

Adaptación de banco de pruebas de combustión ciclónica para uso como quemador de lecho fijo  
y estudio experimental de la combustión de biomasa residual de *Lippia Origanoides*

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Yesica Andrea López Vergara

Juan Diego Reyes Sánchez

Director

MSc Gabriel Fernando García Sánchez

Codirector

PhD Yesid Javier Rueda Ordoñez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

### Dedicatoria

*A Dios y al espíritu santo, primeramente, por la inteligencia, la sabiduría y el entendimiento que me brinda cada día de mi vida y por ser el promotor de todas las bendiciones a lo largo de mi vida y de mi profesión.*

*A mis padres Eunise y Guillermo, mis seres más amados, gracias por ser mi guía, mi apoyo y por su amor incondicional, a mi madre gracias por su valor, su esfuerzo y su compañía a lo largo de mi carrera y de mi vida a quien le debo todo lo que soy y seré.  
Esto es por ti y por mí, por nosotras.*

*A mi hermano Yeison, a quien más adoro y ha sido uno de mis mayores ejemplos a seguir, por su amor, su incondicionalidad, su apoyo y su compañía.*

*Gracias a mi madre y a mi hermano porque son mi mayor motivación a quienes les agradezco por permitirme lograr este gran objetivo en mi vida y que son completamente merecedores de este gran triunfo, quienes sabían de lo que soy capaz y puedo lograr. Quienes me ayudaron a que este sueño se hiciera realidad.*

*A mi mejor amiga Pamela por su amistad, su incondicionalidad, por motivarme cada día y no dejar que me rinda ante cualquier obstáculo, por ser parte de mi vida y de este gran logro.*

*A mi tía Rachel por siempre creer en mí y guiarme de la mejor manera, por ser un pilar fundamental en algunos momentos de mi carrera y por amarme tanto como yo a ella.*

*A mi familia y a cada una de las personas que estuvieron en cada paso que di.*

*A mis amigos más cercanos con quienes viví esta hermosa etapa y fueron parte de ella hasta lograrlo. Que nos deseo el mejor de los éxitos en todo lo que nos espera.*

*A mis profesores los cuales les agradezco por el conocimiento transmitido y mi crecimiento tanto personal como profesional. Principalmente a mi director, codirector y compañero de tesis quienes tuvieron un papel fundamental en este logro.*

**Dedicatoria**

*A mi madre, Claudia*

*A mi padre, William*

*Y a todas esas personas que con un granito de arena hicieron esto posible*

## Contenido

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1 Estado del arte .....	15
2.1.1 Antecedentes Internacionales .....	15
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	16
2.2 Biomasa.....	18
2.2.1 Bagazo de <i>Lippia Origanoides</i> (Orégano silvestre) .....	19
2.3 Combustión .....	20
2.3.1 Fases de la combustión .....	20
2.3.2 Medición de la eficiencia de la combustión .....	21
2.4 Aire teórico.....	22
2.5 Relación aire combustible .....	22
2.6 Gases de combustión .....	23
2.6.1 NO <sub>x</sub> (Óxidos de nitrógeno).....	23
2.6.2 CO (Monóxido de carbono) .....	23

2.6.3 CO <sub>2</sub> (Dióxido de carbono).....	24
2.7 Medición de temperatura.....	24
2.8 Analizador de gases de combustión.....	25
2.9 Medición de caudal de aire.....	26
2.10 Ecuación de Rosin Rammler .....	27
3. Metodología .....	28
3.1 Caracterización de la biomasa .....	28
3.1.1 Granulometría de <i>Lippia Origanoides</i> .....	28
3.1.2 Determinación de la densidad del lecho de <i>Lippia Origanoides</i> .....	33
3.1.3 Relación Aire combustible en la cámara de combustión .....	33
3.2 Rediseño del quemador de lecho fijo.....	35
3.3 Adecuación del banco de laboratorio.....	40
3.4 Estudio de la combustión de biomasa residual de <i>Lippia Origanoides</i> .....	43
4. Resultados y Discusiones.....	44
4.1 Perfiles de temperatura .....	45
4.2 Gases de combustión .....	50
5. Conclusiones .....	57
6. Recomendaciones .....	58
Bibliografía .....	59
Anexos .....	64

**Lista de Figuras**

Figura 1 <i>Lippia Origanoides</i> .....	19
Figura 2 <i>Analizador de gases testo 350</i> .....	25
Figura 3 <i>Software easyEmission</i> .....	26
Figura 4 <i>Placa de orificio según norma ISO 5167</i> .....	26
Figura 5 <i>Toma de muestra de hojas de Lippia Origanoides</i> .....	29
Figura 6 <i>Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para hojas de Lippia Origanoides</i> .....	30
Figura 7 <i>Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para tallos de 3cm de Lippia Origanoides</i> .....	32
Figura 8 <i>Banco de combustión ciclónica del laboratorio</i> .....	35
Figura 9 <i>Alternativa de diseño 1 para banco de lecho fijo</i> .....	37
Figura 10 <i>Alternativa de diseño 2 para banco de lecho fijo</i> .....	37
Figura 11 <i>Alternativa de diseño 3 para banco de lecho fijo</i> .....	38
Figura 12 <i>Sello de caucho para la tubería de aire</i> .....	39
Figura 13 <i>Diseño del banco de lecho fijo</i> .....	40
Figura 14 <i>Banco de lecho fijo</i> .....	41
Figura 15 <i>Malla de seguridad</i> .....	41
Figura 16 <i>Banco de lecho fijo dentro del quemador</i> .....	41
Figura 17 <i>Banco de lecho fijo acoplado con la malla de seguridad</i> .....	42
Figura 18 <i>Sistema alimentación de aire</i> .....	42
Figura 19 <i>Quemador de lecho fijo en posición de encendido</i> .....	43
Figura 20 <i>Perfil de temperaturas de combustión de las hojas de Lippia Origanoides</i> .....	46

Figura 21 <i>Perfil de temperaturas de combustión de los tallos de Lippia Origanoides</i> .....	47
Figura 22 <i>Perfil de temperaturas de combustión de la mezcla de Lippia Origanoides</i> .....	49
Figura 23 <i>Gases de combustión resultantes para la primera quema de hojas</i> .....	51
Figura 24 <i>Gases de combustión resultantes para la segunda quema de hojas</i> .....	52
Figura 25 <i>Gases de combustión resultantes para la primera quema de mezcla</i> .....	53
Figura 26 <i>Gases de combustión resultantes para la segunda quema de mezcla</i> .....	54
Figura 27 <i>Gases de combustión resultantes para primera quema de tallos</i> .....	55
Figura 28 <i>Gases de combustión resultantes para segunda quema de tallos</i> .....	56

**Lista de Tablas**

Tabla 1 <i>Tipos de biomasa residual</i> .....	18
Tabla 2 <i>Resultados de la medición dimensional de la muestra de hojas de Lippia Origanoides</i> .	29
Tabla 3 <i>Resultados de la medición de dimensiones de la muestra de tallos de 3cm de Lippia Origanoides</i> .....	31
Tabla 4 <i>Resultados de la medición de la densidad de lecho y aparente de partícula</i> .....	33
Tabla 5 <i>Resultados de análisis elemental de Lippia Origanoides</i> .....	34
Tabla 6 <i>Resultados de cálculo de moles de aire y relación de aire combustible</i> .....	35
Tabla 7 <i>Cuadro de selección de alternativas</i> .....	38

**Lista de Anexos**

Anexo A. Resultados de granulometría y diámetro equivalente. ....	64
Anexo B. Planos.....	66
Anexo C. Software.....	68
Anexo D. Arreglos de la tubería .....	68

## Resumen

**Título:** Adaptación de banco de pruebas de combustión ciclónica para uso como quemador de lecho fijo y estudio experimental de la combustión de biomasa residual de *Lippia Origanoides*. \*

**Autores:** Yesica Andrea López Vergara y Juan Diego Reyes Sánchez. \*\*

**Palabras clave:** Combustión, biomasa, quemador de lecho fijo, analizador de gases.

### Descripción:

El presente proyecto de investigación plantea una metodología para el estudio experimental de la combustión biomasa residual, de producción local, *Lippia Origanoides*, se realiza la medición de la densidad y la granulometría de esta biomasa y se desarrolla el diseño de un quemador de lecho fijo a partir de la adaptación de un quemador ciclónico preexistente. Con el uso del software de Arduino y termopares adquiridos comercialmente se logró la representación gráfica de varios perfiles de temperaturas de los cuales se analiza su relación con los datos de granulometría y densidad de lecho. Se realizó un análisis de los gases de combustión por medio de la experimentación usando el analizador de gases marca testo 350 en el lecho fijo adaptado, donde se encontró la cantidad de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO resultante. Se observaron resultados coherentes al compararse con los de diversos autores, se espera que estos puedan servir para futuros estudios de la combustión de otras biomásas residuales sólidas.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Gabriel Fernando García Sánchez. MsC.

### Abstract

**Title:** Adaptation of a cyclone combustion test bench for use as a fixed bed reactor and experimental study of the combustion of *Lippia Origanoides* residual biomass. \*

**Authors:** Yesica Andrea López Vergara y Juan Diego Reyes Sánchez. \*\*

**Key words:** Combustion, biomass, fixed bed reactor, gas analyzer.

#### Description:

This research project proposes a methodology for the experimental study of the combustion of locally produced residual biomass, *Lippia Origanoides*, measuring the density and granulometry of this biomass and developing the design of a fixed bed burner from the adaptation of a pre-existing cyclone burner. With the use of Arduino software and commercially acquired thermocouples, the graphical representation of several temperature profiles was achieved and their relationship with the data of granulometry and bed density is analyzed. An analysis of the combustion gases was carried out by experimentation using the testo 350 gas analyzer in the adapted fixed bed, where the amount of CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and NO was found. Consistent results were observed when compared with those of various authors, it is expected that these can serve for future studies of the combustion of other solid waste biomasses.

---

\*Bachelor thesis

\*\*Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Gabriel Fernando García Sánchez. MsC.

## Introducción

La necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo, es alarmante, por lo cual se requieren herramientas para realizar estudios experimentales de transformación energética que a su vez aporten a la formación de nuevos ingenieros enfocados en dar solución a la problemática.

Según señala Morales Soler (2022), Colombia es un país con poco desarrollo en energías renovables enfocadas en el uso de biomasa, que cuenta con mínimos incentivos de inversión en ellas. Por esta razón, casi no se ven apuestas en el desarrollo e implementación de tecnologías que permitan la producción de este tipo de energía renovable, lo anterior, ha sido un gran obstáculo para poder implementar procesos de transformación de residuos. Sin embargo, en años recientes se ha observado una voluntad gubernamental en pro del desarrollo de energías limpias en general en el país. Por ejemplo, en el Plan Nacional de Desarrollo (DNP, 2018) el Gobierno Nacional tiene como una de sus estrategias reforzar el desarrollo ambiental del país, para esto planea aumentar la reutilización de los residuos sólidos al 17,9% y a su vez reducir los gases de efecto invernadero a mediano plazo, según lo estipulado en el Acuerdo de París. El país cuenta con grandes oportunidades para ello. De acuerdo con un estudio realizado por la BUN-CA (2002), se estima que Colombia posee biomasa residual con valores importantes de Poder Calorífico Inferior, siendo este la cuantificación de la energía liberada en los procesos de combustión, entre 1800 Kcal/kg para el raquis de banano y 4384 Kcal/kg en tallos de café. Gracias a que el territorio colombiano está ubicado cerca del ecuador cuenta con clima generalmente templado y gran cantidad de fuentes hidrográficas, la nación mantiene una riqueza agrícola única en el mundo, en donde la gran cantidad de productos podrían ser aprovechados por medio de la conversión energética de la

biomasa para satisfacer las necesidades eléctricas del país. Según Escalante et al.: “... se reportan 29 millones de t/año de biomasa residual agrícola, procedentes de bagazo de caña de azúcar y panelera, de cascarilla de arroz, de fibra del cocotero, [...] y de cebada; los cálculos indican que esta biomasa puede tener una capacidad energética aproximada de 12000 Mwh/año” (Escalante et al, 2011, p.127). Respecto a los beneficios de usar esta fuente energética, Beaumont (1994) expresa, “uno de los puntos favorables de la utilización de la biomasa como fuente de energía es que en la constitución de las emisiones de la combustión de esta hay menor cantidad NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y de sus derivados si se compara con la emitida por los combustibles fósiles, lo cual contribuye a la neutralización de la lluvia ácida”.

