



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**ESTUDIO DE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS BIOMÁSICOS MUNICIPALES PARA  
LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y BIOCARBÓN.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ARGEMIRO PALENCIA DÍAZ**

**TUTOR PRINCIPAL**

**JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**COMITÉ TUTOR**

**MARIANO LÓPEZ DE HARO, INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**  
**JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.      JULIO 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Fernández Zayas José Luis

Secretario: López de Haro Mariano

1er Vocal: Aguillón Martínez Javier Eduardo

2do Vocal: González Oropeza Rogelio

3er Vocal: Arroyo Cabañas Fernando

Lugar donde se realizó la tesis:

**Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria (UNAM), Ciudad de México**

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

-----

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis no se hubiera podido realizar sin la ayuda de mí tutor, Dr. Javier Aguillón Martínez. Para él es mi primer agradecimiento, por recibirme como su estudiante y permitirme trabajar bajo su tutela, por su paciencia y ayuda a la hora de afrontar las dificultades que se han generado durante el transcurso de esta investigación.

Al Departamento de Bolívar, por su soporte en la realización de mis estudios doctorales mediante el programa de becas Bolívar ganador.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de seguir creciendo como ingeniero, investigador y en especial como ser humano.

A Juan José Hernández Adrover en la Universidad de Castilla-La Mancha, por permitirme conocer una cultura de investigación diferente y por su colaboración para mi estancia de investigación.

A Alicia Lasso Trinidad, por sus contribuciones en las distintas etapas de este trabajo y por su apoyo incondicional en todo momento, por su buen humor y sobre todo por su amistad.

A los miembros de mi jurado, los doctores José Luis Fernández Zayas, Mariano López de Haro, Rogelio González Oropeza y Fernando Arroyo Cabañas, por contribuir a mejorar este trabajo.

Muchas gracias

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Argemiro y Melva, Por haberme cuidado y por brindarnos todas las oportunidades posibles a mis hermanos y a mí. Porque todos nuestros logros también son de ustedes.

A mis hermanos, por apoyarme en todos mis planes, por aconsejarme siempre que lo necesité y en especial por cuidar de mis padres en estos años que no pude estar cerca.

A mis amigos, gracias por tantos buenos momentos y desde hace tanto tiempo.

A Dios por acompañarme y guiarme a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles y por una vida llena de felicidad.

## RESUMEN

---

Los residuos son una problemática creciente en todo el planeta tierra. De acuerdo con el World Bank la generación mundial de residuos aumentará de 900 millones de toneladas anuales en 2016 a 1200 millones de toneladas anuales para el 2030 [1], [2]. En la mayoría de países la generación de residuos supera los 225 kg/año/habitante llegando en algunos casos hasta 1 ton/año/habitante [3], estas cifras demuestran la importancia de tener un control adecuado de los residuos y distintas alternativas para su disposición final. Como una alternativa para el manejo de residuos biomásicos surgen los procesos termoquímicos que permiten su conversión en energía. Además estos procesos tienen numerosas ventajas entre las que se encuentra la reducción de las emisiones de gas invernadero procedente de la descomposición en depósitos de los residuos [4] y la transformación en diferentes formas de energía útil, como la energía eléctrica o térmica dentro de un proceso productivo [5]. Es debido a estas grandes oportunidades que se hace necesario comprender detalladamente la fenomenología asociada a los procesos de transformación de residuos biomásicos en portadores energéticos como el gas de síntesis.

Este proyecto plantea un estudio experimental de la gasificación de una parte importante de los residuos municipales biomásicos, como son la madera de pino y diversas mezclas de madera de pino-pasto procedentes de residuos de jardinería. Las mezclas que se utilizaron son 90% madera de pino - 10% pasto, 80% madera de pino - 20% pasto y 70% madera de pino - 30% pasto con proporción en peso. El reactor utilizado es de corrientes ascendentes y aire fue el agente gasificante. El objetivo principal es conocer la influencia de los parámetros de procesos como la relación de equivalencia y temperatura de reacción en el desempeño de la gasificación. La composición del gas se

obtiene mediante un analizador de gases por infrarrojo, para tres niveles de relación de equivalencia y temperaturas entre 800°C y 1100°C. Los resultados muestran que la mezcla con 80% de Madera de pino y 20% de Pasto mejora la conversión de carbón y reduce la cantidad de alquitranes en el gas producto. Además, se obtienen niveles superiores de poder calorífico del gas, lo que es resultado de la mayor concentración en algunos gases combustibles en la corriente de salida.

