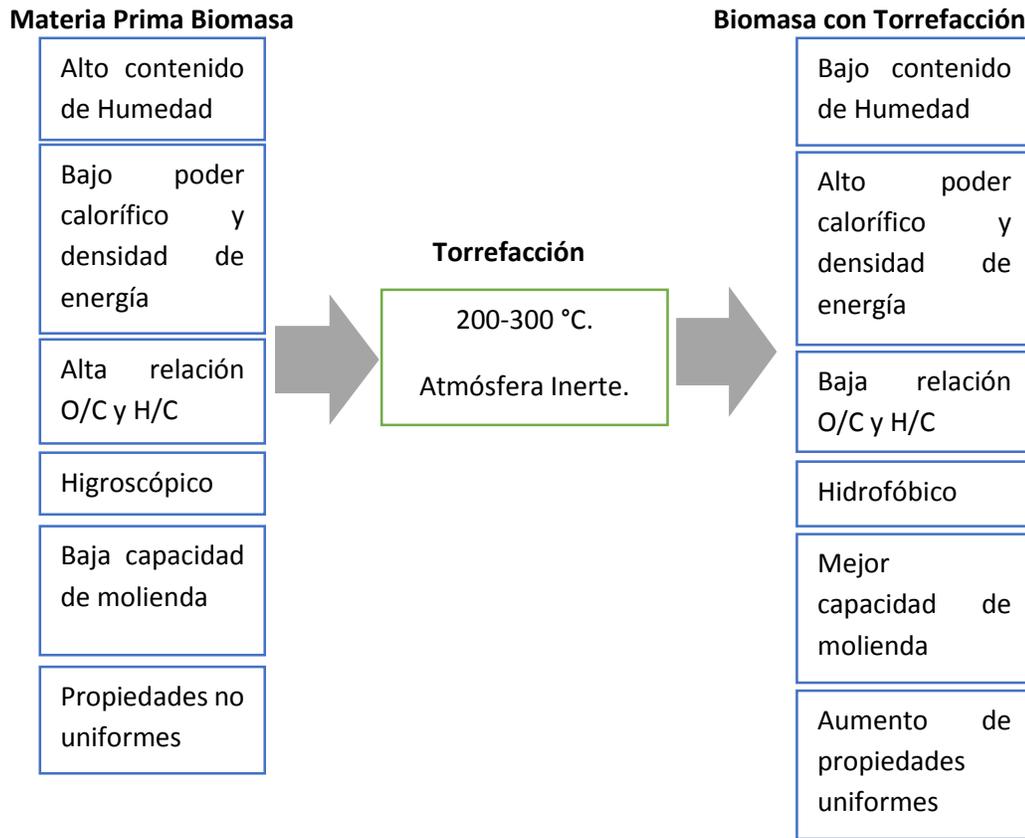
Los usos tradicionales de estas biomásas en muchas zonas no interconectadas del país han estado limitados a procesos de combustión ineficientes para cocción de alimentos y calentamiento de espacios (Gómez, Ríos, & Peña, 2012). Lo anterior sumado a la mala o nula disposición de los residuos conduce a un impacto ambiental negativo, evidenciado en la degradación de los suelos, deterioro del tejido de la subsistencia rural, incremento de enfermedades asociadas al impacto de los contaminantes, entre otros (Pérez, J., Barrera, R. & Ramírez, G., 2015; Minagricultura, 2012).

Durante la combustión estas biomásas son quemadas con el oxígeno del aire principalmente, para obtener CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> y, además, otros compuestos en menor proporción como son las sustancias contaminantes (Oberberger, Biedermann, Widmann, & Riedl, 1997). El principal uso del proceso de combustión es la obtención de calor y/o energía eléctrica. La combustión de biomasa sólida (principalmente madera) para la producción de calor es el proceso más común en todo el mundo (Carvalho, Jensen, & Tarelho, 2016). Los sistemas de calefacción a pequeña escala para los hogares suelen consistir en estufas o calderas alimentadas con leña o pellets. Las calderas de rejilla de los usuarios de mediana escala suelen quemar virutas de madera, mientras que las calderas a gran escala son capaces de quemar una mayor variedad de combustibles, incluyendo desechos de madera y residuos de procesos agronómicos (Chen, Peng, & Bi, 2015; Tumuluru, Sokhansanj, Hess, Wright, & Boardman, 2011). El calor también se puede producir en una escala mediana o grande a través de la cogeneración que proporciona calor para procesos industriales en forma de vapor y electricidad, también se puede suministrar calor a redes de calefacción urbanas (Proskurina, Heinimö, Schipfer, & Vakkilainen, 2017; van der Stelt, Gerhauser, Kiel, & Ptasinski, 2011).

En cuanto a la aplicación de la combustión a pequeña escala, se hacen necesarios proyectos que mejoren la eficiencia en cocinas de biomasa en el mundo, especialmente en países en vía de desarrollo (Jeuland et al., 2015; MacCarty, Still, & Ogle, 2010). Esto con el fin de reducir la deforestación, mejorar la salud y disminuir el impacto en el cambio climático. Estos requisitos refuerzan la necesidad de realizar pruebas exhaustivas y verificar el rendimiento de quemadores y estufas de combustión (Chen et al., 2015; Fachinger, Drewnick, Gieré, & Borrmann, 2017). La investigación sistemática de la transferencia de calor y la eficiencia de la combustión en el diseño de estos sistemas podría determinar qué tecnologías funcionan mejor y cómo asegurar que las estufas que se diseñan son realmente una mejora sobre los métodos tradicionales (Zhang, Zhang, Zhou, & Ahmad, 2016). Algunos parámetros que se deben tener en cuenta para la utilización de estufas son (I) el consumo de combustible, (II) la eficiencia térmica, (III) emisiones de CO y PM<sub>2.5</sub>, (IV) temperatura interior (V) concentraciones diarias de CO y PM<sub>2.5</sub> en interiores, entre otros (Fachinger et al., 2017; Mitchell et al., 2016).

Debido a la baja densidad de energía de la biomasa es importante realizar pretratamientos para mejorar sus propiedades fisicoquímicas, con lo cual se busca mejorar la disposición de los combustibles e incrementar las eficiencias en los procesos de combustión y gasificación. Un proceso básico es el secado donde se elimina la humedad de la biomasa. En este proceso se tiene un amplio





**Figura 0-1: Representación esquemática del proceso de Torrefacción. Fuente: (adaptado de Chen et al., 2015).**

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Diseñar y construir un reactor de torrefacción de biomasa.

### Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica en la literatura científica de los diferentes diseños de reactores de torrefacción de biomasa.
- Seleccionar y realizar el diseño del reactor de torrefacción a ser construido basados en criterios técnicos y económicos.
- Construir el reactor de torrefacción.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

Un proceso termoquímico se refiere a un tratamiento que involucra calor y una atmósfera reactiva o inerte como los principales reactivos que convierten un material en un producto que puede ser utilizado para aplicaciones energéticas (Danilo Scordia, Douwe van den Berg, in *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts*, 2018)(Stephen Gent, Evan Almberg, in *Theoretical and Applied Aspects of Biomass Torrefaction*, 2017). Por ejemplo, la pirólisis es un proceso en el cual un material orgánico es calentado de manera rápida en una atmósfera en ausencia de aire (Danilo Scordia, Douwe van den Berg, in *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts*, 2018). Existen diferentes tipos de reactores para llevar a cabo un proceso termoquímico (ALEJANDRO, 2017; Obando, 2015). A continuación, se describen algunos:

### Tipos de reactores

#### Reactor tipo Batch

El reactor tipo Batch es un reactor caracterizado por tener un tanque cubierto con una chaqueta calefactora donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un dispositivo mecánico (agitador) que se encarga de homogenizar la mezcla por medio de la agitación. Posee un diseño de fácil implementación, sin embargo, es un equipo que promueve la aparición de productos secundarios no deseados (compuestos cíclicos, aromáticos, etc.) debido a la no existencia de un flujo gaseoso que vaya desplazando los volátiles generados en la reacción, por esta razón esta tecnología es poco utilizada.

Por otra parte, este tipo de reactor opera exclusivamente de manera batch, haciendo que desde un punto industrial este en desventaja frente aquellos que lo hacen de manera continua, sin embargo, es una alternativa que promueve la obtención de producto en fase sólida.



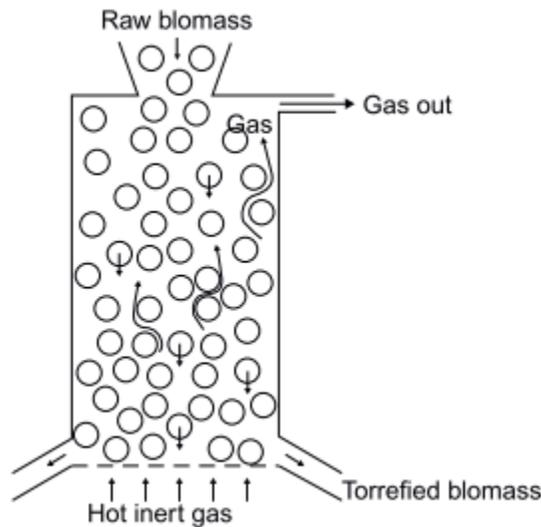
Figura 0-2: Reactor Batch. Fuente: (Obando, 2015)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### Reactor de Lecho Fijo

Reactor de flujo no ideal con forma generalmente tubular, que se utiliza para reacciones catalizadas por sólidos o reacciones fluido-sólido no catalíticas, con disposición de las partículas sólidas en lecho fijo.

El reactor del Lecho fijo es uno de los equipos que obtiene mejores resultados en cuanto a la selectividad hacia productos líquidos, puede ser operado de manera continua y batch. Sin embargo, este tipo de reactor es propenso a sufrir obstrucciones en sus conductos a la hora de ser escaldado además de presentar problemas de transferencia de materia y calor en el lecho, requiere de pretratamientos que involucren la adición de presión y temperatura para facilitar el ingreso de los reactivos al lecho, o bien de la realización de una etapa de pirólisis térmica previa.



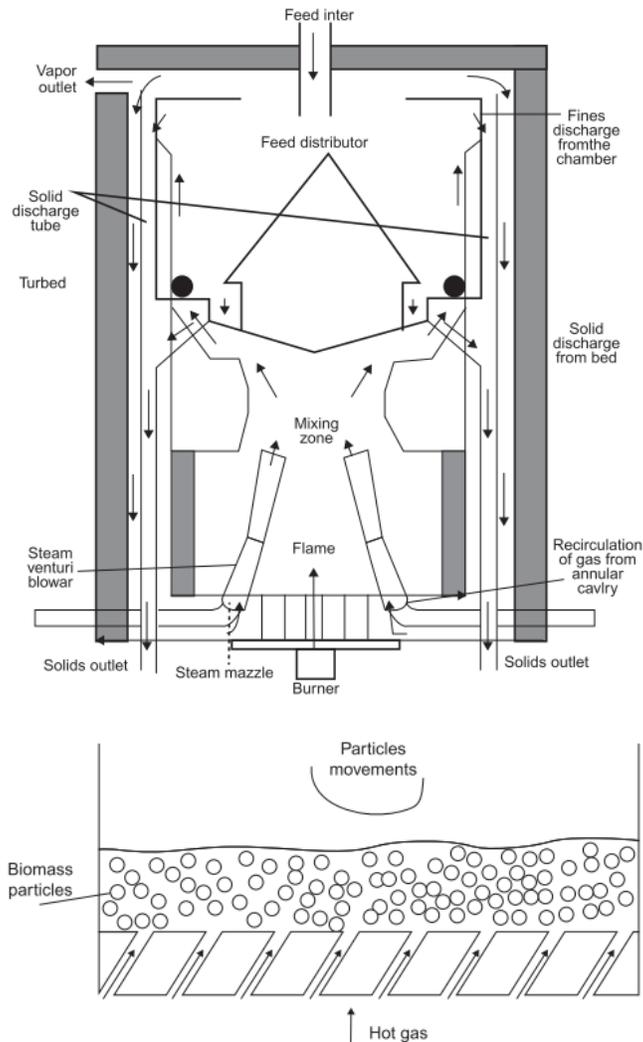
**Figura 0-3: Reactor convectivo (lecho fijo, entrante y en movimiento). Fuente: (Basu, 2013).**

### Reactor de Lecho Fluidizado

Reactor donde un fluido, gas o líquido, pasa a través de un sólido granulado finalmente, generalmente un catalizador, a una velocidad tal que el sólido queda suspendido en el fluido comportándose, a su vez, como un fluido. El flujo ascendente hace que las partículas del lecho se dispersen mejorando tremendamente la transferencia de calor y de masa en su volumen de reacción. Justamente, la facilidad relativa en la que se dan estos fenómenos es la ventaja clave que tiene este equipo frente al lecho fijo, manifestándose como una alternativa atractiva desde un punto de vista industrial, puesto que permite la operación en continuo.

Este tipo de equipos se caracterizan por tener un lecho que se moverá cuando el peso aparente de sus partículas sea igual o menor a la fuerza de arrastre originada por la velocidad del flujo del gas portador. En ese sentido, toma relevancia el factor de velocidad de fluidización, parámetro clave que determinara la distribución de tiempos de residencia de los productos obtenidos en el reactor.

El reactor de lecho fluidizado debe sus ventajas a factores como el buen contacto entre el catalizador y el reactivo.