En el programa de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, en la materia electiva “Combustión Industrial”, se cuenta con un banco de laboratorio donde se estudia la combustión de biomasa en un lecho ciclónico, los parámetros estructurales y de funcionamiento de dicho banco podrían ser modificados para su uso en labores investigativas en el campo del aprovechamiento de biomasa residual de la región como fuente de energía. Se plantea una adecuación estructural del banco para su uso como quemadora de lecho fijo y su mejoramiento en la obtención de datos de temperatura, para un posterior análisis de la combustión de la biomasa sólida vegetal.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Rediseñar y adecuar el banco de combustión ciclónica del laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica para la realización de pruebas de lecho fijo a diferentes condiciones de operación.

### 1.2 Objetivos específicos

- Acondicionar la cámara de combustión del banco de lecho ciclónico para la realización de pruebas de lecho fijo a 1 kg de biomasa sólida.
- Modificar el sistema de medición del banco de laboratorio de combustión mencionado para lograr la medición de todo el rango de temperatura presentado en la combustión de biomasa sólida y el registro de gases de combustión.
- Estudiar la combustión del bagazo de *Lippia Origanoides* (hojas, tallos y mezcla de hojas y tallos) por medio de la medición experimental de gases contaminantes y perfiles de temperaturas en el banco de laboratorio modificado.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Estado del arte

El estudio de la combustión de biomasa para la obtención de energía es un fenómeno en auge debido a la necesidad de conseguir energías limpias alternativas a los combustibles fósiles, se pueden encontrar diversos trabajos que utilizan la combustión en lecho fijo y lecho fluidizado para las pruebas. No obstante, el análisis de la quema de *Lippia Origanoides* no está desarrollado en su totalidad dejando espacio a la presente investigación sobre el tema, como se mostrará a continuación.

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

En Portugal, Al-karany (2013) con su trabajo titulado *caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante*, llevo a cabo un estudio del secado térmico y la combustión no contaminante de residuos de biomasa, su principal objetivo fue evaluar las características del residuo de la zona de Alentejo, Portugal y evaluar el desempeño de diferentes biomásas como combustible poco contaminante. Se realizaron los análisis inmediatos, de composición de cenizas y determinación del poder calorífico superior para las biomásas de orujo de uva, miscanthus, cáscara de café, poda, aceituna, corcho y eucalipto. Se usaron elementos tales como: KERN DBS 60-3 (Analizador humedad), horno mufla, Calorímetro y Thermo Scientific Niton XRF. A su vez, se utilizó un banco de ensayo de secado térmico (EDILKAMIN) para determinar la eficacia del secado y la longitud

necesaria del secador por medio de diferentes ensayos; en este trabajo se concluyó que el poder calorífico superior del orujo de aceituna seca es de 17 MJ/kg, por lo cual puede ser usado para aplicaciones de calefacción e incluso para generación de energía en centrales térmicas.

Para la tesis doctoral de Patiño (2009) *análisis experimental de combustión de biomasa en un quemador de lecho fijo* se realizó el análisis de la combustión de biomasa de hueso de aceituna, cáscara de almendra y una variedad de pellets de madera, para ello, diseñaron un reactor de lecho fijo guiándose de numerosos trabajos de investigación del mismo tipo. En primera instancia, se determinaron las características de las diferentes biomásas tal como el aire mínimo, la granulometría y la densidad de empaquetamiento; posteriormente, se realizó la combustión tomando los datos captados por los termopares en el reactor por medio de LabVIEW y llegaron a diferentes conclusiones entre las que destacan el impacto del tamaño de la partícula en las velocidades máximas superiores y el rango de aire de combustión, además no obtuvieron una dependencia de la temperatura máxima del lecho con la humedad presentada en la biomasa, pero sí en las velocidades máximas de trabajo y el rango de aire a usar.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

A nivel nacional se encuentra el trabajo de Marrugo (2019) que lleva como título *caracterización de cascarilla de arroz para el estudio de la reducción de emisiones de gases nox en combustión con el carbón mediante el proceso de reburn*, tuvo como objetivo estudiar el efecto en los gases de emisión de NOx en la adición de biomasa a la combustión del carbón, la biomasa usada fue cascarilla de arroz y el equipo de trabajo una cámara de combustión vertical con ducto

de escape, 6 puertos de inyección de combustible y 10 para instrumentalización. Por medio de análisis último y próximo se conoció la composición química de la biomasa y el carbón para después hallar la relación aire-combustible teórica en la combustión. Estableciendo un flujo másico y una altura de alimentación de biomasa se procedió a estudiar la composición de los gases cuando se varía la altura con una composición de 85% carbón y 15% biomasa. Se concluyó que hacer esta mezcla de combustible es beneficioso pues reduce las emisiones de NOx independientemente de la altura de inyección de la biomasa, aunque la altura de inyección influyó en la posición de la temperatura de combustión de la cámara.

*Estudio de la reducción de emisiones de nox cuando se utiliza bagazo de caña como combustible secundario en la combustión de carbón por medio del proceso de reburn* fue el trabajo de Bobadilla (2019). En esta tesis se usó biomasa de bagazo de caña de azúcar, por otra parte, se utilizó una cámara de combustión vertical para las pruebas experimentales, con esto se pudo conocer el perfil de temperaturas a lo largo de la cámara de combustión y las emisiones de NOx. Se analizaron los resultados como el aumento de la proporción de la biomasa y de las emisiones de NOx; simultáneamente, se pudo evidenciar un punto de operación óptimo por medio de la experimentación que esté alrededor de la sustitución del 5% en masa de carbón por biomasa, generando un 30% de disminución en las emisiones. Se concluyó que la biomasa del bagazo de caña puede emplearse con resultados exitosos para la reducción de los gases NOx.

## 2.2 Biomasa

Teniendo en cuenta a Patiño Martínez, 2014. Se refiere a la materia orgánica de origen vegetal o animal la cual se puede emplear como fuente de energía y puede ser convertida en diferentes tipos de energía dependiendo el uso que se le quiera dar. Desde el contexto energético, la biomasa se emplea como la definición de una fuente de energía renovable la cual se basa en la implementación de la materia orgánica formada por vía biológica o de productos derivados, ya sea también debido a su contenido energético el cual es resultado del proceso de conversión de la energía lumínica del sol en energía química.

Colombia, por su posición geográfica y variedad de climas, ofrece condiciones favorables para el desarrollo de las actividades agropecuarias. El país cuenta con una superficie continental de 114.174.800 hectáreas, de las cuales el 44,77% se estima que se destina a la actividad agropecuaria (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). Esto evidencia que en Colombia el sector agropecuario es una fuente importante de biomasa residual. (Al-Karany, 2013)

Tabla 1

### *Tipos de biomasa residual*

<b>Fuente generadora de biomasa</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Características físicas</b>
<b>Residuos forestales</b>	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	Polvo, sólido, HR <sup>1</sup> >50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólido, HR >55%
<b>Residuos agropecuarios</b>	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo
	Cáscara y polvo de granos secos	Polvo, HR <25%
	Estiércol	Sólido muy húmedo
	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido HR >55%

<b>Residuos industriales</b>	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido moderadamente húmedo
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido muy húmedo
	Aguas de lavado de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido graso
<b>Residuos urbanos</b>	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos	Sólido muy húmedo
	Basura orgánica	Sólido muy húmedo

*Nota.* Adaptado de: Biomass Users Network Centroamérica - BUN-CA. (2002).

### 2.2.1 Bagazo de *Lippia Origanoides* (Orégano silvestre)

En este proyecto se estudiará la combustión de la *Lippia Origanoides*, esta es una planta endémica y abundante en Colombia, Vásquez (2012) comenta:

En Colombia, existen nichos naturales para especies de *Lippia Origanoides* ubicados en zonas con ambientes secos o semidesérticos que abundan de forma silvestre como la zona del Cañón del Río Chicamocha (Santander) y en el cordón panamericano la región del Alto Patía, la primera zona ha tenido una serie de caracterizaciones mientras que la segunda aún no se ha estudiado a profundidad. (p. 19)

Esta especie pertenece a la familia Verbenáceas, además es usada para la extracción de aceite de diferentes usos, debido a la destilación de este aceite se puede encontrar una gran cantidad de desechos al finalizar el proceso, los cuales se denominan bagazo, estos residuos no tienen un gran uso más allá de ser empleados para el compostaje. (García, Rueda, Chacón, & Martínez, 2021)

Figura 1

*Lippia Origanoides*



*Nota.* Tomado de: Dicyt. Agencia Iberoamericana Para La Difusión De La Ciencia Y La Tecnología.

## **2.3 Combustión**

La combustión es una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía, conocida como la fuente de energía más importante proporcionada por la naturaleza. En su libro, Turns (2012) señala que la combustión transforma la energía almacenada en los enlaces químicos en calor para que pueda ser utilizada de diferentes maneras.

El proceso de la combustión consiste en la oxidación de constituyentes en un combustible que son capaces de ser oxidados y puede ser representado mediante una ecuación química. Durante un proceso de combustión. La masa de cada elemento se mantiene igual, por lo tanto, incluye la conservación de la masa de cada elemento. En este proceso, según ha señalado Wylen (2003), muchos productos intermedios son formados durante la reacción química.

### ***2.3.1 Fases de la combustión***

Teniendo en cuenta a Khodaei (2015) El proceso de descomposición térmica de un sólido mediante la combustión se lleva a cabo por medio de las etapas presentadas a continuación:

- Secado: como su nombre lo indica, en esta primera fase se evapora el agua contenida en la biomasa. Esta pierde gran parte de su peso al estar conformada mayormente por agua.
- Pirólisis y combustión volátil: la materia volátil contenida en la biomasa es transformada en productos gaseosos que están encima de su temperatura de evaporación y además evitan que el oxígeno se introduzca en la materia, evitando la reacción con el sólido restante.
- Combustión de la fase carbonosa (char): Dentro de esta etapa hay 3 procesos diferentes, transferencia de los gases a la superficie, reacción de los gases en la superficie sólida y una difusión del producto. En este momento el char empieza a reaccionar oxidándose y formando emisiones de CO y CO<sub>2</sub>.

### ***2.3.2 Medición de la eficiencia de la combustión***

En un reactor de lecho fijo la eficiencia del proceso se puede medir por medio de cuatro parámetros, según (Khodaei, Al-Abdeli, Guzzomi, & Yeoh, 2015), estos son:

- Velocidad de combustión: Se da en unidades de  $Kg/m^2s$ , se puede encontrar midiendo la cantidad de masa incinerada respecto al tiempo.
- Velocidad de ignición: Las unidades son idénticas al parámetro anterior, pero su forma de calcular necesita la ayuda de termopares que midan la temperatura entre dos distancias diferentes del reactor y el tiempo que tarda una temperatura máxima en propagarse desde el punto A hasta el punto B, siempre en un eje axial del reactor.
- Pico de temperatura: Puede ser medida en un punto específico o calcularla con un

promedio de temperaturas máximas a lo largo de todo el reactor.

- Grosor de la zona de reacción: Este parámetro es dado por la distancia entre la superficie del lecho hasta el punto del reactor donde la temperatura cambia por primera vez respecto a su temperatura inicial.

## 2.4 Aire teórico

Al ser un proceso de oxidación, la combustión necesita de un oxidante, normalmente se usa oxígeno (O<sub>2</sub>) generalmente por medio de aire, cuando se tiene una cantidad de aire capaz de oxidar el combustible llegando a la estabilidad, entonces se le denomina aire teórico (Portero González, 2018). En una reacción real de combustión no se encuentra normalmente este equilibrio, y por lo tanto hay más o menos aire en el momento de la reacción, llamándose aire en exceso o insuficiente, respectivamente (Beaumont, 1994). Dependiendo de la cantidad de aire en la reacción se pueden encontrar diferentes gases resultantes de combustión, es por ello importante el de poder variar el suministro de aire cuando se realizan procesos de combustión industrial.