Finalmente es importante notar que los resultados de este estudio ayudan a mejorar el conocimiento de la producción de gas de síntesis y muestran que la gasificación de mezclas de residuos biomásicos municipales en un gasificador de corrientes ascendentes puede ser una tecnología efectiva en la producción de gas de síntesis.

## ABSTRACT

---

Wastes are a growing problem. According to the World Bank the global generation of waste will increase from 900 million tons per year in 2016 to 1200 million tons per year by 2030 [1], [2]. In most countries the generation of waste exceeds 225 kg/year/inhabitant, reaching in some cases up to 1 ton/year/inhabitant [3], these data demonstrate the relevance of having good control of waste and different alternatives for its final disposal. As an alternative for biomass treatment, thermochemical processes allow its conversion into energy. In addition, these processes have numerous advantages like the reduction of greenhouse emissions from biomass decomposition in landfills [4] and the conversion into different forms of useful energy, such as electrical or thermal within a productive process [5]. These opportunities bring relevance to the understanding of the phenomenology associated with the transformation processes of waste in energy carriers such as syngas.

This project proposes an experimental study of the gasification for an important segment of the municipal biomass waste, such as pinewood and some pinewood-grass mixtures coming from garden waste. The analyzed mixture contents for pinewood and grass were 90%-10%, 80%-20% and 70%-30% (weight based). The study was performed using a laboratory-scale updraft gasifier as the reactor and air was used as the gasifying agent. Experimental tests were carried out to investigate the influence of the equivalence ratio (ER) and the process temperature on gasification performance. The gas composition was analyzed using an infrared syngas analyzer for three levels of equivalence ratio (0.25, 0.30 and 0.34) and temperatures between 800°C and 1100°C. The results showed that compared to 100% pinewood, 90% pinewood-10% grass (MX90%-10%) and 70% pinewood-30% grass (MX70%-30%), gasification of 80% pinewood-20% grass (MX80%-20%) mixture improves carbon conversion and reduces the amount of char. In addition,

higher levels of calorific value of the gas are obtained, which is the result of the higher concentration of some fuel gases in the output stream

Finally, it is important to note that the results of this study help to improve the knowledge of syngas production and show that the gasification of mixtures of municipal biomass waste in an updraft gasifier can be an effective technology.

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Energía y medio ambiente.</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Objetivos de la Investigación.</b> .....	<b>21</b>
<b>Objetivo General.</b> .....	<b>21</b>
<b>Objetivos Específicos.</b> .....	<b>21</b>
<b>1.3 Justificación.</b> .....	<b>22</b>
<b>1.4 Hipótesis.</b> .....	<b>23</b>
<b>1.5 Estructura de la Tesis.</b> .....	<b>24</b>
<b>2. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 Biomasa.</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 Propiedades de la Biomasa.</b> .....	<b>26</b>
2.2.1 Análisis último.....	26
2.2.2 Análisis próximo.....	27
2.2.3 Características de la combustión. ....	28
<b>2.3 Procesos de Transformación y Aprovechamiento Energético.</b> .....	<b>30</b>
2.3.1 Proceso de conversión de la biomasa.....	30

2.3.2	Conversión termoquímica. ....	31
2.3.3	Gasificación. ....	33
2.3.4	Tecnologías de la gasificación. ....	42
<b>2.4</b>	<b>Ciclos combinados de generación de potencia. ....</b>	<b>53</b>
<b>2.5</b>	<b>Diseños experimentales. ....</b>	<b>57</b>
2.5.1	Aleatorización. ....	59
2.5.2	Análisis factorial. ....	60
2.5.3	Experimentos con mezclas. ....	61
<b>2.6</b>	<b>Estado del Arte de la Gasificación de Biomasa. ....</b>	<b>62</b>
<b>3.</b>	<b>INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y COMBUSTIBLES. ....</b>	<b>70</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterización de la Biomasa. ....</b>	<b>70</b>
3.1.1	Poder calorífico. ....	70
<b>3.2</b>	<b>Instalación experimental. ....</b>	<b>73</b>
3.2.1	Molino. ....	73
3.2.2	Sistema de aire comprimido. ....	73
3.2.3	Sensores de temperatura. ....	74
3.2.4	Sistema de filtrado del gas producto. ....	75
3.2.5	Analizador de gases. ....	76
3.2.6	Materia prima. ....	77
3.2.7	Reactor gasificador. ....	78
3.2.8	Sistema gasificador de biomasa. ....	80
<b>3.3</b>	<b>Diseño experimental. ....</b>	<b>81</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS. ....</b>	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Perfil de temperatura y tiempo de proceso. ....</b>	<b>85</b>

