

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS**

**“Puesta en marcha de un gasificador de flujo concurrente para el  
aprovechamiento energético de residuos biomásicos”**

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como  
requisito para optar por el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Óscar Eduardo Badilla Sánchez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica  
2019

Este Trabajo final de Graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

Tribunal Examinador



---

Óscar Eduardo Badilla Sánchez

Estudiante



---

Dr. Pedro Casanova Treto

Director, Trabajo Final de Graduación



---

Dra. Kattia Solís Ramírez

Miembro, Equipo Asesor



---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos

Miembro, Equipo Asesor



---

Dra. Marta Montero Calderón

Presidenta, Tribunal Examinador



---

Ing. Juan Roberto Mora Chaves

Miembro, Tribunal Examinador

## **Dedicatoria**

---

*A mi familia, por todo el apoyo que me  
ha brindado durante todos estos años.*

## Agradecimientos

---

*A Pedro Casanova, por permitirme hacer mi trabajo final de graduación, apoyarme con su conocimiento, sus consejos, amistad y mantener su confianza en mi trabajo durante todo este tiempo.*

*A Kattia Solís y Geovanni Carmona, por su apoyo en este proyecto, por brindarme consejos y su interés por mi bienestar personal.*

*Al personal de la Unidad de Recursos Forestales, en especial a Pedro Rojas por su apoyo y amistad durante todos estos años.*

*A la Escuela de Biosistemas por brindarme su apoyo y permitirme desarrollarme como estudiante.*

*A mis compañeros de Ingeniería de Biosistemas, por su amistad y todo el apoyo durante esta etapa.*

*A la Universidad de Costa Rica, que me permitió desarrollarme como persona y se convirtió en mi segundo hogar durante todos estos años de estudio.*

# ÍNDICE GENERAL

---

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>                            | <b>vii</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS. ....</b>                           | <b>viii</b> |
| <b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....</b>                      | <b>x</b>    |
| <b>RESUMEN .....</b>                                     | <b>xi</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                | <b>1</b>    |
| <b>1 ESTADO DEL ARTE.....</b>                            | <b>3</b>    |
| 1.1 Definición de biomasa.....                           | 3           |
| 1.2 Tecnología de peletizado comercial.....              | 5           |
| 1.3 Propiedades térmicas de los pellets.....             | 7           |
| 1.4 Principales normativas de pellets.....               | 10          |
| 1.5 Proceso de gasificación de biomasa.....              | 11          |
| 1.6 Reacciones químicas del proceso de gasificación..... | 12          |
| 1.7 Etapas de la gasificación.....                       | 14          |
| 1.7.1 Gasificador de flujo concurrente.....              | 17          |
| <b>2 METODOLOGÍA.....</b>                                | <b>21</b>   |
| 2.1 Materia prima.....                                   | 21          |
| 2.1.1 Acondicionamiento de muestras.....                 | 21          |
| 2.1.2 Densificación de la biomasa.....                   | 22          |
| 2.1.3 Almacenamiento de pellets.....                     | 25          |
| 2.2 Caracterización física y térmica de los pellets..... | 25          |
| 2.2.1 Contenido de humedad.....                          | 26          |
| 2.2.2 Densidad aparente.....                             | 27          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.2.3    | Densidad real .....                        | 29        |
| 2.2.4    | Porosidad .....                            | 30        |
| 2.2.5    | Friabilidad .....                          | 30        |
| 2.3      | Propiedades térmicas de los pellets .....  | 32        |
| 2.3.1    | Conductividad térmica .....                | 32        |
| 2.3.2    | Difusividad térmica .....                  | 33        |
| 2.3.3    | Calor específico .....                     | 34        |
| 2.3.4    | Poder calorífico .....                     | 34        |
| 2.4      | Gasificación de biomasa .....              | 35        |
| 2.5      | Pruebas preliminares de gasificación ..... | 37        |
| 2.5.1    | Efecto del agente gasificante .....        | 39        |
| 2.5.2    | Limpieza del gas de síntesis .....         | 40        |
| 2.6      | Evaluación del gas de síntesis .....       | 42        |
| 2.7      | Análisis estadístico .....                 | 43        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                    | <b>44</b> |
| 3.1      | Propiedades físicas de los pellets .....   | 44        |
| 3.2      | Densidad aparente .....                    | 45        |
| 3.3      | Densidad unitaria .....                    | 46        |
| 3.4      | Porosidad .....                            | 47        |
| 3.5      | Friabilidad .....                          | 48        |
| 3.6      | Propiedades térmicas de los pellets .....  | 49        |
| 3.6.1    | Conductividad térmica de los pellets ..... | 51        |
| 3.6.2    | Difusividad térmica de los pellets .....   | 52        |

|                              |  |           |
|------------------------------|--|-----------|
| 3.6.3                        | Calor específico de los pellets .....  | 52        |
| 3.6.4                        | Poder calorífico de los pellets .....  | 53        |
| 3.7                          | Efecto del flujo de aire en la composición química del gas síntesis .....                            | 54        |
| 3.8                          | Comparación de la composición química y el LHV del gas de síntesis variando el tipo de biomasa ..... | 65        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>    |  | <b>71</b> |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b> |  | <b>72</b> |
| <b>REFERENCIAS.....</b>      |  | <b>73</b> |
| <b>4</b>                     | <b>Anexos .....</b>  | <b>84</b> |

## ÍNDICE DE CUADROS.

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro 1.1.</b> Clasificación y subclasificación de dos grupos biomásicos. ....  | 4  |
| <b>Cuadro 1.2.</b> Datos publicados y relacionados sobre la capacidad calorífica, la conductividad térmica de biomasas y pellets.....                                 | 9  |
| <b>Cuadro 1.3.</b> (Continuación) Datos publicados y relacionados sobre la capacidad calorífica, la conductividad térmica de biomasas y pellets.....                  | 10 |
| <b>Cuadro 1.4.</b> Normativa para los combustibles sólidos en forma de pellets, empleadas en los principales países productores y consumidores. ....                  | 11 |
| <b>Cuadro 1.5.</b> Las principales reacciones químicas del proceso de gasificación. ....  | 12 |
| <b>Cuadro 1.6.</b> (Continuación) Las principales reacciones químicas del proceso de gasificación.....  | 13 |
| <b>Cuadro 1.7.</b> Reacciones adicionales del vapor. ....   | 13 |
| <b>Cuadro 1.8.</b> Composición química del gas de síntesis obtenidas en diversos procesos de gasificación empleando un reactor de flujo concurrente. ....             | 19 |
| <b>Cuadro 1.9.</b> Efecto del agente gasifica en la producción del gas de síntesis.....   | 20 |
| <b>Cuadro 2.1.</b> Valores de caudales de aire y la ER para el proceso de gasificación. ....  | 39 |
| <b>Cuadro 2.2.</b> Biomasas empleadas en las corridas del proceso gasificación, los flujos de aire y las relaciones equivalentes correspondientes.....                | 43 |
| <b>Cuadro 3.1.</b> Valores de las densidades aparentes para los pellets de ciprés y eucalipto. ....   | 45 |
| <b>Cuadro 3.2.</b> Valores obtenidos de la densidad unitaria de los pellets eucalipto y ciprés. ...   | 47 |
| <b>Cuadro 3.3.</b> Valores de porosidad para los pellets de eucalipto y ciprés. ....  | 48 |
| <b>Cuadro 3.4.</b> Datos de friabilidad de los pellets.....   | 49 |
| <b>Cuadro 3.5.</b> Propiedades térmicas de los pellets de eucalipto y ciprés. ....  | 53 |
| <b>Cuadro 3.6.</b> Poder calorífico determinado para los pellets de eucalipto y ciprés.....   | 53 |
| <b>Cuadro 3.7.</b> Análisis estadístico realizado a la composición química y al poder calorífico inferior del gas de síntesis producido con pellets de eucalipto..... | 58 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro 3.8.</b> Análisis estadístico realizado a la composición química y al poder calorífico inferior del gas síntesis producido con pellets de ciprés..... | 63 |
|---|----|

## ÍNDICE DE FIGURAS.

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Esquema de una peletizadora.....   | 6  |
| <b>Figura 1.2.</b> Esquema del equipo experimental para medir la conductividad térmica de pellets. Fuente: [26]. .....                            | 8  |
| <b>Figura 1.3.</b> Diagrama conceptual de las etapas del proceso de gasificación. Fuente: Adaptado a partir de [51]. .....                        | 16 |
| <b>Figura 1.4.</b> Etapas de la gasificación en un reactor de flujo concurrente de lecho fijo. Fuente: [53]. .....                                | 18 |
| <b>Figura 2.1.</b> Equipo para el acondicionamiento de la biomasa.....  | 22 |
| <b>Figura 2.2.</b> Peletizadora de rodillos con matriz de anillo, General Dies, modelo M20.....   | 23 |
| <b>Figura 2.3.</b> Matriz con forma de anillo y rodillos.....   | 24 |
| <b>Figura 2.4.</b> Cuarto de almacenamiento de muestras.....  | 25 |
| <b>Figura 2.5.</b> Horno convectivo marca Precision Scientific, modelo 625-B.....   | 27 |
| <b>Figura 2.6.</b> Determinación de la densidad aparente.....   | 28 |
| <b>Figura 2.7.</b> Equipo para determinar la densidad real de los pellets.....  | 29 |
| <b>Figura 2.8.</b> Prueba de friabilidad.....   | 31 |
| <b>Figura 2.9.</b> Equipos empleados en las pruebas de las propiedades térmicas de los pellets.....   | 31 |
| <b>Figura 2.10.</b> Bomba calorimétrica marca Leco AC500.....   | 35 |
| <b>Figura 2.11.</b> Reactor de gasificación con lecho fijo y flujo concurrente.....   | 36 |
| <b>Figura 2.12.</b> Equipo empleado para el control del agente gasificante. a) Flujómetro marca Dwyer y b) ventilador marca Atlantic Blowers..... | 37 |
| <b>Figura 2.13.</b> Pellets fabricados a partir de aserrín de ciprés (a) y eucalipto (b).....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.14.</b> a) Batería de filtros del gasificador, b) intercambiador de calor, c) filtro relleno con burucha, d) filtro relleno con arena. ....  | 41 |
| <b>Figura 3.1.</b> Perfiles de temperaturas obtenidos empleando un cilindro teóricamente infinito con el fin de determinar las propiedades térmicas de los pellets de ciprés. (Nota: las distancias que se indican en la figura se midieron respecto el centro del cilindro (resistencia) de forma radial). .... | 50 |
| <b>Figura 3.2.</b> Efecto de la relación equivalente en la composición química del gas de síntesis producido con eucalipto. ....   | 56 |
| <b>Figura 3.3.</b> Efecto de la relación equivalente en la composición química del gas de síntesis producido con pellets de ciprés. ....   | 59 |
| <b>Figura 3.4.</b> Comparación de las fracciones volumétricas de CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> obtenidas experimentalmente con los datos reputados por [82]. ....   | 61 |
| <b>Figura 3.5.</b> Comparación del poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis obtenido experimentalmente con respecto a datos consultados en la literatura (1) [58], (2) [69], (3) [73], para el caso de los pellets de eucalipto (a) y ciprés (b). ....  | 64 |
| <b>Figura 3.6.</b> Comparación de la composición química del gas de síntesis entre los tratamientos de eucalipto y ciprés. ....  | 66 |
| <b>Figura 3.7.</b> Eficiencia del gas de síntesis en función de la relación equivalente. ....  | 68 |

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| Abreviatura   | Significado   | Abreviatura   | Significado  |
|---------------|---|---------------|--|
| $CH_{bh}$     | Contenido de humedad en base húmeda, %. Eq (1)                          | $t_1$ y $t_2$ | Tiempo inicial y final r, s  |
| $m_i$         | Masa inicia de la muestra, g  | $\alpha$      | Difusividad térmica, $m^2 s^{-1}$ . Eq (7)   |
| $m_f$         | Masa seca de la muestra, g  | $r$           | Distancia radial de toma de lecturas, m  |
| $\rho_a$      | Densidad aparente $kg m^{-3}$ , Eq (2)                                  | $\Delta T$    | Gradiente de temperatura a la distancia $r$ , °C                                     |
| $m_T$         | Masa total de la muestra, kg  | $y$           | Constante de Euler ( $y = 0,5772$ )  |
| $v_c$         | Volumen del cilindro, $m^3$   | $t$           | Intervalo de tiempo de las mediciones, s   |
| $\rho_r$      | Densidad real, $g dm^{-3}$  | $c_p$         | Calor específico, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ . Eq (8)                                       |
| $m_p$         | Masa del pellet, g  | $LHV$         | Poder calorífico inferior de la muestra, $MJ kg^{-1}$ . Eq (9)                       |
| $v_p$         | Volumen del pellet, $dm^3$  | $HHV$         | Poder calorífico superior de la muestra, $MJ kg^{-1}$                                |
| $\varepsilon$ | Porosidad, %. Eq (4)  | $ER$          | relación equivalente, Adimensional. Eq (11)  |
| $Fr$          | Friabilidad, adimensional. Eq (5)                                       | $M_g$         | Masa de aire empleada en el proceso de gasificación, kg                              |
| $N_i$         | Número de pellets al inicio del ensayo                                  | $M_c$         | Masa de aire necesaria para que se produzca la combustión completa de la biomasa, kg |
| $N_f$         | Número de pellets al final de la prueba, pellets enteros y fraccionados | $CO$          | Monóxido de carbono, % vol   |
| $k$           | Conductividad térmica de la muestra, $W m^{-1} K^{-1}$ . Eq (6)         | $H_2$         | Hidrógeno, % vol   |
| $q$           | Potencia disipada por la resistencia, W                                 | $CH_4$        | Metano, % vol  |
| $L$           | Longitud del cilindro, m  | $SD$          | Desviación estándar  |
| $T_1$ y $T_2$ | Temperatura inicial y final de la resistencia respectivamente, °C       | $scfh$        | Pie cubico específico por hora   |

## RESUMEN

---

El objetivo de esta investigación fue la puesta en marcha de un gasificador de flujo concurrente. Inicialmente se elaboraron pellets con eucalipto (*Eucalyptus ssp*) y ciprés (*Cupressus sempervirens L*) con el objetivo de evaluar las propiedades físicas (densidad aparente, densidad unitaria, porosidad y friabilidad), propiedades térmicas (conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico) y el poder calorífico del material. Luego se empleó este biocombustible en un reactor de gasificación en el cual se estudió el efecto del agente gasificante y el tipo de biomasa en la producción del gas síntesis.

Los parámetros operativos del reactor de flujo concurrente donde se obtuvieron los mejores resultados durante el proceso de gasificación son cuando se emplea: 13,5 kg con un contenido de humedad en base húmeda menor del 12 % de pellets de ciprés y eucalipto, además, se empleó una relación equivalente de 0,30, donde se presentó un rango de temperatura entre 738,95 °C a 750,12 °C respectivamente.

Las propiedades físicas de los pellets presentaron valores de densidad aparente y real entre 379,66 kg m<sup>-3</sup> a 409,32 kg m<sup>-3</sup> y 0,81 kg dm<sup>-3</sup> a 1,01 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Para el caso de la porosidad y la friabilidad se obtuvieron resultados entre 53,03 % a 59,47 % y 0,93 a 0,94 respectivamente. Además, las propiedades térmicas presentaron resultados de 0,335 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> a 0,384 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> para el caso de la conductividad térmica, 2,44×10<sup>-7</sup> m s<sup>-1</sup> a 2,79×10<sup>-7</sup> m s<sup>-1</sup> en el caso de la difusividad térmica y 3,37 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> a 3,76 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> para el caso del calor específico, donde se obtuvo como resultado que estas propiedades térmicas se vieron afectadas por la densidad aparente del material. Finalmente, el poder calorífico inferior presentó valores entre 19 179,87 kJ kg<sup>-1</sup> a 19 756,98 kJ kg<sup>-1</sup>, estos valores obtenidos al compararse con los parámetros indicados en las normas SS 187120 y DIN 51731 pueden ser utilizados para aplicaciones energéticas.

En cuanto a la producción del gas de síntesis presentaron concentraciones entre 22,04 % a 27,46 % para el caso del CH<sub>4</sub>, 17,12 % a 26,45 % para el caso del CO, 15,52 % a 18,70 %

para el caso del CO<sub>2</sub>, 7,01 % a 13,83 % para el caso del H<sub>2</sub> y un poder calorífico inferior entre 11,03 MJ m<sup>-3</sup> a 13,53 MJ m<sup>-3</sup>. Donde se observó que empleando una relación equivalente del 0,30 se obtienen los mejores resultados en términos de composición química y poder calorífico inferior del gas de síntesis, estableciendo esta condición como punto de operación óptimo del reactor. Además, la mayor eficiencia energética fue del 75,23 % y se obtuvo cuando se emplearon los pellets de eucalipto.

## INTRODUCCIÓN

---

Un mayor crecimiento económico, da como resultado un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero emitidos por las unidades de combustión fósiles, que conducen al calentamiento global y generan problemas en la salud pública. Para hacer frente a esta situación, se ha prestado más atención a la producción de energía a partir de la biomasa, la cual es una alternativa para obtener energías sostenibles y renovables [1].

En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa no tiene una emisión de dióxido de carbono, dado que este lo consume de la atmósfera durante su crecimiento a través de la fotosíntesis, por lo tanto, las emisiones generadas son consideradas como neutras. Por lo anterior, en las últimas décadas se observa un creciente interés en disminuir el consumo de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se ha promovido el desarrollo de numerosos trabajos de investigación sobre el uso de la biomasa en los procesos de conversión de energía, de los cuales se destaca la gasificación [2].

Aunque se han realizado varios esfuerzos para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero las tendencias mundiales se han mantenido en aumento durante los últimos años, para el año 2016 se estimó que a nivel mundial se liberaron 4,9 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente [3]. En Costa Rica actualmente se emiten 1,7 toneladas de dióxido de carbono al año [4]. Esta tendencia crea la necesidad de implementar nuevas fuentes de energías renovables, con el fin de mitigar la emisión de gases de efecto invernadero.

Costa Rica realiza iniciativas que buscan un desarrollo productivo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero, una de estas iniciativas es valorar el potencial que tienen los residuos agrícolas orgánicos (RAO) y forestales producidos por el sector agropecuario en la búsqueda de fuentes alternativas de energía limpia como una opción que contribuya a

disminuir el consumo de las fuentes convencionales de energía provenientes de los hidrocarburos importados [5]. De estos residuos biomásicos destacan el café (pulpa, cascarilla, mucílago), en la piña (rastrojo y corona) y en los aserraderos (aserrín, burucha, leña, entre otros).

Los usos más comunes de la producción de energía a partir de biomasa es la combustión directa, seguido de la gasificación y la pirólisis [6]. La gasificación de biomasa es una de las tecnologías más prometedoras para convertir los combustibles sólidos en combustibles gaseosos, este método puede ser empleado en muchas aplicaciones industriales, como la generación combinada de calor y energía [7], también en algunos casos se emplea como combustible en motores de combustión interna para diversos medios de transporte.

La gasificación es un proceso termoquímico que se da a temperaturas alrededor de los 900 °C. Este proceso termoquímico produce monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y pequeñas cantidades de metano (CH<sub>4</sub>), además, se generan productos no deseados como nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros hidrocarburos (HC) [8].

Este proyecto final de graduación busca la puesta en marcha de un gasificador de flujo concurrente como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos biomásicos con potencial de producción de energía. El objetivo general de esta investigación fue determinar el punto de operación de un gasificador de flujo concurrente, mediante la variación del tipo de biomasa y el flujo del agente gasificante con el fin de maximizar la producción del gas de síntesis. Para esto, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Acondicionar físicamente la biomasa mediante un proceso de densificación con el fin de que cumpla con las propiedades físicas necesarias para la gasificación.
- Determinar el efecto que tiene el flujo del agente gasificante en el rendimiento de la producción del gas de síntesis.
- Estudiar el efecto en la producción del gas de síntesis empleando eucalipto (*Eucalyptus ssp*) y ciprés (*Cupressus sempervirens L*).

# 1 ESTADO DEL ARTE

---

## 1.1 Definición de biomasa

La biomasa se refiere a cualquier material orgánico que proviene de plantas y animales que viven o vivieron recientemente, una parte importante de la biomasa proviene de las plantas que se clasifican como lignocelulosas [9].

Las plantas absorben la energía solar mediante un proceso llamado fotosíntesis, en este proceso la clorofila de las plantas captura la radiación del sol, donde transforma el agua presente en el suelo y el dióxido de carbono de la atmósfera en glucosa ( $\text{CH}_m\text{H}_n$ ), con el fin de producir biomasa. Cuando estos carbohidratos se consumen, regresan a su forma original de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contiene [9], [10].

La biomasa proviene de distintas fuentes, como se muestra en la Cuadro 1.1. El comité europeo publicó dos estándares para la clasificación y especificación (EN 14961) y la garantía de la calidad (EN 15234) de la biomasa. Con base en su origen se clasifica la biomasa en cuatro categorías [11], [12]:

1. Biomasa leñosa.
2. Biomasa herbácea.
3. Biomasa de frutas.
4. Combinación y mezclas.



**Cuadro 1.1.** Clasificación y subclasificación de dos grupos biomásicos.

|                     |                                |   |
|---------------------|--------------------------------|---|
| A. Biomasa virgen   | A.1 Biomasa terrestre          | 1. Biomasa forestal<br>2. Pastos<br>3. Cultivos energéticos<br>4. Cultivos cosechados       |
|                     | A.2 Biomasa acuática           | 1. Algas<br>2. Plantas acuáticas  |
| B. Biomasa residual | B.1 Residuos municipales       | 1. Residuos sólidos municipales.<br>2. Biosólidos y aguas residuales<br>3. Gas de vertedero |
|                     | B.2 Residuos sólidos agrícolas | 1. Ganado y estiércol<br>2. Residuos de cultivos agrícolas                                  |
|                     | B.3 Residuos forestales        | 1. Hojas y corteza  |
|                     | B.4 Residuos Industriales      | 1. Madera de demolición y aserrín<br>2. Aceites y grasas residuales                         |

Fuente: [9].

El uso de la biomasa como combustible es una alternativa viable para la generación de energía térmica renovable; a pesar de esto, en comparación con los combustibles fósiles tiene un bajo poder calorífico, baja densidad y alta humedad [13]. Según [14], los residuos lignocelulósicos se consideran los principales residuos provenientes de la biomasa, estos se han utilizado a escala de investigación y comercial para la producción de bioenergía a través de vías termoquímicas y bioquímicas. Las operaciones logísticas de la biomasa lignocelulósica incluidas el manejo, transporte y almacenamiento, son costosas debido al alto contenido de humedad, la forma irregular, la baja densidad de la masa y la baja energía de la biomasa.

La baja densidad aparente de los residuos lignocelulósico se debe mejorar con el fin de resolver sus limitaciones para generar productos bioenergéticos, como por ejemplo los residuos agrícolas y pastos que presentan entre  $80 - 100 \text{ kg m}^{-3}$  y la biomasa leñosa entre  $150 - 200 \text{ kg m}^{-3}$ . Con el fin incrementar la baja densidad de la biomasa lignocelulósica se puede someter a un proceso de densificación, el cual aumentará la densidad del material a  $500 - 700 \text{ kg m}^{-3}$ . Además, de aumentar la densidad de la biomasa se obtienen otras ventajas como mejoras en: el manejo, el transporte debido a que se requiere menos espacio, la distribución controlada del tamaño de partícula y la uniformidad del material [15].

Entre los mecanismos de densificación de biomasa más empleados para fines energéticos se encuentran las peletizadoras y las briqueteadoras [16], ambos procesos ocurren a altas presiones y son dos técnicas muy relacionadas. La diferencia de las briqueteadoras es que el procesamiento se realiza mediante un pistón o prensa, en contraste con la peletizadora que emplea una matriz y rodillos para formar los pellets.