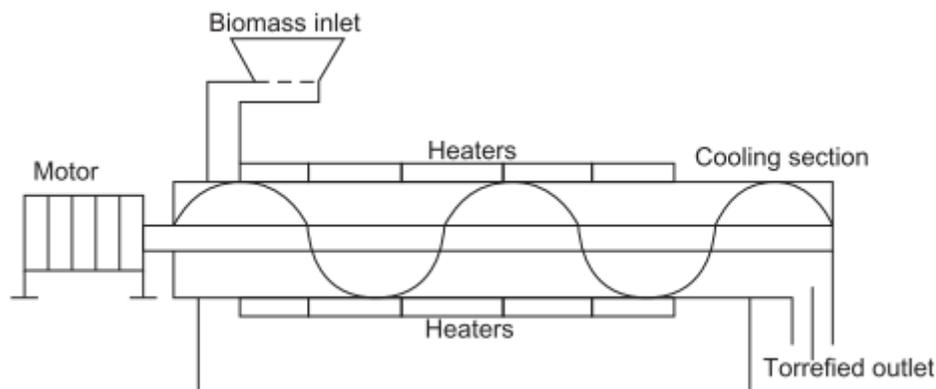
**Figura 0-4: Reactor Torbed con lecho fluidizado. Fuente: (Basu, 2013).**

### Reactor de Tornillo

El reactor de tornillo es un equipo que básicamente consiste en una tolva de entrada, por donde ingresan los reactivos para dar a un tornillo sin fin, encargado de transportar estos compuestos a través de un barril calefaccionado, donde se llevan a cabo las reacciones de degradación. En sí, es muy similar a lo que es una extrusora de plástico.

Este tipo de sistema permite trabajar de forma continua, así como evaluar el efecto del tiempo de residencia en el reactor sobre los productos generados únicamente modificando la velocidad de giro del tornillo (Aguado et al 2001). El reactor de tornillo es una alternativa que al igual que otros reactores descritos, permite la operación en continuo, sin mostrar aparentes problemas en el escalamiento, por lo que contempla una alternativa interesante desde un punto de vista industrial.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 0-5: Reactor de tornillo sinfín. Fuente: (Basu, 2013).**

### Reactor de Tornillos en Serie

Trabajo como el de (Nachenius, van de Wardt, Ronsse, & Prins, 2014) determinan trabajar con un reactor de tornillo sin fin debido a su ventaja en cuanto a ser un proceso continuo lo cual es interesante desde el punto de vista industrial. Los investigadores utilizaron un reactor con un flujo másico de diseño de 2.5 kg/h encontrando que cambios en los parámetros de operación de la torrefacción dentro del reactor tiene gran influencia en los rendimientos como el mass yield y recomiendan que posibles bloqueos dentro del reactor es dado por la generación de finos del pino.

Se usó Pino comercialmente (Bemap Houtmeel BV, Holanda) con un tamaño de partícula máximo de 6 mm se usó en estos experimentos. La configuración experimental utilizada en este trabajo es única ya que las lecturas de temperatura se toman de la superficie del tornillo giratorio a lo largo de todo el reactor. Las temperaturas medidas en la superficie del tornillo, que está en contacto directo con la superficie de las partículas de biomasa, proporcionan una mejor estimación de las condiciones térmicas experimentadas por las partículas.

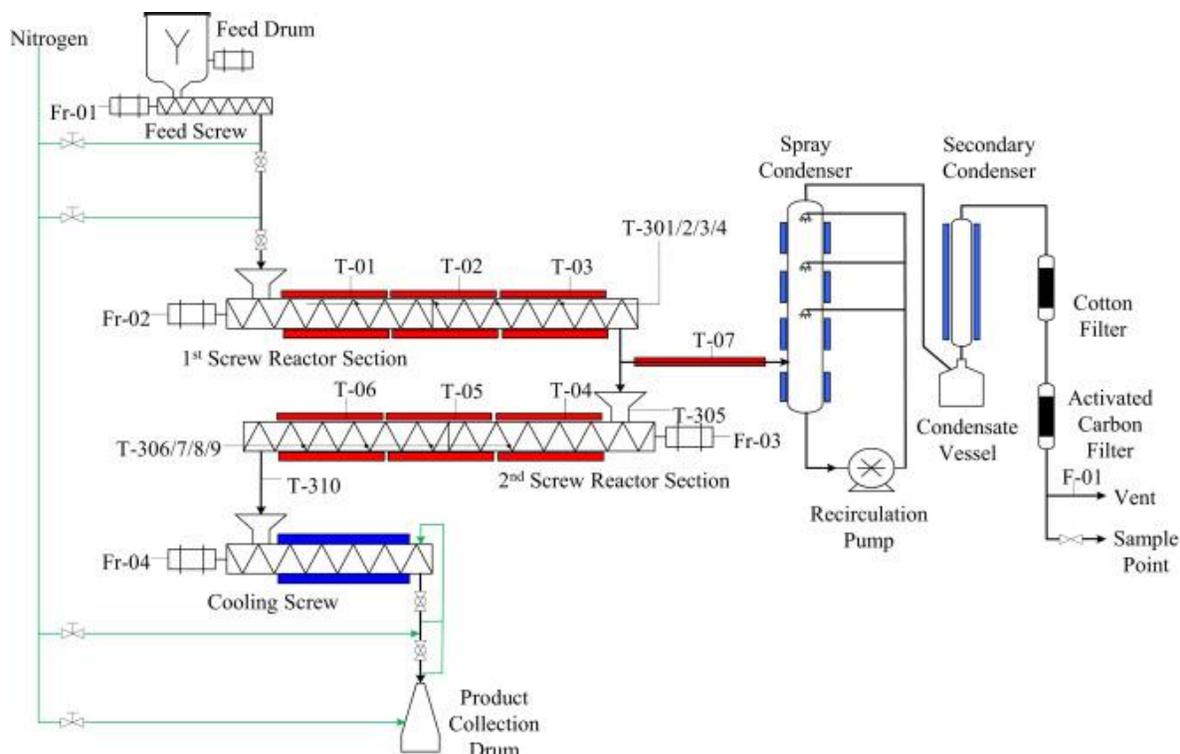
Las partículas de pino se transportan desde un tambor de alimentación agitado a un sistema de válvulas de bola accionadas neumáticamente mediante un transportador de alimentación. Las válvulas de bola garantizan que el reactor permanezca herméticamente sellado. El nitrógeno se introduce en el sistema en cuatro puntos cerca de las válvulas de entrada y salida del reactor para purgar cualquier oxígeno del proceso y también para barrer los gases y vapores del producto desde la entrada y salida del reactor al sistema de condensación de vapor.

Los caudales de nitrógeno se miden mediante rotámetros y se manipulan ajustando las válvulas de aguja. El reactor de torrefacción está dividido en dos secciones de reactor de tornillo idénticas, que funcionan en serie. La división del reactor en dos secciones obedecía a requisitos prácticos (que reducían el tamaño de la instalación) pero también permitiría trabajos futuros que compararan el flujo en contra corriente de nitrógeno y gases de torrefacción en relación con el flujo de biomasa.

En ese trabajo se demostró que las partículas gruesas de pino pueden ser molidas de manera efectiva en un reactor transportador de tornillo. Durante la torrefacción, se debe prestar atención

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a la selección de las condiciones de operación (y al diseño adecuado de los procesos futuros) para evitar la aglomeración de partículas finas que pueden causar bloqueos del proceso. Adicionalmente, se observaron diferencias de temperatura significativas entre la pared exterior del reactor y las temperaturas internas registradas por los termopares fijados a la superficie de los tornillos giratorios.