4.2 Relación de equivalencia y composición del gas.....	87
4.3 Temperatura del proceso y composición del gas.....	91
4.4 Nivel de bio-carbón y alquitranes en el proceso.....	93
4.5 Poder calorífico del gas producto.....	96
4.6 Caso de estudio: gas de síntesis en una planta de generación de potencia. ...	98
4.6.1 Central de vapor. ....	98
4.6.2 Central de ciclo combinado. ....	102
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>
5.1 Trabajos futuros sugeridos. ....	109
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1.1. Composición de residuos a nivel Global (Izq.) y en Latinoamérica (Der.)...	15
Figura 1.2. Proyección del consumo de energía mundial 2020 a 2040.....	17
Figura 1.3. Emisiones de carbono asociadas con la energía 2020 a 2040 .....	17
Figura 1.4. Producción total de energía por región (izq.) y mayores productores de energía por combustible (der.) .....	19
Figura 1.5. Producción de energía en América. ....	20
Figura 2.1. Esquema de las transformaciones de la biomasa .....	26
Figura 2.2. Diagrama de Van Krevelen .....	30
Figura 2.3. Procesos de conversión de la biomasa .....	32
Figura 2.4. Hitos en el desarrollo de la gasificación .....	34
Figura 2.5 Capacidad de gasificación a nivel mundial.....	34
Figura 2.6. Mecanismo simplificado de la conversión de biomasa.....	36
Figura 2.7. Constantes de equilibrio de reacciones de gasificación vs temperatura (a) y $1000/\text{Temperatura}$ (b) .....	39
Figura 2.8. Tecnologías de gasificación .....	43
Figura 2.9. Rango de utilización de las tecnologías de gasificación.....	44
Figura 2.10. Esquema de operación del reactor de corrientes ascendentes (Updraft)...	45
Figura 2.11. Esquema de operación del reactor de corrientes descendentes (Downdraft) .....	46
Figura 2.12. Esquema de operación del reactor de corrientes cruzadas .....	47

Figura 2.13. Esquema de operación del reactor de lecho fluidizado burbujeante (BFB). .....	49
Figura 2.14. Esquema de operación del reactor de lecho fluidizado circulante (CFB) . .	50
Figura 2.15. Esquema de operación del reactor de flujo arrastrado.....	51
Figura 2.16 Componentes principales de una central en ciclo combinado.....	55
Figura 2.17. Diagrama básico de un IGCC. ....	57
Figura 2.18. Diagrama general de un proceso .....	58
Figura 2.19. Superficie de respuesta (Izq.) y gráfico de contorno (Der.).....	61
Figura 2.20. Restricción de las variables de una mezcla. ....	62
Figura 3.1. Bomba calorimétrica de combustión de oxígeno Parr 1108.....	71
Figura 3.2. Recipiente y cápsula de la bomba calorimétrica. ....	72
Figura 3.3. Molino de cuchillas y dimensiones finales.....	73
Figura 3.4. Sistema de aire comprimido.....	74
Figura 3.5. Sistema de adquisición de temperatura. ....	75
Figura 3.6. Sistema de filtros.....	76
Figura 3.7. Analizador Gasboard 3000L.....	76
Figura 3.8. Reactor de gasificación .....	79
Figura 3.9. Esquema del sistema de gasificación. 1) gasificador, 2) filtros, 3) analizador de gases, 4) módulo de adquisición de temperatura.....	80
Figura 3.10. Diagrama de flujo del experimento.....	84
Figura 4.1. Perfil de temperatura tipo del proceso.....	86
Figura 4.2. Perfil de concentración y temperatura en gasificación de madera de pino. .	87

Figura 4.3. Perfiles de concentración de CO y CO <sub>2</sub> para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% .....	88
Figura 4.4. Perfiles de concentración de H <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% .....	89
Figura 4.5. Producción de gas para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30%.....	91
Figura 4.6. Perfiles de concentraciones en función de la temperatura para 100% madera (W) y mezcla 80%-20% (MX <sub>80-20</sub> ). .....	92
Figura 4.7. Producción de gases en función de la temperatura para 100% madera (W) y mezcla 80%-20% (MX <sub>80-20</sub> ).....	93
Figura 4.8. Producción de Biocarbón en función de ER (Izq.) y de la Temperatura (Der.) .....	95
Figura 4.9. Alquitranes en función de ER (Izq.) y de la temperatura (Der.).....	96
Figura 4.10. Poder calorífico inferior (LHV) para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% .....	97
Figura 4.11. Diagrama planta 320 MW.....	99
Figura 4.12. Esquema del sistema de gasificación thermoflex.....	101