Además, el tamaño de los productos es diferente, para el caso de la peletizadora, los pellets tienen una forma cilíndrica y presentan un diámetro aproximado de 6 mm a 25 mm y una longitud de 3 mm a 50 mm [17]. Las briquetas son similares a los pellets, pero con mayor tamaño, tienen un diámetro de 25 mm o mayores, y están formados de biomasa altamente comprimida que pasa por una matriz debido a la acción de un pistón o tornillos sin fin. Se emplea también matrices con calentadores para favorecer la compresión de la briqueta [18].

Existen normas internacionales relevantes para los pellets de biomasa y su materia prima (ISO / CD 17225-1, ISO / CD 17225-2 y ISO / CD 1722-6), estas normas establecen los valores para las dimensiones, la calidad y la composición de los pellets, por ejemplo, calidad de las materias primas, contenido de cenizas y metales pesados [19].

En este trabajo final de graduación se va a limitar describir la técnica de peletizado a nivel comercial, descrita por [16] y [20].

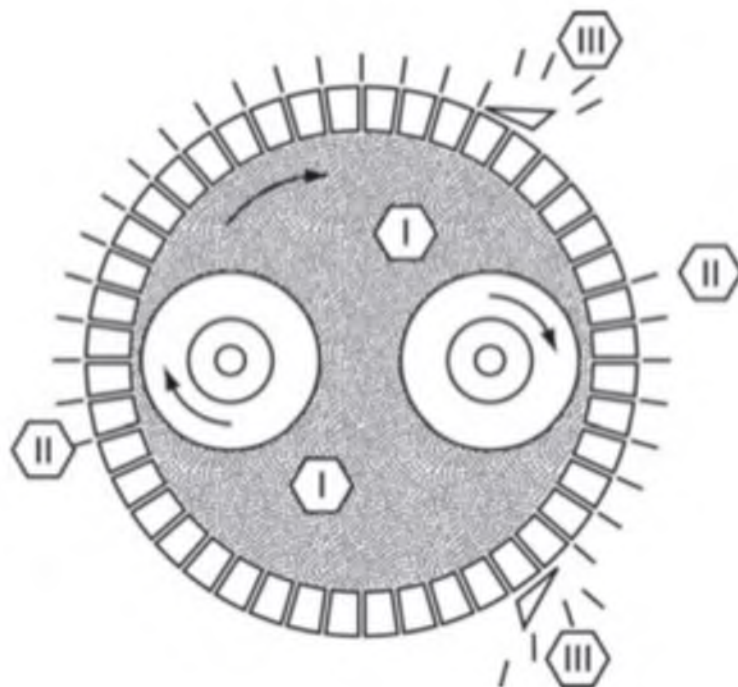
## **1.2 Tecnología de peletizado comercial**

Una peletizadora consiste en una matriz de acero perforado con uno o dos rodillos (ver Figura 1.1). Al girar la matriz y los rodillos, el material que ingresa es forzado a través de las perforaciones de la matriz con el fin de formar biomasa densificada o pellets [16].

El proceso de peletizado consta de dos tipos: matriz anular y matriz plana, en ambas máquinas, la matriz rota y los rodillos giran. Hay otros modelos de peletizadoras de matriz giratoria en que los rodillos permanecen estacionarios durante el proceso de producción [16].

La operación de las peletizadoras inicia con la descarga de la biomasa sobre un imán permanente y en un tornillo de alimentación que conduce a la matriz de la peletizadora. Los giros de la matriz alimentan la masa uniformemente a cada uno de los rodillos. Los giros de los rodillos distribuyen el material a través de la cara de la matriz. Luego, los rodillos impulsados por la fricción fuerzan al material a atravesar los orificios de la matriz. Las cuchillas de corte montadas en la carcasa cortan los pellets a medida que se extruyen de la matriz, y finalmente los pellets caen a través de la abertura de descarga [20].

Las peletizadoras comerciales típicas tienen dos rodillos para cumplir con las altas tasas de producción en el rango de 2,5 a 5,0 ton h<sup>-1</sup> y consumo de energía dentro de un rango de 15 a 40 kW h ton<sup>-1</sup> [20].



**Figura 1.1.** Esquema de una peletizadora.

I. Materia prima sin peletizar, II. Pellets extruidos desde la matriz. III. Cuchilla para cortar pellets. Fuente: [16].

### 1.3 Propiedades térmicas de los pellets

La conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico son tres propiedades importantes de la ingeniería para determinar la transferencia de calor de un material biológico [21],[22], estas propiedades son esenciales para estudiar los procesos de calentamiento, secado y enfriamiento de las biomásas. Los factores que afectan significativamente las propiedades térmicas de la biomasa incluyen: la densidad, la temperatura y el contenido de humedad [23].

El calor específico es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de 1 kilogramo del material en 1 grado Celsius y la capacidad de un producto biológico para almacenar el calor en relación con su capacidad para conducir (perder o ganar) calor. Según Mohsenin (1980), existen varios métodos para determinar el calor específico de los alimentos y los materiales agrícolas: ecuaciones empíricas, método de mezclas, método de la placa protegida, método de comparación del calorímetro, método de cálculo del calor específico, calorímetro adiabático y método de “calorímetros de barrido diferencial” (conocidos como DSC por su acrónimo en inglés) [24]. Entre los métodos descritos para la medición del calor específico, el calorímetro de barrido diferencial ha sido hasta el momento el método más preciso y rápido [25].

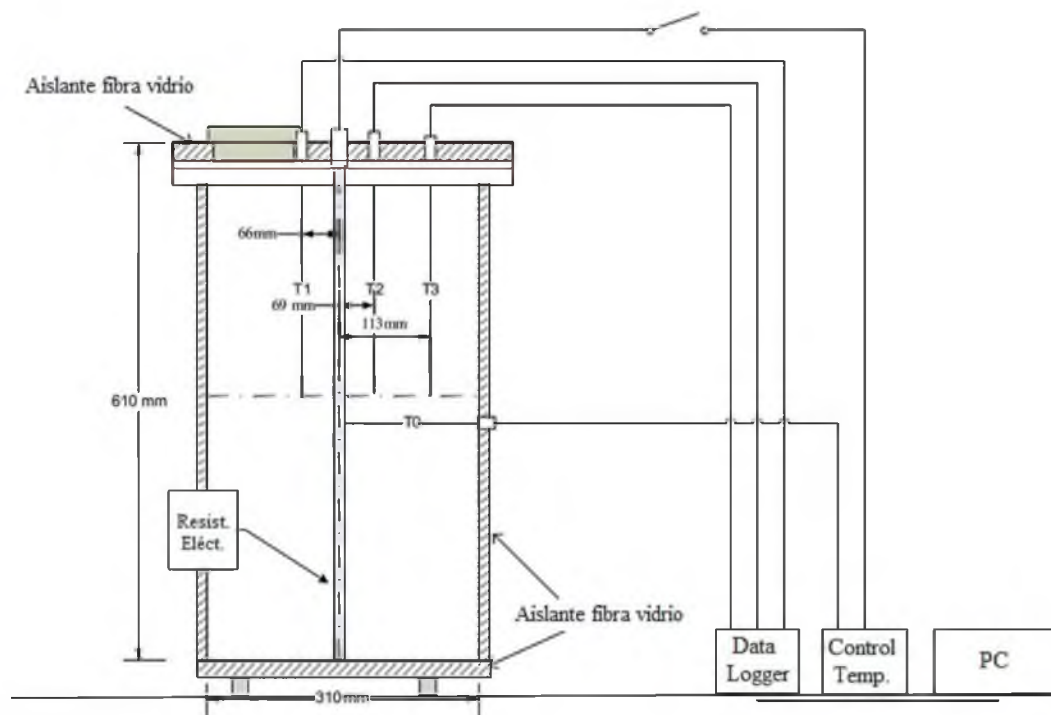
La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir el calor. La ecuación que relaciona la conductividad térmica con la cantidad de calor que fluya a través del material por unidad de tiempo ( $dQ / dt$ ), el área de la sección transversal del material a través del cual fluye el calor ( $A$ ) y la diferencia de la temperatura por unidad de longitud del material conductor ( $dT/dx$ ) es la mostrada en la ecuación (1.1):

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Según Mohsenin (1980), el método de fuente de calor lineal es uno de los métodos de estado transitorio más comunes, empleados particularmente con materiales granulares, por ejemplo, pellets de biomasa. En este método se emplea una fuente de calor constante para

un sólido infinito a lo largo de una línea infinitesimal, como un alambre delgado y resistente. Al tener la fuente de calor incrustada en la masa del material cuya conductividad se va a medir, la fuente lineal se energiza y el aumento de la temperatura a una distancia dada de la fuente se mide después de un corto tiempo de calentamiento. En la fase inicial, la temperatura aumentará rápidamente y, a medida que el calor comienza a transferirse, la velocidad de aumento de la temperatura se vuelve constante. A partir de la posición recta de la curva de velocidad (temperatura en función del tiempo) se puede calcular conductividad térmica [25].

En el 2013, en Canadá se desarrolló un equipo de laboratorio para determinar la conductividad térmica y se calculó indirectamente el calor específico de pellets hechos de residuos forestales bajo el principio de la fuente de calor línea en estado transitorio [26]. El esquema del equipo se muestra en la siguiente figura:



**Figura 1.2.** Esquema del equipo experimental para medir la conductividad térmica de pellets. Fuente: [26].

La difusividad térmica es la capacidad de un material para conducir la energía térmica en relación con su capacidad para almacenar dicha energía y va a determinar la rapidez con que se difunde el calor a través de un material. Los parámetros que afectan la difusividad térmica son el contenido de humedad, la temperatura, la composición química y la porosidad del material [24]. La difusividad térmica se puede calcular a partir de la conductividad térmica medida, la densidad aparente y el calor específico de un material, también se puede determinar a partir de la solución de una ecuación de transferencia de calor de estado unidireccional.

Generalmente, el estudio de las propiedades térmicas de los materiales biológicos es un tema de interés para las aplicaciones ingenieriles. En el Cuadro 1.2, se resumen varios métodos empleados por distintos investigadores para la determinación de propiedades térmicas, tales como la conductividad térmica y el calor específico para distintos materiales agrícolas y forestales, así como relaciones matemáticas empíricas que se encontraron para aproximar su valor numérico [27].

**Cuadro 1.2.** Datos publicados y relacionados sobre la capacidad calorífica, la conductividad térmica de biomásas y pellets.

| Investigadores            | Método y material   | Conductividad térmica<br>(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )  | Calor específico<br>(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )   |
|---------------------------|---|--|--|
| Krollman et al., [28].    | Madera en general   | $k_{seco}=0,0002\rho_{seco}+0,024$<br>[Temperatura ambiente]<br>$k_2=k_1(1-0,00015(CH_1-CH_2))$<br>[5 %<CH<35 %]   | $C_{p,seco}=0,0046T-0,116$<br>[0°C – 100°C]  |
| Adl-Zarrabi et al., [29]. | Método TPS, madera  | 0,55 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> en dirección paralela de las fibras<br>0,11 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> dirección perpendicular de las fibras<br>[20 °C, 100 °C y 150 °C] | 1,07 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> madera seca<br>1,38 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> 9,5 % de CH, Temp. ambiente |
| Gupta et al., [30].       | Aparato Fitch y DSC<br>Madera blanda seca<br>L=1,0 mm; D=6,5 mm | 0,0986 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> [37 °C]   | $C_p=0,00546T-0,524$<br>[40 °C – 140 °C]   |

Fuente: [27].

**Cuadro 1.3.** (Continuación) Datos publicados y relacionados sobre la capacidad calorífica, la conductividad térmica de biomasas y pellets.

| Investigadores         | Método y material                     | Conductividad térmica<br>(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )  | Calor específico<br>(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )   |
|------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Fasina et al.,<br>[31] | Pellets de alfafa<br>CH. 7,5 % a 18 % | $k_{efect.}=0,049+0,0082 CH$ [20 °C]   | $C_p=1,083+0,089$<br>$CH-0,002CH^2$ , [20 °C]  |
| Peters et al.,<br>[32] | Sin referencia                        | 0,20 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> para partícula madera<br>de 4 mm,<br>0,35 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> para partículas de<br>abeto | $C_p = 1,733$ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ,<br>$C_p = 1,112$ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| Pauner et al.,<br>[33] | Método de Blomquist                   | Pellets de biomasa 0,17 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup><br>[23 °C] [34]  | 2,2 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> para<br>pellets [23 °C]  |

Fuente: [26].

#### 1.4 Principales normativas de pellets

Los mercados donde se ha desarrollado principalmente el comercio de pellets son en Europa (Suecia, Alemania y Australia) y el mercado Norteamérica (Canadá y Estados Unidos). La normativa se desarrolló principalmente por estas regiones y el objetivo de estas normas es garantizar la uniformidad de la biomasa densificada y reducir las barreras de mercado a fin de crear un mercado en el que los biocombustibles puedan ser objeto de comercio entre productores y usuarios sin importar las regiones o países [35].

Las normas establecen propiedades como, por ejemplo, la densidad aparente, densidad unitaria, el contenido de cenizas, el contenido de humedad, el poder calorífico y el contenido de elementos como azufre, nitrógeno y cloro. Además, las normas utilizadas en los diferentes países productores como Norteamérica (Canadá y Estado Unidos) y Europa (Suecia, Alemania y Austria) se mantiene vigentes en la actualidad [27], [36]. A continuación se presentan las normativas para biocombustibles sólidos en forma de pellets, empleadas en Alemania y Estados Unidos [35]:

**Cuadro 1.4.** Normativa para los combustibles sólidos en forma de pellets, empleadas en los principales países productores y consumidores.

| <b>Norma</b>  | <b>Descripción</b>   |
|---|--|
| <i>DIN 51731</i>  | Pruebas de combustibles sólidos, madera comprimida y sin tratamiento. Requisitos y ensayos.  |
| <i>DIN EN 15270</i>                                       | Normas para los quemadores de pellets para pequeñas calderas de calefacción, definiciones, requisitos, pruebas y características.  |
| <i>La norma DIN Plus, basada en la norma DIN EN 15270</i> | Establece parámetros para pellets de alta calidad y hoy día es la certificación de calidad más importante del mundo para pellets de madera.  |
| <i>Estados Unidos</i>                                     | Las normas para biomasa densificada y uso como combustible están reguladas por el PFI (Pellet Fuel Institute). Este instituto propone utilizar las siguientes normas de la ASTM para la caracterización de los pellets [35]. |
| <i>ÖNORMM 7135</i>  | Requerimientos y pruebas para pellets y briquetas elaboradas de madera con o sin corteza.  |
| <i>ÖNORMM 7136</i>  | Requerimientos de calidad de la logística y transporte de pellets de madera.   |
| <i>ÖNORMM 7137</i>  | Requerimientos de calidad y de almacenamiento para consumidores finales de pellets de madera.  |

Fuente: [35], [27].

### **1.5 Proceso de gasificación de biomasa**

La gasificación es un proceso de conversión termoquímico que transforma el combustible sólido como la biomasa y el carbón mediante la oxidación parcial a un producto gaseoso llamado gas de síntesis o syngas (abreviatura de synthesis gas, en inglés), el cual se puede emplear para diversas aplicaciones que requieren esta forma gaseosa o líquida, en lugar de una forma sólida. Para realizar la gasificación de biomasa, se va a requerir que la materia prima reaccione con un agente oxidante como el aire, el oxígeno, el vapor o una mezcla de ellos [37].



## 1.6 Reacciones químicas del proceso de gasificación

Las reacciones típicas que tiene lugar en la gasificación pueden resumirse como se indica en el siguiente cuadro [38]:

**Cuadro 1.5.** Las principales reacciones químicas del proceso de gasificación.

| Reacción  | Calor de reacción (kJ mol <sup>-1</sup> ) | Nombre   | Reacción |
|---|---|--|----------|
| Biomasa → Char + Alquitrán + H <sub>2</sub> O + (CO + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> + ...) | >0  | Pirólisis (Desvolatilización)                                      | R1       |
| Combustión del char<br>C + 1/2 O <sub>2</sub> → CO  | -111                                      | Combustión parcial   | R2       |
| C + O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>  | -394                                      | Combustión completa  | R3       |
| Gasificación del char<br>C + CO <sub>2</sub> → 2CO  | +173                                      | Reacción de Bounduard  | R4       |
| C + H <sub>2</sub> O → CO + H <sub>2</sub>  | +131                                      | Vapor de la gasificación (reacción de cambio heterogénea agua+gas) | R5       |
| C + 2H <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub>   | -75                                       | Hidrogasificación (reacción del metano)                            | R6       |
| Oxidación volátil homogénea<br>CO + 1/2 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>  | -283                                      | Oxidación del monóxido de carbono                                  | R7       |
| H <sub>2</sub> + 1/2 O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O  | -242                                      | Oxidación del hidrogeno  | R8       |
| CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>  | -802                                      | Oxidación del metano   | R9       |
| CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>  | -802                                      | Oxidación del metano   | R9       |

Fuente: [38].

**Cuadro 1.6.** (Continuación) Las principales reacciones químicas del proceso de gasificación.

| Reacción  | Calor de reacción (kJ mol <sup>-1</sup> ) | Nombre                       | Reacción |
|---|---|------------------------------|----------|
| Cambios del metano  |   |                              |          |
| $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$    | +206                                      | Recombinación del metano     | R11      |
| $\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$        | -36                                       | Oxidación parcial del metano | R12      |
| $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$          | +247                                      | Cambio en el secado          | R13      |
| $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ | +163                                      | Reacción combinada           | R14      |

Fuente: [38].

Los calores de la reacción (el signo + indica una reacción endotérmica y signo – una reacción exotérmica) para los tres procesos se muestran que la mayor liberación de energía se deriva de la oxidación completa a dióxido de carbono, es decir, la combustión, mientras que la oxidación parcial del carbono representa alrededor del 65 % de la energía liberada durante el proceso de la oxidación completa. A diferencia de la combustión que solo produce un gas caliente, el monóxido de carbono, el hidrógeno y el vapor pueden sufrir reacciones adicionales durante el proceso de gasificación de la siguiente manera:

**Cuadro 1.7.** Reacciones adicionales del vapor.

| Proceso de la reacción     | Fórmula química  | Cambio de entalpía [MJ kg <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------|--|---|
| Reacción del vapor de agua | $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$  | -42   |
| Oxidación completa         | $\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ | -88   |

Las flechas indican que las reacciones están en equilibrio y pueden avanzar en cualquier dirección, dependiendo de la temperatura, la presión y la concentración de las especies que reaccionan. Se deduce que el producto de la gasificación o gas de síntesis consiste en una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, vapor de agua y carbono residual. En este proceso de gasificación también se producen varios

contaminantes como el alquitrán y ceniza [39]. Además, la calidad del gas de síntesis varía con el tipo de agente gasificante suministrado al reactor [40].

El agente gasificante más común es el aire, porque es abundante en la naturaleza y simple de usar. El rendimiento de la gasificación empleando aire depende en gran medida de la temperatura y de la relación equivalente (ER) [41], en cuanto mayor sea la temperatura del aire inyectado en el gasificador, mayor será el valor de calentamiento del gas combustible seco resultante [42], al utilizar aire para gasificar va a implicar un inconveniente debido a que el aire contiene hasta un 79 % de nitrógeno, produciendo que el gas de síntesis se encuentre altamente diluido, lo que aumenta el costo de la separación del gas [43]. Además, el gas de síntesis producto de la gasificación utilizando aire va a presentar un poder calorífico bajo (3,7 - 7,8 MJ m<sup>-3</sup>); por tanto, el uso de aire como agente de gasificante a menudo se limita a la generación de calor y energía en el sitio [44].

### **1.7 Etapas de la gasificación**

El proceso de gasificación está conformado por varios fenómenos complejos que van desde los mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas pre-secado y secado de la biomasa, pirólisis, oxidación y la gasificación o reducción (ver Figura 1.3) [45].

Las biomásas en muchos casos presentan un alto contenido de humedad, por lo tanto, se necesita realizar una etapa de pre-secado para eliminar la mayor cantidad de humedad externa o superficial de la biomasa antes de alimentar el gasificador. La etapa de pre-secado se da debido a que cada kilogramo de humedad en la biomasa requiere un mínimo de 2260 kJ de energía extra del gasificador para vaporizar el agua. Para producir un gas de síntesis con un poder calorífico razonablemente alto, la mayoría de los sistemas de gasificación utilizan biomasa seca con un contenido de humedad entre 10 % y 20 % [6].

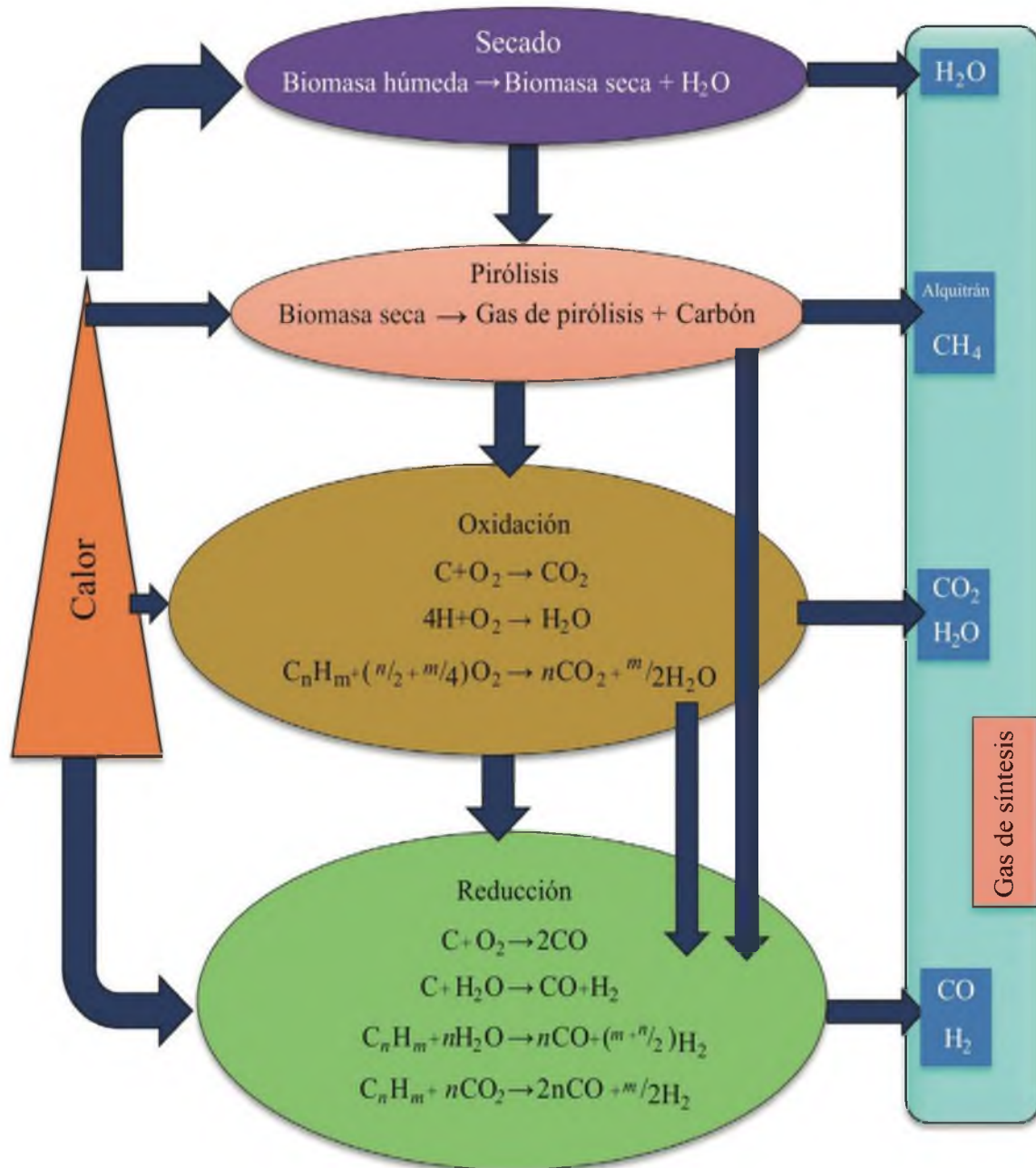
El secado final tiene lugar después de la alimentación del gasificador, donde recibe calor de las zonas más calientes que se encuentran aguas abajo del reactor. Este calor seca el combustible de alimentación, lo que libera el agua. Por encima de los 100 °C, el agua no ligada que está en la biomasa se elimina irreversiblemente, conforme la temperatura aumenta las moléculas de bajo peso molecular extractivas inician a volatizarse, este proceso continúa hasta que se alcanza una temperatura aproximadamente de 200 °C [6].