**Figura 0-6: Diagrama de flujo de reactor de torrefacción de tornillo sin fin. Fuente: (Nachenius et al., 2014)**

### Reactor con termoacústica

En este artículo (Silveira et al., 2018) buscan proponer una tecnología innovadora para mejorar la torrefacción de biomasa a través de ondas acústicas. Los autores presentan el uso de un sistema acústico en un reactor de torrefacción en laboratorio existente.

Discutieron la posibilidad de mejorar la transferencia de calor entre los sólidos y el gas del ambiente mediante la aplicación de un campo acústico fuerte. Los resultados mostraron que la tasa de transferencia de calor entre un cable precalentado y el gas ambiental puede mejorarse con la aplicación de ondas de sonido.

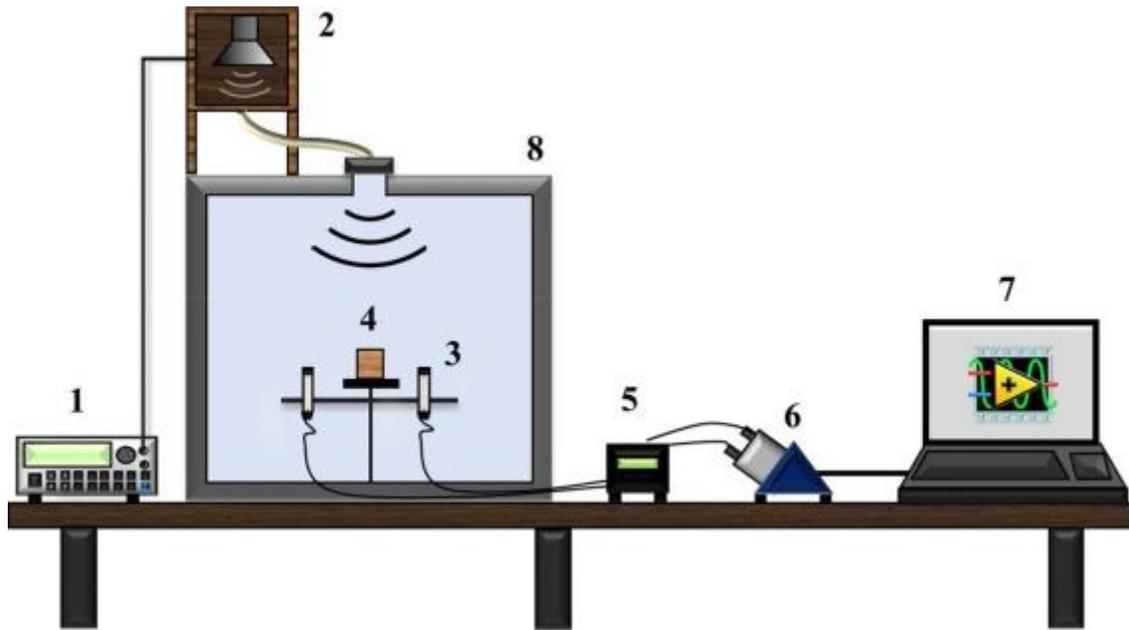
La suposición es que un campo acústico en un reactor de torrefacción modifica la presión y las velocidades de las partículas alrededor de la muestra de madera. El efecto combinado del calor y la acústica podría modificar la interacción entre el ambiente gaseoso del reactor y la muestra de madera, modificando el desarrollo de los procesos de degradación. Para ello, se aplicó un sistema

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

acústico dentro de un reactor de torrefacción existente y posteriormente se caracterizó. Se utilizaron tres metodologías diferentes en términos de dominios de tiempo y frecuencia. Esta caracterización permitió la medición de la velocidad de flujo y la intensidad acústica en el punto exacto donde estaba la muestra en el reactor.

Estos resultados acústicos se analizaron y se usaron para predecir qué frecuencia e intensidad acústica produjeron las condiciones ideales para obtener velocidades de partículas más altas alrededor de la muestra de madera. Finalmente, se realizó una prueba preliminar de torrefacción para observar el efecto de acoplamiento de la temperatura y las ondas acústicas en los perfiles de temperatura, rendimiento sólido y tasa de conversión.

Estos resultados indican que los campos acústicos afectaron la interacción entre el ambiente gaseoso y la muestra de madera que afecta la dinámica de transferencia de calor bajo las mismas condiciones experimentales. Un análisis paramétrico de la torrefacción de biomasa, incluidas las ondas acústicas, será objeto de nuevas investigaciones en un próximo estudio.



**Figura 0-7: Reactor de torrefacción a escala de laboratorio de termoacústica. Fuente: (Silveira et al., 2018).**

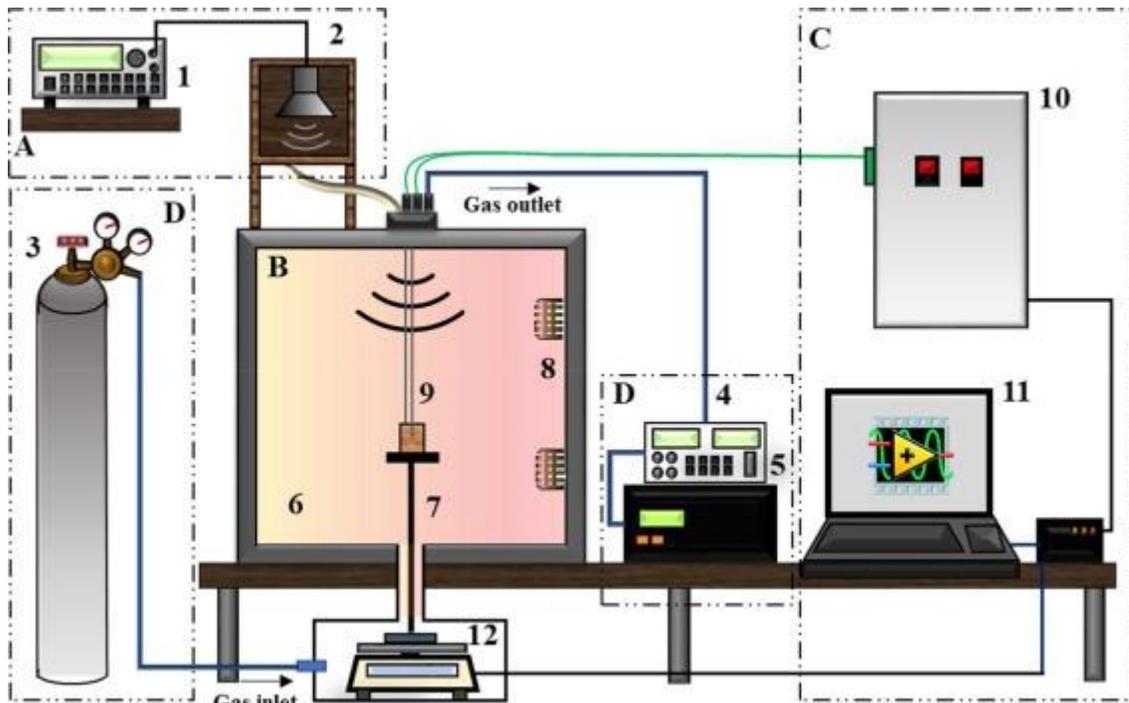


Figura 0-8: Torrefacción termoacústica. Fuente: (Silveira et al., 2018).