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1. Principales países consumidores de energía en 2016 .....	20
Tabla 2. Composiciones de biomاسas (análisis último).....	28
Tabla 3. Composiciones de biomاسas (análisis próximo).....	28
Tabla 4. Constantes de equilibrio de reacciones.....	39
Tabla 5. Características de los reactores principales operando con biomasa.....	52
Tabla 6. Principales ventajas y desventajas de los reactores .....	53
Tabla 7. Poder calorífico de la biomasa .....	72
Tabla 8. Valores promedio análisis próximo, último y de cenizas de la madera de pino y pasto .....	78
Tabla 9. Niveles de los factores. ....	83
Tabla 10. Parámetros de operación planta de 320MW .....	100
Tabla 11. Parámetros principales de las configuraciones. ....	101
Tabla 12. Parámetros de operación planta de ciclo combinado.....	103
Tabla 13. Parámetros principales de las configuraciones de ciclo combinado.....	104



## 1. INTRODUCCIÓN.

Los combustibles fósiles actualmente representan la mayor fuente de energía primaria en el mundo y se espera que esta tendencia se conserve para el año 2040. Con un comportamiento similar, en Centro y Sur América entre el 70% y 90% del consumo final de la energía es soportado con uso del petróleo, gas natural y carbón. Estos niveles de utilización de combustibles fósiles están ligados directamente a la generación de gases de efecto invernadero, los cuales son una de las mayores preocupaciones debido a su influencia en el incremento de la temperatura promedio mundial. Es así como aparecen las energías renovables que tienen como principales objetivos, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y la reducción de la contribución de gases de efecto invernadero.

Dentro del sector energético, las energías renovables constituyen una alternativa cada vez mayor, generando cerca del 14% de la energía mundial y con una proyección de aumento promedio anual cercana al 2% como resultado de incentivos gubernamentales y de avances tecnológicos [6]. Actualmente cerca del 40% de la energía renovable proviene de la biomasa, lo que permite evidenciar una gran oportunidad de crecimiento con la inclusión de nuevos procesos y el aumento de la eficiencia de los métodos existentes para el aprovechamiento de residuos biomásicos [7]. La generación de residuos a nivel global es un resultado relacionado con la urbanización, desarrollo económico y el crecimiento de la población. Entre más próspera y más poblada se encuentre una región mayor es la generación de productos y servicios, al igual que aumenta la cantidad de residuos que deben ser manejados mediante tratamiento y/o eliminación. De acuerdo con el banco mundial la generación de residuos en el planeta aumentará de 900 millones de toneladas/año en 2016 a 1200 millones de toneladas/año



en el 2030 [1], [2]. La composición de estos residuos varía incluso al interior de regiones relativamente pequeñas como resultado de las diferencias en las actividades de la población, sin embargo, de forma general la figura 1.1 muestra las composiciones promedios global y en Latinoamérica [1], [2], [8]. En esta figura se puede apreciar que cerca del 50% de los residuos generados en el planeta son orgánicos y por tanto susceptibles de ser utilizados para procesos de transformación térmica.

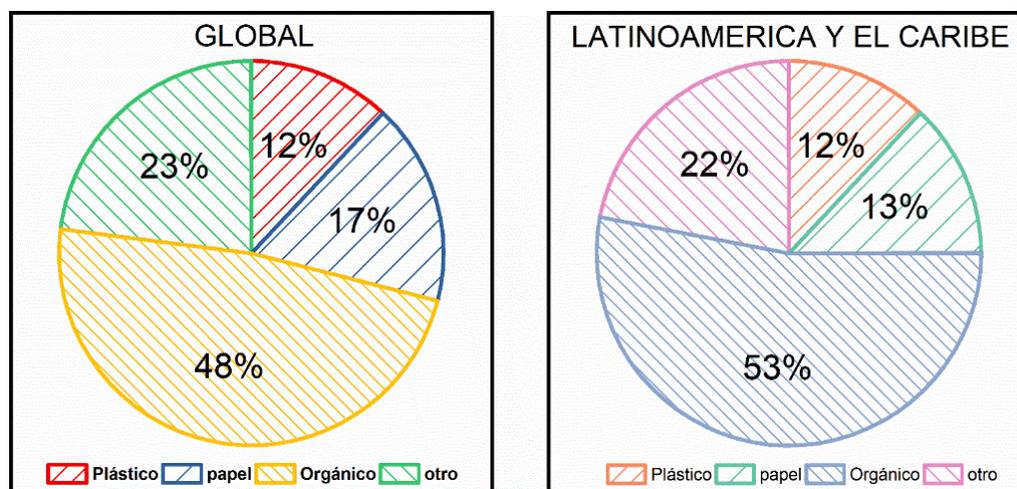


Figura 1.1. Composición de residuos a nivel Global (Izq.) y en Latinoamérica (Der.) [2].