En la etapa de la pirólisis se da una descomposición termoquímica de la matriz carbonosa presente en la biomasa, en particular, el “cracking” o rompimiento de los enlaces químicos que genera la formación de moléculas con un peso molecular menor. Mediante la pirólisis es posible obtener diferentes fracciones: una sólida, una líquida/condensada y una fracción gaseosa [46], [47].

Las reacciones en la etapa de la pirólisis ocurren en un rango de temperatura de 250 - 700 °C. Son reacciones endotérmicas y, al igual que en la etapa del secado, la energía requerida proviene desde la zona de oxidación del proceso de gasificación [48].

La oxidación parcial de la biomasa es necesaria para obtener la energía térmica requerida en los procesos endotérmicos, manteniendo los valores requeridos de temperatura en el proceso de gasificación. La oxidación se lleva a cabo en condiciones deficientes de oxígeno con respecto a la relación estequiométrica con el objetivo de oxidar parcialmente el combustible. En esta etapa se produce una mezcla de gases de CO, CO<sub>2</sub> y agua. En el caso de que se utilice aire como agente oxidante, se va dar la presencia de nitrógeno en esta mezcla de gases [49].

Reducción o gasificación es resultado de varias reacciones químicas que involucran la reducción de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y una sustancia sólida carbonosa (char), en un rango de temperatura de 800 - 1200 °C. La composición final del gas de síntesis depende del flujo de oxígeno dentro del gasificador, el contenido de humedad, el tamaño de partícula de la materia prima y el volumen de la zona de reducción [50].



**Figura 1.3.** Diagrama conceptual de las etapas del proceso de gasificación.  
Fuente: Adaptado a partir de [51].

### **1.7.1 Gasificador de flujo concurrente**

El gasificador de flujo concurrente cuenta con cuatro zonas distintas: zona de secado, zona de pirólisis, zona de oxidación y zona de reducción (ver Figura 1.4), en estos, el flujo de la biomasa es en la misma dirección del aire y el gas de síntesis, la cual va hacia la sección inferior del reactor de gasificación, por lo tanto, el gas de síntesis sale por esta parte del reactor, lo que permite el rompimiento (cracking) del alquitrán en la parte superior, con esto se tiene un gas de síntesis con un contenido bajo de esta sustancia, la concentración de partículas y alquitranes presentes en el gas de síntesis es aproximadamente  $1 \text{ g Nm}^{-3}$  [52].

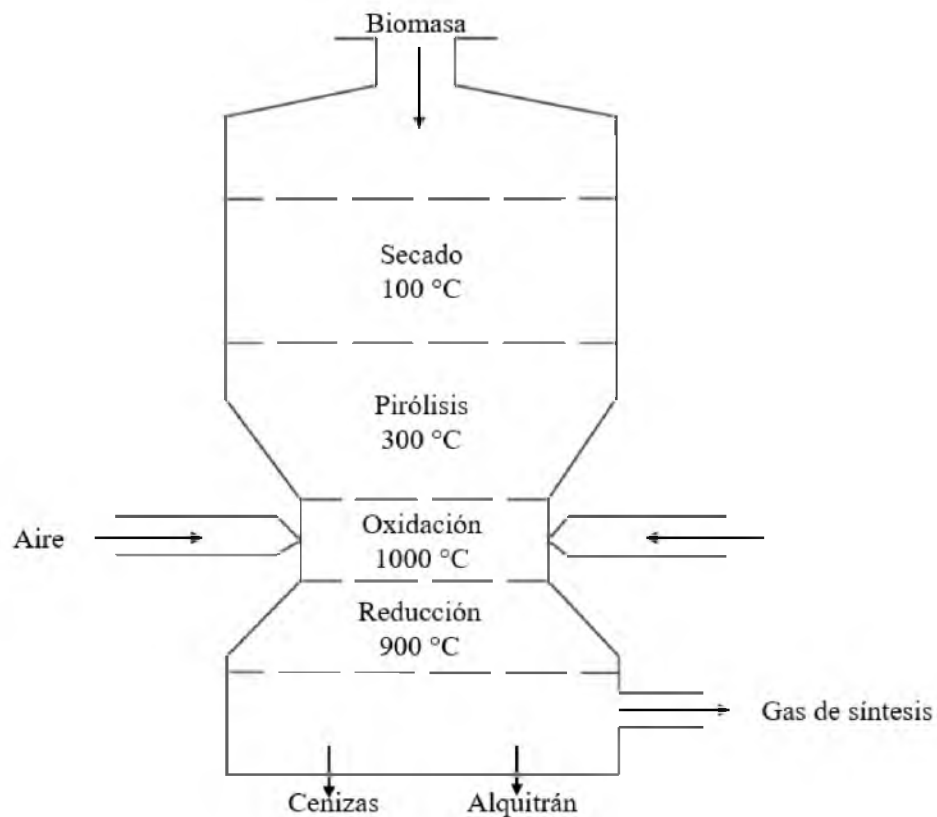
#### **1.7.1.1 Ventajas y desventajas**

Entre las ventajas de los gasificadores de flujo concurrente está que se requiere una limpieza mínima de alquitrán, esto debido a que aproximadamente un 99,9 % de este producto es consumido, por otra parte, no es indispensable emplear un filtro de ciclón, debido a que los minerales quedan retenidos en la ceniza, además, es un proceso simple y de bajo costo. Por otra parte, se tienen desventajas como el requerimiento de materia prima con baja densidad (<20 %). Se tiene una pérdida de aproximadamente entre 4 % y 7 % del carbono que no es convertido y el gas de síntesis producido tiene una alta temperatura en la salida, por lo que se requiere de enfriamiento antes de ser empleado [53].

Además, con este tipo de gasificadores se puede obtener un gas de síntesis que una vez pasado por un sistema de limpieza se puede utilizar en motores de combustión interna como sistema de alimentación.

El gasificador de flujo concurrente presenta un flujo de la biomasa en la misma dirección del aire y el gas de síntesis, la cual es hacia la sección inferior del reactor de gasificación. El gasificador de flujo concurrente tiene cuatro zonas distintas: zona de secado, zona de pirólisis, zona de oxidación y zona de reducción (ver Figura 1.4), por tanto, el gas de síntesis sale por la parte inferior del reactor, lo que permite el rompimiento (cracking) del

alquitrán en la parte superior, lo anterior produce un contenido bajo de alquitrán en gas. La concentración de partículas y alquitranes presentes en el gas de síntesis es aproximadamente  $1 \text{ g Nm}^{-3}$  [52]. Las desventajas de este tipo de gasificador son la baja eficiencia térmica del reactor, otro inconveniente es que la materia prima debe presentar un contenido de humedad en base húmeda del 20 % o menos y la producción de cenizas [54], [53].



**Figura 1.4.** Etapas de la gasificación en un reactor de flujo concurrente de lecho fijo.  
Fuente: [53].

### 1.7.1.2 Composición química del gas de síntesis para un gasificadores de flujo concurrente

En un gasificador de flujo concurrente se tienen valores generales para el uso de dicho equipo, en donde se reporta un poder calorífico inferior que ronda entre 4,0 y 5,6 MJ/Nm<sup>3</sup>. Por otra parte, se tienen rangos de porcentaje de volumen para diferentes compuestos como hidrógeno que va entre 15 y 21 %, monóxido de carbono que ronda entre 10 y 22 %, dióxido de carbono que varía entre 11 y 13 % y metano que va de 1 a 5 % [53].

Además, se han llevado a cabo varios estudios de gasificación empleando diferentes tipos de biomasa, algunos resultados de estos estudios se resumen en el siguiente cuadro.

**Cuadro 1.8.** Composición química del gas de síntesis obtenidas en diversos procesos de gasificación empleando un reactor de flujo concurrente.

| Biomasa              | ER<br>(adimensional) | Composición del gas de síntesis (vol%) |      |                 |                 | Referencia |
|----------------------|----------------------|--|------|-----------------|-----------------|------------|
|                      |                      | H <sub>2</sub>                         | CO   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |            |
| Cáscaras de avellana | 0,35                 | 13                                     | 23   | 11              | 4               | [55]       |
| Residuos de madera   | 0,20                 | 8                                      | 15   | 5               | 1               | [56]       |
|                      | 0,35                 | 12                                     | 22   | 8               | 3               |            |
| Eucalipto            | 0,37                 | 17,4                                   | 17,8 |                 | 1,4             | [38]       |
|                      | 0,42                 | 16,6                                   | 21   |                 | 1,7             |            |
| Chips de madera      | 0,25                 | 19,1                                   | 21,3 |                 | 1,06            | [57]       |

*Nota:* ER: relación equivalente.

### 1.7.1.3 Condiciones de operación

#### 1.7.1.3.1 Temperatura

Una disminución en el poder calorífico del gas repercute directamente en el aumento del rendimiento de este, esto sin importar la materia prima empleada y el tipo del gasificador, además, al aumentar la temperatura, se propicia un aumento en la velocidad de diferentes reacciones en el proceso de gasificación. Por otra parte, se tiene que a temperaturas más



elevadas de gasificación las emisiones de sólidos y de alquitrán disminuyen, lo que implica que el proceso de limpieza puede ser más económico [53].

### 1.7.1.3.2 Presión

Los gasificadores pueden trabajar tanto a presión atmosférica, en el caso de los gasificadores de alta presión son utilizados cuando se desea comprimir el gas en la salida. Los gasificadores a presión atmosférica cuando son utilizados en turbinas, requieren de una alta limpieza del gas antes de entrar en la turbina, en el caso de uso para motores el gas no requiere tanta calidad como para las turbinas mencionadas anteriormente. Los sistemas a presión atmosférica son más económicos y eficientes para capacidades bajas de hasta 30 MW. Tanto para el caso del gasificador a presión atmosférica como el que se maneja a alta presión. la composición del gas y el poder calorífico no varían, esto significa que la presión no influye directamente en estos resultados [53].

### 1.7.1.3.3 Tipo de agente oxidante

El agente oxidante es uno de los factores que afecta directamente el poder calorífico y el contenido de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis, sabiéndose que estos factores aumentan cuando se utiliza vapor en comparación con el uso de aire.

**Cuadro 1.9.** Efecto del agente gasifica en la producción del gas de síntesis.

| Agente oxidante             | Composición química (vol. %) |    |                 |                 |                | HHV (MJ m <sup>-3</sup> ) |
|-----------------------------|------------------------------|----|-----------------|-----------------|----------------|---------------------------|
|                             | H <sub>2</sub>               | CO | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> |                           |
| Aire (flujo concurrente)    | 17                           | 21 | 13              | 1               | 48             | 5,7                       |
| Oxígeno (flujo concurrente) | 32                           | 48 | 15              | 2               | 3              | 10,4                      |

*Nota:* HHV: poder calorífico superior. Fuente: [53].

## 2 METODOLOGÍA

---

### 2.1 Materia prima

La materia prima utilizada consistió en residuos de aserrín y burucha generadas a partir del procesamiento de madera de eucalipto (*Eucalyptus ssp*) y ciprés (*Cupressus sempervirens L*), dicho producto fue almacenado en sacos para evitar pérdidas de durante el transporte. Esta biomasa fue recolectada del aserradero Tarimas Oreamuno, localizado en La Lima, Cartago.

La biomasa fue transportada a las instalaciones del laboratorio de recursos forestales ubicado en el Instituto Investigaciones en Ingeniería (INII) de la Sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica (UCR).

#### 2.1.1 Acondicionamiento de muestras

La biomasa del aserradero requirió un acondicionamiento previo a la etapa de peletización. En la primera etapa se tamizó el material para la extracción de impurezas, como ejemplo tornillos y tuercas (ver Figura 2.1a). Luego se empleó un molino de martillos modelo DPM-500, marca Nogueira, con una malla de 2 mm para uniformizar el tamaño de partícula (ver Figura 2.1b). Seguidamente, se tomó una muestra del aserrín molido para determinar el contenido de humedad en base humedad, empleando la norma ASTM E871-82, donde se obtuvo un valor del 30,33 % para el eucalipto y un  $CH_{bh}$  del 29,33 % en el ciprés. Finalmente, la materia prima se almacenó en sacos para su posterior tratamiento de densificación (ver Figura 2.1c y Figura 2.1d).



**Figura 2.1.** Equipo para el acondicionamiento de la biomasa.

- a) Impurezas (tuercas, tornillos, piedras, entre otros) presentes en la biomasa,
- b) molino de martillos, c) biomasa con diferente tamaño de partícula y d) almacenamiento del aserrín.

### 2.1.2 Densificación de la biomasa

El proceso de peletizado se llevó a cabo mediante una peletizadora de rodillos con matriz anular, modelo M20 de la marca General Dies (ver Figura 2.2). Esta máquina permite densificar varios tipos de biomasa dependiendo del tamaño de partícula y contenido de humedad que presenten.



**Figura 2.2.** Peletizadora de rodillos con matriz de anillo, General Dies, modelo M20.

El proceso de peletizado al que responde la peletizadora M20 se divide en dos fases. La primera etapa es el proceso de alimentación de la biomasa hacia la matriz, esta fase se ejecuta a través de una tolva y un tornillo sin fin. El tornillo sin fin es impulsado por un motor eléctrico de 0,009 kW. La segunda etapa es la densificación de la biomasa, mediante una matriz perforada de geometría anular. En la parte interna de la matriz se encuentran dos rodillos del mismo diámetro (ver Figura 2.3), los cuales van a suministrar la presión necesaria para obtener la densificación del aserrín, esta presión varió según el tipo de material, tamaño partícula o contenido de humedad de la muestra.



**Figura 2.3.** Matriz con forma de anillo y rodillos.

Se realizaron pruebas preliminares evaluando el comportamiento de la peletizadora con el eucalipto y el ciprés. Además, se varió el tamaño de partícula y su contenido de humedad, con el fin de establecer los parámetros de operación del equipo.

Una vez realizadas estas pruebas se estableció que la biomasa debe presentar un tamaño de partícula menor o igual a 2,00 mm, una temperatura de 80 °C en la matriz de la peletizadora y un rango de contenido de humedad en base húmeda ( $CH_{bh}$ ) del 18 % – 28 % para realizar el proceso de peletización. Este elevado contenido de humedad empleado en el proceso de peletizado se debe a una limitante que presentó el equipo, porque si se empleaba un contenido de humedad menor no permitía una buena formación de los pellets de eucalipto y ciprés. Una vez concluida la etapa de peletizado se procede a su almacenamiento.

### 2.1.3 Almacenamiento de pellets

Después de la etapa de peletizado, los pellets de aserrín de eucalipto y ciprés se almacenaron en seis sacos con un volumen de  $3,50 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ , los cuales constan de tres sacos con una masa de 13,50 kg respectivamente. Luego los sacos se ubicaron en un cuarto de almacenamiento con una temperatura promedio de 21 °C y una humedad relativa promedio del 61 % (ver Figura 2.4).



**Figura 2.4.** Cuarto de almacenamiento de muestras.

## 2.2 Caracterización física y térmica de los pellets

Los pellets obtenidos en la etapa de densificación se sometieron a unas pruebas físicas tales como: contenido de humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, y friabilidad. Además, se determinó la conductividad térmica, difusividad y calor específico de los pellets.

### 2.2.1 Contenido de humedad

Se empleó la norma ASTM E871-82 para determinar el contenido de humedad. El procedimiento consistió en colocar tres muestras de 5,0 g de aserrín y 20,0 g de pellets en un recipiente de vidrio y se colocaron en un horno convectivo de marca Precision Scientific, modelo 625-B a una temperatura de  $103,0 \pm 2,0$  °C por 24 h (ver Figura 2.5). Después se extrajeron las muestras y se pesaron en una balanza analítica marca Ohaus, modelo traveler TA3001 y una precisión  $\pm 0,1$  g. Las mediciones se repitieron tres veces para reportar el promedio [27], [58]. El contenido de humedad se calculó como:

$$CH_{bh} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100 \quad (1)$$

donde:

$CH_{bh}$ : contenido de humedad en base húmeda (%)

$m_i$ : masa inicial de la muestra (g)

$m_f$ : masa seca de la muestra (g)



**Figura 2.5.** Horno convectivo marca Precision Scientific, modelo 625-B.

### **2.2.2 Densidad aparente**

La densidad aparente de los pellets fue determinada con un recipiente cilíndrico de 9,0 cm de diámetro y 7,5 cm de altura, como se muestra en la Figura 2.6. El método empleado se basa en la Norma ASEA-124 para la determinación de propiedades físicas de pellets y briquetas. Las muestras de pellets se depositaron en el cilindro hasta llenarlo al tope, luego se midió la masa de la muestra en balanza digital con precisión de  $\pm 0,1$  g. Esta prueba se realizó por triplicado, con lo que se reporta el promedio. Para determinar la densidad aparente se empleó la siguiente ecuación:



$$\rho_a = \frac{m_T}{v_C} \quad (2)$$

donde:

$\rho_a$ : densidad aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$m_T$ : masa total de la muestra (kg)

$v_C$ : volumen del cilindro ( $\text{m}^3$ )



**Figura 2.6.** Determinación de la densidad aparente.

### 2.2.3 Densidad real

La densidad real (densidad unitaria y de partículas) se realizó tomando una muestra de 40 pellets de forma aleatoria [59]. Luego la masa de los pellets se determinó empleando una balanza digital con una precisión de  $\pm 0,1$  g, el diámetro y la longitud del pellet se determinó con ayuda de un vernier digital de precisión  $\pm 0,01$  mm; seguidamente se calculó su volumen (ver Figura 2.7). La densidad real se calculó con la siguiente ecuación:

$$\rho_r = \frac{m_p}{v_p} \quad (3)$$

donde:

$\rho_r$ : densidad real del pellet ( $\text{g dm}^{-3}$ )

$m_p$ : masa del pellet (g)

$v_p$ : volumen del pellet ( $\text{dm}^3$ )



**Figura 2.7.** Equipo para determinar la densidad real de los pellets.

#### 2.2.4 Porosidad

El cálculo de la porosidad se realizó con base en los valores de la densidad aparente y la densidad real. La porosidad se calculó mediante la siguiente ecuación [15], [60]:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) 100 \quad (4)$$

donde:

$\varepsilon$ : porosidad del material (%)

$\rho_a$ : densidad aparente del material ( $\text{g m}^{-3}$ )

$\rho_r$ : densidad real del material ( $\text{g m}^{-3}$ )

#### 2.2.5 Friabilidad

Según la metodología propuesta por [61], la prueba de friabilidad se basó en la metodología de los Laboratorios de Termodinámicos y Motores de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSI) de motores, la cual consistió en dejar caer uno a uno los pellets de una altura de 1,0 m sobre una superficie cerámica y se observa en cuantas partes se rompen (2, 3 o más) (ver Figura 2.8). La ecuación empleada para el cálculo de friabilidad es la siguiente:

$$Fr = \frac{N_i}{N_f} \quad (5)$$

donde:

$Fr$ : friabilidad resultante (adimensional)

$N_i$ : número de pellets al inicio del ensayo

$N_f$ : número de pellets al final de la prueba (pellets enteros y fraccionados)



**Figura 2.8.** Prueba de friabilidad.

Después de realizar la caracterización física se determinaron las propiedades térmicas de los pellets. La metodología utilizada consiste en determinar la conductividad térmica de los pellets empleando un equipo construido en el laboratorio y se calculó la difusividad térmica y el calor específico mediante las ecuaciones (7) y (8) respectivamente. Este equipo se adaptó según lo descrito en los trabajos de [26],[62]. En la Figura 2.9 se muestra el equipo empleado en las pruebas térmicas.



**Figura 2.9.** Equipos empleados en las pruebas de las propiedades térmicas de los pellets.

Las características del equipo cumplieron con el fundamento termodinámico de cilindro infinito. Fue construido con un tubo de PVC de 10 cm de diámetro y 30 cm de largo. Recubierto en sus extremos con aislante térmico de poliestireno expandido y sellado con dos tapones de los cuales uno es removible a fin de rellenar el cilindro. A lo largo del eje central del cilindro se ubicó una resistencia eléctrica de 30 cm de largo, como fuente de calor lineal. Se asumió la hipótesis que se da la condición de calor unidimensional y radial a partir de la fuente de calor lineal [63].