### Reactor de Hogares Múltiples

En este reactor las partículas se mueven con respecto a las paredes del reactor. Dichas paredes pueden ser horizontales, verticales o inclinadas. Las partículas pueden ser movidas por efecto de la gravedad o por un dispositivo mecánico como un disco rotatorio (Basu, 2013).

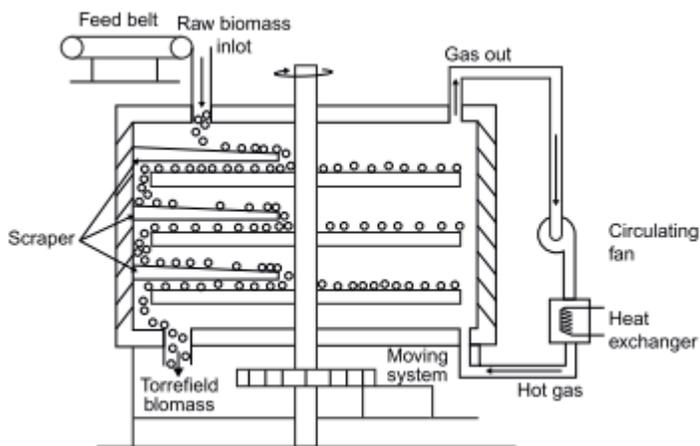
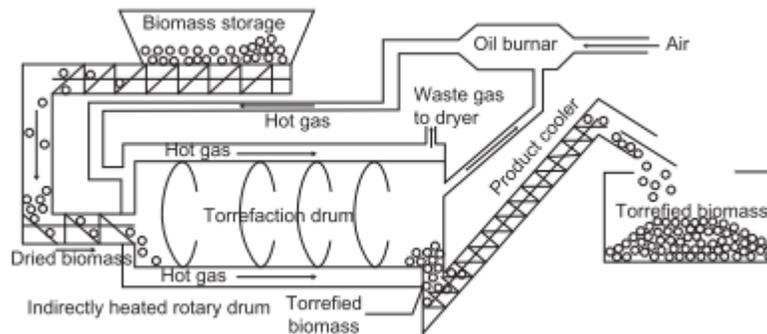


Figura 0-9: Reactor de hogares múltiples. Fuente: (Basu, 2013).

### Reactor de tambor rotatorio

En este reactor se genera calentamiento indirecto a partir de un tambor giratorio bajo una atmosfera inerte. La biomasa es calentada por las paredes del tambor o por la atmosfera caliente dentro del tambor. La transferencia de calor hacia las partículas es el principal factor de control en este reactor a diferencia de la transferencia de calor del gas hacia la biomasa (Basu, 2013).



**Figura 0-10: Reactor de tambor rotatorio. Fuente: (Basu, 2013).**

**Tabla 0-1: Ventajas y desventajas. Fuente: Tomado de (Basu, 2013).**

Reactor	Ventajas	Desventajas
<b>Tambor Rotatorio</b>	Simple. Baja caída de presión. Operación en contacto directo o indirecto.	Mala transferencia de calor. Difícil control de temperatura.
<b>Lecho Móvil</b>	Simple operación y construcción. Alta densidad de lecho. Elevada transferencia de calor.	Alta caída de presión. Difícil control de temperatura.
<b>Tornillo</b>	Posibilidad de flujo en pistón. Tecnología madura.	Calentamiento indirecto. Baja capacidad de transferencia de calor.
<b>Hogares Múltiples</b>	Diseño probado. Fácil escalado. Facilidad para el control del tiempo de residencia y la temperatura.	Reactores de gran tamaño. Difícil escalado.
<b>Lecho Fluidizado</b>	Eficiencia para transferencia de calor. Escalable.	Requiere partículas de pequeño diámetro.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

		Requerimiento adicional de gas para fluidización.
--	--	---

**Tabla 0-2: Diferentes desarrolladores de tecnologías de reactores de torrefacción. Tomado de (Basu, 2013).**

Tecnología reactor	Desarrollador
<b>Tambor rotatorio (<i>Rotary drum reactor</i>)</b>	CDS(UK), Torr-coal (NL), BIO3D(FR), EBES AG(AT), 4Energy Invest (BE), BioEndev/EPTS (SWE), Atmosclear S.A. (CH)
<b>Tornillo sinfin (<i>Screw conveyor</i>)</b>	BTG (NL), Biolake (NL), FoxCoal (NL), Agri-tech (US)
<b>Hogares multiples (<i>Multiple hearth</i>)</b>	CMI-NESA (BE), Wyssmont (US)
<b><i>Entrained</i></b>	Topell (NL), Airex (Canada)
<b><i>Fluidized</i></b>	Topell (NL)
<b><i>Mircowave</i></b>	Rorowave (UK)

### 3. METODOLOGÍA

#### Descripción de la búsqueda en la literatura y selección del reactor.

A partir de la búsqueda en bases de datos científicas adscritas al ITM, se investigó en artículos científicos, una tesis de maestría y una tesis doctoral relacionados con los diferentes reactores para torrefacción teniendo en cuenta los parámetros de operación como temperatura, tiempo de residencia, cantidad de material, economía, tipo de material del reactor, tipo de biomasa, gas de arrastre; entre otros.

El criterio de selección se dio en encontrar una viabilidad técnica y económica del reactor. Por tanto, el reactor de tornillo sin fin fue una alternativa viable, porque al estudiar este dispositivo a una escala real, éste permite adaptarse a parámetros como: facilita usar un gas de arrastre (N<sub>2</sub>), el material es de acero inoxidable el cuál no reacciona con la biomasa y no requiere una inversión alta en componentes electromecánicos.

En cuanto a la temperatura y el tiempo de residencia se tuvo en cuenta un proceso que no fuera severo, esto quiere decir 250 °C y 1 hora o menos puesto que a valores mayores se degradaba gran cantidad de material (aserrín). Por otra parte, la escala de trabajo para el aserrín es del orden de los 500 gramos/hora ya que en otros trabajos se llevaron a cabo en reactores de escala industrial (flujos másicos mayores) o del orden de micras por TGA. Este flujo másico es adecuado para quemar la biomasa posteriormente en un quemador de baja potencia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Debido a la naturaleza fibrosa de la biomasa de aserrín, el reactor de tornillo sinfín fue seleccionado a partir de una viabilidad técnica asociada a presentar un mejor comportamiento en el arrastre del material. En cuanto a la viabilidad económica se dio por la utilización en gran parte de dispositivos mecánicos con un diseño sencillo. Las principales piezas del reactor son de acero inoxidable debido a sus buenas propiedades mecánicas, su resistencia a las altas temperaturas, a la corrosión y la oxidación, evitando así contaminación en la biomasa. La temperatura debe permanecer en los rangos ya establecidos para cumplir con el objetivo que se busca obtener de la biomasa y que sea una temperatura en lo posible homogénea en todo el reactor.