## 2.5 Relación aire combustible

La relación aire-combustible (A/C) representa la cantidad de aire utilizada por unidad de masa de combustible durante un proceso de combustión y se representa a través de la siguiente formula.

$$\left(\frac{A}{C}\right) = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

## **2.6 Gases de combustión**

Son aquellos gases resultantes de los distintos procesos de combustión, como los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

### **2.6.1 *NO<sub>x</sub> (Óxidos de nitrógeno)***

Son un grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El término NO<sub>x</sub> se refiere a la combinación de ambas sustancias. El dióxido de nitrógeno es el principal contaminante de los óxidos de nitrógeno, y se forma como subproducto en todas las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas. Se trata de una sustancia de color amarillento, que se forma en los procesos de combustión en los vehículos motorizados y las plantas eléctricas. Es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato, que conllevan la producción de ácidos y elevados niveles de PM<sub>2,5</sub> en el ambiente (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, s.f.).

### **2.6.2 *CO (Monóxido de carbono)***

El monóxido de carbono es un gas tóxico incoloro e inodoro. Se genera en gran medida como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles fósiles (instalaciones de combustión), combustibles de motor (vehículos) y otros materiales que contienen carbono. El CO es, en general, inocuo para las personas porque rápidamente se une con el oxígeno del aire para formar CO<sub>2</sub> (Testo Argentina SA, 2018).

### **2.6.3 CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono)**

Es el principal gas contaminante debido a los diferentes procesos industriales de la humanidad en cuanto a cantidad, está presente en la combustión de combustibles fósiles y aunque es un ciclo natural del planeta gracias a la fotosíntesis de las plantas y la absorción del océano, debido al ser humano, se ha venido presentando un desequilibrio ambiental generando así el calentamiento global (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), 2020).

## **2.7 Medición de temperatura**

En sistemas térmicos es importante saber el valor de la temperatura en el dispositivo en cualquier momento, una de las formas más sencillas y usadas tanto en la industria como en las pruebas de laboratorio para medir este factor es usando los llamados termopares.

Los termopares están hechos de diferentes materiales resistentes a las altas temperaturas, Según Alutal measure & trust (s.f) “este elemento por lo general tiene 2 materiales en su composición, los cuales se unen en dos puntos diferentes”.

Estos elementos funcionan de acuerdo con un flujo eléctrico que fluye por los alambres que lo componen y genera una señal eléctrica que varía dependiendo de la temperatura a la que se encuentren. Los rangos de temperatura que se puede medir con estos dispositivos según Testo SE & Co. KGaA (s.f) van desde los -200 °C hasta los 1700°C.

## 2.8 Analizador de gases de combustión

Es un dispositivo electrónico que monitorea los gases generados en los procesos de combustión, los cuales son útiles para medir la eficiencia del proceso y las emisiones de cada tipo de gas que se genera.

Dispone de un conducto de aspiración creada por una micro bomba interna para la toma de la muestra de gases, y de un programa de cálculo en su memoria interna con la composición de los combustibles más habituales, por lo que los resultados son inmediatos una vez seleccionado el combustible adecuado (Testo SE & Co. KGaA, s.f.)

Este equipo es capaz de medir la cantidad exacta de cada gas presente en el proceso así se puede identificar cuales gases pueden llegar a ser tóxicos para el ser humano. El equipo presente en el laboratorio de la universidad es el testo 350.

Figura 2

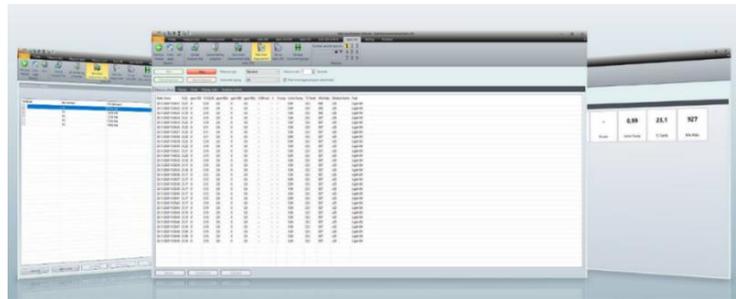
*Analizador de gases testo 350*



*Nota.* Testo SE & Co. KGaA. (s.f). testo. Obtenido de <https://www.testo.com/es-CO/testo-350/p/0632-3510>

Figura 3

*Software easyEmission*



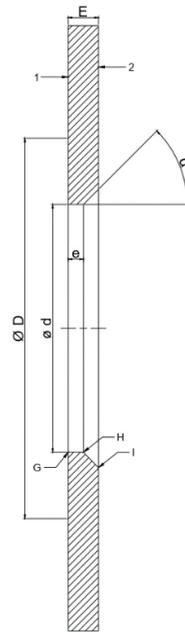
*Nota. Testo SE & Co. KGaA. (s.f). testo. Obtenido de <https://www.testo.com/es-CO/testo-350/p/0632-3510>*

## **2.9 Medición de caudal de aire**

Existen varias maneras de medir el caudal de un fluido en una tubería, para este proyecto se usará la norma ISO 5167-2 (Organización Internacional de Normalización, 2003), esta norma define el método para calcular el flujo de un fluido a partir de la diferencia de presión medida con el uso de una placa de orificio, la geometría que debe tener la placa, ver en la Figura 4.

Figura 4

*Placa de orificio según norma ISO 5167*



*Nota:* Tomado de Organización Internacional de Normalización. (2003)

## 2.10 Ecuación de Rosin Rammler

La ley de distribución de Rosin-Rammler dice que se puede representar mediante un modelo matemático la acumulación del tamaño de grano de partículas (Luna, 2016, p. 33), esta ecuación se presenta como:

$$F(d) = [1 - \exp(-\left(\frac{d}{d'}\right)^m)] \times 100$$

En cualquier distribución que cumpla con la regresión a una recta de los parámetros de la ecuación puede emplearse para disminuir el error en la gráfica del tamaño de grano de partículas.

### **3. Metodología**

#### **3.1 Caracterización de la biomasa**

La biomasa de *Lippia Origanoides* usada en el proyecto fue suministrada por el Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinas Tropicales (CENIVAM), esta fue obtenida de sus instalaciones en la Universidad Industrial de Santander (UIS). Dicha planta es usada en un proceso de destilación para la investigación de sus aceites esenciales, al finalizar esta operación el bagazo es entregado y se procedió a su secado.

##### **3.1.1 Granulometría de *Lippia Origanoides***

El tamaño de grano de cualquier biomasa que va a ser usada en un quemador influye de gran manera en los resultados obtenidos en cuanto a temperatura (Patiño, 2009). En tal sentido, se tomó una pequeña muestra de las hojas de *Lippia Origanoides*, se seleccionaron las que podían ser medidas de mejor manera por los instrumentos de medición al alcance. Las presentadas en la Figura 5, son un ejemplo de la biomasa que se quemó en el reactor.

Figura 5

*Toma de muestra de hojas de Lippia Origanoides*



Fuente: *Autores*

Los resultados de estas mediciones se pueden encontrar en la Tabla 2. Una vez registrados los datos, se calculó el volumen aparente de las hojas con el cual se hizo la igualdad al volumen de una esfera equivalente, de donde se calcula el respectivo diámetro.

Tabla 2

*Resultados de la medición dimensional de la muestra de hojas de Lippia Origanoides*

Muestra	$\lambda$ (cm)	d1 (cm)	d2 (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
1	2.1	1.1	0.07	0.254
2	1.4	1.1	0.09	0.218
3	1.7	1	0.04	0.107
4	2	0.9	0.08	0.226
5	2.3	1.2	0.04	0.173
6	1.9	1.2	0.05	0.179
7	1.6	0.9	0.09	0.204
8	1.5	0.8	0.16	0.302
9	0.6	0.5	0.04	0.019

10	0.9	0.7	0.05	0.049
11	0.8	0.9	0.08	0.090
12	1.2	0.9	0.03	0.051
13	1.5	0.9	0.03	0.064
14	2.3	0.8	0.06	0.173
15	2.6	1.1	0.09	0.404
16	0.8	0.5	0.01	0.006
17	1.7	1	0.04	0.107
18	1	0.5	0.03	0.024
19	1.7	0.9	0.05	0.120
20	1.6	0.8	0.04	0.080
21	1.4	0.9	0.04	0.079
22	1.1	0.8	0.03	0.041
23	1	0.8	0.01	0.013
24	0.9	0.6	0.02	0.017

*Nota.* El volumen calculado se asumió como la representación del volumen de una elipse plana.

Donde:

$\lambda$  = Largo

d1 = Ancho

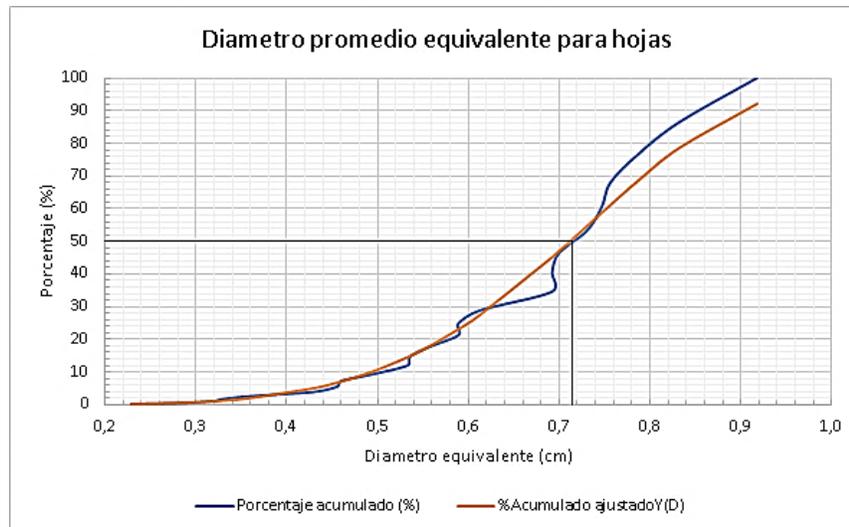
d2 = Espesor

Al igualarse al volumen obtenido al de una esfera equivalente se despeja el radio o diámetro equivalente para cada hoja. Con el uso de las ecuaciones de Rosin-Rammler para la distribución de un tamaño de grano específico se ajustó la distribución de diámetros equivalentes para hallar el diámetro promedio que se puede encontrar en las hojas al ingresarlas al lecho del reactor. En la Figura 5 se halló que este valor equivale a 0,71 cm de diámetro aproximadamente.

Figura 6

*Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para hojas de Lippia*

*Origanoides*



Posteriormente, se hizo el mismo procedimiento anterior para los tallos al cortarse en tamaños de 3, 5 y 10cm de largo, se tomó una muestra variada en cuanto a grosor.

Tabla 3

*Resultados de la medición de dimensiones de la muestra de tallos de 3cm de Lippia Origanoides*

<b>Muestra</b>	<b><math>\lambda</math> (cm)</b>	<b>d1 (mm)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>
1	3	2,1	0,104
2	3	2,7	0,172
3	3	3,15	0,234
4	3	3,2	0,241
5	3,2	3,15	0,249
6	3	3,5	0,289
7	3,2	3,4	0,291
8	3,5	3,8	0,397
9	3,1	4,2	0,429
10	3,1	4,4	0,471
11	3,1	4,4	0,471
12	3,1	4,7	0,538

13	2,5	6,1	0,731
14	3,2	5,5	0,76
15	3,4	5,6	0,837

*Nota.* El volumen calculado se asumió como la representación del volumen de un cilindro

Donde:

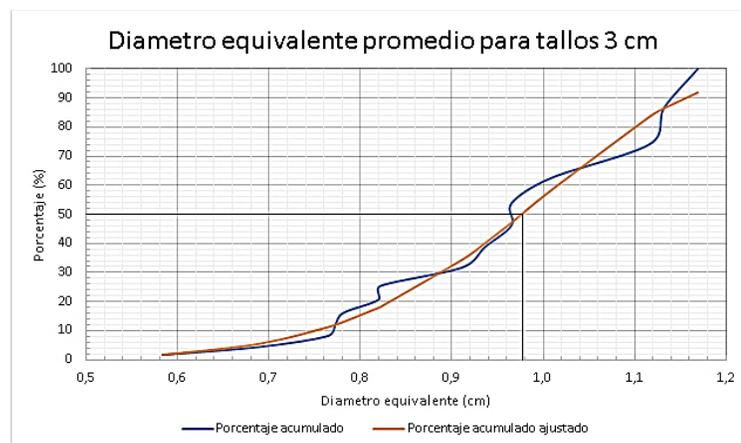
$\lambda$  = Largo

d1 = diámetro

Como en el procedimiento anterior, se igualó el volumen al de una esfera equivalente, donde se pudo despejar el diámetro equivalente para cada tallo. Usando la metodología de Rosin-Rammler se ajustó esta distribución para hallar el diámetro del 50% de la muestra. En la Figura 8 se halló que este valor equivale a 0,98 cm.