## **2.3 Propiedades térmicas de los pellets**

### **2.3.1 Conductividad térmica**

Las corridas experimentales consistieron en rellenar el cilindro con las muestras de pellets. El cilindro se colocó dentro de una incubadora marca Memmert por 30 minutos con el fin de estabilizar la temperatura de la biomasa, el equipo se fijó a una temperatura constante de 20 °C. Luego, para activar la resistencia eléctrica (fuente de calor) se suministró un voltaje de 2,4 V y un consumo de corriente eléctrica de 2,2 A. Una vez iniciado el calentamiento se monitoreó el cambio de la temperatura mediante cuatro termopares tipo J: el termopar  $T_0$  registra la temperatura de resistencia y los otros tres termopares  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$  registraron las temperaturas en puntos ubicados a una distancia radial de 1,0 cm, 2,5 cm y 4,0 cm respectivamente, estos valores de temperatura se almacenaron a través de un sistema de adquisición de datos (DAQ), marca Cole-Parmer 18200-40 (ver Figura 2.9). Finalmente, los perfiles de temperatura con respecto al tiempo generado por los cuatro termopares ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ), se relacionaron con la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de las muestras de acuerdo con las ecuaciones (6) , (7) y (8) respectivamente [27]:

La conductividad térmica se calculó con la siguiente ecuación, según lo propuesto por [64]:

$$k = \frac{q}{4\pi L(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (6)$$

donde:

$k$ : conductividad térmica de la muestra ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$q$ : potencia disipada por la resistencia (W)

$L$  longitud del cilindro (m)

$T_1$  y  $T_2$ : temperatura inicial y final de la resistencia respectivamente ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_1$  y  $t_2$ : tiempo inicial y final respectivamente (s)

### 2.3.2 Difusividad térmica

La difusividad térmica se determinó según [65], empleando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left[ \frac{e^{\left(\frac{4\pi k \Delta T}{q} + y\right)}}{4t} \right] r^2 \quad (7)$$

donde:

$\alpha$ : difusividad térmica de la muestra ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

$r$ : distancia radial de toma de lecturas (m)

$\Delta T$ : gradiente de temperatura a la distancia  $r$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k$ : conductividad térmica de la muestra ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$q$ : potencia disipada por la resistencia (W)

$y$ : constante de Euler ( $y = 0,5772$ )

$t$ : intervalo de tiempo de las mediciones (s)

### 2.3.3 Calor específico

Con los valores calculados de la densidad aparente, la conductividad térmica y la difusividad térmica, se determinó de forma indirecta el calor específico de los pellets empleando la siguiente ecuación [64]:

$$c_p = \frac{k}{\alpha \rho_a} \quad (8)$$

donde:

$c_p$ : calor específico de la muestra ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$k$ : conductividad térmica de la muestra ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$\alpha$ : difusividad térmica de la muestra ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

$\rho_a$ : densidad aparente de la muestra ( $\text{kg m}^{-3}$ )

### 2.3.4 Poder calorífico

El poder calorífico superior (HHV) de los pellets se determinó en Laboratorio de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería con ayuda de una bomba calorimétrica marca Leco AC500 (ver Figura 2.10). Además, el poder calorífico inferior (LHV) de los pellets se calculó de forma indirecta empleando la siguiente ecuación [66]:

$$LHV = HHV(1 - CH_{bh}) - (2,447CH_{bh}) \quad (9)$$

donde:

$LHV$ : poder calorífico inferior de la muestra ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

$HHV$ : poder calorífico superior de la muestra ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

$CH_{bh}$ : contenido de humedad de los pellets en base húmeda (decimal)

2,447: constante del calor latente de vaporización del agua liberado en  $\text{MJ kg}^{-1}$  a  $25^\circ \text{C}$



**Figura 2.10.** Bomba calorimétrica marca Leco AC500.

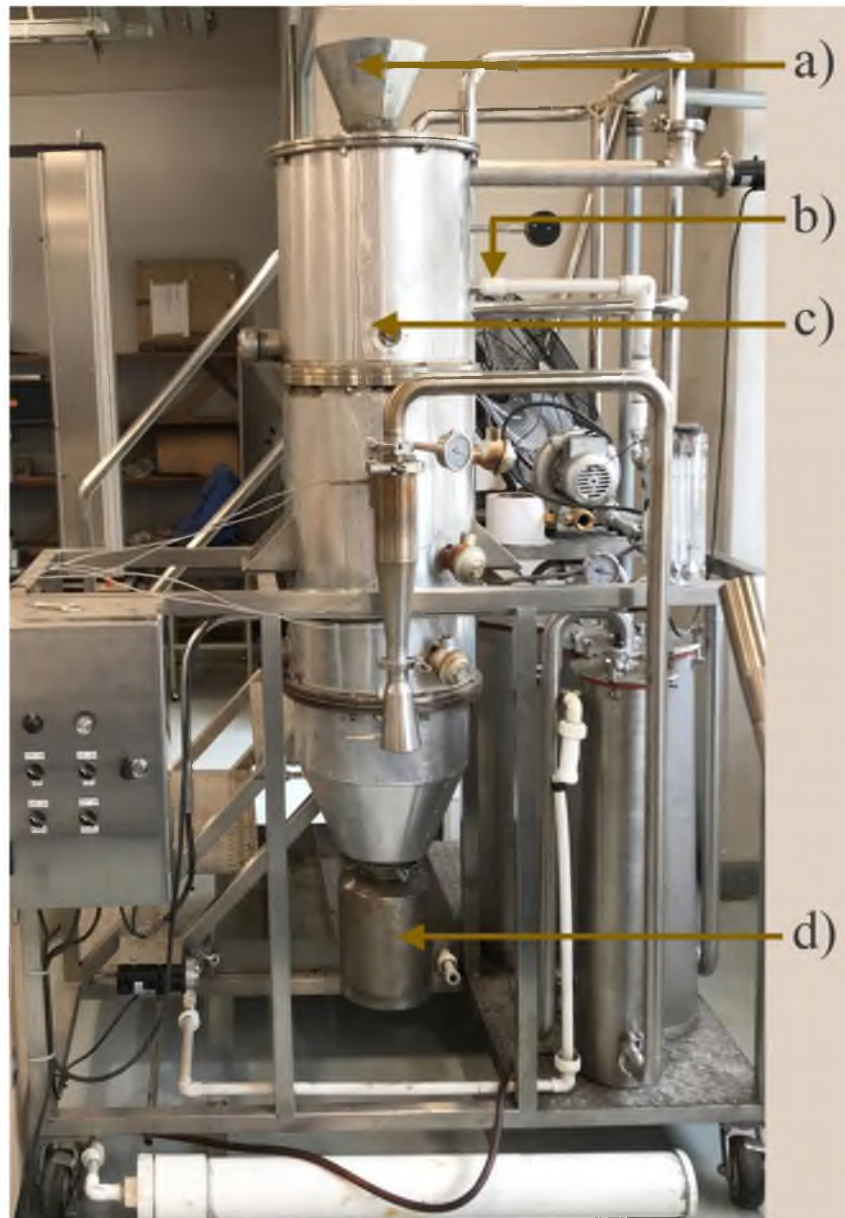
## **2.4 Gasificación de biomasa**

Una vez realizada la caracterización física y térmica de los pellets, se procedió a la etapa de gasificación de biomasa. En la cual se empleó un reactor de gasificación de flujo concurrente con lecho fijo y una batería de filtros para la limpieza del gas de síntesis (ver Figura 2.11).

El reactor de gasificación se clasifica como flujo concurrente con un lecho fijo y cuenta con un diseño teórico que permite una producción constante de 15 kW. El cuerpo principal del reactor consiste en tres zonas, en la parte superior se ubica una tolva de alimentación de pellets, luego en la parte interna se cuenta con tres toberas radiales que permite el ingreso del agente gasificante, aire, que es inyectado por medio de un ventilador externo Atlantic Blowers, modelo AB-80. En la zona media del reactor presenta una reducción del área



transversal de la garganta con el objetivo de que se den los procesos de pirólisis y gasificación. Además, en esta zona se ubica la salida del gas de síntesis producido. En la zona inferior del reactor se da la extracción de las cenizas [67].

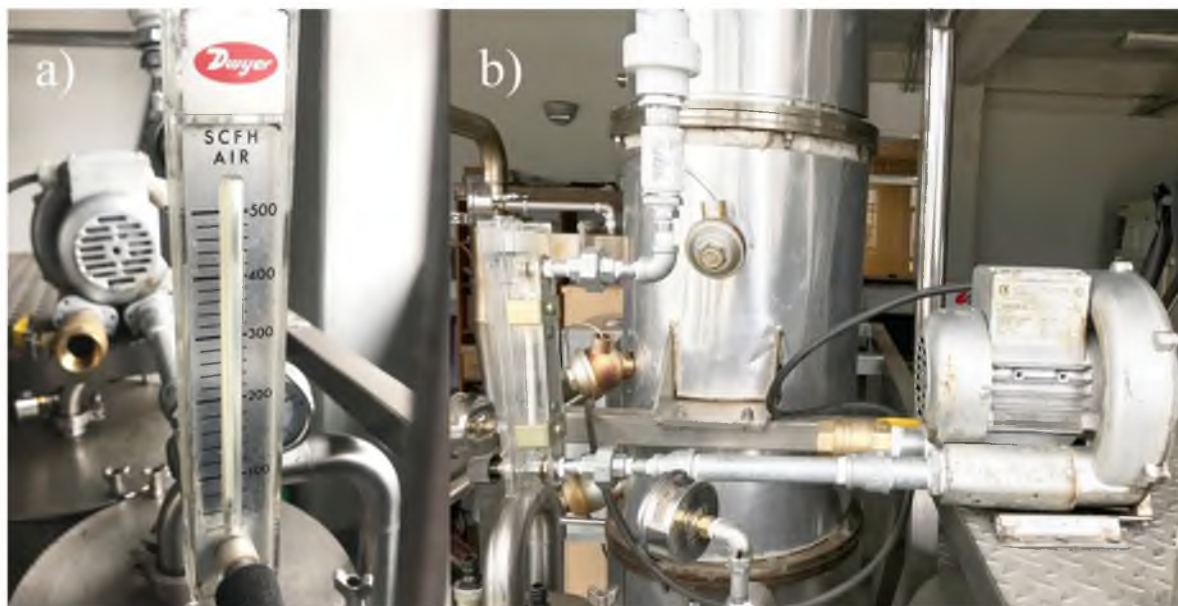


**Figura 2.11.** Reactor de gasificación con lecho fijo y flujo concurrente.  
a) Ingreso de los pellets, b) Entrada del agente gasificante, c) reactor de gasificación de flujo concurrente y d) contenedor de cenizas.

## 2.5 Pruebas preliminares de gasificación

El proceso de gasificación se realizó por corridas el cual consistió en utilizar una masa de pellets de 13,5 kg ( $3,50 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ). Se procedió a la ignición de 2,0 kg de biomasa dentro del reactor por medio de una antorcha, luego se depositaron los otros 11,5 kg pellets dentro del reactor y se procedió a cerrar el reactor con el fin de regular el ingreso del agente gasificante.

El agente gasificante fue suministrado al interior del reactor por medio de un ventilador centrifugo marca Atlantic Blowers, modelo AB-80 (ver Figura 2.12). El caudal se cuantificó con un flujómetro marca Dwyer con una capacidad de 500 scfh (aproximadamente  $14,15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ).

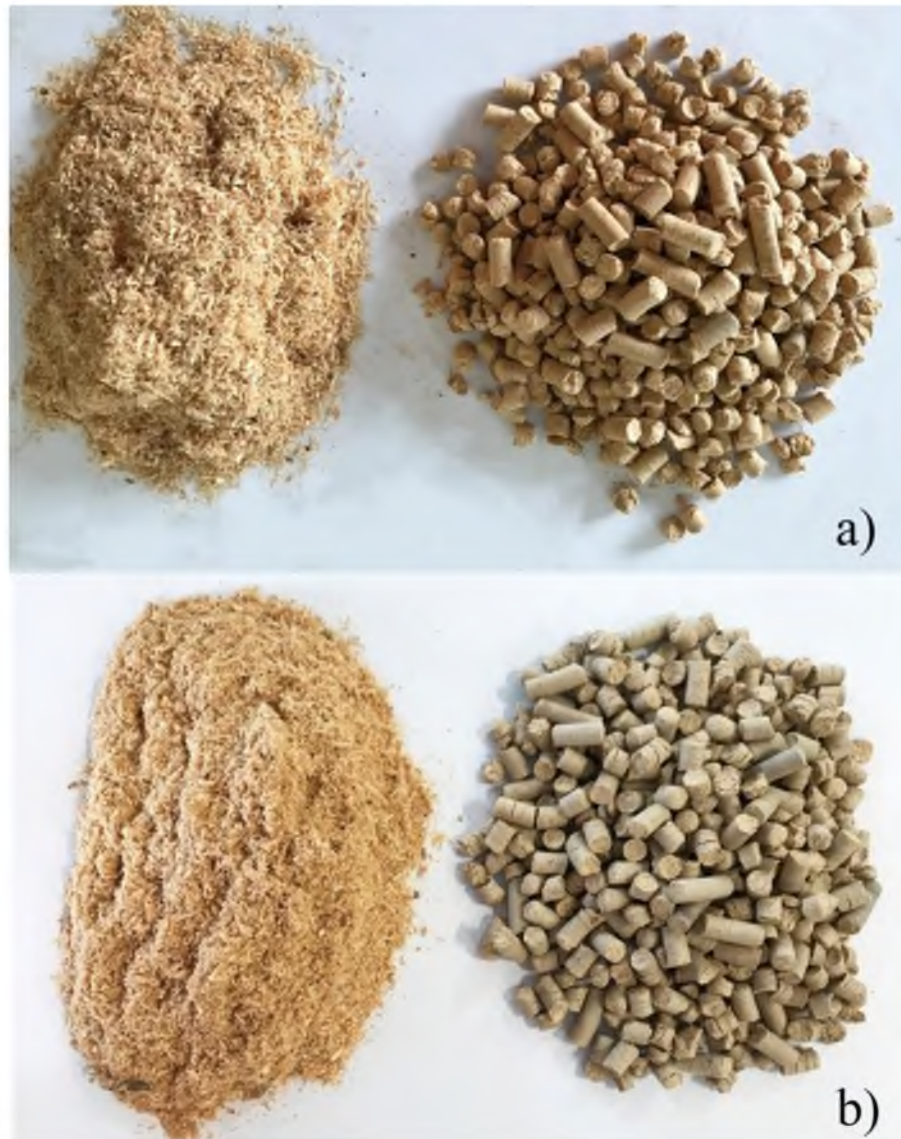


**Figura 2.12.** Equipo empleado para el control del agente gasificante.

a) Flujómetro marca Dwyer y b) ventilador marca Atlantic Blowers.

Una vez iniciada la gasificación dentro del reactor, se monitoreó la temperatura en cuatro puntos del reactor, mediante termopares tipo k y los datos de temperatura se almacenaron mediante un sistema de adquisición de datos Cole-Parmer 18200-40. A fin de estudiar la variación del perfil de la temperatura del reactor conforme cambia en el tiempo.

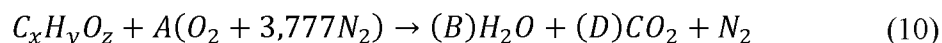
Con base en las pruebas preliminares se estableció que el caudal mínimo del agente gasificante es de  $3,40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Manteniendo constante este caudal se alcanzó una temperatura promedio ( $T_3$ ) de  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 180 minutos. Esta prueba se realizó para cada una de las relaciones equivalente (0,20, 0,27 y 0,30), tuvo una duración de 210 minutos con una masa de 13,5 kg de pellets por corrida y un  $\text{CH}_{\text{bh}}$  máximo del 11,50 % (Figura 2.13).



**Figura 2.13.** Pellets fabricados a partir de aserrín de ciprés (a) y eucalipto (b).

### 2.5.1 Efecto del agente gasificante

Los flujos másicos de aire requeridos en el proceso de gasificación se determinaron empleando la ecuación (10), que corresponde a la ecuación de combustión de la biomasa. Con base en las relaciones estequiométricas se puede determinar la masa teórica de aire requerida para que se dé una combustión completa de la biomasa y utilizando la ecuación (11) se calculó la ER [6] el cual permite determinar la masa de agente gasificante necesaria para que se dé la gasificación. Los valores obtenidos de los caudales de aire y su respectiva ER se muestran en el Cuadro 2.1.



$$ER = \frac{M_g(\text{Aire para gasificar})}{M_c(\text{aire estequiométrico})}, \quad ER < 1,0(\text{gasificación}) \quad (11)$$

donde:

*ER*: relación equivalente (adimensional)

*M<sub>g</sub>*: masa de aire empleada en el proceso de gasificación (kg)

*M<sub>c</sub>*: masa de aire necesaria para que se produzca la combustión completa de la biomasa (kg)

**Cuadro 2.1.** Valores de caudales de aire y la ER para el proceso de gasificación.

| <b>Biomasa</b>   | <b>Caudal del agente<br/>gasificante (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)</b> | <b>ER</b> |
|------------------|---|-----------|
|                  | 3,40 (120 scfh)   | 0,20      |
| Eucalipto/ciprés | 3,96 (140 scfh)   | 0,27      |
|                  | 4,80 (170 scfh)   | 0,30      |

*Nota:* ER: relación equivalente entre aire requerido para que se dé la gasificación y el aire requerido estequiométricamente para producir una combustión completa, scfh: pies cúbicos por hora.

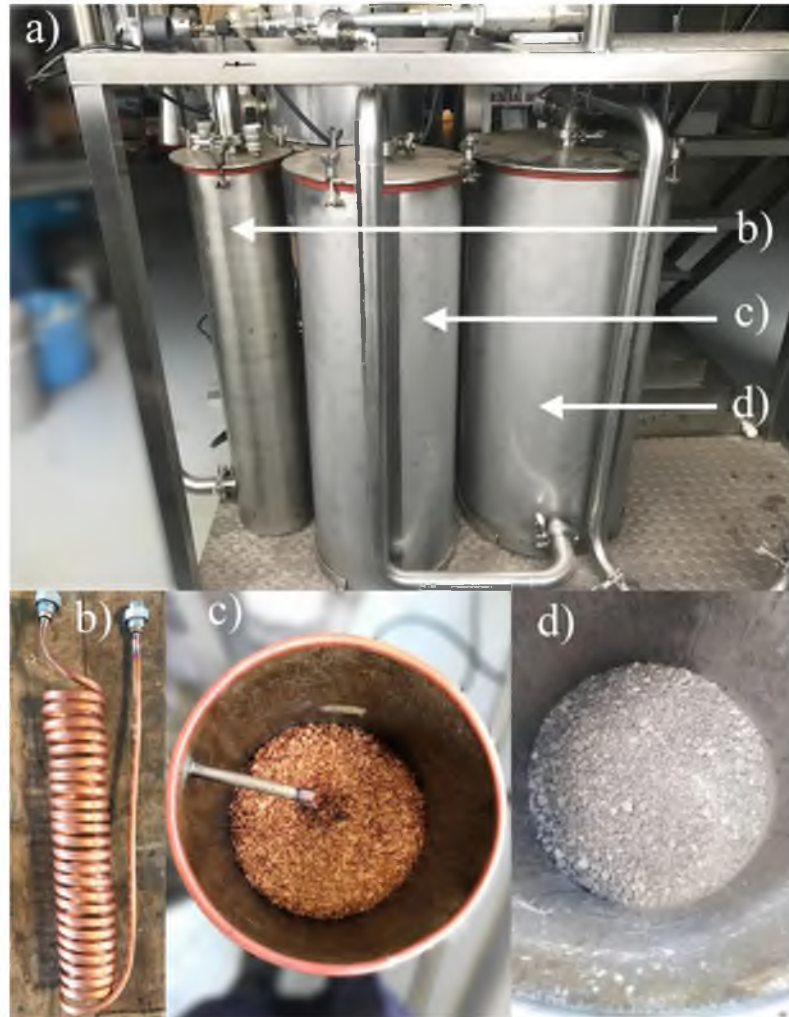
Para establecer la relación equivalente (ER) de esta investigación se utiliza el estudio realizado por [6]; donde se indica, que al emplearse una ER baja ( $< 0,20$ ) presentan varios problemas como una alta producción de residuos carbonoso, procesos de gasificación incompletos y un poder calorífico inferior bajo. Para el caso de relaciones estequiométrica con un valor alto ( $> 0,40$ ) da como resultado la alta formación de los productos de la combustión completa como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , en lugar de favorecer la producción de  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ , lo que implica una disminución del poder calorífico del gas de síntesis. Además, en los sistemas de gasificación normalmente mantienen un rango de ER desde 0,20 hasta 0,30, como en la investigación realizada por [68], donde estudiaron seis relaciones equivalentes: 0,20, 0,22, 0,24, 0,26, 0,28 y 0,30, y, reportaron el poder calorífico inferior del gas de síntesis: 7,15, 7,01, 6,77, 6,47, 6,42 y 5,95  $\text{MJ m}^{-3}$  respectivamente.

Por su parte, [38] utilizó un rango de ER del 0,37 al 0,42, el cual no cumple con las recomendaciones anteriormente descritas. Sin embargo, se va comparar la eficiencia de la gasificación obtenida experimentalmente con los resultados reportados por [38], en vista de que se presentaron similitudes en ambos estudios, por ejemplo, utilizaron aire como agente gasificante y pellets de eucalipto como biocombustible.

### **2.5.2 Limpieza del gas de síntesis**

Una vez producido el gas de síntesis se procedió a su limpieza. Primero se eliminaron las partículas más grandes como ceniza y un residuo carbonoso por medio de un ciclón. Luego, se dio una etapa de secado del gas de síntesis, donde el gas atravesó el intercambiador de calor a fin de condensar el vapor de agua y los vapores de alquitrán presentes en el gas de síntesis, el condensado se almacenó en un reservorio con capacidad de  $7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Después, el gas de síntesis se forzó atravesar por dos filtros secos con el fin de eliminar las partículas de alquitrán presentes en este gas. El primer filtro se rellenó con burucha de madera con un volumen de  $5,15 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ , el segundo filtro cuenta con dos capas de arena, la capa inferior se rellenó con una grava de granulometría de 2,5 mm con un volumen de

$2,65 \times 10^{-2} \text{m}^3$  y la capa superior contó con un relleno arena de volumen de  $5,09 \times 10^{-3} \text{m}^3$  y una granulometría mayor a 2,0 mm, con el fin de evitar el arrastre de las partículas de piedra hacia el analizador de gases o a la antorcha (ver Figura 2.14).



**Figura 2.14.** a) Batería de filtros del gasificador, b) intercambiador de calor, c) filtro relleno con burucha, d) filtro relleno con arena.

## 2.6 Evaluación del gas de síntesis

Esta prueba consistió en variar dos parámetros, la relación equivalente del agente gasificante y el tipo de biomasa, con el fin de evaluar las condiciones de operación y el rendimiento en el gasificador de flujo concurrente [69].

El primer parámetro estudiado fue el efecto del caudal del agente gasificante. Esta prueba consistió en variar el caudal de aire con el objetivo de establecer tres relaciones de equivalencia para cada tipo de biomasa (0,20, 0,27 y 0,30).

Con base a los resultados de las pruebas preliminares, la primera medición se realizó cuando el reactor alcanzó una temperatura de 630 °C, dado que la producción del gas de síntesis inició cuando se alcanzó esta temperatura. Luego se varió el caudal de agente gasificante y las mediciones se realizaron cada 40 minutos, con el fin de permitir que se estabilizara la temperatura y las reacciones de gasificación que se dan dentro del reactor. Se usó un analizador de gas de síntesis modelo ETG MCA 100 BIO conectado a la salida del sistema de filtros y se registraron los porcentajes de: metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, hidrógeno y el poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis [70], [71]. Las mediciones se realizaron por triplicado con la finalidad de reportar el promedio y la desviación estándar.

Después, se varió el tipo de biomasa con el fin de evaluar su efecto en la composición químicas y el poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis. Una vez obtenidos los datos de la composición química y el poder calorífico inferior se procedió a realizar un análisis estadístico con el objetivo de establecer si presentan diferencias significativas.

**Cuadro 2.2.** Biomosas empleadas en las corridas del proceso gasificación, los flujos de aire y las relaciones equivalentes correspondientes.

| Biomasa   | Caudal del agente gasificante<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | ER   |
|-----------|--|------|
| Eucalipto | 3,40 (120 scfh)  | 0,20 |
|           | 3,96 (140 scfh)  | 0,27 |
|           | 4,80 (170 scfh)  | 0,30 |
| Ciprés    | 3,40 (120 scfh)  | 0,20 |
|           | 3,96 (140 scfh)  | 0,27 |
|           | 4,80 (170 scfh)  | 0,30 |

*Nota:* ER: relación equivalente entre aire requerido para que se dé la gasificación y el aire requerido estequiométricamente para producir una combustión completa.

Además, se estudió el poder calorífico inferior del gas de síntesis, porque es un parámetro importante para la utilización del gas combustible en aplicaciones posteriores. El poder calorífico inferior (LHV) para un gas combustible se puede calcular mediante la siguiente ecuación [72]:

$$LHV (kJ m^{-3}) = (30 [CO] + 25,7 [H_2] + 85,4 [CH_4]) 4,2 \quad (12)$$

## 2.7 Análisis estadístico

Los resultados de las mediciones para las propiedades físicas, propiedades térmicas y el análisis del gas de síntesis se analizaron mediante estadística descriptiva, se aplicó la prueba estadística SNK, conocido como t de Student. Además, un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey, con un nivel de significancia  $p = 0,05$ . Se utilizó el software estadístico Infostat versión 2018e y los resultados del análisis de varianza se presentaron en forma de tablas [69], [73].



### 3 RESULTADOS

---

A continuación, se procede a realizar el análisis de los datos obtenidos a lo largo del proceso de densificación y gasificación de biomasa, mediante el uso de estadística descriptiva y un análisis de varianza empleando la prueba de Tukey con un valor de probabilidad  $p > 0,05$ . Primero, se evaluó las propiedades físicas y térmicas de los pellets fabricados a partir de eucalipto y ciprés, además, se verificó si cumple con la norma alemana DIN 51731 y la norma SS 187120, debido a que son de las normas más estrictas en cuanto la calidad de los pellets. Posteriormente se gasificó el biocombustible, con el fin de evaluar el efecto del flujo del agente gasificante y el tipo de biomasa en el gas de síntesis.

#### 3.1 Propiedades físicas de los pellets

La primera prueba realizada fue la del contenido de humedad en base húmeda ( $CH_{bh}$ ) para la materia prima de eucalipto y ciprés, las cuales presentaron un valor inicial de CH de 28,0 % y 18,00 % respectivamente. Según [74], recomienda un rango de CH que va desde el 5,0 % hasta el 15,0 % para obtener pellets de alta calidad, al comparar esta recomendación con los valores de CH empleados en este estudio se nota que son mayores, esto debido a una limitante del equipo empleado, dado que si se utiliza una biomasa con un  $CH_{bh}$  menor de 18,00 % la máquina tendía a obstruirse. Además, cabe destacar que los mejores resultados del proceso de densificación para el eucalipto y el ciprés se presentaron con un CH de 28,0 % y 18,0 % respectivamente.