### Proceso de selección de biomosas

El criterio de selección se hizo con base en especies representativas a nivel local, teniendo en cuenta su factibilidad técnica asociada a su ubicación geográfica, cantidad, disponibilidad y acceso al lugar donde se encontraban. Por tanto, se efectuó la búsqueda del aserrín de pino ciprés (madera blanda) en la ciudad de Medellín. Esto es debido a que el área reforestada con fines comerciales presenta las siguientes características: producción por turnos para 30 años; densidad de 0,43 g/cm<sup>3</sup>; rendimiento de 27 m<sup>3</sup>/(ha x año) y presencia en la subregión del suroeste antioqueño. Adicionalmente, presenta una composición química sin torrefacción de celulosa (47,64%), hemicelulosa (14,32%) y lignina (29,57%) en base seca (Gong et al., 2016).

### Evaluación del efecto de la temperatura de torrefacción.

En esta etapa, se realizó el proceso de torrefacción en el analizador térmico TA Instruments TGA/DSC Q600 SDT del laboratorio de energía térmica de parque i-ITM, el cual tiene las siguientes características: sensibilidad en balanza de 0.1 µg, rango de temperatura hasta 1500 °C, termopares de platino/platino-rodio, sensibilidad de temperatura de 0.001 °C y el material de referencia en el equipo es alúmina inactiva térmicamente (Q. Bach, Chen, Lin, Sheen, & Chang, 2017; Bilgic, Yaman, Haykiri-Acma, & Kucukbayrak, 2016).

En cuanto a la temperatura se seleccionaron cinco (200, 225, 250, 275 y 300 °C) según lo reportado en el trabajo reportado por (Chen et al., 2015), donde el efecto de la temperatura ha sido clasificado en procedimientos ligeros, medios y severos, respectivamente. El análisis TGA-DSC se hizo un proceso previo de secado a 120°C posteriormente, la biomasa se llevó a la temperatura de torrefacción a una rampa de calentamiento de 20 °C/min, para luego hacer una isoterma en 1 tiempo de residencia de 60 min. Luego, se sometió la muestra a una temperatura de 800 °C con nitrógeno como gas de proceso. Finalmente, la muestra es enfriada hasta temperatura ambiente.

### Descripción del sistema experimental: CAD

En cuanto al tornillo sinfín, consta de un  $\varphi_{eje} = 1/2"$ ,  $\varphi_{exterior} = 48,7 \text{ mm}$ , espesor filete de 2 mm y 28 vueltas con una longitud de 1 metro como se muestra en la siguiente figura:



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Figura 0-11. Tornillo sinfín del reactor de torrefacción.**

Una vez construido el tornillo, se hicieron varios ensayos de flujo de arrastre en reactor de torrefacción a partir de pruebas de llenado con el material y se tomaron medidas del tiempo que se demora el tornillo sin fin en desplazar la cantidad de aserrín alimentado.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

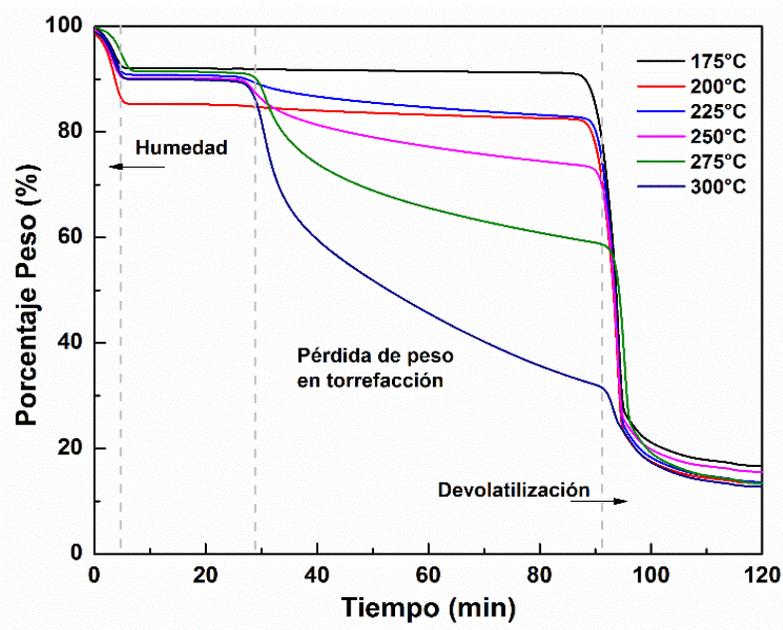
**Tabla 0-3: Tabla comparativa (ventajas y desventajas) de diferentes tecnologías de reactores.**

Tipo de reactor	Fácil Diseño	Fabricación a escala industrial	Costo de mantenimiento	Costo de Fabricación	Temperaturas Homogéneas
BATCH	SI	SI	MEDIO	ALTO	APLICA
LECHO FIJO	SI	SI	MEDIO	MEDIO	NO APLICA
LECHO FLUIDIZADO	SI	SI	MEDIO	ALTO	NO APLICA
TORNILLO	SI	SI	BAJO	BAJO	APLICA
TERMOACUSTICO	NO	NO	ALTO	ALTO	NO APLICA
TORNILLOS EN SERIE	NO	SI	ALTO	ALTO	APLICA
MICROONDAS	NO	NO	ALTO	ALTO	APLICA

A partir de la tabla anterior se tienen en cuenta las ventajas para seleccionar el reactor de tornillo como la tecnología más viable. En cuanto a tiempo de residencia, este no puede ser mayor a una hora con el objetivo de obtener un rendimiento sólido adecuado durante la torrefacción que este dentro de los límites propuestos (ver **Figura 0-14**).

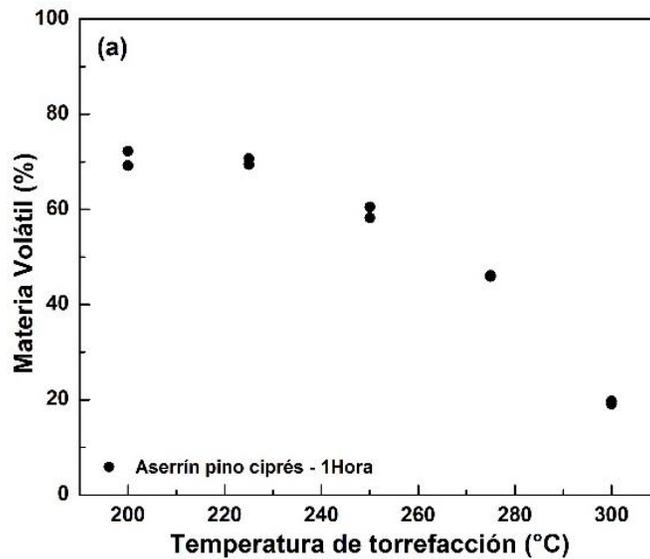
### **Efecto de la temperatura de torrefacción**

El efecto de la temperatura de torrefacción en la pérdida de peso del aserrín de pino ciprés se muestra en la **Figura 0-12**. En el termograma se observa un proceso que consiste en tres etapas, las cuales son: pérdida de humedad en un rango de 95-100 °C; pérdida de peso correspondiente a la torrefacción que puede ser hasta un 40% dependiendo la temperatura y devolatilización en mayores temperaturas. Cuando la temperatura de torrefacción se incrementó a valores de 275 °C o 300 °C (proceso severo), los cambios en peso fueron mayores debido a una degradación de uno de sus componentes macromoleculares, para nuestro caso fue principalmente hemicelulosa, lo cual es similar a estudios previos (Nunes, De Oliveira Matias, & Da Silva Catalão, 2018) llevados a cabo en biomásas madereras.