Figura 7

*Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para tallos de 3cm de Lippia Origanooides*



El mismo procedimiento fue usado para tallos de diferentes longitudes, encontrándose que su diámetro equivalente equivale a 1,4 cm para tallos de 10 cm de largo y 1,18 cm para tallos de 5 cm. Ver Anexo 1.

### 3.1.2 Determinación de la densidad del lecho de *Lippia Origanoides*

En la siguiente parte de la experimentación en el laboratorio, se tomaron varias muestras de la composición de la *Lippia Origanoides* que se iba a usar en el quemador para hallar sus respectivos valores de densidad de lecho con el uso de la norma CEN/TS 15103 (AENOR, 2010), seguido de la densidad aparente de partícula sumergiendo la biomasa en un recipiente graduado de aceite y midiendo la diferencia de volumen antes y después (Patiño, 2009), el procedimiento se hizo 3 veces para cada composición y se obtuvo el promedio de mediciones.

Tabla 4

*Resultados de la medición de la densidad de lecho y aparente de partícula*

Composición de <i>Lippia</i>	Densidad de lecho ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Densidad de partícula ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Tallos	232.350	493.854
Mezcla (Hojas + tallos)	21.245	109.184
Hojas	16.975	106.568

### 3.1.3 Relación Aire combustible en la cámara de combustión

Para definir la cantidad de aire que se debía ingresar al lecho del reactor se tomó como referencia la composición química encontrada en el trabajo de Muñoz y Pico (2020), donde

calcularon los porcentajes de carbono, hidrogeno y oxigeno mostrados en la tabla 5 para diferentes mezclas de biomasa, una con solo hojas, otra con tallos y una mezcla.

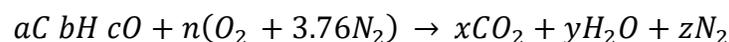
Tabla 5

*Resultados de análisis elemental de Lippia Origanoides*

Elemento	Hojas (%)	Hojas (mol)	Tallos (%)	Tallos (mol)	Mezcla (%)	Mezcla (mol)
Carbono (C)	43.767	3.647	46.428	3.896	45.636	3.803
Hidrogeno (H)	5.396	5.396	5.67	5.67	5.584	5.584
Oxigeno (O)	39.878	2.492	41.745	2.609	41.143	2.571

*Nota.* Adaptado de: *Resultados análisis elemental*, de Carlos Muñoz y David Pico. 2020

Estos porcentajes se refieren a la composición de la *Lippia Origanoides* en base másica de 100 gramos, para poder hacer el balance estequiométrico se convirtieron a moles teniendo en cuenta su respectiva masa molar en la tabla periódica. A continuación, se hizo la reacción de combustión con aire teórico asumiendo una reacción completa dando como productos dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno.



Para cada composición de biomasa a, b y c de hojas, tallos y mezcla, se hallaron las moles de aire teórico y con ello la relación aire combustible teórica, como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 6

*Resultados de cálculo de moles de aire y relación de aire combustible*

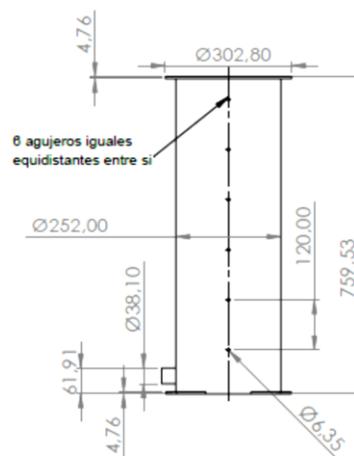
<b>Parámetro</b>	<b>Hojas</b>	<b>Tallos</b>	<b>Mezcla</b>
Moles de aire (mol)	3.75	3.982	3.914
Relación aire/combustible	5.808	6.168	6.061

### 3.2 Rediseño del quemador de lecho fijo

Actualmente, en el laboratorio de combustión industrial existe un banco de laboratorio para combustión ciclónica. Se detallaron sus características geométricas, tal como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

*Banco de combustión ciclónica del laboratorio*



Nota: Tomado de Herrera & Aparicio. (2022)

Este combustor creado por Herrera y Aparicio (2022) es una pareja de cilindro hueco con una tapa en la parte superior, además a su alrededor lleva aislante tanto externo e interno y tiene una tubería en la parte inferior que entra de forma tangencial al cilindro, esta transporta el aire para la combustión ciclónica; la separación entre los termopares es de 120mm. Por otra parte, la naturaleza de la biomasa que va a ser utilizada al no ser procesada y tamizada necesita de un lecho fijo para funcionar.

Se llevo a cabo un proceso de diseño de concepto para el banco de lecho fijo, por medio de un cuadro comparativo se puntuarán ciertas características que debe tener el reactor, esta puntuación será de 1 a 5, con 5 siendo excelente y 1 siendo mala. A continuación, se enlistan dichas características y se explica a qué se refiere cada concepto.

- ***Fácil montaje y desmontaje:*** Teniendo en cuenta que el banco de laboratorio debe seguir funcionando de manera ciclónica, el lecho fijo debió ser montable y desmontable, por lo tanto, al tener mayor facilidad de ensamblaje tuvo una mejor puntuación.
- ***Poca área superficial:*** En los procesos de combustión debe existir poca transferencia de calor con el ambiente para aprovechar de mejor manera la conversión energética en los gases resultantes, en este caso, el parámetro que más afectó a la transferencia de calor es el área superficial que puede llegar a tener el banco, una menor área superficial en contacto con la *Lippia* *Origanoides* tuvo una mejor puntuación y viceversa.
- ***Suficiente capacidad:*** En la combustión en lecho fijo para este banco no hubo un flujo másico entrante de biomasa como sí lo hubo en la combustión ciclónica, por ende, para el estudio de la temperatura y el frente de llama se necesitó de suficiente biomasa para tomar los datos de

temperatura y emisión de gases antes de que se consuma totalmente. Una mayor capacidad de biomasa tuvo una mejor puntuación.

- ***Simplicidad de fabricación:*** En función de economizar el precio del banco para el presupuesto del proyecto es fundamental diseñar un lecho que sea simple en su fabricación, en este sentido, al tener menos operaciones de mecanizado obtuvo una mejor puntuación.

Las alternativas de diseño hechas por los autores se muestran en las Figuras 9, 10 y 11.

Figura 9

*Alternativa de diseño 1 para banco de lecho fijo*



Figura 10

*Alternativa de diseño 2 para banco de lecho fijo*



Figura 11

*Alternativa de diseño 3 para banco de lecho fijo*



A criterio de los autores se les dio valor a las características enumeradas anteriormente para cada alternativa, en la Tabla 7 obtuvimos el resultado de la mejor opción de diseño al sumar todas las columnas de cada fila y seleccionar la de mayor puntuación.

Tabla 7

*Cuadro de selección de alternativas*

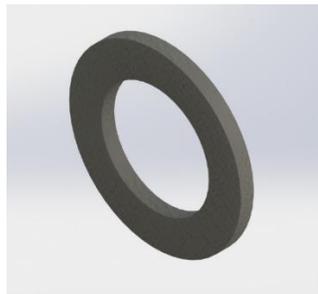
<b>Alternativa</b>	<b>Parámetro</b> <b>Montaje y desmontaje</b>	<b>Área de superficial</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Simplicidad de fabricación</b>
Alternativa 1	2	5	4	2
Alternativa 2	5	5	4	4
Alternativa 3	4	2	3	3

La alternativa seleccionada es la numero 2 obteniendo 18 puntos de 20 posibles, gracias a ser un banco de fácil montaje, muy simple de fabricar y tener poca área de transferencia de calor.

Cabe destacar que el banco de combustión ciclónica actual tiene una tubería tipo T por donde se conecta la tubería de aire primario y el tornillo sin fin que ingresa la biomasa molida, para este proyecto no era necesario el tornillo sin fin, en consecuencia, se tuvo que conseguir una unión lisa para suplantar la conexión en T. En lo referente a la tubería de aire primario, esta tiene una unión tipo brida en donde va conectada la placa de orificio usada para medir la diferencia de presión, la placa de orificio fue arreglada según la norma (Organización Internacional de Normalización, 2003) y para evitar las posibles fugas de aire en esta conexión se fabricaron sellos de caucho similares al de la Figura 11 con un espesor de 3 mm.

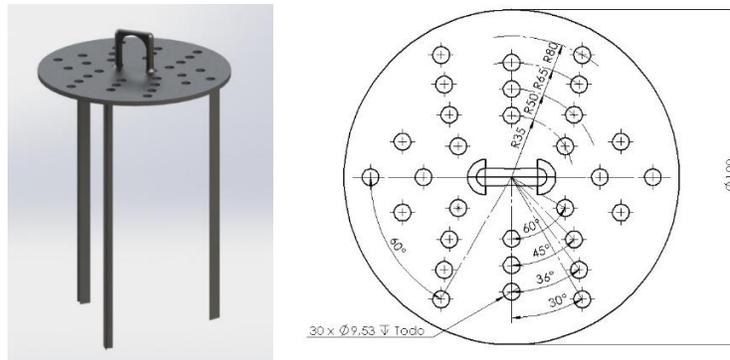
Figura 12

*Sello de caucho para la tubería de aire*



Otro punto para tener en cuenta es la posible filtración de biomasa en los espacios internos del banco y el quemador, se propuso arreglar una malla rígida de media pulgada en forma circular mayo al diámetro del banco, de 19,5 cm para que así este elemento evite el paso de biomasa de pequeño espesor al cenicero o al ducto de aire.

Figura 13

*Diseño del banco de lecho fijo*

El lecho fijo debía tener una partición simétrica de agujeros para que el aire pasase de la forma más homogénea posible y existiera una correcta distribución del elemento oxidante para la combustión. La longitud de la base fue de 260mm y el espesor de la placa de 3mm, esto asegura que la biomasa empiece a acumularse desde 10 mm antes del agujero para el cuarto termopar observado en la Figura 8 y así se obtuvo una cantidad de medición de temperaturas adecuada.

### 3.3 Adecuación del banco de laboratorio

Una vez fabricados los elementos para la transformación del banco de laboratorio se adecuaron dentro del cilindro y se acoplaron en la tubería del aire.

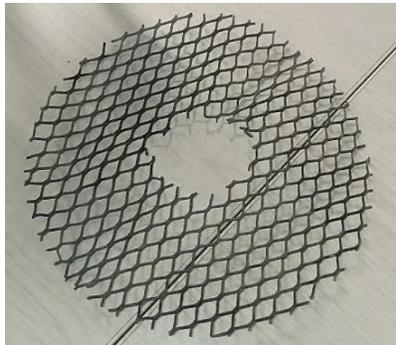
Figura 14

*Banco de lecho fijo*



Figura 15

*Malla de seguridad.*



*Nota.* Evita la filtración directa de biomasa hacia el cenicero.

Figura 16

*Banco de lecho fijo dentro del quemador*



Figura 17

*Banco de lecho fijo acoplado con la malla de seguridad*



Figura 18

*Sistema alimentación de aire*



Figura 19

*Quemador de lecho fijo en posición de encendido*



### 3.4 Estudio de la combustión de biomasa residual de *Lippia Origanoides*

Para empezar la combustión era necesario generar una metodología experimental para el uso del quemador como lecho fijo y así estandarizar el proceso de medición de temperatura y gases de combustión. Se dedujo una serie de pasos para realizar el proceso:

1. Acoplamiento de la tubería de aire con el quemador para la alimentación de aire.
2. Introducción del banco dentro del lecho del quemador seguido del posicionamiento de la rejilla y el llenado del cilindro con el respectivo combustible.
3. Posicionamiento de los termopares en lecho y comprobación del orden correcto con el software de recolección de datos.
4. Revisión del manómetro para la toma del delta de presión con el ambiente y el delta

entre la entrada y salida de la placa de orificio.