Existen diferencias igualmente en los niveles de material volátil, carbono fijo, cenizas y humedad de los residuos biomásicos, siendo la humedad en la mayoría de los casos cercana al 50% para residuos mixtos (cocina, papel, textiles) y para residuos forestales entre 15% y 20% aproximadamente, el material volátil oscila entre 50 y 80% para la mayoría de los casos reportados [8]–[16]. Estas variaciones en conjunto con los



demás parámetros que gobiernan los procesos de transformación generan las diferencias que se obtienen en los procesos de transformación térmicos.

A continuación, se muestra el marco general de la situación energética como medio para sustentar la importancia del desarrollo de tecnologías y procesos que contribuyan al fortalecimiento de las energías renovables y en especial, el de procesos de conversión que permitan aprovechar los niveles de producción de residuos biomásicos del planeta.

### **1.1 Energía y medio ambiente.**

Actualmente el consumo de energía mundial es cercano a los 606 peta julios y de acuerdo con la *U.S. Energy Information Administration* para el año 2040 alcanzará los 776 peta julios (Figura 1.2). Además, las emisiones de carbón relacionadas con este consumo energético en el mundo, pasarán de 33.000 millones de toneladas anuales en 2015 a cerca de 40.000 millones de toneladas anuales en el año 2040 [6]. Esto representa un aumento sostenido del 1% durante los próximos 20 años en la contribución promedio de CO<sub>2</sub> a la atmósfera terrestre, de los cuales como se muestra en la figura 1.3 un gran porcentaje se atribuyen a la creciente industrialización, población y demanda energética de los países menos desarrollados (no-OECD). Este aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> es una de las principales causas a las que se atribuye el aumento en la temperatura promedio global, como resultado del llamado efecto invernadero que atrapa parte de la radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre. En general la concentración de los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.) se ha incrementado por diversos motivos, pero una de las principales razones es el uso de combustibles fósiles para la producción de la energía que se utiliza en todas las actividades a nivel mundial. El efecto



invernadero se ha convertido en uno de los problemas ambientales de mayor interés a nivel internacional y ha impulsado la generación de energías alternativas que permitan disminuir las emisiones a la atmósfera, además de mitigar la dependencia de los combustibles fósiles.

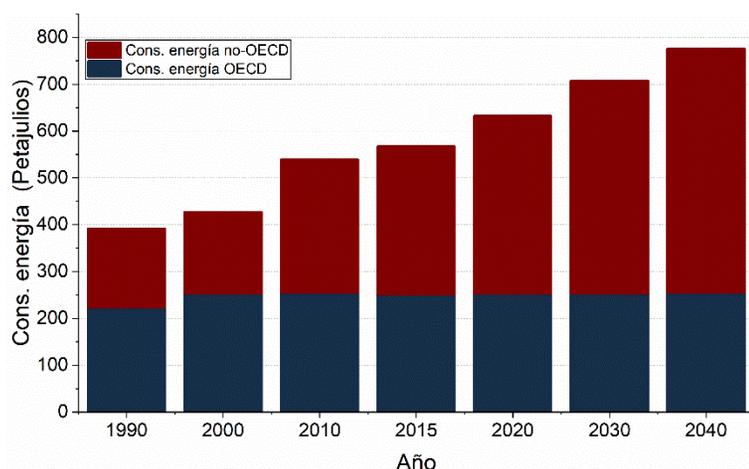


Figura 1.2. Proyección del consumo de energía mundial 2020 a 2040 [1], [2].

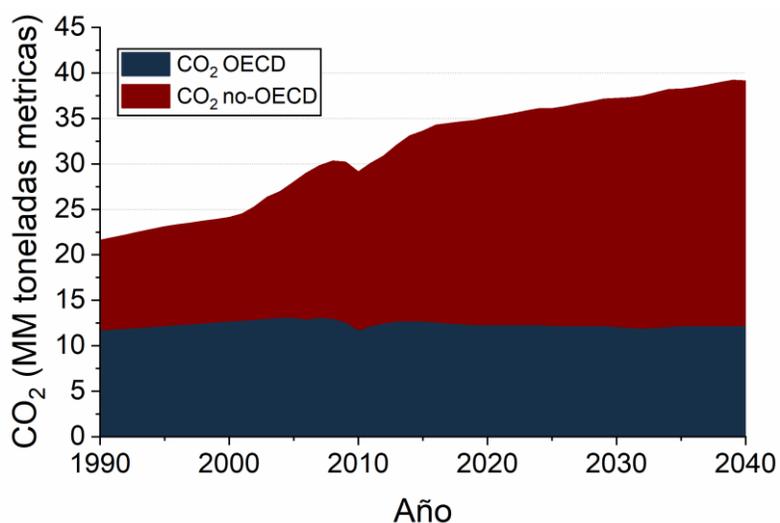


Figura 1.3. Emisiones de carbono asociadas con la energía 2020 a 2040 [2].