Luego del proceso de peletizado se disminuyó el  $CH_{bh}$  del biocombustible, a consecuencia de que se dio un proceso de compresión y un aumento de la temperatura del aserrín lo que causa una pérdida del agua libre de la biomasa. Los pellets eucalipto y ciprés presentaron un  $CH_{bh}$  del 15,7 % y el 14,3 % respectivamente. Donde se observó que el contenido de humedad en ambos casos es superior al valor de  $CH_{bh}$  (12,0 %) permisible en la norma DIN 51731. Sin embargo, los pellets de ciprés y eucalipto son aptos para emplearlos en la

procesos de gasificación, aunque no cumplan los parámetros establecidos por la norma, teniendo en cuenta que para producir de un gas de síntesis con un poder calorífico alto, la mayoría de los sistemas de gasificación utilizan la biomasa con rango de  $CH_{bh}$  del 10 % al 20 % [75].

### 3.2 Densidad aparente

Los datos obtenidos de densidad aparente se muestran en el Cuadro 3.1, donde se reportó su promedio y la desviación estándar para los dos tratamientos.

**Cuadro 3.1.** Valores de las densidades aparentes para los pellets de ciprés y eucalipto.

| Biomasa               | Pellets densidad aparente      |                                |                          |        |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------|
|                       | $\rho_a$ (kg m <sup>-3</sup> ) | Promedio (kg m <sup>-3</sup> ) | SD (kg m <sup>-3</sup> ) | p      |
| Eucalipto             | 408,4                          |                                |                          |        |
| ( $CH_{bh}$ = 15,7 %) | 413,1                          | 409,3 <sup>B</sup>             | ± 3,4                    |        |
| (Tamaño ≤ 2 mm)       | 406,5                          |                                |                          |        |
|                       |                                |                                |                          | 0,0008 |
| Ciprés                | 384,7                          |                                |                          |        |
| ( $CH_{bh}$ = 14,3 %) | 376,6                          | 379,7 <sup>A</sup>             | ± 4,4                    |        |
| (Tamaño ≤ 2 mm)       | 377,7                          |                                |                          |        |

*Nota:*  $\rho_a$ : densidad aparente, SD: desviación estándar,  $CH_{bh}$ : contenido de humedad en base húmeda, promedios con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ), n: número de muestras.

Según los resultados obtenidos, los pellets de eucalipto presentaron el mayor valor de densidad aparente la cual fue de 409,3 kg m<sup>-3</sup>, mientras que los pellets de ciprés presentaron una densidad aparente de 379,7 kg m<sup>-3</sup>. Esta diferencia entre los dos valores de las densidades aparentes se puede explicar con base en el estudio realizado por [13], donde reporta que se empleó rastrojo de maíz con dos contenidos de humedad iniciales de 15 % y del 25 %, con las cuales se fabricaron pellets que presentaron una densidad aparente de 553,1 kg m<sup>-3</sup> y 636,2 kg m<sup>-3</sup> respetivamente.

Cabe destacar que como se denota en el estudio [16], uno de los principales factores que afecta la densidad aparente es la composición de celulosa, hemi-celulosa y lignina que

presenta cada uno de los materiales. Además, en esta investigación se utilizó una peletizadora semiindustrial para la fabricación de pellets de ambos materiales, en donde solo era posible variar la presión de los rodillos, la cual, se mantuvo constante en ambos casos, por lo que no es un factor que haya afectado las densidades aparentes obtenidas, es por esto, que se atribuye esta variación de densidad aparente al tipo de biomasa empleada y el contenido de humedad inicial que tenía el aserrín de ciprés y eucalipto. En los resultados aquí expuestos se observa que la densidad aparente tiende a aumentar cuando se utiliza una materia prima con mayor CH (28 %), de la misma forma [13] observó un resultado similar en su informe. Sin embargo, los valores de densidad aparente obtenidos en este estudio no cumplen con la norma SS 187120, debido a que no presentaron un valor de  $500 \text{ kg m}^{-3}$  o mayor, con respecto al valor reportado por la norma sueca, para los valores obtenidos de densidad aparente tanto para el caso del ciprés como del eucalipto, el espacio de almacenamiento requerido para estos productos es mayor, esto debido a que las densidades aparentes son menores a lo recomendado por la norma.

El análisis estadístico (t Student) para la densidad aparente de los pellets, mostrado en Cuadro 3.1, demostró que la densidad aparente de los pellets de eucalipto presentó diferencias significativas en comparación con los pellets de ciprés, dado que el valor de obtenido en esta prueba fue de  $p < 0,0008$ .

### **3.3 Densidad unitaria**

La densidad unitaria fue la siguiente propiedad estudiada, según los datos obtenidos (ver Cuadro 3.2) se observó que los pellets de eucalipto presentaron el mejor resultado con un valor de  $1,01 \text{ kg dm}^{-3}$ , mientras que la densidad unitaria de los pellets de ciprés fue del  $0,81 \text{ kg dm}^{-3}$ . De acuerdo con los resultados de densificación, se notó que al utilizar el aserrín de eucalipto con un  $\text{CH}_{\text{bh}}$  de 28,0 % los pellets se fracturaban menos en comparación con la biomasa de ciprés ( $\text{CH}_{\text{bh}}$  de 18,0 %), lo que indica que se dio una mejor densificación cuando se empleó el eucalipto. Según [13], informa que al utilizar una materia prima con un  $\text{CH}_{\text{bh}}$  del 15 % y el 25 % la producción de pellets fue del 51,49 % a

91,75 % respectivamente, lo que muestra que al emplear biomásas con un mayor contenido de humedad se puede obtener mejores resultados en el proceso de peletizado. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que se puede presentar diferencias a la hora de peletizar un mismo material, porque este proceso puede variar según la composición de la materia prima y las condiciones de operación de la pelletizadora [13].

**Cuadro 3.2.** Valores obtenidos de la densidad unitaria de los pellets eucalipto y ciprés.

| Biomasa                     | Densidad unitaria               |                                 |                           |        |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------|
|                             | $\rho_r$ (kg dm <sup>-3</sup> ) | Promedio (kg dm <sup>-3</sup> ) | SD (kg dm <sup>-3</sup> ) | p      |
| Eucalipto                   | 1,00                            |                                 |                           |        |
| (CH <sub>bh</sub> = 15,7 %) | 1,03                            | 1,01 <sup>B</sup>               | ± 0,029                   |        |
| (Tamaño ≤ 2 mm)             | 1,00                            |                                 |                           | 0,0006 |
| Ciprés                      | 0,84                            |                                 |                           |        |
| (CH <sub>bh</sub> = 14,3 %) | 0,78                            | 0,81 <sup>A</sup>               | ± 0,018                   |        |
| (Tamaño ≤ 2 mm)             | 0,80                            |                                 |                           |        |

*Nota:*  $\rho_r$ : densidad real, SD: desviación estándar, promedios con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

Los resultados de la densidad real se compararon con los valores recomendados por norma DIN 51731, en la cual indica que se requiere un valor de densidad unitaria entre el 1,00 kg dm<sup>-3</sup> y 1,40 kg dm<sup>-3</sup>. Con base en los resultados obtenidos se determinó que solo los pellets de eucalipto (1,01 kg dm<sup>-3</sup>) presentaron un valor de densidad unitaria permisible según la indicado por la norma alemana.

El análisis estadístico (t Student) de la densidad unitaria, mostrado en el Cuadro 3.2, demostró que existe suficiente información estadística para decir que las variables son significativamente diferentes para los pellets de eucalipto y ciprés ( $p = 0,0006$ ).

### 3.4 Porosidad

Posteriormente, se realizó el análisis de los valores obtenidos de la porosidad para los pellets de eucalipto y ciprés los cuales fueron 59,5 % y 53,1 % para una densidad aparente de 409,3 kg m<sup>-3</sup> y 379,7 kg m<sup>-3</sup> respectivamente. Por su parte [76], reporta valores de

porosidad de 41,0 % y 35,5 % para una densidad aparente de 670,0 kg m<sup>-3</sup> y 731,0 kg m<sup>-3</sup> para pellets de madera suave, los cuales son inferiores a los obtenidos en este estudio, además, en dicho estudio se emplearon pellets de aproximadamente 6,5 ± 0,065 mm de diámetro, mientras que los de la presente investigación median 6,2 ± 0,045 mm para el caso de los pellets de eucalipto y 6,4 ± 0,026 mm para los de ciprés. La diferencia entre los valores de porosidad obtenidos de forma experimental y los reportados por la literatura se da por la baja densidad aparente de los pellets eucalipto y ciprés, en vista de que con forme el material sea más denso va a presentar menor espacio entre los pellets y por lo tanto, un menor valor de porosidad [76].

Además, se realizó un análisis estadístico de t Student obteniendo como resultado que los pellets de ciprés y eucalipto no presentan diferencias estadísticamente significativas (p = 0,0007), como se muestra en el Cuadro 3.3. Lo que da como resultado que el tipo de biomasa no tuvo un efecto significativo en la porosidad reportada en este estudio.

**Cuadro 3.3.** Valores de porosidad para los pellets de eucalipto y ciprés.

| Biomasa   | Porosidad         |   |        |
|-----------|-------------------|---|--------|
|           | Promedio (%)      | n | p      |
| Eucalipto | 59,5 <sup>B</sup> | 3 | 0,0007 |
| Ciprés    | 53,1 <sup>A</sup> | 3 |        |

*Nota:* Promedios con una letra común no son significativamente diferentes (p>0.05), n: números de muestras.

### 3.5 Friabilidad

Los valores de friabilidad se reportan en un rango entre cero y uno, donde el valor de uno indica que no se fracturaron los pellets durante el ensayo y si es menor a uno se entiende que los pellets presentaron fracturas en dos o más partes. La prueba de friabilidad es importante a fin de determinar la resistencia al daño mecánico que se le puede ocasionar a

los pellets durante el transporte o el almacenamiento, debido a que indica la resistencia al golpeo que presenta el biocombustible [77].

Los valores obtenidos de friabilidad se muestran en el Cuadro 3.4, en este se observa que los pellets de ciprés y de eucalipto no presentaron diferencias significativas entre ellos, esto utilizando un análisis estadístico t Studen ( $p = 0,2814$ ). Además, se observa que los pellets de eucalipto presentaron la mayor resistencia al golpeo (0,94) y se reportó un valor de 0,93 para los pellets ciprés. Además, estos valores indican que en promedio se quiebran alrededor de 6 pellets de cada 100 para el caso del eucalipto y 7 pellets de cada 100 para los pellets de ciprés. Por lo tanto, las friabilidades de los pellets para ambas biomásas son consideradas como buena, debido a que se considera como aceptable una resistencia al golpeo con un valor de 0,93 o superior [61].

**Cuadro 3.4.** Datos de friabilidad de los pellets.

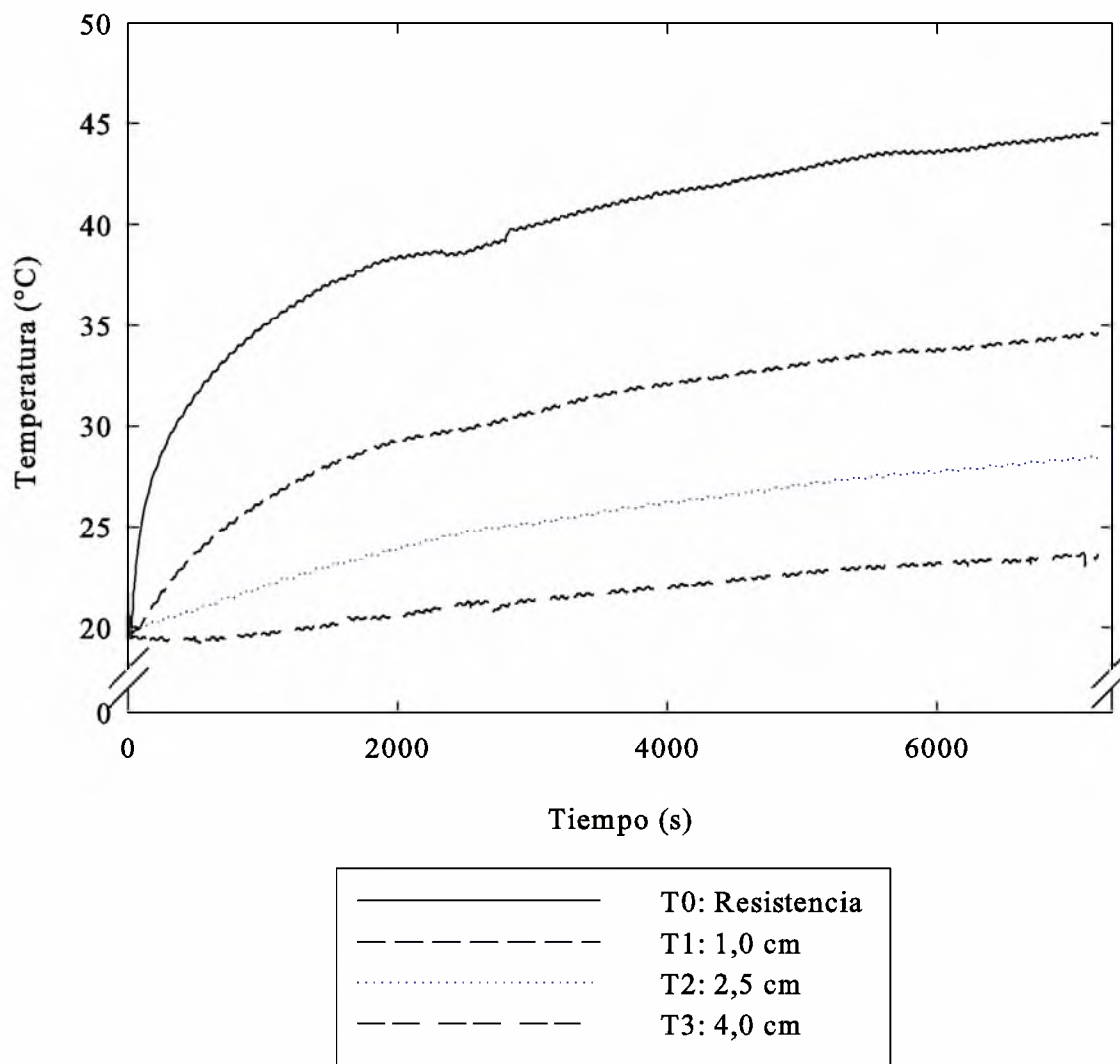
| Biomasa   | Friabilidad             |                   |        |
|-----------|-------------------------|-------------------|--------|
|           | Promedio (adimensional) | SD (adimensional) | p      |
| Eucalipto | 0,94 <sup>A</sup>       | ± 0,016           | 0,2814 |
| Ciprés    | 0,93 <sup>A</sup>       | ± 0,013           |        |

*Nota:* SD: desviación estándar, promedios con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

### 3.6 Propiedades térmicas de los pellets

A continuación, la Figura 3.1 ilustra el perfil de temperaturas, donde muestra la variación de la temperatura con respecto al tiempo durante el proceso de transferencia de calor obtenido a partir de 2 horas de calentamiento. Las temperaturas rotuladas como T0 que midió la temperatura en centro del cilindro (resistencia), las temperaturas T1 (1 cm), T2 (2,5 cm) y T3 (4,0 cm) midieron el perfil de temperatura dentro del cilindro. Inicialmente, todo el volumen de pellets estaba a una temperatura de 19,72 °C. La temperatura en el centro del cilindro (T0) donde se encontraba la fuente de calor aumentó en el instante que se accionó el flujo de corriente eléctrica y la temperatura más alta

registrada en esta prueba fue de 44,53 °C después de 2 horas de calentamiento. Mientras que las temperaturas T1, T2 y T3 no presentaron cambios significativos durante un periodo de 300 s y luego de las 2 horas alcanzaron una temperatura máxima de 34,59 °C, 28,50 °C y 23,59 °C respectivamente.



**Figura 3.1.** Perfiles de temperaturas obtenidos empleando un cilindro teóricamente infinito con el fin de determinar las propiedades térmicas de los pellets de ciprés. (Nota: las distancias que se indican en la figura se midieron respecto el centro del cilindro (resistencia) de forma radial).

### 3.6.1 Conductividad térmica de los pellets

Los resultados obtenidos de la conductividad ( $k$ ), difusividad ( $\alpha$ ) y calor específico ( $c_p$ ) para los pellets de eucalipto y ciprés, son mostrados en el Cuadro 3.5. La conductividad térmica los pellets de eucalipto y ciprés presentaron valores entre  $0,384 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y  $0,335 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para una densidad de  $409,3 \text{ kg m}^{-3}$  y  $379,7 \text{ kg m}^{-3}$  respetivamente. Donde se nota que la conductividad térmica presentó un incremento con la densidad aparente de las muestras estudiadas.

Esta diferencia entre las conductividades térmicas se puede explicar con base en el estudio realizado por [78], que reporta valores de conductividad desde  $0,105 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  hasta  $0,160 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para una densidad aparente de  $502 \text{ kg m}^{-3}$  y  $693 \text{ kg m}^{-3}$  respectivamente. Según [78] la conductividad térmica aumenta de forma lineal conforme incrementa la densidad aparente de los pellets.

Como se observa, los valores obtenidos en este estudio son superiores en comparación con los reportados por la literatura empleando pellets de madera suave. No obstante, esta diferencia entre los resultados se puede atribuir al hecho de que la conductividad térmica de un lote de pellets es en realidad una combinación efectiva de la conductividad que se da dentro de cada uno de los pellets, la transferencia de calor por convección en la fase gaseosa y el intercambio de la radiación entre los pellets [78]. Además, según [26] la conductividad térmica depende de los espacios porosos en el lecho de pellets y la distribución de las partículas sólidas. Por lo tanto, hay que tomar en cuenta que los valores de conductividad térmica efectiva reportados en la literatura, pueden ser considerados como base de las tendencias que puedan presentar los valores obtenidos en este estudio. Sin embargo, los resultados obtenidos de conductividad térmica presentan la misma tendencia que la reportada por la literatura, donde se indica que la conductividad térmica es directamente proporcional a la densidad aparente de los pellets.

Además, otro parámetro que puede afectar la conductividad térmica es el contenido de humedad del material [62]. Según los resultados reportados por [26], indicó que la



conductividad térmica aumentó de  $0,146 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0,192 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , cuando el contenido de humedad en base húmeda de los pellets de madera varió de 1,7 % a 9,0 %. En los resultados de esta investigación se observó que la conductividad térmica de los pellets de eucalipto y ciprés presentaron valores entre  $0,384 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y  $0,335 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , para un contenido de humedad del 15,7 % y 14,3 % respectivamente, por lo que se le puede atribuir el incremento de la conductividad térmica a la variación del contenido de humedad que presentaron los pellets y la composición química del material.

### **3.6.2 Difusividad térmica de los pellets**

Luego se calculó la difusividad térmica mediante la ecuación (7), donde se observó un aumento de la difusividad térmica de los pellets de ciprés y eucalipto de  $2,44 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  a  $2,79 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  para una densidad aparente de  $379,7 \text{ kg m}^{-3}$  y  $409,3 \text{ kg m}^{-3}$  respectivamente, el cual corresponde al mismo comportamiento de la conductividad térmica. Este resultado indica que se favorece la velocidad de la transferencia de calor conforme en los pellets sean más densos.

### **3.6.3 Calor específico de los pellets**

El calor específico se calculó empleando la ecuación 8, con base en los datos experimentales de densidad aparente, difusividad y conductividad térmica. Los valores calor específico variaron de  $3,37 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $3,76 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para las densidades aparentes de  $379,7 \text{ kg m}^{-3}$  (ciprés) y  $409,3 \text{ kg m}^{-3}$  (eucalipto) respectivamente. El comportamiento del calor específico es inversamente proporcional a la densidad aparente de los pellets, debido a que el calor específico de los materiales sólidos y granulados tienden a disminuir conforme la difusividad térmica aumenta. Esta tendencia también fue reportada por [78], donde indica que la disminución del calor específico se da debido a que conforme disminuye la densidad aparente aumenta el área superficial, causando que haya mayor evaporación del agua, esto concuerda con el comportamiento obtenido en este estudio.

Según [26], reportó valores de calor específico desde  $1.073 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $1.253 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para un rango de contenido de humedad en base húmeda de 1,4 % al 8,8 % respectivamente, donde [26] indicó que el calor específico de los pellets de madera presenta un incremento en conforme el contenido de humedad. Como se observa en el Cuadro 3.5, los valores de conductividad térmica varían debido al cambio del contenido de humedad para los pellets de ciprés y eucalipto que prestaron un valor de 14,3 % a 15,7 % respectivamente.

**Cuadro 3.5.** Propiedades térmicas de los pellets de eucalipto y ciprés.

| Biomasa                                 | k [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] |                        | $\alpha$ [ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ] ( $\times 10^{-7}$ ) |                                    | $c_p$ [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] |                      |
|---|--|------------------------|---|------------------------------------|--|----------------------|
|   | k                                      | Promedio               | $\alpha$  | Promedio                           | $c_p$  | Promedio             |
| Eucalipto<br>$\text{CH}_{bh} = 15,7 \%$ | 0,387                                  |                        | 2,83  |                                    | 3,33   |                      |
|   | 0,381                                  | 0,384 ( $\pm 0,0029$ ) | 2,76  | 2,79 ( $\pm 4,16 \times 10^{-9}$ ) | 3,38   | 3,37 ( $\pm 0,034$ ) |
|   | 0,385                                  |                        | 2,77  |                                    | 3,40   |                      |
| Ciprés<br>$\text{CH}_{bh} = 14,3 \%$    | 0,332                                  |                        | 2,42  |                                    | 3,77   |                      |
|   | 0,343                                  | 0,335 ( $\pm 0,0075$ ) | 2,47  | 2,44 ( $\pm 2,73 \times 10^{-9}$ ) | 3,81   | 3,76 ( $\pm 0,059$ ) |
|   | 0,329                                  |                        | 2,45  |                                    | 3,70   |                      |

*Nota:* k: conductividad,  $\alpha$ : difusividad y  $C_p$ : calor específico.

### 3.6.4 Poder calorífico de los pellets

A continuación, se muestra el Cuadro 3.6, los resultados del poder calorífico superior para distintos contenidos de humedad presentes en los pellets.

**Cuadro 3.6.** Poder calorífico determinado para los pellets de eucalipto y ciprés.

| Pellets | Biomasa   | $\text{CH}_{bh}$ (%) | Poder calorífico                 |                                  |
|---------|-----------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|         |           |                      | Superior ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) | Inferior ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) |
|         | Eucalipto | 11,5                 | 19,14 $\pm$ 0,24                 | 16,66 $\pm$ 0,22                 |
|         | Ciprés    | 11,2                 | 19,97 $\pm$ 0,18                 | 17,47 $\pm$ 0,16                 |

*Nota:*  $\text{CH}_{bh}$ : Contenido de humedad en base húmeda, se dió una disminución del contenido de humedad después de 22 días de almacenamiento.

Finalmente, se realizó el cálculo del poder calorífico inferior de los pellets de ciprés y eucalipto mediante la ecuación (9), en el Cuadro 3.6 se reportan los valores del poder calorífico inferior, poder calorífico superior y sus respectivos contenidos de humedad. Los pellets de ciprés presentaron el mayor valor de poder calorífico inferior con un valor promedio de  $17,47 \text{ MJ kg}^{-1}$ , mientras que se obtuvo un valor de  $16,66 \text{ MJ kg}^{-1}$  para el tratamiento del eucalipto.

Al comparar los datos experimentales con los parámetros establecidos por las normas ( $\geq 16,90 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) se puede observar que los dos tratamientos estudiados presentan un valor superior, por lo cual se puede afirmar que cumple con un poder energético adecuado según las normas SS 187120 y DIN 51731. Como se muestra en el Anexo 1, los valores de poder calorífico superior e inferior presentan una variabilidad en sus valores conforme cambia la especie de biomasa estudiada, por lo tanto, la variabilidad en los poderes caloríficos de los pellets reportados en el presente estudio se puede atribuir a la utilización de dos diferentes especies de biomásas (eucalipto y ciprés). También, cabe destacar que al realizar un análisis estadístico de t Student, donde se obtuvo como resultado que presentaban diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de biomásas ( $p = 0,0008$ ) estudiadas, indicando que el efecto del tipo de biomasa en este estudio se observa un efecto significativo en el poder calorífico de la muestra.