5. Preparación e inicio del software para la toma de medición de niveles de temperatura y del analizador de gases
6. Pesado de biomasa a usar y encendido de la cámara de combustión para inicio de pruebas.
7. Inserción de la sonda del analizador de gases en una posición paralela a la salida de los gases en la cubierta del quemador.
8. Medición de gases alrededor de 5 o 10 minutos con el analizador de gases.
9. Inspección visual por el visor del banco, revisión de que no hay presencia de llama y el material este completamente hecho cenizas
10. Finalización de los dos softwares y grabación de los datos obtenidos.
11. Procedimiento de limpieza del banco.

#### **4. Resultados y Discusiones**

Las mediciones se realizaron en el laboratorio de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander cumpliendo con las normas de seguridad y bajo la supervisión del director y codirector de proyecto de grado.

Antes de empezar la toma de datos de la combustión de las muestras del bagazo *Lippia Origanoides* se pesó la masa, antes de ingresarla en cada prueba, con el objetivo de mantener una masa constante en la repetición de la respectiva prueba, en la Figura de las gráficas de los resultados del perfil de temperatura se detalla este valor. A continuación, se midió la diferencia

de presión entre la entrada y salida de la placa, así como entre la entrada y ambiente, este valor se usó para mantener un mismo valor de flujo de aire para cada composición de biomasa, se calculó este caudal de aire con la norma ISO 5167.

Se registraron los valores de temperatura respecto al tiempo a lo largo del proceso de la combustión, así como las diferentes cantidades de gases contaminantes y su composición. Para esto se realizó una prueba de funcionamiento para cerciorarse del correcto comportamiento de los dispositivos y materiales empleados para su construcción. Igualmente, se alistaron los softwares de Arduino y EasyEmission para la toma de datos. En las siguientes Figuras se muestran los resultados obtenidos.

#### **4.1 Perfiles de temperatura**

En la primera toma se observó que la combustión de las hojas alcanzó una temperatura máxima de 860 °C en la posición del termopar 3, el tiempo que se tardó el avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 3 fue de 132 segundos, de igual manera entre los termopares 3 y 4 el tiempo fue de 72 segundos. Finalmente, el tiempo total de la combustión fue de 741 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000691 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  y una relación aire combustible de 5.43.

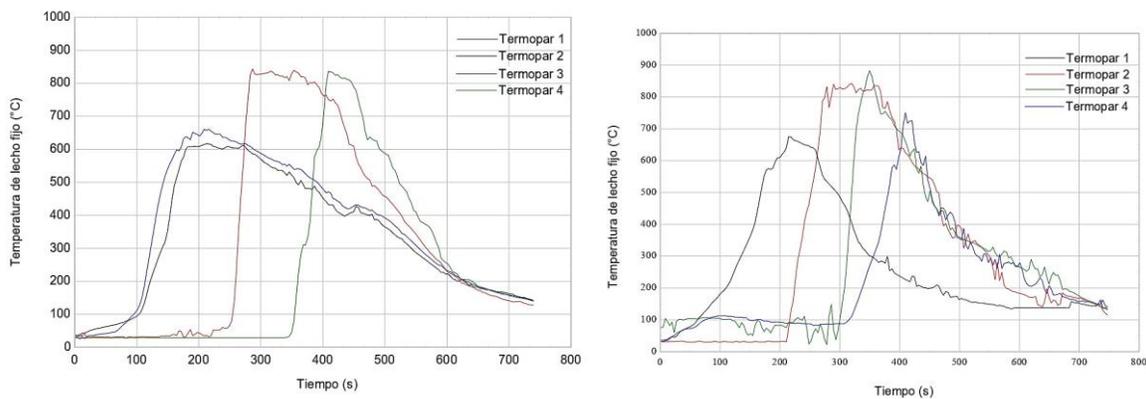
En la segunda toma se observó que la combustión de las hojas alcanzó una temperatura máxima de 884 °C en la posición del termopar 3, el tiempo que se tardó el avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 3 fue de 72 segundos, de igual manera entre los

termopares 3 y 4 el tiempo fue de 63 segundos. Finalmente, el tiempo total de la combustión fue de 748 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000684 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  y una relación aire combustible de 5.49

La Figura 20 muestra el perfil de temperaturas de 2 procesos de combustión de las hojas de la *Lippia Origanoides*, al ser un material bastante homogéneo y pequeño, con un diámetro equivalente de esfera de menos de 1 cm presenta unos picos de temperatura simétricamente distribuidos respecto al tiempo, a su vez tienen una relación aire combustible de 5,43 que al compararse con la teórica de 5,8 indica que la combustión estuvo en un estado de deficiencia de aire.

Figura 20

*Perfil de temperaturas de combustión de las hojas de Lippia Origanoides*



*Nota.* Perfil de temperatura para la primera (izquierda) y segunda (derecha) toma de hojas de *Lippia Origanoides*, con masa de bagazo ingresado de 512 gramos y caudal de aire de  $0,003759 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

En esta la primera toma de la figura 21 se observó que la combustión de los tallos alcanzó una temperatura máxima de  $809,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en la posición del termopar 3, el tiempo que se tardó el

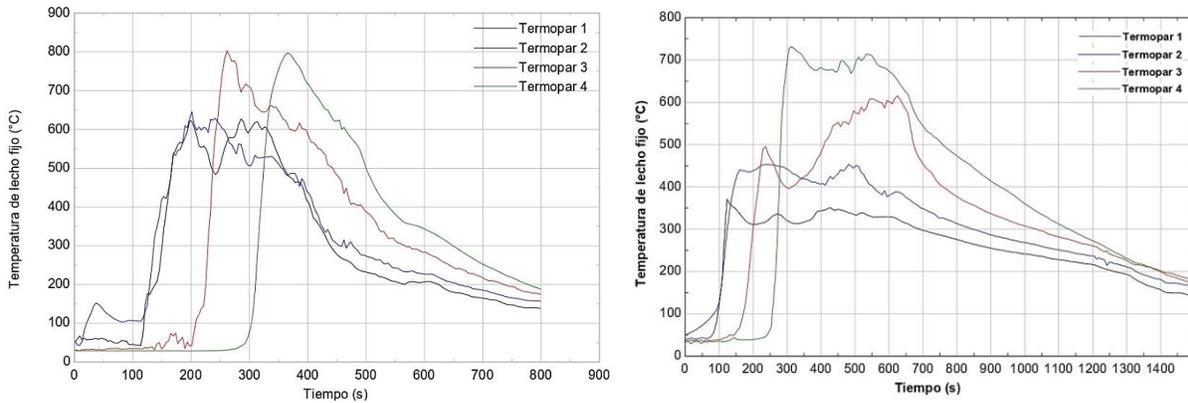
avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 3 fue de 75 segundos, de igual manera entre los termopares 3 y 4 el tiempo fue de 83 segundos. Finalmente, el tiempo total de la combustión fue de 803 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000834 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  y una relación aire combustible de 5.12

En la segunda toma de la figura 21 se observó que la combustión de los tallos alcanzó una temperatura máxima de  $737,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en la posición del termopar 4, el tiempo que se tardó el avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 4 fue de 60 segundos, de igual manera entre los termopares 4 y 3 el tiempo fue de 293 segundos. Finalmente, el tiempo total de combustión fue de 1450 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000462 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  y una relación aire combustible de 9.25

En la toma siguiente se obtiene una distribución de picos de temperatura menos simétrico respecto al tiempo, esto puede explicarse debido a su diámetro equivalente que los tallos es de aproximadamente 1,4 cm lo que hace al lecho un poco heterogéneo y puede generar un desbalance en la capa del frente de llama del proceso, esto significa que en algún lado de su área superficial se quema más rápido que en el opuesto. Al ver la relación aire combustible del proceso de 5,12 y 9,25 y comparado con el teórico de 6.168 en la primera prueba se encuentra en deficiencia de aire y en la segunda en exceso de aire. Acá se obtiene una temperatura mayor en la primera cuando es en deficiencia de aire al igual que los resultados del trabajo de Patiño (2009).

Figura 21

*Perfil de temperaturas de combustión de los tallos de Lippia Origanoïdes*



*Nota.* Perfil de temperatura para la primera (izquierda) y segunda (derecha) toma de tallos de *Lippia Origanooides*, con masa de bagazo ingresado de 670 gramos y caudal de aire de  $0.004272 \frac{kg}{s}$

En la figura 22 se observó que la combustión de la mezcla alcanzó una temperatura máxima de  $772,75 \text{ } ^\circ\text{C}$  en la posición del termopar 4, el tiempo que se tardó el avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 3 fue de 110 segundos, de igual manera entre los termopares 3 y 4 el tiempo fue de 153 segundos. Finalmente, el tiempo total de combustión fue de 1015 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000575 \frac{kg}{s}$  y una relación aire combustible de 6.62

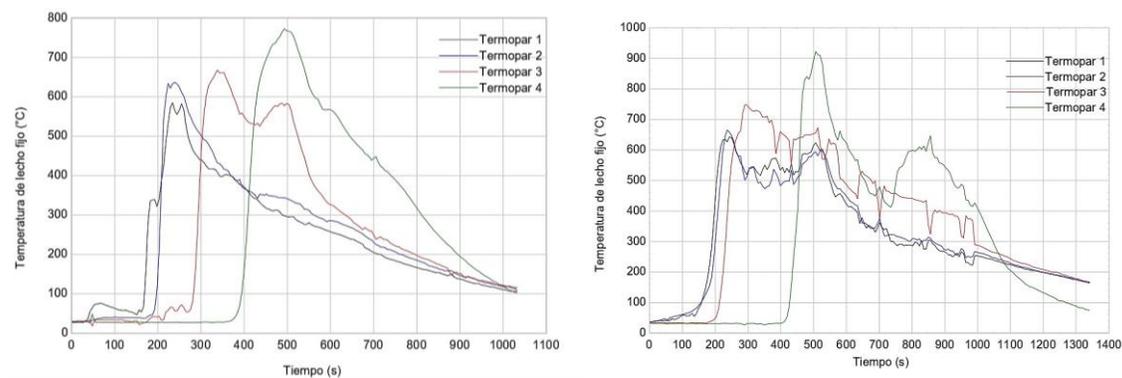
Para la segunda toma se observó que la combustión de la mezcla alcanzó una temperatura máxima de  $961,75 \text{ } ^\circ\text{C}$  en la posición del termopar 4, el tiempo que se tardó el avance de la llama de llegar de un pico al otro entre los termopares 2 y 3 fue de 58 segundos, de igual manera entre los termopares 3 y 4 el tiempo fue de 222 segundos. Finalmente, el tiempo total de combustión fue de 1315 segundos, con esto se obtiene un flujo másico de  $0,000444 \frac{kg}{s}$  y una relación aire combustible de 8,58.

Por último, en las Figuras 24 y 25 se ve menos simétrico los picos de temperatura si se compara con la combustión de las hojas, pero más simétrico si se compara con la combustión de

los tallos, esto se debe a que el diámetro equivalente de la mezcla de 1,05 cm se encuentra en el medio de los dos anteriores. La relación aire combustible obtenida en ambas pruebas es de 6,62 y 8,58, al compararse con la teórica de 6,061 se puede inferir que el proceso se encuentra en exceso de aire, la temperatura máxima que alcanzo la primera combustión es de 770°C siendo congruente con Patiño (2009), sin embargo, la segunda combustión alcanzo una temperatura de 961,75 °C esto puede deberse a que el tiempo que transcurrió entre una prueba y la otra fue pequeño, lo que no dio espacio a que el banco se enfriara por completo y las paredes todavía estuvieran a una temperatura mayor a la ambiente, lo que causo una pérdida de calor menor que en la primera prueba. Otra explicación puede ser la composición química de la *Lippia* *Origanoides* como se dice en el trabajo de Herrera y Aparicio (2022) existe una composición menor a 1% de nitrógeno en la biomasa.