Los combustibles biomásicos (agrícolas, forestales y municipales) se convierten en una alternativa viable de sustitución a los combustibles convencionales, como una fuente de energía renovable usando diferentes procesos de transformación térmica, en los que la contribución de CO<sub>2</sub> final a la atmósfera se ve reducida sustancialmente, además del beneficio de utilizar materia prima que originalmente sería depositada en vertederos con sus respectivas implicaciones ambientales.

### 1.1.2 SITUACION ENERGÉTICA MUNDIAL.

La producción mundial de energía primaria en el año 2016 fue de 13.761 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) de los cuales el 81% corresponden a combustibles fósiles[17]. Esta cifra representa una disminución del 0.6% respecto a la producción en el 2015 y muestra que por primera vez en los últimos 15 años la producción de energía basada en combustibles fósiles tuvo una disminución a nivel global.

Por su parte las energías renovables aumentaron su contribución al total de la producción de energía en un 0.5% entre el año 2015 y el 2016, con un 2% para la energía hidráulica, 10% para los biocombustibles y 2% para otras renovables (geotérmica, solar, eólica). La figura 1.4 (izq) muestra la producción por regiones en el año 2016, en ella los países pertenecientes a la *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) contribuyen con la mayor producción de energía, seguidos de cerca por los países de Asia no miembros de la OECD. En general la producción de energía no se distribuye uniformemente y para cada combustible utilizado normalmente menos de 5 países generan casi la mitad de la producción mundial (Figura 1.4 der).

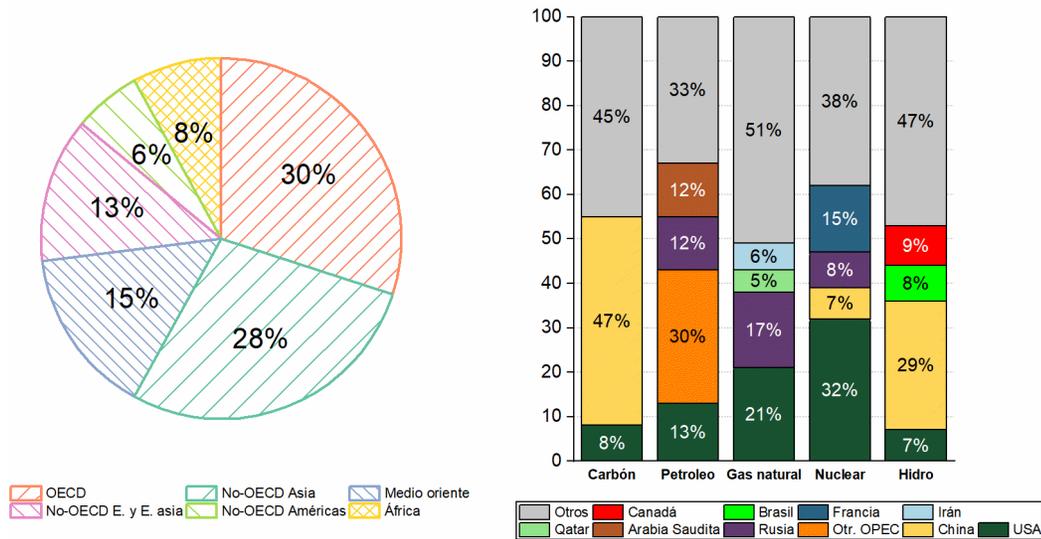


Figura 1.4. Producción total de energía por región (izq.) y mayores productores de energía por combustible (der.) [17].

Por otra parte, en la actualidad la demanda de energía mundial está altamente concentrada y 10 países consumen el 62% de la producción mundial (Tabla 1), de los cuales los 5 primeros generan 48% del producto interno bruto del planeta, tienen el 44% de la población mundial y consumen el 52% de la energía.

### 1.1.3 SITUACION ENERGÉTICA EN AMÉRICA.

De acuerdo con las cifras de la agencia internacional de energía, la producción de energía en el continente americano en 2016 fue de 3390.66 MMtep como se aprecia en la figura 1.5, donde el carbón, petróleo y gas natural representan la mayor contribución y los biocombustibles alcanzan cerca del 8% del total de la producción con 257.46 MMte,



lo que se logró con un esfuerzo colectivo de las naciones para disminuir las emisiones y promover la sostenibilidad del sector energético[17].