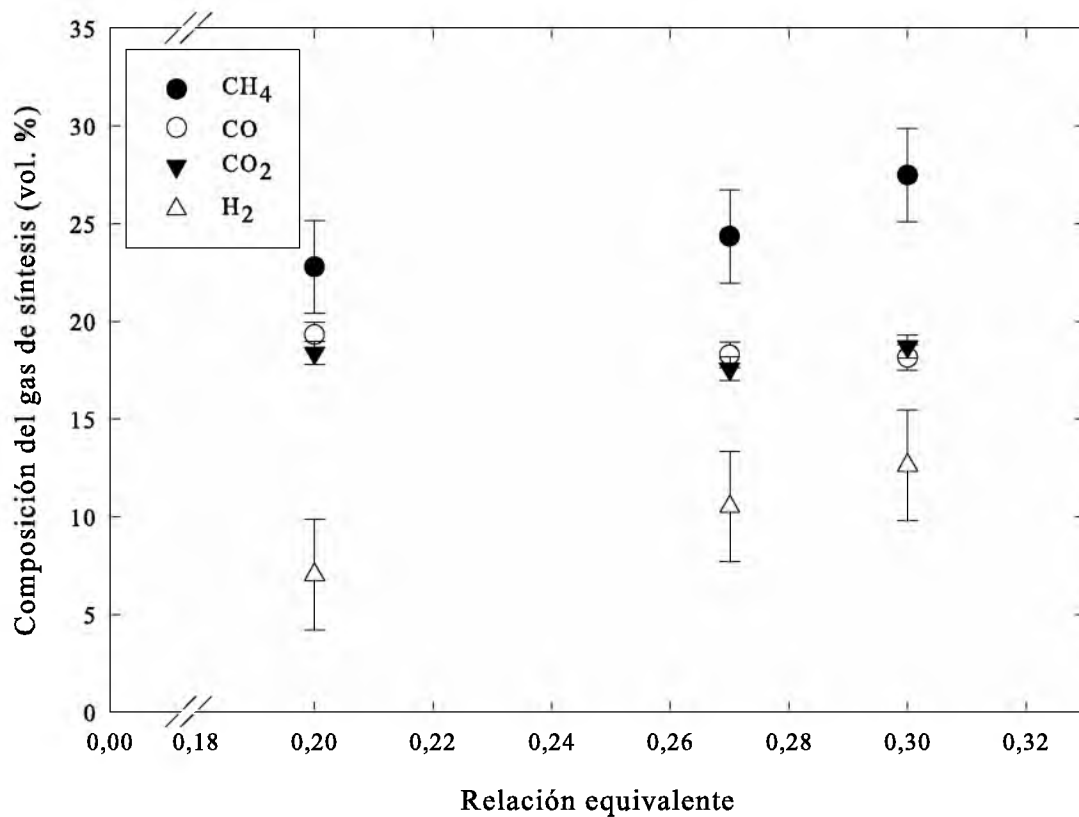
### **3.7 Efecto del flujo de aire en la composición química del gas síntesis**

En la etapa de gasificación se realizaron 6 pruebas en total, en cada ensayo fue empleada una masa de 13,50 kg de pellets de eucalipto o de ciprés, los cuales presentaron un  $\text{CH}_{\text{bh}}$  del 11,50 % y del 11,17 % respectivamente. La disminución del contenido de humedad en la biomasa fue causada por el almacenamiento de los pellets en el cuarto de muestras, lo que es un efecto favorable debido a que no se empleó energía para el secado de los pellets y esto mejora la calidad del biocombustible. Además, las pruebas se realizaron a una humedad relativa entre el 70 % y 80 %, se estudiaron tres relaciones equivalentes

(ver Cuadro 2.2), la influencia del tipo de biomasa en la composición del gas de síntesis y se registraron las temperaturas del reactor con la ayuda de cuatro termocuplas tipo k.

En la segunda etapa de esta investigación se estudió el gas de síntesis producido con eucalipto, en la Figura 3.2 se muestra la variación de los porcentajes de la composición química del gas de síntesis y su respectiva relación equivalente. La composición química del gas de síntesis para una relación equivalente de 0,20 es de: 22,77 % de CH<sub>4</sub>, 19,32 % de CO, 18,38 % de CO<sub>2</sub> y 7,01 % de H<sub>2</sub> (ver el Anexo 2). Comparando los valores obtenidos con respecto a la composición del gas de síntesis típica de un gasificador de flujo concurrente, se determinó que cumplen con los rangos de la concentración de las fracciones volumétricas del CO y el H<sub>2</sub> (18 % a 24 % del volumen total del gas de síntesis) reportadas por [57], [79]. Además, según lo reportado por [80], la elevada producción de CO e H<sub>2</sub> se debe principalmente a las elevadas temperaturas que alcanza la biomasa en los gasificadores de flujo concurrente lo que va a favorecer la conversión de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en CO e H<sub>2</sub>.

En el Cuadro 3.7 se muestra el efecto de la relación equivalente sobre la composición del gas de síntesis y el LHV usando aire como agente gasificante. A medida que la ER aumentó de 0,20 a 0,30 la concentración del CH<sub>4</sub> y el H<sub>2</sub> presentó un incremento del 22,77 % al 27,46 % y del 7,01 % al 12,61 % respectivamente, mientras que el valor obtenido del CO disminuyó de 19,30 % a 18,13 %, asimismo el CO<sub>2</sub> presentó el menor cambio porcentual en comparación con las otras fracciones que componen el gas de síntesis. Como se ilustra en la Figura 3.2, la razón principal de esos cambios en la concentración de los gases fue por el aumento del flujo de aire 3,40 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a 4,80 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> que favoreció las reacciones endotérmicas de la gasificación [68]. Esto indica que al aumentar el flujo de aire promoverá la producción de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, lo cual es beneficioso para usos como calderas o turbinas, dado que va a incrementar el LHV del gas.



**Figura 3.2.** Efecto de la relación equivalente en la composición química del gas de síntesis producido con eucalipto.

El aumento de la relación equivalente implicó un incremento en la temperatura dentro del reactor de gasificación lo que produce cambios en las reacciones de gasificación y los cambios físicos de los pellets [81]. Con base en los datos obtenidos, al incrementar el flujo de aire  $3,40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  a  $4,80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  la temperatura aumentó de  $655,98 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $750,12 \text{ }^\circ\text{C}$ , como se muestra en la Figura 3.2 este cambio en las temperaturas favoreció a la formación de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ .

Trabajos como el desarrollado por [81], reportan que el gas síntesis estuvo compuesto por 8,44 % de H<sub>2</sub>, 8,09 % CO, 1,12 % de CH<sub>4</sub> y 8,00 % de CO<sub>2</sub> para una relación equivalente del 0,26 y al incrementar la relación equivalente a 0,29 se dio un incremento en las concentraciones del gas de síntesis el cual se compuso por 10,70 % de H<sub>2</sub>, 9,24 % CO, 1,18 % de CH<sub>4</sub> y 10,53 % de CO<sub>2</sub>. De lo anterior se entiende que los valores obtenidos en este estudio también mantienen la tendencia a incrementar la concentración de las fracciones de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, el cual es un efecto deseado a fin de mejorar el poder energético del gas (ver Figura 3.2). Esto se puede explicar con base en las diversas reacciones que se llevaron a cabo, por ejemplo, hidrogasificación (o reacción del metano R6), la reacción del cambio gas-agua (R10), recombinación del metano (R11) y la reacción de Boudouard (R4). Las reacciones R10 y R11 son endotérmica, por lo tanto, van a depender de la temperatura de gasificación.

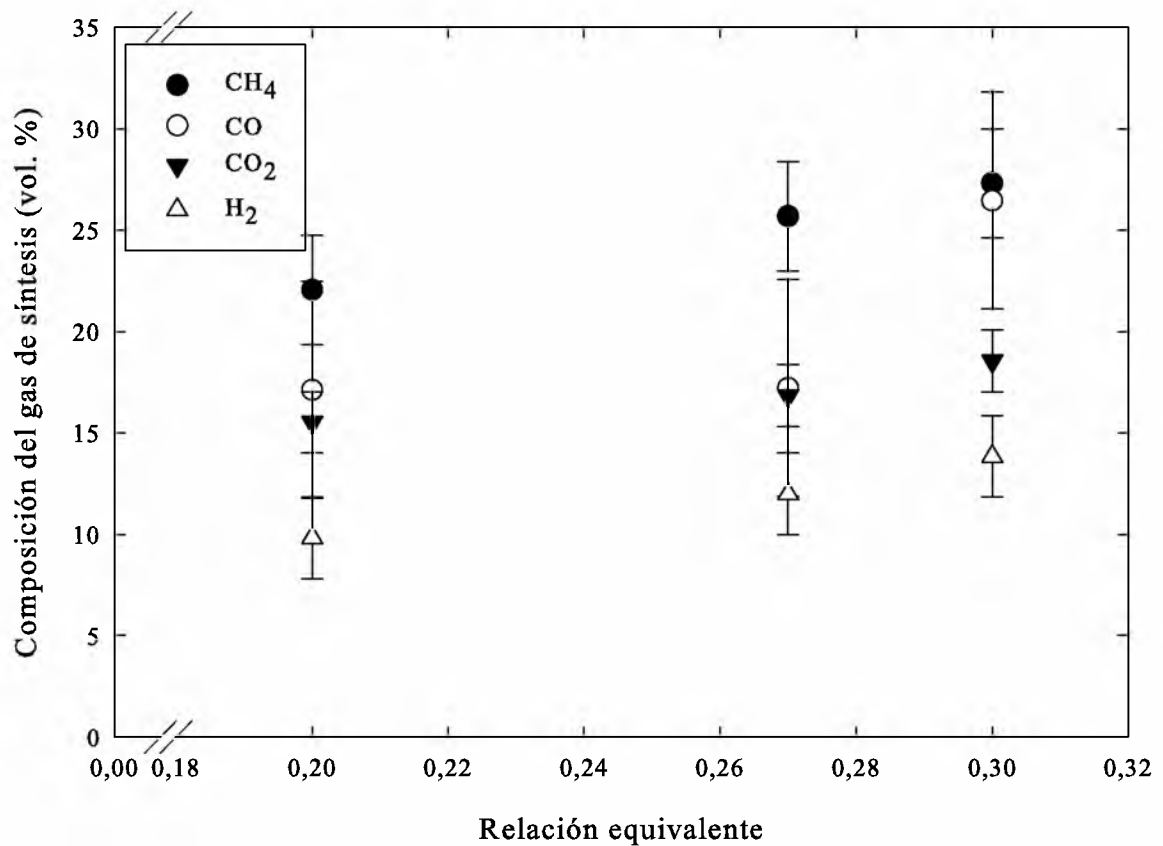
Los resultados del análisis estadístico, mostrado en el Cuadro 3.7, muestra que el análisis de varianza entre las concentraciones del CH<sub>4</sub> presentaron diferencias estadísticamente significativas con forme se aumentó la relación equivalente ( $p = 0,0001$ ). Mientras que la fracción volumétrica del CO ( $p = 0,2311$ ) y el CO<sub>2</sub> ( $p = 0,2986$ ) no presentó diferencias significativas cuando se varió la ER. Por su parte, la fracción del H<sub>2</sub> presentó diferencias significativas ( $p = 0,0037$ ) en los tratamientos con una relación equivalente de 0,20 y 0,30. De lo anterior se entiende que el aumento de la ER va a ayudar a incrementar la producción de H<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>.

**Cuadro 3.7.** Análisis estadístico realizado a la composición química y al poder calorífico inferior del gas de síntesis producido con pellets de eucalipto.

| ER              | n | CH <sub>4</sub> (vol. %) | CO (vol. %)        | CO <sub>2</sub> (vol. %) | H <sub>2</sub> (vol. %) | LHV (MJ Nm <sup>-3</sup> ) |
|-----------------|---|--------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                 |   | Promedio                 | Promedio           | Promedio                 | Promedio                | Promedio                   |
| ER <sub>1</sub> | 3 | 22,78 <sup>A</sup>       | 19,32 <sup>A</sup> | 18,38 <sup>A</sup>       | 7,01 <sup>A</sup>       | 11,16 <sup>A</sup>         |
|                 |   | (± 0,48)                 | (± 1,34)           | (± 0,18)                 | (± 1,72)                | (± 0,22)                   |
| ER <sub>2</sub> | 3 | 24,33 <sup>B</sup>       | 18,28 <sup>A</sup> | 17,55 <sup>A</sup>       | 10,51 <sup>B</sup>      | 12,09 <sup>B</sup>         |
|                 |   | (± 0,16)                 | (± 0,31)           | (± 0,73)                 | (± 0,39)                | (± 0,11)                   |
| ER <sub>3</sub> | 3 | 27,46 <sup>C</sup>       | 18,13 <sup>A</sup> | 18,70 <sup>A</sup>       | 12,61 <sup>B</sup>      | 13,53 <sup>C</sup>         |
|                 |   | (± 0,03)                 | (± 0,34)           | (± 1,24)                 | (± 1,12)                | (± 0,02)                   |

*Nota:* Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ), n: números de muestras, LHV: poder calorífico inferior, ER: relación equivalente, ER<sub>1</sub> = 0,20, ER<sub>2</sub> = 0,27, ER<sub>3</sub> = 0,30.

Luego se estudió la composición del gas de síntesis producido con ciprés. La variación de la composición química del gas de síntesis conforme cambia la relación equivalente (ver Figura 3.3), lo que implicó un aumento en el flujo del aire que también favoreció las reacciones que participan en la gasificación de los pellets de ciprés. La composición química del gas de síntesis producido con pellets de ciprés y una ER de 0,20 se conformó por un 22,04 % de CH<sub>4</sub>, 17,12 % de CO, 15,52 % de CO<sub>2</sub> y 9,81 % de H<sub>2</sub> (ver el Anexo 3). Asimismo, estas concentraciones cumplen con los valores propios del gas de síntesis reportado por la literatura, esto al presentar una concentración en las fracciones CO e H<sub>2</sub> en un rango del 18 % al 24 % del volumen total del gas de síntesis [57], [79].



**Figura 3.3.** Efecto de la relación equivalente en la composición química del gas de síntesis producido con pellets de ciprés.

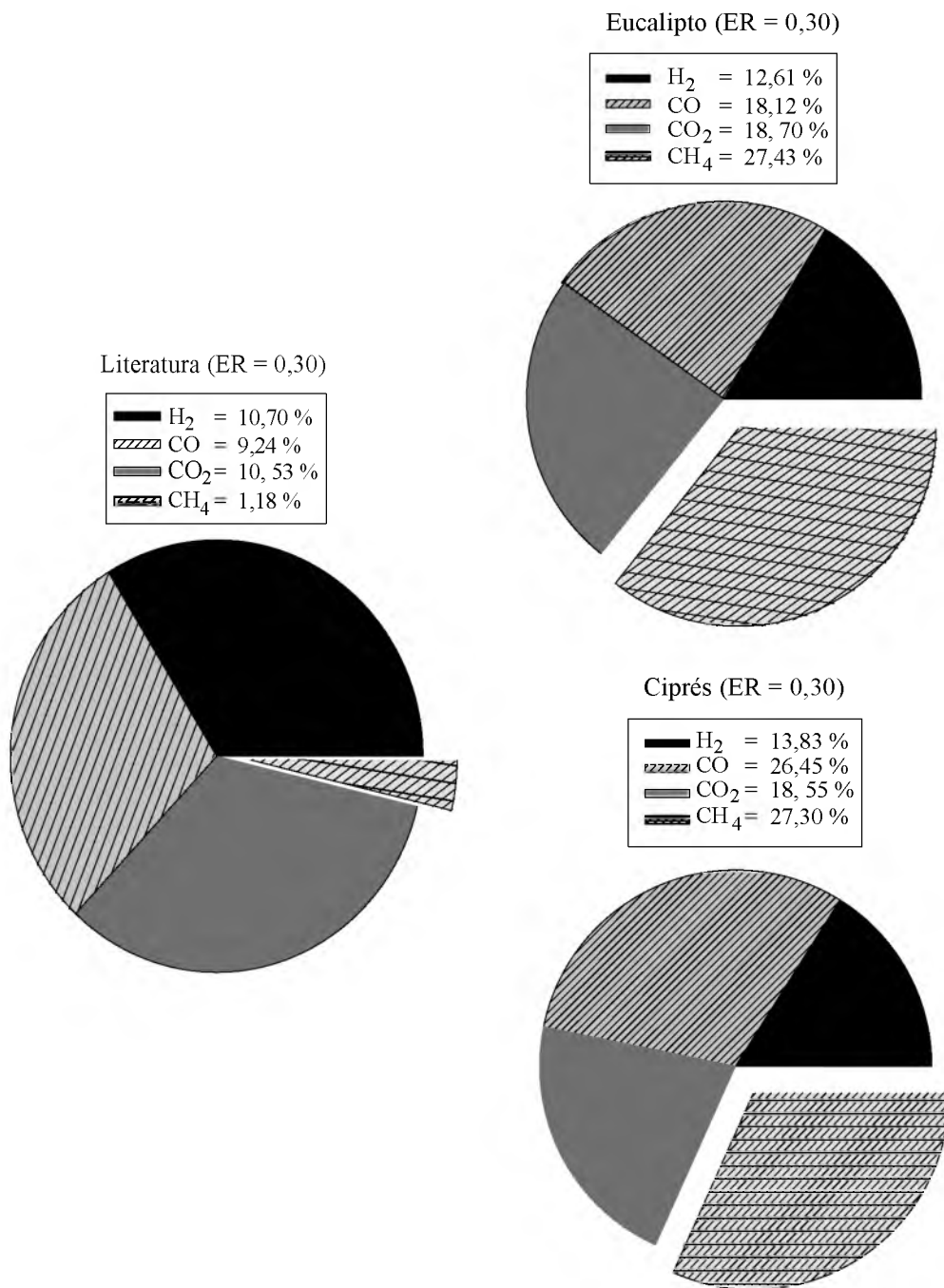
Los resultados obtenidos para el caso del gas de síntesis producido con pellets de ciprés, muestran que la fracción del CO presentó el mayor incremento porcentual, el cual varió de un 17,12 % a 26,45 % cuando se aumentó el caudal de aire  $3,40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  a  $4,80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  respectivamente y la concentración de H<sub>2</sub> (ver Figura 3.3) mantuvo la tendencia a incrementar su concentración el cual varió desde un 9,81 % hasta un 13,83 % para el mismo rango de flujos. Esta tendencia favoreció las reacciones de gasificación de combustión y combustión incompleta, esto provoca un incremento en la relación equivalente y un aumento de la temperatura dentro del reactor [82]. Cuando se varió la relación equivalente del 0,20 al 0,30 el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> aumentaron su concentración de un 15,52 % a un 18,55 % y del 22,04 % al 27,30 % respectivamente. Esta tendencia en



aumentar las concentraciones de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub> son significativas porque se va a intensificar el poder calorífico inferior del gas de síntesis.

Este comportamiento en la composición del gas de síntesis también lo reporta [82], donde indica que la concentración del CO aumenta de 16,60 % a 17,80 % con una variación del flujo de aire de 0,097 kg m<sup>-3</sup> a 0,137 kg m<sup>-3</sup> y la fracción del volumétrica del H<sub>2</sub> también aumentó su concentración desde un 14,00 % hasta un 15,00 % en el mismo rango de flujos. De igual forma en el estudio [82], indica que estos procesos se deben principalmente a las altas temperaturas que pueden alcanzar los gasificadores de flujo concurrente, las cuales mejoran la eficiencia en la generación de H<sub>2</sub> y CO [82].

Igualmente, los resultados obtenidos en este estudio indican que al incrementar la relación equivalente del aire se favoreció el proceso de gasificación, debido a que se incrementó la temperatura del reactor de gasificación desde 658,47 °C hasta 738,95 °C, cuando se varió el caudal de aire 3,40 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a 4,80 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Lo que da como resultado un aumento del O<sub>2</sub> disponible que ayudó a las reacciones endotérmicas de la gasificación [81]. En la Figura 3.3, se muestra el aumento de la producción del CH<sub>4</sub>, el H<sub>2</sub> y en especial el CO que presentó el mayor aumento porcentual.



**Figura 3.4.** Comparación de las fracciones volumétricas de CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> obtenidas experimentalmente con los datos reputados por [82].

Como se observó en los resultados anteriormente descritos, los datos obtenidos en este estudio presentaron valores superiores en comparación a los reportados en la literatura (ver Figura 3.4), por ejemplo, el valor de la concentración del  $H_2$  obtenido experimentalmente para el caso del gas de síntesis producido con eucalipto fue de un 12,61 % y en el resultado obtenido por [81] fue de un 10,70 %, mientras que la mayor diferencia se da en la fracción volumétrica del  $CH_4$ , donde [81] reporta una concentración del 1,18 %, mientras que en los resultados experimentales presentó una concentración del 27,43 %. Asimismo, los datos del gas de síntesis producidos con ciprés presentaron el mismo comportamiento (ver Figura 3.4) y se obtuvo una mayor concentración en todas las especies de gases. Esta diferencia tan alta que se dio en la concentración del metano se debe principalmente a las temperaturas durante el proceso de gasificación, dado que [81] reportó una temperatura mínima de 1078 °C para una relación equivalente de 0,26 y cuando aumentó la ER reportó que la temperatura de 1160 °C, bajo estas condiciones de gasificación se van a favorecer las reacciones R11, R12, R13 y R14 (para más información ver el Cuadro 1.5) las cuales corresponden a las reacciones de cambio del metano, donde se consume el metano para dar paso a la formación de  $H_2$  y CO.

Cabe destacar que el ensayo realizado no se logró llegar a más de 814,00 °C a diferencia de la literatura, esto debido a una limitante de la resistencia de los materiales de construcciones del gasificador. Por esta razón, se presentó un déficit en la temperatura en comparación con los valores reportados por [81], no permite que se den las reacciones de cambio del metano y como resultado no se propicia las condiciones para que se forme el CO e  $H_2$  (ver Figura 1.4).

El análisis estadístico de la composición del gas de síntesis para los tratamientos de ciprés y de eucalipto, mostrado en Cuadro 3.8. Demostró que existen suficiente información estadística para decir que se presentaron diferencias significativas en la concentración del  $CH_4$  ( $p = 0,0001$ ) cuando se varió la relación equivalente de 0,20 a 0,30. Luego, en los datos de la fracción volumétrica del CO ( $p = 0,0001$ ) y el  $H_2$  ( $p = 0,0187$ ) se obtuvieron

diferencias significativas cuando se da un aumento de la ER del 0,27 al 0,30. Mientras que el CO<sub>2</sub> no presentó diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los tres tratamientos realizados en este estudio ( $p = 0,8957$ ).