Figura 22

*Perfil de temperaturas de combustión de la mezcla de Lippia Origanoides*



*Nota.* Perfil de temperatura para la primera (izquierda) y segunda (derecha) toma de mezcla de

*Lippia Origanoides*, con masa de bagazo ingresado de 584 gramos y caudal de aire de  $0.003808 \frac{kg}{s}$

En general, en todas las pruebas realizadas se observó un avance del frente de llama en las gráficas, esto se nota al estar los termopares de la parte superior detectando una alta

temperatura y los termopares de la parte inferior aumentando los datos registrados de temperatura poco a poco. Esto indica que hay un proceso de secado en la parte inferior mientras la parte superior sufre de pirolisis y al avanzar lo suficiente se sigue encontrando altas temperaturas, lo que puede ser debido a que se forma char que sigue quemándose

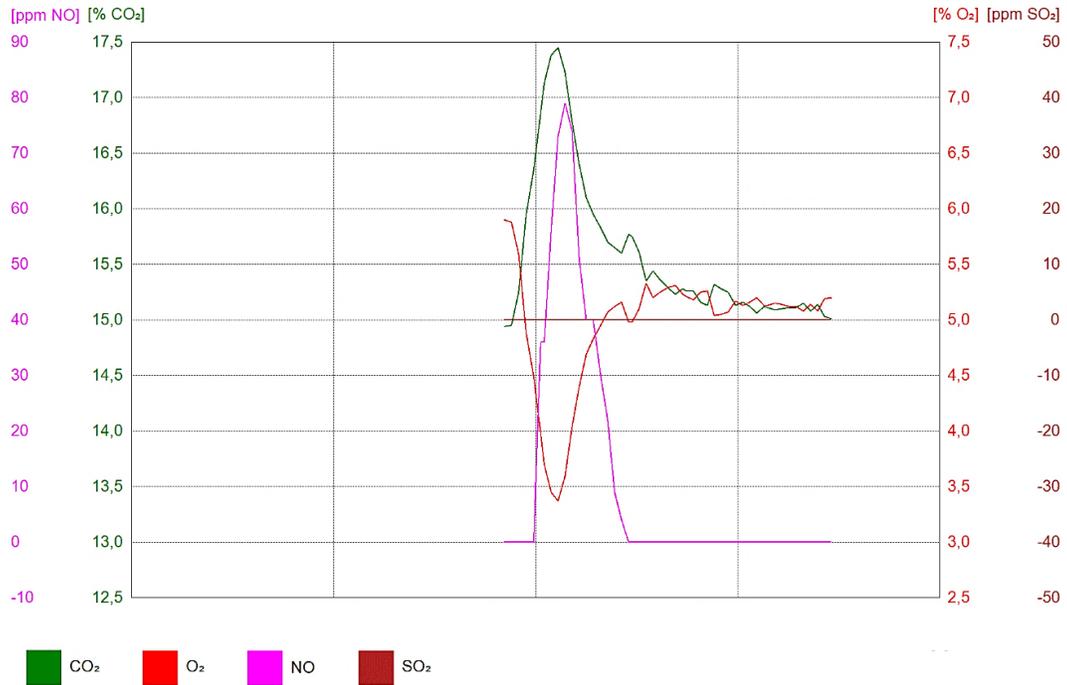
#### **4.2 Gases de combustión**

Para finalizar el presente proyecto se hizo uso del software de EasyEmission y se guardaron los resultados obtenidos del analizador testo 350 de la toma de gases de combustión. Es preciso aclarar que las mediciones de esta herramienta se dan en % de volumen para el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub>, para el SO<sub>2</sub> y el NO<sub>2</sub> se da en partes por millón (ppm).

La toma de datos duró cerca de 1 minuto. Se pudo observar una estabilización en los porcentajes de los gases resultantes de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en la figura 23, el primero se encontró en proporciones de 3% a 6% y el segundo entre 15% y 17,5%. El sistema detectó un pico de emisiones de NO que llega hasta las 80 ppm y después de un tiempo deja de formarse, por otra parte, no se detectan emisiones de SO<sub>2</sub>

Figura 23

*Gases de combustión resultantes para la primera quema de hojas*

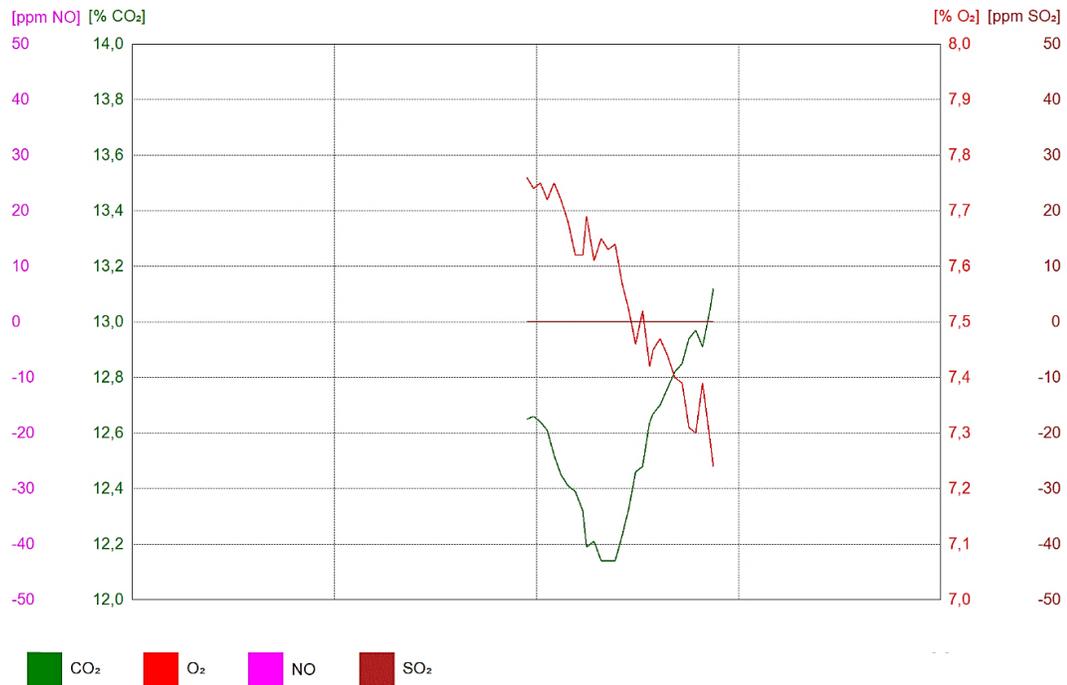


*Nota.* Gráficas en el tiempo de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO y SO<sub>2</sub>

En la figura 24 observó la presencia de gases resultantes correspondientes al CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. El sistema detectó un pico de emisiones de CO<sub>2</sub> que llega hasta el 13,4%, mientras que el O<sub>2</sub> tiene un descenso desde 7,8% hasta 7,2%. En estos resultados de la segunda toma no se detectaron la presencia de SO<sub>2</sub> ni de NO.

Figura 24

*Gases de combustión resultantes para la segunda quema de hojas*

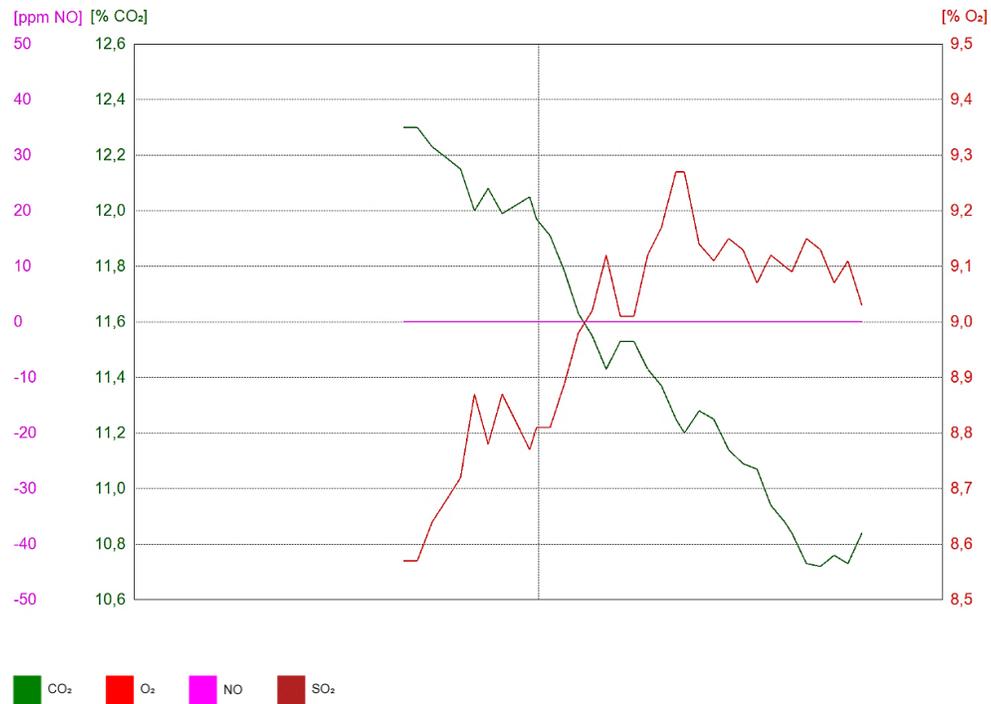


*Nota.* Gráficas temporales de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO y SO<sub>2</sub>

La toma de datos para la combustión de la mezcla duró aproximadamente un 1 minuto para cada prueba. Como se observa en la figura 25, se vieron la presencia de gases resultantes correspondientes al CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Se encuentran intervalos de 12,4% a 10,8% de CO<sub>2</sub> y de 8,6% a 9,3%. No se detectó SO<sub>2</sub> ni la presencia de NO.

Figura 25

*Gases de combustión resultantes para la primera quema de mezcla*

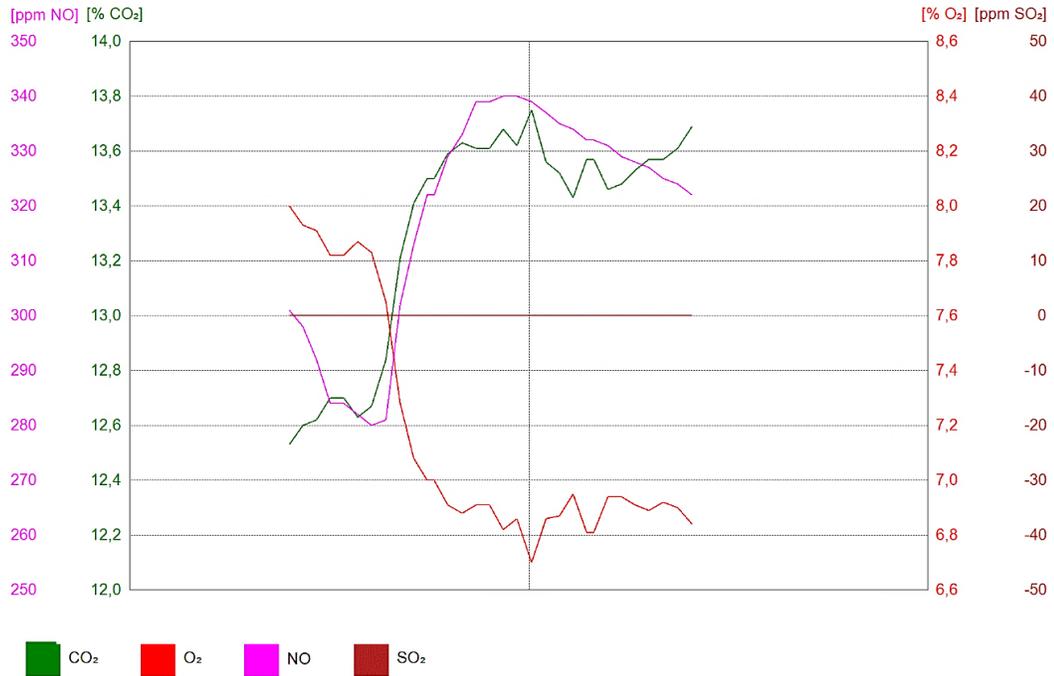


*Nota.* Gráficas temporales de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO

En la segunda toma de la figura 26 se hallaron gases resultantes correspondientes al CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO. El sistema detectó un pico de emisiones de NO que llega hasta el 340 ppm y se emitió durante toda la toma de datos. A su vez, los gases de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se encontraron en una cantidad de 12,4% a 13,8% y de 6,8% a 8% respectivamente.