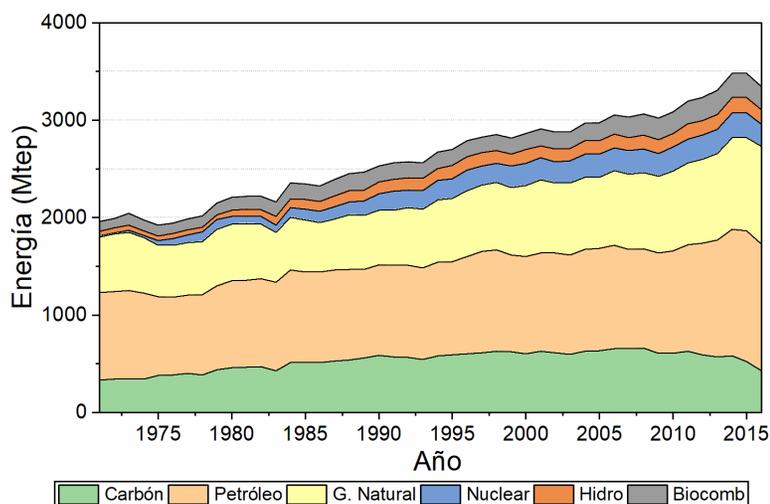


Figura 1.5. Producción de energía en América.[17]

Tabla 1. Principales países consumidores de energía en 2016 [17].

País	Consumo de energía (Mtep)	Contribución (2016) (%)
Rep. China	2958	21.5
Estados Unidos	2167	15.75
India	862	6.26
Rusia	732	5.32
Japón	426	3.1
Alemania	310	2.25
Brasil	285	2.07
Corea	282	2.05
Canadá	280	2.03
Irán	248	1.80
Otros	5211	37.87
<b>Mundial</b>	<b>13761</b>	<b>100</b>



La situación energética y de residuos presentada hasta ahora, son la base sobre la que se sustenta la presente investigación, de la cual se muestran los objetivos principales a continuación:

## **1.2 Objetivos de la Investigación.**

### ***Objetivo General.***

Estudiar el comportamiento de las distintas variables térmicas e hidrodinámicas de la gasificación de residuos biomásicos municipales, en la producción de gas de síntesis potencialmente utilizable como sustituto de combustibles fósiles.

### ***Objetivos Específicos.***

- Identificar el potencial de aprovechamiento energético de los tipos seleccionados de residuos municipales como portadores energéticos.
  
- Caracterizar los residuos biomásicos, determinando su capacidad de contribución al poder calorífico del gas combustible producto de la gasificación.
  
- Estudiar los efectos de los principales parámetros del proceso como temperatura y relación de aire/biomasa en la calidad del gas de síntesis cuando se utilizan mezclas de residuos forestales.
  
- Estudiar el comportamiento de los residuos característicos de la gasificación en función de la temperatura, la relación aire/biomasa y el tipo de mezcla utilizado.



### 1.3 Justificación.

Los residuos biomásicos pueden ser transformados mediante distintos procesos, siendo la gasificación uno de los de mayor aceptación dentro de los últimos años, debido a su mayor eficiencia comparada con procesos como la pirólisis y la combustión. La gasificación de biomasa se ha centrado principalmente en el aprovechamiento de residuos agrícolas como el bagazo de caña, la cascarilla de arroz, y residuos de la palma entre otros. Sin embargo, los residuos sólidos biomásicos provenientes de las distintas actividades cotidianas de la población son susceptibles de ser aprovechadas como material para el proceso de generación de energía, si se realiza el tratamiento adecuado de estos y se utilizan sistemas adecuados para su conversión energética.

Esta alternativa permitiría aprovechar gran parte de las toneladas de residuos orgánicos que son generados anualmente, desde residuos forestales hasta residuos municipales, y de los cuales un alto porcentaje puede ser utilizado con fines energéticos. Es debido a estas grandes oportunidades que se hace necesario comprender detalladamente la fenomenología de los procesos de transformación de residuos en portadores energéticos como el gas de síntesis.

Por otro lado, la gasificación de residuos biomásicos puede contribuir a la disminución de la cada vez creciente necesidad energética a nivel mundial y en especial en países como México donde el índice de dependencia energética (relación entre la producción y el consumo nacional de energía) es cercano a la unidad. En México se generan alrededor de 70 millones de toneladas anuales de residuos que en su mayoría no se aprovechan y de los cuales un alto porcentaje son susceptibles de utilizarse en



procesos de conversión energética y que constituyen una fuente para la obtención de recursos.