**Figura 0-12: Análisis termogravimétrico del aserrín de pino ciprés.**

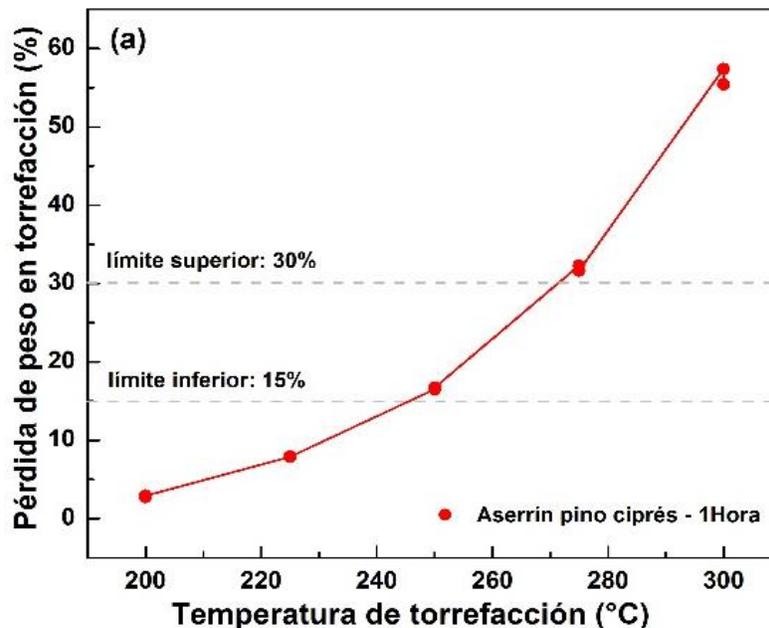
La **Figura 0-13** muestra el porcentaje de contenido volátil en aserrín bajo torrefacción. Se observa que a medida que el proceso aumenta su severidad (300°C-1Hora), el material volátil disminuye hasta un 19% aproximadamente en el aserrín. Este comportamiento es debido a que un porcentaje alto de pérdida de peso se obtuvo durante el proceso termoquímico, lo cual es generado por una degradación térmica de hemicelulosa y celulosa debido a reacciones como deshidratación y despolimerización (Q.-V. Bach, Tran, Skreiberg, & Trinh, 2015; Chen et al., 2013).



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Figura 0-13: Materia volátil por torrefacción: Aserrín**

La **Figura 0-14** presenta los límites para selección de temperatura de torrefacción en aserrín de pino ciprés. El proceso se hizo bajo cinco diferentes temperaturas (200, 225, 250, 275 y 300 °C) y un solo tiempo de residencia (1 hora). Se escogieron dos límites, uno superior de 30% y el inferior de 15% con el fin de lograr un rendimiento sólido apropiado para obtener un biocarbón que pueda ser empleado a futuro en un dispositivo térmico, el cual será un quemador a escala de laboratorio. Se recomienda un valor de 250 °C para llevar a cabo la torrefacción. Sin embargo, por cuestiones económicas asociadas a la atmósfera inerte y de diseño del reactor (componentes electromecánicos), se hace necesario disminuir el tiempo de residencia en el orden de minutos.



**Figura 0-14: Límites para selección de temperatura de torrefacción en aserrín.**

### Descripción del proceso de construcción

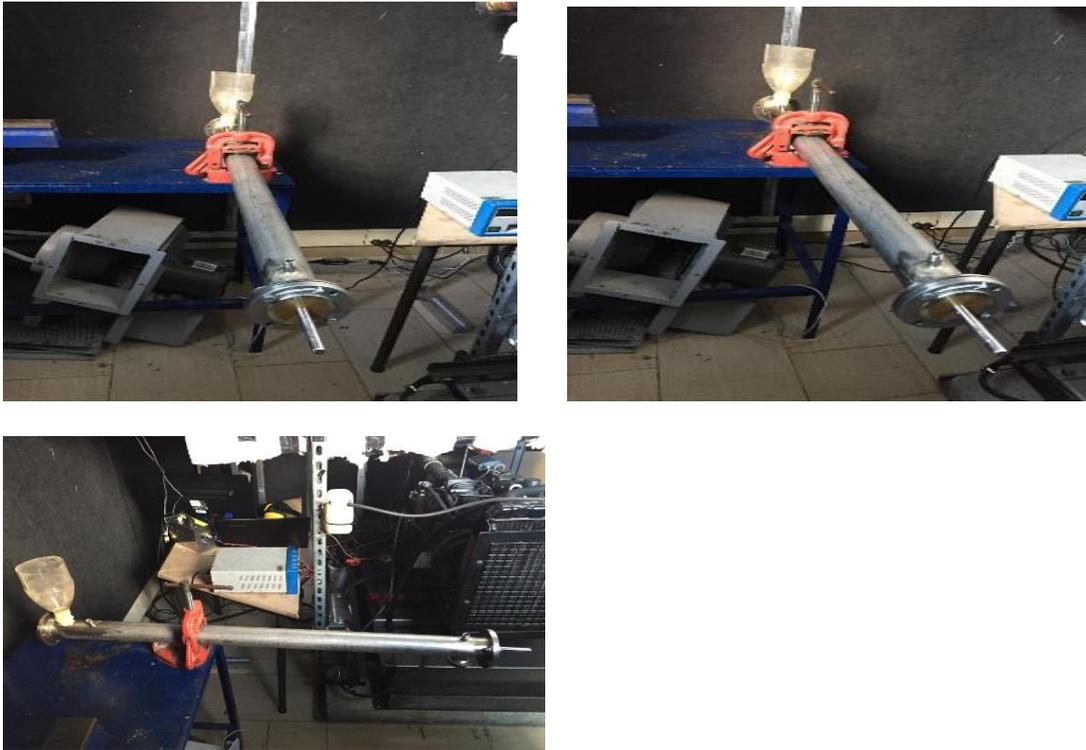
Se inició con la búsqueda de un taller especializado en soldadura en inoxidable. Después, se cotizó la fabricación del diseño escogido el cual consta de los siguientes elementos: tubo en acero inoxidable de 2" x 1 metro, dos tapas bridas ubicadas en los extremos para garantizar un mejor sellado, conexiones para racores de 5/16", una salida de 1 $\frac{13}{16}$ " para salida de material torrefacto.

Adicionalmente, se tuvieron dificultades relacionadas con la ejecución del trabajo puesto que era un diseño en particular sin características estándar o comunes cuyo mecanizado requiere un esfuerzo bajo.

La alineación del tornillo sinfín es fundamental para que este no roce con las paredes del reactor, para evitar desgastes en piezas, y un posible desacople entre el eje del tornillo y el motor en medio de una operación. En este caso se utilizaron bujes como apoyos del eje para obtener una mejor estabilidad, alineación y resistencia a la temperatura. El proceso de soldadura se realizó con mucha precaución para evitar deformaciones del eje por las temperaturas.