Figura 26

*Gases de combustión resultantes para la segunda quema de mezcla*

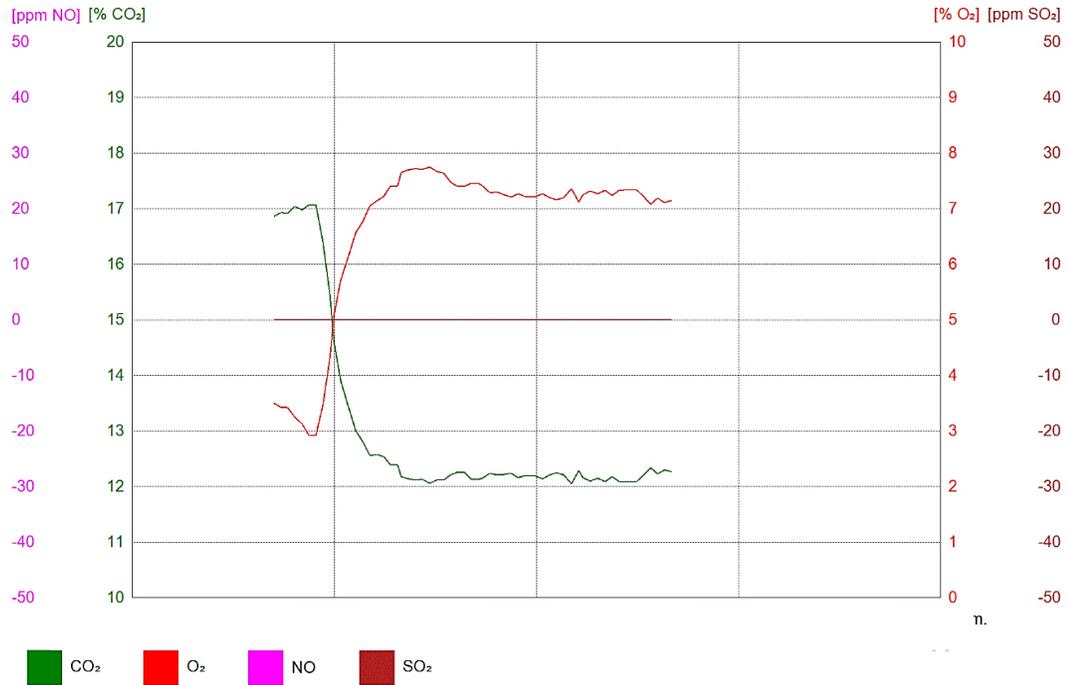


*Nota.* Gráficas temporales de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO y SO

Como en las pruebas anteriores, la toma de datos duró aproximadamente un 1 minuto. Se encontró la presencia de gases resultantes de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> y NO. En la primera prueba de la figura 27, el sistema detecta un pico de emisiones de O<sub>2</sub> que llega hasta un 8% y se estabiliza en 7,4%. La cantidad de CO<sub>2</sub> supera el valor de 17% al inicio y desciende hasta 12% estabilizándose al final. No se vieron gases de NO ni SO<sub>2</sub> en el analizador testo.

Figura 27

*Gases de combustión resultantes para primera quema de tallos*

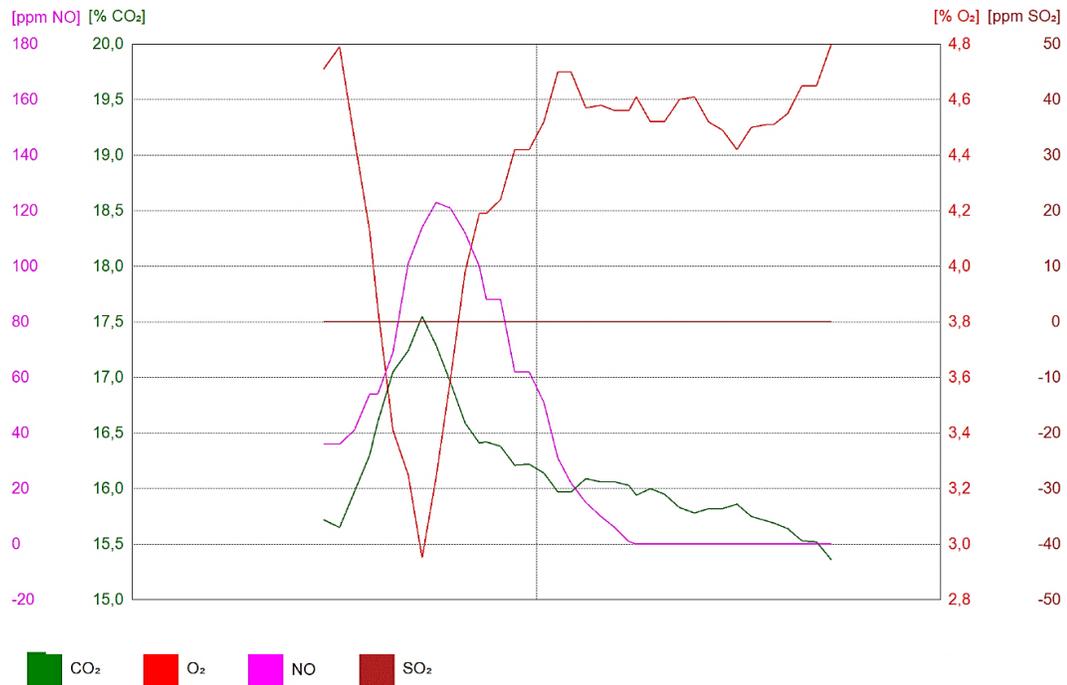


*Nota.* Gráficas temporales de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO y SO<sub>2</sub>

En la gráfica de la figura 28 se encontraron gases de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> y NO. El sistema detecta un pico de emisiones de O<sub>2</sub> con un 4,8 % y el valor más pequeño de 2.2%, el NO se encontró con un valor de 120 ppm y CO<sub>2</sub> con un 17,5% estabilizándose al final en 15,5%. No se detectan rastros de emisiones de SO<sub>2</sub>.

Figura 28

*Gases de combustión resultantes para segunda quema de tallos*



*Nota.* Gráficas temporales de emisiones instantáneas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO y SO<sub>2</sub>

La formación de gases de NO indica que la combustión es real, pues en todos los procedimientos de combustión siempre existe inevitablemente inacabados y procesos intermedios (Portero González, 2018). Se puede inferir que la biomasa de *Lippia Origanoides* contiene suficiente porcentaje de Nitrógeno en su composición para formar este tipo de gas, aunque las temperaturas registradas en el momento de la combustión no superen los 1000 °C

## 5. Conclusiones

El lecho fijo adaptado al banco de laboratorio puede ser montado y desmontado dependiendo del uso que se le quiera dar gracias al diseño hecho en el presente trabajo.

El lecho fijo consigue la realización de pruebas de combustión de una cantidad de masa mayor a 700 gramos de *Lippia Origanoides* de distinta composición de hojas, tallos y mezcla.

Los termopares instalados y el software de Arduino permiten la obtención de datos de perfiles de temperatura entre 0 a 1000 °C y pueden ser usados en el ambiente del laboratorio y para numerosas pruebas de combustión.

La composición de los gases de combustión de la *Lippia Origanoides* es hallada gracias al analizador de gases marca testo 350 exitosamente.

Gracias a la parte experimental se elaboró una metodología simplificada llevada a cabo por una serie de 11 pasos los cuales garantizan un óptimo funcionamiento de la cámara de combustión como lecho fijo y adecuado análisis de resultados de temperaturas y gases de combustión resultantes.

Se logró identificar el comportamiento de los gases resultantes de combustión por medio de la experimentación realizada con la combustión de la biomasa *Lippia Origanoides*.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda lograr la toma de datos de manera simultánea en el tiempo entre la temperatura y la composición de los gases de combustión para apreciar relaciones entre temperatura y emisión de gases.

Se sugiere adaptar una entrada de aire de forma radial al banco, así como un caudal de aire secundario y estudiar el comportamiento que puede lograr en la combustión como lecho fijo.

El tamaño de grano de la biomasa a usar afecta a los resultados obtenidos, por lo tanto, en la medida de lo posible debe usarse una granulometría lo más pequeña posible. Al igual sería oportuno crear un banco de lecho fijo que pueda hacer pruebas de combustión con biomasa molida y un flujo constante de masa de entrada.

Es preciso mejorar el tiempo de toma de datos de gases de combustión y desarrollar una estructura acoplable al banco donde se pueda sostener el dispositivo testo 350 a lo largo de la prueba de combustión debido a que se pueden presentar interferencias en el dispositivo al momento de realizar la toma de datos.

Valorar la posibilidad de reforzar los materiales que componen la cámara de combustión para una mejor experimentación de la quema de diferentes tipos de biomasa.

### Bibliografía

AENOR. (2010). Biocombustibles sólidos. determinación de la densidad a granel. [Solid biofuels - Determination of bulk density] Asociación Española De Normalización Y Certificación UNE-EN 15103:2010, 9-10.

Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA). (2020). *EPA en español*.

Recuperado el 2021, de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

Al-Karany, R. (2013). CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE RESIDUOS DE BIOMASA CON ENSAYOS EXPERIMENTALES DE SECADO TÉRMICO Y COMBUSTIÓN NO CONTAMINANTE. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico de Portalegre]. Obtenido de

<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/17064/1/RaulDiserta%C3%A7aoJunio2013.pdf>

alutal measure & trust. (s.f.). *¿Qué es una termocupla? ¿Cuál es su importancia en la industria?*

Recuperado el 2021, de <https://www.alutal.com.br/es/termopar>

Beaumont, E. (1994). *Caso de Estudio: Autoproducción de Electricidad a partir de Residuos de*

*Madera y Leña en la República Argentina*. Recuperado el 2022, de

<https://www.fao.org/3/V6204s/v6204s00.htm#Contents>

Biomass Users Network (BUN-CA). (2002). *Manuales sobre energía renovable BIOMASA*.

Obtenido de

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales\\_sobre\\_energ%C3%ADa\\_renovableBIOMASA.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf)

Bobadilla, K. (2019). ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE NOX CUANDO SE UTILIZA BAGAZO DE CAÑA COMO COMBUSTIBLE SECUNDARIO EN LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN POR MEDIO DEL PROCESO DE REBURN. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Obtenido de

<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/45262?show=full>

Cengel, Yunus, & Boles, M. (2014). *Reacciones químicas. Termodinámica* (8 ed.). McGraw Hill Education.

Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (s.f.). *Atlas del Potencial*

*Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Recuperado el 2021, de

[https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Atlas-](https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Atlas-Biomasa/1_Indice_Generalidades.pdf)

[Biomasa/1\\_Indice\\_Generalidades.pdf](https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Atlas-Biomasa/1_Indice_Generalidades.pdf)

Galan, X. (2016). POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA [Monografía de especialidad, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA ]. Obtenido de

[https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/637/1/5101477-2016-2-](https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/637/1/5101477-2016-2-GA.pdf)

[GA.pdf](https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/637/1/5101477-2016-2-GA.pdf)

García, G., Rueda, Y., Chacón, J., & Martínez, J. (2021). Kinetic study of the thermal decomposition of *Lippia origanoides* bagasse. *Science Direct*.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100666>

Gobierno de la República de Colombia. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá D.C, Colombia. Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Recuperado el

2021, de

[https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf\\_637176135049017259.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf)

Herrera, D., & Aparicio, A. (2022). Diseño y construcción de un quemador ciclónico de biomasa para el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander ]. Obtenido de

<https://noesis.uis.edu.co/items/80364291-5e42-4099-b174-66140fbd74d8>

JM Industrial Technology SA de CV. (s.f.). *Termocupla*. Recuperado el 2021, de

<https://www.jmi.com.mx/termocupla>

Khodaei, H., Al-Abdeli, Y., Guzzomi, F., & Yeoh, G. H. (2015). An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. *ScienceDirect*, 946-972. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.099>

Luna, A. (2016). "Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay" [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. 33.

Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6351>

Marrugo Bayona, S. (2019). CARACTERIZACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES NOX EN COMBUSTIÓN CON EL CARBÓN MEDIANTE EL PROCESO DE REBURN [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Obtenido de

<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/44472>

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.). *NOX (ÓXIDOS DE NITRÓGENO)*. Recuperado el 2021, de <https://prtr-es.es/NOx-oxidoss-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

Morales Soler, D. (2022). Proyectos de renovables que entrarían en funcionamiento en dos años.

*Portafolio*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/energias-renovables-entre-2023-y-2024-entraria-el-65-de-energias-renovables-asignadas-569749>

Muñoz, C., & Pico, D. (2020). *Evaluación del Bagazo de Lippia Origanoides HBK derivado del proceso de extracción de aceites esenciales como combustible sólido para procesor de combustión [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]*. Bucaramanga.