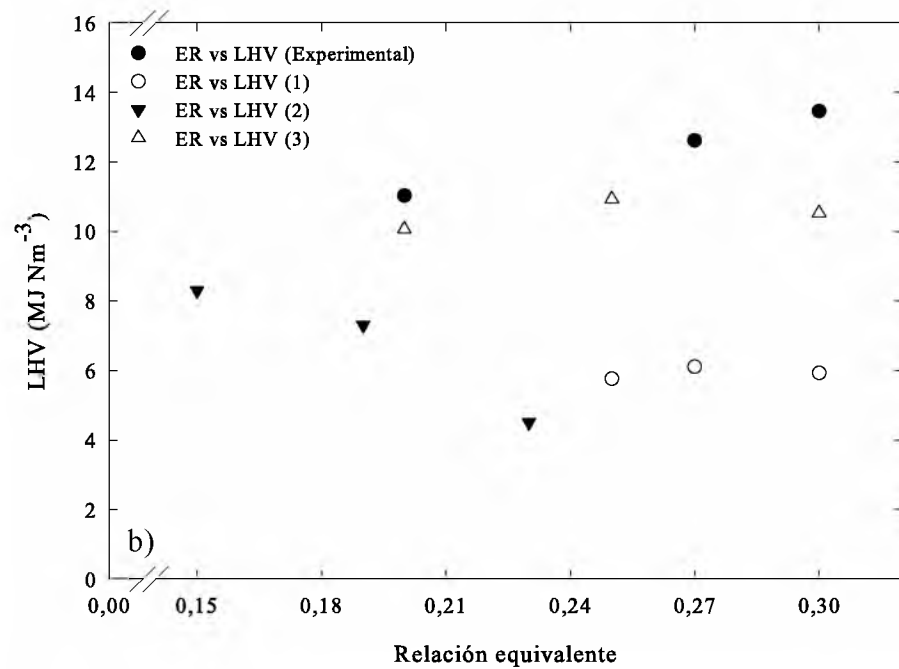
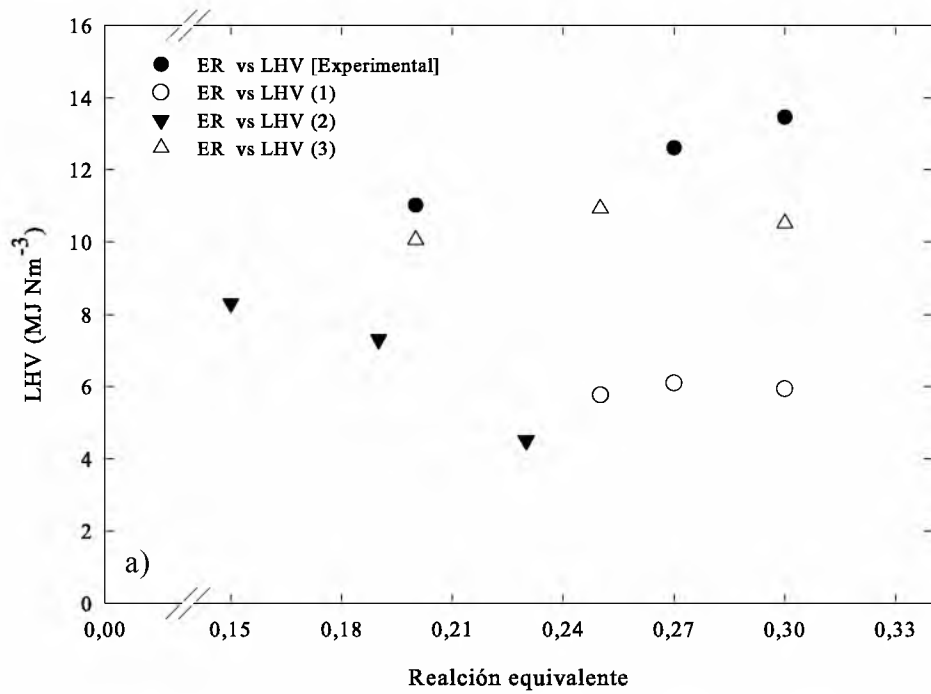
**Cuadro 3.8.** Análisis estadístico realizado a la composición química y al poder calorífico inferior del gas síntesis producido con pellets de ciprés.

| ER              | n | CH <sub>4</sub> (vol. %) | CO (vol. %)        | CO <sub>2</sub> (vol. %) | H <sub>2</sub> (vol. %) | LHV (MJ Nm <sup>-3</sup> ) |
|-----------------|---|--------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                 |   | Promedio                 | Promedio           | Promedio                 | Promedio                | Promedio                   |
| ER <sub>1</sub> | 3 | 22,04 <sup>A</sup>       | 17,12 <sup>A</sup> | 15,52 <sup>A</sup>       | 9,81 <sup>A</sup>       | 11,03 <sup>A</sup>         |
|                 |   | (± 1,14)                 | (± 2,09)           | (± 2,74)                 | (± 1,23)                | (± 0,32)                   |
| ER <sub>2</sub> | 3 | 25,68 <sup>B</sup>       | 17,21 <sup>A</sup> | 16,83 <sup>A</sup>       | 11,99 <sup>AB</sup>     | 12,61 <sup>B</sup>         |
|                 |   | (± 0,25)                 | (± 0,33)           | (± 0,52)                 | (± 0,94)                | (± 0,15)                   |
| ER <sub>3</sub> | 3 | 27,30 <sup>B</sup>       | 26,45 <sup>B</sup> | 18,55 <sup>A</sup>       | 13,83 <sup>B</sup>      | 13,46 <sup>C</sup>         |
|                 |   | (± 0,19)                 | (± 0,19)           | (± 1,33)                 | (± 1,41)                | (± 0,22)                   |

*Nota:* Promedios con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ), n: números de muestras, LHV: poder calorífico inferior, ER: relación equivalente, ER<sub>1</sub> = 0,20, ER<sub>2</sub> = 0,27, ER<sub>3</sub> = 0,30.

Con base en los resultados del análisis estadístico se puede confirmar que la relación equivalente tiene un efecto significativo en la producción del gas de síntesis, el cual indica que conforme la relación equivalente aumenta de 0,20 a 0,30, esto debido al incremento en las concentraciones de CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> van a aumentar el poder calorífico inferior del gas de síntesis producido.

Una vez estudiada la composición química del gas de síntesis, el siguiente paso fue estudiar el efecto de la ER en el LHV del gas de síntesis se muestra en la Figura 3.5, donde se observa un incremento del poder calorífico del gas cuando se aumenta la relación equivalente durante el proceso de gasificación. Donde destaca el tratamiento del eucalipto, el cual presentó el mayor valor (13,53 MJ m<sup>-3</sup>) de poder calorífico, mientras que el ciprés alcanzó un valor de 13,46 MJ m<sup>-3</sup>.



**Figura 3.5.** Comparación del poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis obtenido experimentalmente con respecto a datos consultados en la literatura (1) [58], (2) [69], (3) [73], para el caso de los pellets de eucalipto (a) y ciprés (b).

Al comparar estos valores de poder calorífico inferior con los reportados por [68] y [83], se observó que los resultados obtenidos en este estudio son superiores debido a la concentración del CH<sub>4</sub> producido durante la gasificación. Por ejemplo, para el caso del ciprés la fracción volumétrica del metano fue de un 27,30 % el cual aporta un 61,28 % del valor total del LHV y según los valores reportado por [83] se tiene que el gas de síntesis presentó una concentración de CH<sub>4</sub> del 7,95 % que contribuye en un 27,10 % del poder calorífico de su gas combustible. Con esto se entiende que existe una diferencia porcentual considerable cuando se compara el aporte energético del CH<sub>4</sub> en el valor final del LHV.

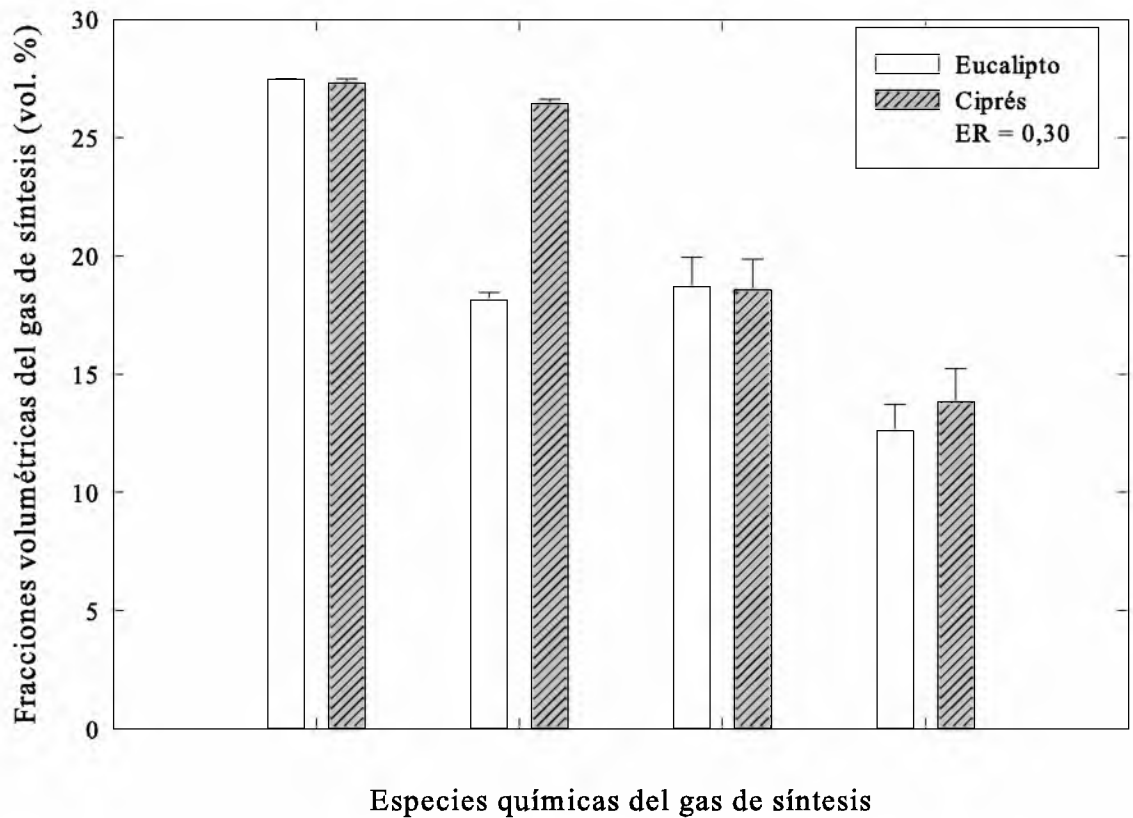
Finalmente, los resultados estadísticos (ANOVA) obtenidos del LHV ( $p = 0,0001$ ) prestaron diferencias significativas en los tres valores de ER. Lo que indica una influencia de la ER en el poder calorífico del gas de síntesis producido durante la gasificación de pellets, lo que ratifica el efecto del flujo de aire en la composición química del gas de síntesis, porque se logró aumentar las concentraciones del CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>.

### **3.8 Comparación de la composición química y el LHV del gas de síntesis variando el tipo de biomasa**

Con base en los resultados obtenidos, el gas de síntesis producido con eucalipto y ciprés presentó la mayor concentración de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO y el mayor poder calorífico inferior cuando se utilizó una relación equivalente de 0,30. Por lo tanto, se fijó esta ER con el fin de comparar la composición química y LHV del gas de síntesis producido con los dos tipos de biomasa.

Para el caso de la composición química del gas de síntesis obtenido con eucalipto y ciprés, ver Figura 3.6, se observa que la concentración del CH<sub>4</sub> ( $p = 0,236$ ) y el CO<sub>2</sub> ( $p = 0,447$ ) presentó una variación no significativa en sus concentraciones, con una diferencia porcentual del 0,58 % y 0,80 % respectivamente, lo cual indica que no se favorecieron las reacciones de recombinación de metano y la reacción de Bounduard, debido a que no se alcanzan altas temperaturas (1000 °C) durante el proceso de gasificación [68], [81]. Según los valores reportados por [83], se tiene que la concentración de CH<sub>4</sub> fue del 7,95 % y del

27,36 % para el CO<sub>2</sub>. Al comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los reportados por [83], se notó que los valores determinados en este estudio son superiores en un 71,05 % en el caso de CH<sub>4</sub> y un 31,65 % para el CO<sub>2</sub>. Al realizar el análisis estadístico dio como resultado que la variación del tipo de biomasa no presentó diferencias significativas en la formación de metano ( $p = 0,2360$ ) y dióxido de carbono ( $p = 0,8957$ ), donde se infiere que en este estudio el tipo de la biomasa no afectó su producción.



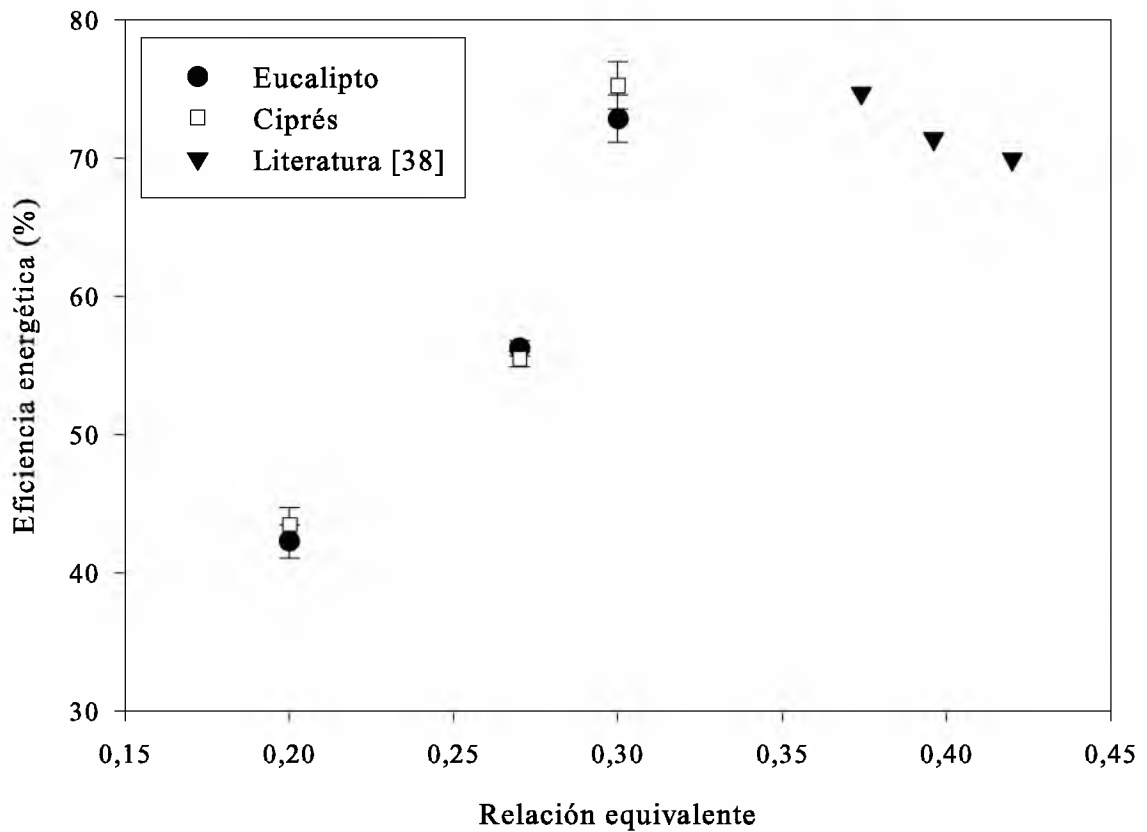
**Figura 3.6.** Comparación de la composición química del gas de síntesis entre los tratamientos de eucalipto y ciprés.

En cuanto a la fracción volumétrica del H<sub>2</sub> no presentó diferencias significativas ( $p = 0,308$ ), el gas de síntesis producido con ciprés fue el que presentó la mayor concentración (ver Figura 3.6), con un valor de 13,83 %, el cual fue un 8,82 % superior en comparación al gas de síntesis de eucalipto.

Según [83], reporta que la concentración de H<sub>2</sub> fue del 30,05 %. Por su parte, [84] reportó una concentración de hidrógeno del 15,23 % y [82] indicó una concentración del 14,6 %. De lo anterior, se muestra que los resultados obtenidos son inferiores (12,61 % - 13,83 %) a los reportados en la literatura. Sin embargo, esta diferencia se sustenta sobre el hecho que se dio una limitación en la resistencia de los materiales, la cual no permitió utilizar temperaturas superiores a los 814 °C, esto dio como resultado que no se favoreciera las reacciones exotérmicas, por ejemplo, la R11, R13 y R14 que limita la formación del hidrógeno. Además, el análisis estadístico no presentó diferencias significativas entre el gas de síntesis producido con eucalipto y ciprés ( $p = 0,3083$ ), indicando que el efecto de la biomasa es nulo en cuanto a la producción de hidrógeno.

La concentración del CO fue la que presentó diferencias significativas ( $p = 0,0001$ ), para el caso del gas de síntesis producido con ciprés se obtuvo un valor promedio del 26,45 % y un 18,21 % para el eucalipto. Esta diferencia entre las concentraciones fue consecuencia de la estabilidad de la temperatura (700 °C) durante el proceso de gasificación cuando se emplearon los pellets de ciprés. También estos resultados se compararon con el estudio realizado por [83] que reportó una concentración de CO del 36,49 %, al comparar este dato con los resultados alcanzados en esta investigación se observa que la concentración del CO del gas de síntesis producido con eucalipto presentó una concentración inferior en un 44,85 % y para el caso del ciprés la concentración fue inferior en un 18,12 %. La deficiencia en la producción del CO se debe a la diferencia de entre las temperaturas de gasificación. Según los resultados [83], el reactor alcanzó una temperatura máxima de 950 °C y en este estudio se obtuvo una temperatura máxima de 714 °C, lo que limitaría las reacciones endotérmicas de gasificación, por ejemplo, R4, R5, R11 y R13. Además, se realizó un análisis de varianza entre las muestras, las cuales presentan diferencias significativas entre los tratamientos estudiados ( $p = 0,0001$ ), donde se obtiene como resultado que los pellets de ciprés presentaron una mayor estabilidad en la temperatura durante el proceso de gasificación lo que da como resultado un incremento en la producción de CO.





**Figura 3.7.** Eficiencia del gas de síntesis en función de la relación equivalente.

Finalmente se analizó el poder calórico inferior del gas de síntesis a fin de estudiar la eficiencia del proceso de gasificación para ambas muestras. Donde la eficiencia de la gasificación es la relación entre la energía producida por el flujo del gas de síntesis ( $LHV_{\text{del gas}}$ ) y la energía contenida dentro de la biomasa ( $LHV_{\text{biomasa}}$ ) [83].

En este estudio se empleó una relación equivalente en un rango de 0,20 a 0,30, se decidió establecer este rango siguiendo las recomendaciones dadas por [6], como se indica en la metodología en la sección 2.5.1.

Se comparan los resultados de la eficiencia del proceso gasificación reportados por [38] con los de la investigación, como se muestra en la Figura 3.7, donde la mayor eficiencia

energética se obtuvo cuando se utilizó una relación equivalente de 0,30. El gas de síntesis producido con pellets de eucalipto y ciprés mostraron una eficiencia del 75,27 % y un 72,83 % respectivamente. La diferencia entre estos valores de eficiencia se debe principalmente al valor calórico inferior de los pellets de ciprés ( $17,47 \pm 0,16 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) el cual presentó diferencias significativas ( $p = 0,0008$ ) en comparación al de los pellets de eucalipto ( $16,66 \pm 0,22 \text{ MJ kg}^{-1}$ ).

Según [38], la máxima eficiencia de la gasificación fue del 74,72 % y se logra cuando se emplea una relación equivalente del 0,374 usando aire como agente gasificante. Con base en este resultado se entiende la eficiencia energética del gas de síntesis producido con eucalipto muestra los mejores resultados, en vista de que presenta la mayor eficiencia.

Por otra parte, [67] realizó un estudio de dinámica de fluidos computacional con el fin de analizar el comportamiento del gasificador de flujo concurrente empleado en esta investigación. [67] empleó el método de volúmenes finitos que considera los principios de conservación de masa, momento y energía, el modelo de turbulencia de  $k$ - $\epsilon$ , el modelo multifásico Euleriano-granular y el modelo de transporte de especies.

En el estudio de [67] se reportó que empleando caudales de aire entre  $18,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  a  $27,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  se obtuvieron unas temperaturas de  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  respectivamente. Además, indica que utilizando un caudal de  $24,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  se obtienen los mejores resultados en términos de composición química del gas de síntesis producido, el cual está conformado por: 16,53 % de  $\text{CO}$ , 16,35 % de  $\text{CO}_2$ , 5,07 % de  $\text{CH}_4$ , 13,07 % de  $\text{H}_2$  y  $5,42 \text{ MJ m}^{-3}$ . Estableciendo una comparación entre los resultados de la simulación de dinámica de fluidos computacional de [67] y los resultados obtenidos experimentalmente en la presente investigación, se observó que estos presentan algunas diferencias, por ejemplo, la temperatura máxima que alcanzó fue de  $750,12 \text{ }^\circ\text{C}$  debido a una limitante en la resistencia de los materiales de construcción del gasificador. Luego, para el caso de los pellets de eucalipto se requirió un flujo de agente gasificante menor el cual fue de  $4,80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  con el fin de garantizar una relación equivalente del 0,30 y se obtuvo un gas de síntesis

conformado por: 18,13 % de CO, 18,70 % de CO<sub>2</sub>, 17,46 % de CH<sub>4</sub>, 12,61 % de H<sub>2</sub> y un poder calorífico inferior de 13,53 MJ m<sup>-3</sup>. Cabe destacar que la mayor diferencia se da en el flujo de agente gasificante y en la fracción volumétrica del metano, debido a que los resultados experimentales presenta valores superiores en comparación con el reportado por [67]. Estas diferencias crean la necesidad de realizar una modelación de fluidos computacional empleando las condiciones reales de funcionamiento del reactor de gasificación con el fin de validar la modelación.

## CONCLUSIONES

---

Los pellets elaborados a partir de eucalipto presentaron los mayores valores de densidad real, densidad aparente y friabilidad, además la conductividad y la difusividad térmica se le atribuyo un comportamiento directamente proporcional a la densidad aparente.

El poder calorífico de los pellets de eucalipto y ciprés presentaron un valor superior al valor recomendado por la norma DIN 51731 y la norma SS 187120, lo que indica que los pellets son aptos para fines energéticos.

El aumento de la relación equivalente del agente gasificante genera un aumento en las concentraciones de las especies de  $H_2$  y  $CH_4$ , obtenidas para el gas de síntesis producido en este estudio.

En el proceso de gasificación la relación equivalente de 0,30 es la ER óptima para maximizar la producción del gas de síntesis, dado que se obtuvieron las mayores concentraciones de  $H_2$ ,  $CH_4$  y el mayor LHV.

La variación del tipo de biomasa no tuvo efectos significativos en el poder calorífico inferior del gas de síntesis, lo cual es óptimo, porque permite emplear distintos tipos de biomasa en el proceso de gasificación.

## RECOMENDACIONES

---

Realizar el balance general de masa y energía para determinar la eficiencia real del gasificador de flujo concurrente.

Diseñar y construir un intercambiador de calor para aprovechar el calor presente en el gas de síntesis con el fin de aumentar la temperatura del agente gasificante y determinar su efecto en el proceso de gasificación.

Rediseñar el sistema de filtros del gasificador, para mejorar la eficiencia de la limpieza del gas de síntesis y facilitar la recolección de los subproductos del proceso de gasificación.

Realizar pruebas de gasificaciones con biomásas de origen agrícola y evaluar la composición química y poder calorífico del gas de síntesis para determinar la mejor ruta de conversión energética, ya sea eléctrica o térmica.

Se recomienda realizar pruebas en motores de combustión interna empleando el gas de síntesis para evaluar su eficiencia.

Realizar una modelación del reactor de gasificación utilizando dinámica de fluidos computacional empleando los resultados experimentales obtenidos en este estudio, con la finalidad de mejorar la eficiencia del proceso de gasificación.

## REFERENCIAS

---

- [1] K. Im-orb, T. Detchusananard, P. Ponpesh, y A. Arpornwichanop, “Investigation of integrated biomass pyrolysis and gasification process for green fuel production”, *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 204–209, dic. 2017.
- [2] M. L. Valderrama Rios, A. Martínez González, E. E. Silva Lora, y O. A. Almazán del Olmo, “Reduction of tar generated during biomass gasification: A review”, *Biomass Bioenergy*, vol. 108, pp. 345–370, ene. 2018.
- [3] J. G. J. Olivier y J. A. H. W. Peters, “Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions”, PBL Environmental Assessment Agency, Netherlands, The Hague; no. 4004, 2017 [En línea]. Disponible en: [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-summary-of-the-2019-report\\_4004.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-summary-of-the-2019-report_4004.pdf). [Accedido: 9-abr-2019]
- [4] R. Gicquel y M. Gicquel, *Introduction to Global Energy Issues*, 2a ed. Paris: CRC-Prees/Balkema, 2013.
- [5] O. Coto, “Evaluación de la Generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e Identificación de Sector Prioritario”, FITTACORI, Rep. Tec., San José, nov. 2013.
- [6] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory*, 2a ed. Amsterdam: Elsevier Inc, 2013.
- [7] A. M. Salem, U. Kumar, A. N. Izaharuddin, H. Dhimi, T. Sutardi, y M. C. Paul, “Advanced Numerical Methods for the Assessment of Integrated Gasification and CHP Generation Technologies”, en *Coal and Biomass Gasification, Energy, Environment, and Sustainability*, India: Springer, cap. 2. 2018, pp. 307–330.