**Registro fotográfico.**





**Figura 0-15: Etapas de construcción del reactor de torrefacción de tornillo sinfín. Fuente: elaboración propia.**

#### Determinación de parámetros de operación del reactor

La masa de aserrín correspondiente al reactor lleno corresponde a 58.1 g. Dependiendo de la velocidad de giro del eje del tornillo se obtendrá un flujo másico determinado. Por ejemplo, la **Tabla 0-4** muestra los parámetros para el cálculo del flujo másico de arrastre del reactor de torrefacción de tornillo sinfín. Se observa que ante un mayor tiempo de residencia se logra arrastrar mayor cantidad de masa del material. Las pruebas 1 y 2 presentan valores de trabajo similares con un valor promedio de diseño de 2,75 g/s a ser suministrados en el reactor. Lo anterior implica que el reactor debe operar con una velocidad de flujo mucho menor con el objetivo de obtener la cantidad de material torrefacto deseada la cual es de 500g/h.

**Tabla 0-4: Parámetros para el cálculo de flujo másico de arrastre en el reactor de torrefacción.**

Tiempo (s)	Masa (g)	Flujo másico (g/s)	
72,001	196	2,722184414	Prueba 1
54,017	151	2,795416258	Prueba 2

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Se realizó la búsqueda de la literatura de las principales tecnologías de reactores de torrefacción con el fin de ver el actual estado del arte. Las tecnologías revisadas correspondieron a reactores batch, reactor de lecho fijo, reactor de lecho fluidizado, reactor de tornillo, reactor con termoacústica y reactor de tornillos en serie.

La tecnología seleccionada para el diseño y la implementación del equipo, correspondió al reactor de tornillo debido a que este se muestra como una alternativa factible a ser escalada industrialmente y que se puede utilizar en modo continuo. Además, con este se puede regular el tiempo de residencia de la biomasa mediante la velocidad del giro del tornillo.

El material escogido para la fabricación del reactor (acero inoxidable) es el adecuado para realizar el tratamiento a la biomasa, evitando contaminación, adherencia de cuerpos extraños que pueden alterar el proceso y es resistente a la temperatura de trabajo deseada.

Las pruebas con el prototipo demuestran un comportamiento de acuerdo a las consideraciones de diseño preestablecidas. El tornillo transporta de manera efectiva la biomasa a lo largo del reactor.

Como actividad futura se evaluará el comportamiento térmico de la biomasa a la temperatura recomendada según los análisis termogravimétricos: 250°C.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

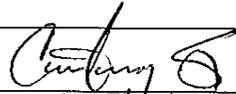
- Acharya, B., Dutta, A., & Minaret, J. (2015). Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *12*, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.08.003>
- ALEJANDRO, D. A. R. (2017). *Gasificación de Biomasa: Modelado, Simulación y Análisis Experimental*. UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0515-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0515-2_3)
- Bach, Q.-V., & Skreiberg, Ø. (2016). Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 665–677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>
- Bach, Q.-V., Tran, K.-Q., Skreiberg, Ø., & Trinh, T. T. (2015). Effects of wet torrefaction on pyrolysis of woody biomass fuels. *Energy*, *88*, 443–456. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.062>
- Bach, Q., Chen, W., Lin, S., Sheen, H., & Chang, J.-S. (2017). Effect of Wet Torrefaction on Thermal Decomposition Behavior of Microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31. *Energy Procedia*, *105*, 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.303>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory*. (A. Press, Ed.) (Second). Oxford, UK: Elsevier Inc. Retrieved from store.elsevier.com
- Bilgic, E., Yaman, S., Haykiri-Acma, H., & Kucukbayrak, S. (2016). Is torrefaction of polysaccharides-rich biomass equivalent to carbonization of lignin-rich biomass? *Bioresource Technology*, *200*, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.032>
- Carvalho, R. L., Jensen, O. M., & Tarelho, L. A. C. (2016). Mapping the performance of wood-burning stoves by installations worldwide. *Energy and Buildings*, *127*, 658–679. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.010>
- Chen, W.-H., Lu, K.-M., Liu, S.-H., Tsai, C.-M., Lee, W.-J., & Lin, T.-C. (2013). Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. *Bioresource Technology*, *146*(x), 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.064>
- Chen, W.-H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Fachinger, F., Drewnick, F., Gieré, R., & Borrmann, S. (2017). How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmospheric Environment*, *158*, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.027>
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Peña, J. D. (2012). Madera, un Potencial Material Lignocelulósico para la Producción de Biocombustibles en Colombia. *Información Tecnológica*, *23*(6), 73–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000600009>
- Gong, C., Huang, J., Feng, C., Wang, G., Tabil, L., & Wang, D. (2016). Effects and mechanism of ball milling on torrefaction of pine sawdust. *Bioresource Technology*, *214*, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.062>
- Jeuland, M. A., Bhojvaid, V., Kar, A., Lewis, J. J., Patange, O., Pattanayak, S. K., ... Ramanathan, V. (2015). Preferences for improved cook stoves: Evidence from rural villages in north India. *Energy Economics*, *52*, 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.11.010>
- MacCarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable*

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Development*, 14(3), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.002>
- Mitchell, E. J. S., Lea-Langton, A. R., Jones, J. M., Williams, A., Layden, P., & Johnson, R. (2016). The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*, 142, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.031>
- Nachenius, R. W., van de Wardt, T. A., Ronsse, F., & Prins, W. (2014). Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor. *Biomass and Bioenergy*, 79, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.027>
- Nunes, L. J. R., De Oliveira Matias, J. C., & Da Silva Catalão, J. P. (2018). *Biomass Torrefaction Process. Torrefaction of Biomass for Energy Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809462-4.00003-1>
- Obando, G. A. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos ( ROS )*.
- Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., & Riedl, R. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. *Biomass and Bioenergy*, 12(3), 211–224. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(96\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(96)00051-7)
- Proskurina, S., Heinimö, J., Schipfer, F., & Vakkilainen, E. (2017). Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. *Renewable Energy*, 111, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.015>
- Silveira, E. A., Morais, M. V. G. de, Rousset, P., Caldeira-Pires, A., Pétrissans, A., & Galvão, L. G. O. (2018). Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129(December 2017), 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.008>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384–401. <https://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Zhou, Y., & Ahmad, R. (2016). Systematic and conceptual errors in standards and protocols for thermal performance of biomass stoves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(September), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.037>  
(<https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion/2-1-reactor-tipo-batch>).  
(<http://diccionario.raing.es/es/lema/reactor-de-lecho-fijo>).  
(<http://diccionario.raing.es/es/lema/reactor-de-lecho-fluidizado>).  
(<https://www.coursehero.com/>).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_

  
 c.c. 9062708 /  
  
 C.C. 71216274

FIRMA ASESOR Pedro Nel Alvarado T.  
c.c. 98462253

FIRMA CO-ASESOR Fredy Esteban Jaramillo Ramirez  
cc 1.152.190.087

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_\_      ACEPTADO\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_