Obtenido de <https://uids->

[primero.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1gjmsqs/uids\\_bucaramanga190450](https://uids-primero.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1gjmsqs/uids_bucaramanga190450)

Organización Internacional de Normalización. (2003). Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección

transversal circular. Parte 2: Placas de orificio (ISO 5167-2). Obtenido de

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0030357>

Patiño Martínez, P. E. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia Facultad De Ciencias Exactas Físicas Y Naturales*, 2(1), 45-52.

doi:<https://doi.org/10.15649/2346075X.255>

Patiño, D. (2009). ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA EN UN QUEMADOR DE LECHO FIJO [Tesis de Doctorado, Universidad de Vigo]. Obtenido

de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=139004>

Portero González, H. M. (2018). Estudio experimental de peletizado en planta piloto y

combustión en caldera de baja potencia. [Tesis de doctorado, Universidad de Castilla-La Mancha]. Obtenido de

<https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/18416/TESIS%20Portero%20Gonz%c3%a1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rosin, P., & Rammler, E. (1933). The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel*, 7:29.

Testo Argentina SA. (2018). *Gases de combustión*. Recuperado el 2021, de <https://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>

Testo SE & Co. KGaA. (s.f.). *testo*. Obtenido de <https://www.testo.com/es-CO/testo-350/p/0632-3510>

Turns, R. S. (2012). *An introduction to combustion: concepts and applications* (3 ed.). McGraw Hill Education.

V.Vassileva, S., Baxter, D., & Vassileva, C. (2013). An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *ScienceDirect*, 391-449.

Vásquez, D. (2012). El orégano de monte (*Lippia origanoides*) del Alto Patía: Efecto del método de obtención de sus extractos sobre la composición y la actividad antioxidante de los mismos [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11580/197514.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wyllen, J. G. (2003). *Fundamentals of thermodynamics* (6 ed.). McGraw Hill Education.

## Anexos

Anexo A. Resultados de granulometría y diámetro equivalente.

Tabla A1.

Medición de dimensiones de la muestra de tallos de 10cm de *Lippia Origanoides*

Muestra	$\lambda$ (cm)	d1 (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
1	10	2	0,314
2	10,1	2,2	0,384
3	10,2	2,3	0,424
4	10,2	2,3	0,424
5	10,1	2,45	0,476
6	10,3	2,6	0,547
7	9,9	2,7	0,567
8	10,4	2,7	0,595
9	9,9	3,2	0,796
10	10,1	3,3	0,864
11	10	3,8	1,134
12	10	4,4	1,521
13	10,1	4,7	1,752
14	10	5	1,964
15	10,1	6,85	3,722

Figura A1.

*Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para tallos de 10cm de*

*Lippia Origanoides*

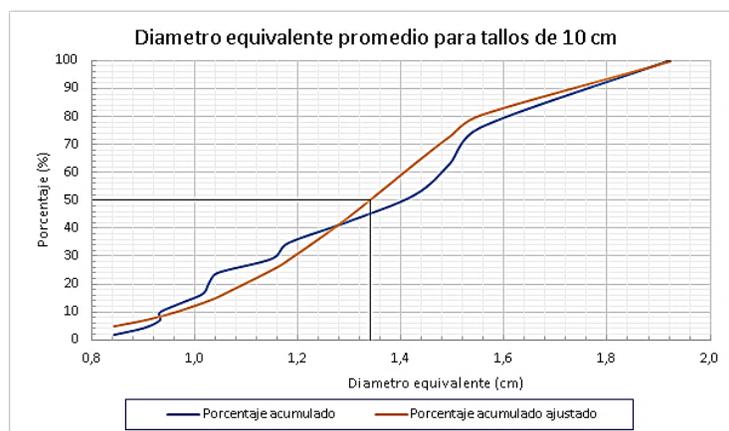


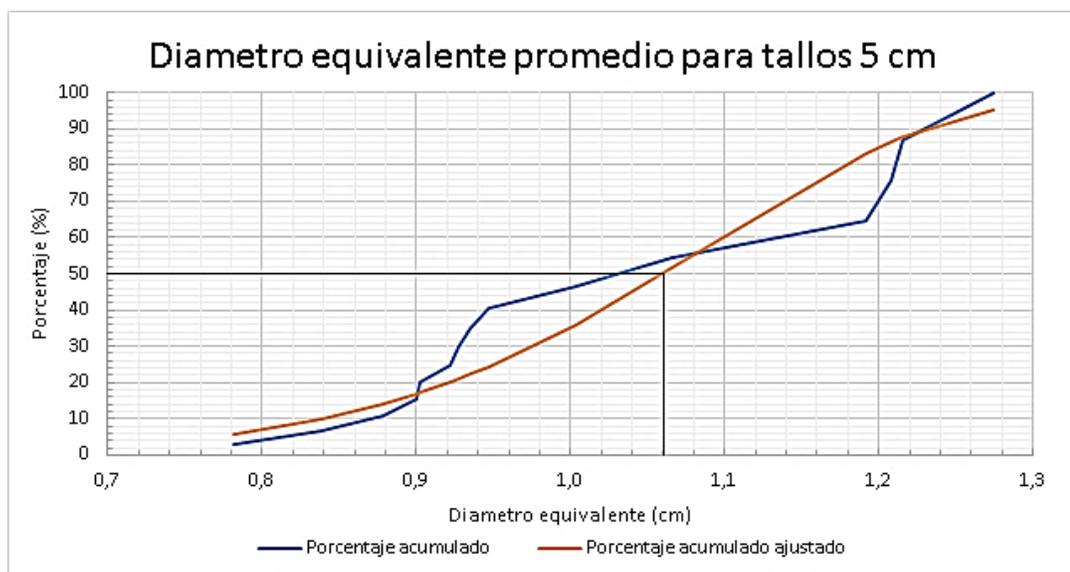
Tabla A2.

Resultados de la medición de dimensiones de la muestra de tallos de 5cm de *Lippia Origanoides*

Muestra	$\lambda$ (cm)	d1 (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
1	5,1	2,5	0,25
2	5	2,8	0,308
3	5,2	2,95	0,355
4	4,9	3,15	0,382
5	5,1	3,1	0,385
6	5,1	3,2	0,41
7	5,2	3,2	0,418
8	5	3,3	0,428
9	4,9	3,4	0,445
10	5,2	3,6	0,529
11	4,8	4,1	0,634
12	5,1	4,7	0,885
13	5	4,85	0,924
14	5,2	4,8	0,941
15	5	5,25	1,082

Figura A2.

Cálculo del diámetro equivalente promedio con ajuste Rosin-Rammler para tallos de 5cm de *Lippia Origanoides*



Anexo B. Planos

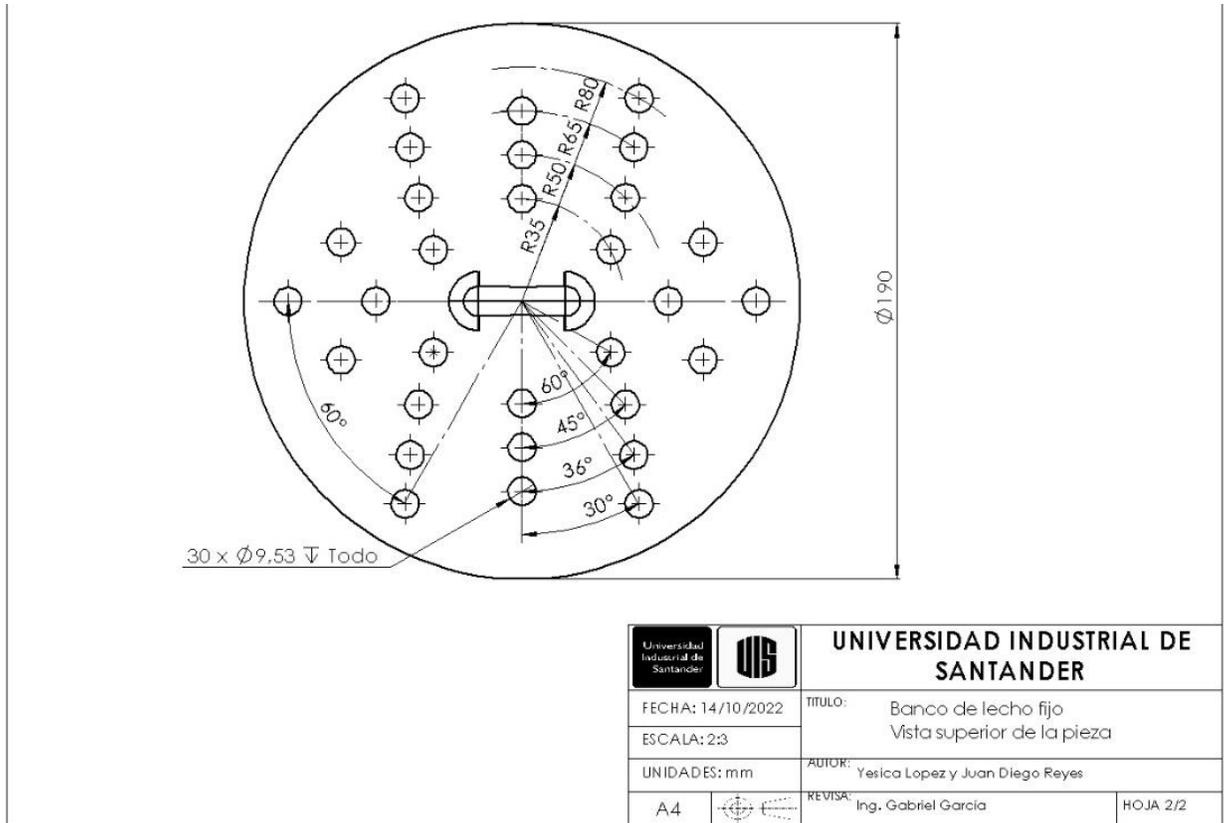
Figura B1.

*Plano de banco de lecho fijo*



Figura B2.

*Plano vista superior banco de lecho fijo*

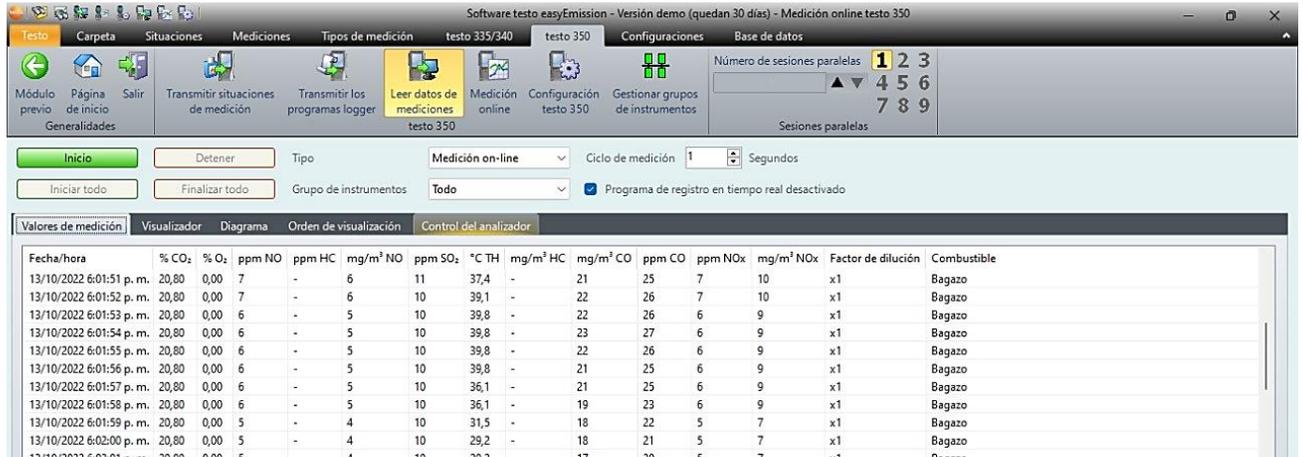


		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 14/10/2022		TITULO: Banco de lecho fijo Vista superior de la pieza	
ESCALA: 2:3		AUTOR: Yesica Lopez y Juan Diego Reyes	
UNIDADES: mm		REVISOR: Ing. Gabriel Garcia	
A4			HOJA 2/2

Anexo C. Software

Figura C1.

Software *EasyEmission*



Anexo D. Arreglos de la tubería

Figura D1.

Placa de orificio



Figura D2.

*Sellos de la tubería*

Figura D3.

*Acople de la tubería*