- [8] A. M. Salem y M. C. Paul, “An integrated kinetic model for downdraft gasifier based on a novel approach that optimises the reduction zone of gasifier”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 109, pp. 172–181, feb. 2018.
- [9] P. Basu, “Biomass Characteristics”, en *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Amsterdam: Elsevier, 2010, cap. 1, pp. 27–63.
- [10] L. E. G. Fernández, “Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo”, tesis de Maestría, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad Nac. Colombia, Bogotá, Colombia, 2011 [En línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4133/1/291461.2011.pdf>. [Accedido: 05-ago-2019]
- [11] P. Basu, “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction”, 3a ed., Elsevier, Ed. Canadá: Elsevier Ltd, 2018.
- [12] T. Bułkowska, Katarzyna; Gusiatin, Zygmunt Mariusz; Klimiuk, Ewa; Pawłowski, Artur; Pokój, *Biomass for Biofuels*, 1a ed. Inglaterra: CRC Press/Balkema, 2016.
- [13] J. Jackson, A. Turner, T. Mark, y M. Montross, “Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 148, pp. 43–49, jul. 2016.
- [14] M. Soleimani, X. L. Tabil, R. Grewal, y L. G. Tabil, “Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes”, *Fuel*, vol. 193, pp. 134–141, abr. 2017.
- [15] J. S. Tumuluru, C. T Wright, K. L. Kenney, y R. J. Hess, “A Technical Review on Biomass Processing: Densification, Preprocessing, Modeling and Optimization”, en *2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20 - June 23, 2010*, 2010, pp. 1–20 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/236898167\\_A\\_Technical\\_Review\\_on\\_Biomass\\_Processing\\_Densification\\_Preprocessing\\_Modeling\\_and\\_Optimization/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/236898167_A_Technical_Review_on_Biomass_Processing_Densification_Preprocessing_Modeling_and_Optimization/citation/download). [Accedido: 23-sep-2019]

- [16] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, y K. L. Kenney, “A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application”, *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 5, no. 6, pp. 683–707, nov. 2011.
- [17] E. Alakangas, “New European pellets standards”, EUBIONET3, Finlandia, CEN/TC 335, 011 [En línea]. Disponible en: [https://www.foex.fi/uploads/bioenergy/New\\_European\\_pellets\\_standards\\_March\\_2011.pdf](https://www.foex.fi/uploads/bioenergy/New_European_pellets_standards_March_2011.pdf). [Accedido: 10-Mar-2019]
- [18] F. Clarke, S, Eng y P, Preto, “Biomass Densification for Energy Production”, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario, Canadá, 2011 [En línea]. Disponible en: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/11-035.htm>. [Accedido: 23-sep-2019]
- [19] W. Stelte, Sanadi, A. R. Shang, Lei, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt, U. B. Henriksen, “Recent developments in biomass pelletization – a review”, *BioResources*, vol. 7, no. 3, pp. 4451–4490, 2012.
- [20] A. Pandey, “A review of biomass energy in India and its densification”, *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.*, vol. 20, no. 2, 2017.
- [21] J. K. Carson, “Thermal Conductivity Measurement and Prediction of Particulate Foods”, *Int. J. Food Prop.*, vol. 18, no. 12, pp. 2840–2849, dic. 2015.
- [22] L. P. Fennell y D. Boldor, “Dielectric and Thermal Properties of Sweet Sorghum Biomass”, *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 48, no. 4, pp. 244–260, 2014.
- [23] R. K. Raigar y H. N. Mishra, “Effect of moisture content and particle sizes on physical and thermal properties of roasted bengal gram flour”, *J. Food Process. Preserv.*, vol. 39, no. 6, pp. 1839–1844, dic. 2014.
- [24] B. P. Ato, “Thermophysical properties of selected cash crops grown in Ghana”, tesis Doctoral, Dpto. Ing. Agrícola, Kwame Nkrumah University, Kwame



- Nkrumah, Ghana, 2014 [En línea]. Disponible en: <http://ir.knust.edu.gh/xmlui/bitstream/handle/123456789/7220/THERMOPHYSICAL%20PROPERTIES%20OF%20SELECTED%20CASH%20CROPS.pdf?sequence=>. [Accedido: 17-may-2019]
- [25] W. Yang, S. Sokhansanj, J. Tang, y P. Winter, “Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of borage seeds”, *Biosyst. Eng.*, vol. 82, no. 2, pp. 169–176, jun. 2002.
- [26] W. Guo, C. J. Lim, X. Bi, S. Sokhansanj, y S. Melin, “Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets”, *Fuel*, vol. 103, pp. 347–355, ene. 2013.
- [27] T. Carrillo Paniagua, “Caracterización de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos forestales”, trabajo de fin de graduación de Licenciatura, Escuela Ing. Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2015 [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/3323>. [Accedido: 09-feb-2018]
- [28] W. Kollman, F. Cote, *Principles of wood science and technology*. Berlin (Germany): Springer-Verlag, 1968.
- [29] B. Adl-Zarrabi, L. Boström, y U. Wickström, “Using the TPS method for determining the thermal properties of concrete and wood at elevated temperature”, *Fire Mater.*, vol. 30, no. 5, pp. 359–369, sep. 2006.
- [30] M. Gupta, J. Yang, y C. Roy, “Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles”, *Fuel*, vol. 82, no. 8, pp. 919–927, may 2003.
- [31] O.O. Fasina y S. Sokhansanj, “Bulk thermal properties of alfalfa pellets”, *Can. Agric. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 91–95, 1995.
- [32] B. Peters y C. Bruch, “Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation”, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 70, no. 2, pp. 233–250, dic. 2003.

- [33] M. A. Pauner y H. Bygbjerg, “Spontaneous ignition in storage and production lines: Investigation on wood pellets and protein powders”, *Fire Mater.*, vol. 31, no. 8, pp. 477–494, dic. 2007.
- [34] P. Blomquist y P. Van-Hees, “Spontaneous Ignition of Biofuels - An Experimental Investigation through Small and Large-Scale Tests”, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Suecia, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962373/FULLTEXT01.pdf>. [Accedido: 9-abr-2019]
- [35] J. Cabral, J. Tatiane, D. Braga, M. Mitiko, M. Behling, C. Dias y P. Dilicio, “Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais”, en Embrapa Agroenergia 1a edição, Brasília, 2012, pp. 91-111 [En línea]. Disponible en: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/952626>. [Accedido: 8-may-2019]
- [36] N. Y. Harun y M. T. Afzal, “Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends”, *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 93–99, 2016.
- [37] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies”, *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, may 2002.
- [38] C. A. V. B. de Sales et al., “Experimental study on biomass (*eucalyptus spp.*) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 145, pp. 314–323, ago. 2017.
- [39] O. Yucel y M. A. Hastaoglu, “Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 144, pp. 145–154, abr. 2016.

- [40] E. S. Aydin, O. Yucel, y H. Sadikoglu, “Development of a semi-empirical equilibrium model for downdraft gasification systems”, *Energy*, vol. 130, pp. 86–98, jul. 2017.
- [41] J. Watson, Y. Zhang, B. Si, W. T. Chen, y R. de Souza, “Gasification of biowaste: A critical review and outlooks”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 83, pp. 1–17, mar. 2018.
- [42] C. Lucas, D. Szewczyk, W. Blasiak y S. Mochida, “High-temperature air and steam gasification of densified biofuels”, *Biomass Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 563–575, dic. 2004.
- [43] R. M. Navarro, M. A. Peña, y J. L. G. Fierro, “Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass”, *Chem. Rev.*, vol. 107, no. 10, pp. 3952–3991, oct. 2007.
- [44] C. N. Hamelinck y A. P. C. Faaij, “Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass”, *J. Power Sources*, vol. 111, no. 1, pp. 1–22, sep. 2002.
- [45] J. Pérez, D. Borge, J. Agudelo, “Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico- experimentales”, *Rev Fac Ing-Univ Ant*, no. 22, pp. 95–107, 2010.
- [46] K. Qian et al., “Effects of Biomass Feedstocks and Gasification Conditions on the Physiochemical Properties of Char”, *Energies*, vol. 6, no. 8, pp. 3972–3986, ago. 2013.
- [47] X. T. Li, J. R. Grace, C. J. Lim, A. P. Watkinson, H. P. Chen, y J. R. Kim, “Biomass gasification in a circulating fluidized bed”, *Biomass Bioenergy*, vol. 26, no. 2, pp. 171–193, feb. 2004.

- [48] M. Widyawati, T. L. Church, N. H. Florin, y A. T. Harris, “Hydrogen synthesis from biomass pyrolysis with in situ carbon dioxide capture using calcium oxide”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4800–4813, abr. 2011.
- [49] A. Molino, S. Chianese, y D. Musmarra, “Biomass gasification technology: The state of the art overview”, *J. Energy Chem.*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, ene. 2016.
- [50] Z. A. Zainal, A. Rifau, G. A. Quadir, y K. N. Seetharamu, “Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier”, *Biomass Bioenergy*, vol. 23, no. 4, pp. 283–289, oct. 2002.
- [51] S. Kathi, “Bioenergy from Phytoremediated Phytomass of Aquatic Plants via Gasification”, en *Bioremediation and Bioeconomy*, Kalapet: Elsevier, 2016, cap. 6, pp. 111–128.
- [52] P. N. Sheth y B. V. Babu, “Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier”, *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 12, pp. 3127–3133, jun. 2009.
- [53] N. Couto, A. Rouboa, V. Silva, E. Monteiro, y K. Bouziane, “Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas”, *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 596–606, 2013.
- [54] T. K. Patra y P. N. Sheth, “Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 50, pp. 583–593, oct. 2015.
- [55] H. Olgun, S. Ozdogan, y G. Yinesor, “Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues”, *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 572–580, ene. 2011.
- [56] P. N. Sheth y B. V. Babu, “Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier”, *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 12, pp. 3127–3133, jun. 2009.

- [57] V. Kirsanovs, D. Blumberga, I. Veidenbergs, C. Rochas, E. Vigants, y G. Vigants, “Experimental investigation of downdraft gasifier at various conditions”, *Energy Procedia*, vol. 128, pp. 332–338, sep. 2017.
- [58] P. Pradhan, A. Arora, y S. M. Mahajani, “Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass”, *Energy Sustain. Dev.*, vol. 43, pp. 1–14, abr. 2018.
- [59] M. Puig-Arnabat, L. Shang, Z. Sárossy, J. Ahrenfeldt, y U. B. Henriksen, “From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 142, pp. 27–33, feb. 2016.
- [60] I. Grubecki, “Airflow versus pressure drop for a mixture of bulk wood chips and bark at different moisture contents”, *Biosyst. Eng.*, vol. 139, pp. 100–110, nov. 2015.
- [61] G. Soto, M. Núñez, “Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante”, *Maderas-Cienc. Tecnol.*, vol. 10, no. 2, pp. 129–137, 2008.
- [62] V. S. P. Bitra, S. S. Banu, P. H. D. Ramakrishna, G. Narender, y A. R. Womac, “Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells”, *Biosyst. Eng.*, vol. 106, no. 4, pp. 503–512, ago. 2010.
- [63] A. Incropera, F. DeWitt, D. Bergman y T. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7a ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [64] A. Ramaswamy, H. Raghavan, V. Chakraverty y A. Mujumdar, *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*, 1a ed. CRC Press, Florida, BR., 2003.
- [65] D. Moura, J; Devilla, I; Martins, “Propriedades térmicas dos grãos de quinoa”, *Semin. Iniciação Científica*, pp. 1–6, 2010.

- [66] S. Boundy, Bob; Diegel, Susan; Wright, Lynn; Davis, “Biomass energy data book”, en *Biomass energy data*, 4a ed., U.S. Department of energy; Energy Efficiency and Renewable Energy; Oak Ridge National Laboratory, Ed. Tennessee: U.S. Department of energy, 2011, pp. 204–254.
- [67] R. Salazar, “Análisis de un gasificador de flujo concurrente para el aprovechamiento energético de residuos biomásicos aplicando dinámica de fluidos computacional”, trabajo de fin de graduación de Licenciatura, Escuela Ing. Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2017 [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/5561>. [Accedido: 4-nov-2019]
- [68] F. Meng, Q. Ma, H. Wang, Y. Liu, y D. Wang, “Effect of gasifying agents on sawdust gasification in a novel pilot scale bubbling fluidized bed system”, *Fuel*, vol. 249, pp. 112–118, ago. 2019.
- [69] M. James, “The effect of biomass, operating conditions, and gasifier design on the performance of an updraft biomass gasifier”, tesis de Maestría, Dpto. Ing. Biológica y agrícola, Kansas State University, 2012 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/301220963\\_The\\_effect\\_of\\_biomass\\_operating\\_conditions\\_and\\_gasifier\\_design\\_on\\_the\\_performance\\_of\\_an\\_updraft\\_biomass\\_gasifier](https://www.researchgate.net/publication/301220963_The_effect_of_biomass_operating_conditions_and_gasifier_design_on_the_performance_of_an_updraft_biomass_gasifier). [Accedido: 30-oct-2019]
- [70] C. Hanping, L. Bin, Y. Haiping, Y. Guolai, y Z. Shihong, “Experimental Investigation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor”, *Energy Fuels*, vol. 22, no. 5, pp. 3493–3498, sep. 2008.
- [71] M. Mahishi y D. Goswami, “Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production”, *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 16, pp. 3831–3840, nov. 2007.

- [72] Y. Cao, Q. Wang, J. Du, y J. Chen, “Oxygen-enriched air gasification of biomass materials for high-quality syngas production”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, nov. 2019.
- [73] I. Niedziółka et al., “Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass”, *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 312–317, abr. 2015.
- [74] J. S. Tumuluru, “Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover”, *Biosyst. Eng.*, vol. 119, pp. 44–57, mar. 2014.
- [75] P. Basu, “Gasification Theory and Modeling of Gasifiers”, en *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Amsterdam: Elsevier, 2010, cap 5, pp. 117–165.
- [76] C. Igathinathane et al., “Simple and inexpensive method of wood pellets macro-porosity measurement”, *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 16, pp. 6528–6537, ago. 2010.
- [77] G. Montero, “Desarrollo de pellets mediante densificación con mezclas de residuos agrícolas de Costa Rica”, trabajo de fin de grado de Licenciatura, Escuela Ing. Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2016 [En línea].  
Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/10284>. [Accedido: 04-abr-2018]
- [78] J. Sjöström y P. Blomqvist, “Direct measurements of thermal properties of wood pellets: Elevated temperatures, fine fractions and moisture content”, *Fuel*, vol. 134, pp. 460–466, oct. 2014.

- [79] S. Bunchan, T. Poowadin, y K. Trairatanasirichai, “A study of throat size effect on downdraft biomass gasifier efficiency”, *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 745–750, oct. 2017.
- [80] S. Varunkumar, N. K. S. Rajan, y H. S. Mukunda, “Experimental and computational studies on a gasifier based stove”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 53, no. 1, pp. 135–141, ene. 2012.
- [81] G. Oh et al., “Gasification of coal water mixture in an entrained-flow gasifier: Effect of air and oxygen mixing ratio”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 129, pp. 657–664, ene. 2018.
- [82] D. Antolini, S. S. Ail, F. Patuzzi, M. Grigante, y M. Baratieri, “Experimental investigations of air-CO<sub>2</sub> biomass gasification in reversed downdraft gasifier”, *Fuel*, vol. 253, pp. 1473–1481, oct. 2019.
- [83] H. Gu, Y. Tang, J. Yao, y F. Chen, “Study on biomass gasification under various operating conditions”, *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 5, pp. 1329–1336, oct. 2019.
- [84] E. Shayan, V. Zare, y I. Mirzaee, “Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 159, pp. 30–41, mar. 2018.
- [85] C. Telmo y J. Lousada, “Heating values of wood pellets from different species”, *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 2634–2639, jul. 2011.



## 4 Anexos

**Anexo 1.** Valores promedio del poder calorífico superior e inferior, contenido de humedad para distintas especies.

| Especie                       | HHV (kJ/kg)        | LHV (kJ/kg)        | CH (%) |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------|
| <i>Pinus pinaster</i>         | 20 237,89 ± 374,12 | 16 935,72 ± 335,46 | 10,3   |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i>  | 19 660,02 ± 32,29  | 16 704,30 ± 29,46  | 8,8    |
| <i>Cedrus atlantica</i>       | 20 360,45 ± 187,30 | 15 629,71 ± 154,00 | 17,8   |
| <i>Castanea sativa</i>        | 18 754,86 ± 218,64 | 15 468,56 ± 194,33 | 11,1   |
| <i>Eucalyptus globulus</i>    | 17 631,66 ± 326,53 | 14 411,54 ± 289,03 | 11,5   |
| <i>Fagus sylvatica</i>        | 19 132,47 ± 231,97 | 15 818,67 ± 206,36 | 11,0   |
| <i>Quercus robur</i>          | 18 696,82 ± 47,00  | 15 361,13 ± 41,63  | 11,4   |
| <i>Fraxinus angustifolia</i>  | 19 090,90 ± 306,18 | 16 450,82 ± 283,92 | 7,3    |
| <i>Prunus avium</i>           | 18 256,48 ± 120,86 | 15 552,33 ± 111,18 | 8,0    |
| <i>Salix babilonica</i>       | 18 279,41 ± 348,08 | 15 372,32 ± 316,07 | 9,2    |
| <i>Populus euro-americana</i> | 18 791,20 ± 248,45 | 16 130,08 ± 229,78 | 7,5    |
| <i>Acer pseudoplatanus</i>    | 18 637,91 ± 152,15 | 15 615,05 ± 137,43 | 9,7    |
| <i>Chlorophora excelsa</i>    | 20 314,74 ± 378,88 | 17 287,67 ± 345,38 | 8,8    |
| <i>Entandrophragma cyli,</i>  | 19 053,87 ± 113,65 | 15 691,61 ± 100,73 | 11,4   |
| <i>Gossweilerodendron b,</i>  | 20 499,80 ± 338,74 | 17 170,12 ± 303,73 | 10,3   |
| <i>Bowdichia nitida</i>       | 20 809,47 ± 354,05 | 17 907,85 ± 325,83 | 8,0    |
| <i>Hymenaea courbaril</i>     | 19 296,38 ± 187,61 | 16 183,69 ± 169,18 | 9,8    |

*Nota:* HHV: poder calorífico superior, LHV: poder calorífico inferior, CH: contenido de humedad en base humedad. Fuente: [85].

**Anexo 2.** Concentraciones de las fracciones volumétricas del gas de síntesis producido con eucalipto en el gasificador de flujo concurrente.

| Caudal (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CH <sub>4</sub> (%) | CO (%) | CO <sub>2</sub> (%) | O <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> (%) | N <sub>2</sub> (%) | LHV (MJ Nm <sup>-3</sup> ) |
|--|---------------------|--------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 3,40                                     | 21,68               | 18,78  | 17,20               | 0,71               | 7,33               | 34,30              | 10,84                      |
|  | 21,91               | 21,06  | 13,01               | 0,89               | 5,40               | 37,73              | 10,97                      |
|  | 20,45               | 18,21  | 14,45               | 2,23               | 10,21              | 34,45              | 10,64                      |
|  | 22,91               | 18,60  | 18,28               | 0,66               | 7,09               | 32,46              | 11,24                      |
|  | 24,58               | 20,64  | 15,30               | 0,60               | 5,00               | 33,88              | 11,85                      |
|  | 25,10               | 18,61  | 18,65               | 0,66               | 7,05               | 29,93              | 11,43                      |
| 3,96                                     | 23,96               | 18,45  | 17,68               | 0,71               | 10,45              | 28,75              | 11,97                      |
|  | 23,63               | 18,80  | 16,11               | 0,47               | 11,14              | 29,85              | 11,96                      |
|  | 22,94               | 18,51  | 15,91               | 0,82               | 10,77              | 31,05              | 11,64                      |
|  | 25,01               | 18,19  | 19,06               | 0,63               | 10,20              | 26,91              | 12,29                      |
|  | 25,06               | 18,34  | 17,81               | 0,32               | 10,76              | 27,71              | 12,39                      |
|  | 25,38               | 17,39  | 18,75               | 0,92               | 9,72               | 27,84              | 12,28                      |
| 4,80                                     | 25,01               | 18,14  | 19,12               | 0,18               | 13,47              | 24,08              | 12,64                      |
|  | 24,82               | 19,25  | 16,43               | 0,32               | 11,66              | 27,52              | 12,50                      |
|  | 25,67               | 19,45  | 16,61               | 0,35               | 11,28              | 26,64              | 12,79                      |
|  | 29,83               | 17,88  | 21,12               | 0,13               | 14,25              | 16,79              | 14,45                      |
|  | 30,12               | 19,22  | 19,83               | 0,18               | 12,94              | 17,71              | 14,57                      |
|  | 29,30               | 19,48  | 19,06               | 0,24               | 12,08              | 19,84              | 14,21                      |

*Nota:* LHV: poder calorífico inferior.

**Anexo 3.** Concentraciones de las fracciones volumétricas del gas de síntesis producido con eucalipto en el gasificador de flujo concurrente.

| Caudal (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) | CH <sub>4</sub> (%) | CO (%) | CO <sub>2</sub> (%) | O <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> (%) | N <sub>2</sub> (%) | LHV (MJ Nm <sup>-3</sup> ) |
|--|---------------------|--------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 3,40                                     | 16,38               | 19,24  | 7,79                | 1,37               | 9,30               | 45,92              | 9,17                       |
|  | 21,38               | 14,74  | 17,08               | 2,18               | 10,91              | 33,71              | 10,65                      |
|  | 19,54               | 17,05  | 13,46               | 1,66               | 10,78              | 37,51              | 10,23                      |
|  | 25,44               | 18,60  | 17,39               | 0,50               | 7,53               | 30,54              | 12,21                      |
|  | 24,98               | 15,37  | 18,98               | 1,08               | 10,61              | 28,98              | 12,00                      |
|  | 24,54               | 16,79  | 18,40               | 0,98               | 9,72               | 29,57              | 11,91                      |
| 3,96                                     | 24,92               | 17,59  | 15,64               | 0,72               | 11,45              | 29,68              | 12,33                      |
|  | 25,22               | 16,98  | 16,36               | 0,59               | 13,21              | 27,64              | 12,56                      |
|  | 25,46               | 17,06  | 16,94               | 1,26               | 11,67              | 27,61              | 12,49                      |
|  | 25,88               | 17,39  | 16,80               | 0,59               | 11,23              | 28,11              | 12,63                      |
|  | 26,57               | 16,72  | 17,94               | 0,37               | 12,92              | 25,48              | 12,99                      |
|  | 26,03               | 16,91  | 17,27               | 1,15               | 11,45              | 27,19              | 12,65                      |
| 4,80                                     | 26,57               | 17,86  | 16,04               | 0,48               | 12,21              | 26,84              | 13,04                      |
|  | 26,55               | 17,37  | 19,17               | 0,21               | 14,34              | 22,36              | 13,21                      |
|  | 26,23               | 18,06  | 18,49               | 0,25               | 14,68              | 22,29              | 13,21                      |
|  | 27,61               | 17,56  | 18,18               | 0,28               | 12,19              | 24,18              | 13,38                      |
|  | 28,37               | 17,30  | 20,29               | 0,19               | 14,96              | 18,89              | 13,93                      |
|  | 28,49               | 18,00  | 19,13               | 0,22               | 14,58              | 19,58              | 14,01                      |

*Nota:* LHV: poder calorífico inferior.