Basados en esta necesidad, esta propuesta centra su contribución en la caracterización de residuos municipales biomásicos específicamente madera de pino y pasto kikuyo, por lo que se orienta en la obtención de los potenciales energéticos de la biomasa y de los productos del proceso de gasificación para la producción de gas de síntesis y/o biocarbón. Lo anterior con el fin de obtener diferentes tipos de gas de síntesis que permitan tener una mejor descripción del fenómeno y conocer alternativas de uso dentro de los diferentes residuos biomásicos disponibles.

Finalmente, con el desarrollo de esta investigación se establecerá un precedente para futuras propuestas encaminadas a la transformación de recursos biomásicos municipales en gas de síntesis y/o biocarbón que contribuyan a la disminución del impacto medioambiental de la disposición final de los residuos y a un índice de dependencia energética favorable.

#### **1.4 Hipótesis.**

Es posible mejorar el proceso de gasificación de residuos biomásicos mediante la utilización de mezclas de distintas biomásas, en las que se favorezca la generación de productos combustibles con alta concentración de los gases que permiten alcanzar un mayor poder calorífico. Lo anterior con el fin de aprovechar los potenciales energéticos del procesamiento de este tipo de residuos, para lo cual es necesario evaluar el desempeño de la gasificación y en especial conocer las características del gas de síntesis



que se obtiene bajo distintos escenarios de transformación térmica, como la mezcla de residuos en distintas proporciones con el fin de aprovechar los potenciales de transformación y evaluar las características de los gases combustibles.

### **1.5 Estructura de la Tesis.**

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se muestra una visión general de la biomasa y sus principales propiedades, los procesos de transformación energética disponibles en la actualidad y en especial las transformaciones termoquímicas entre las que se encuentra la gasificación, de la cual aparecen sus distintas etapas y reacciones. Luego se mencionan las tecnologías susceptibles de ser utilizadas para gasificar biomásas, el estado del arte de la gasificación de residuos con el objetivo de tener una visión general del nivel de las investigaciones actuales en esta área y finalmente aparecen las técnicas de diseño de experimentos usadas para llevar a cabo la investigación. En el capítulo 3 se describe la biomasa y la instalación experimental utilizados, incluyendo los equipos para el pretratamiento de la biomasa, control del proceso y medición de variables que gobiernan la gasificación. Al finalizar el capítulo se describe el diseño experimental utilizado, con las distintas variables que involucran la presente investigación. En el capítulo 4 se presentan los resultados alcanzados con la aplicación del diseño experimental, además de la discusión correspondiente sobre las implicaciones de los descubrimientos realizados durante el estudio. Finalmente aparecen dos casos de estudio de los posibles resultados que se pueden obtener con la inclusión de un proceso de gasificación en una central de generación de potencia. En el capítulo 5 se recogen las conclusiones obtenidas de esta tesis y se proponen una serie de trabajos que pueden ser realizados en futuras investigaciones.



## 2. MARCO DE REFERENCIA.

### 2.1 Biomasa.

El término biomasa varía de significado dependiendo del campo de discusión en el que se emplea. Por ejemplo, en aplicaciones de la biología biomasa hace referencia a la cantidad total de material viviente en un hábitat, población o muestra de estudio. Por otra parte, en ingeniería biomasa se refiere al material orgánico que tiene almacenada energía química. Incluye madera, residuos de madera, pasto, maíz, caña de azúcar, arroz y muchos otros subproductos de los procesos agrícolas y de actividades de la población.

Actualmente, existe gran interés por utilizar la biomasa para obtener energía por su disponibilidad, carácter renovable y capacidad de sustitución parcial de los combustibles fósiles, que tardan millones de años en formarse y están sujetos a terminarse a medida que se consumen en los distintos procesos de las actividades en el planeta.

La biomasa es considerada una fuente renovable de carbono. Sin embargo, en términos generales los combustibles fósiles también lo son, el tiempo es lo que determina si una fuente de carbono puede o no ser considerada renovable. Los combustibles fósiles serían renovables si la sociedad pudiera esperar los miles de millones de años necesarios para su formación. La biomasa por su parte es una de las fuentes de carbono que más rápidamente se renueva y permite su continua disponibilidad.



En la figura 2.1 se muestra un esquema de la trayectoria principal en la transformación de la biomasa, en específico para residuos de madera. Se puede apreciar que parte de la generación de contaminantes es absorbida dentro de un ciclo, lo cual es una gran ventaja en la utilización de estos recursos.

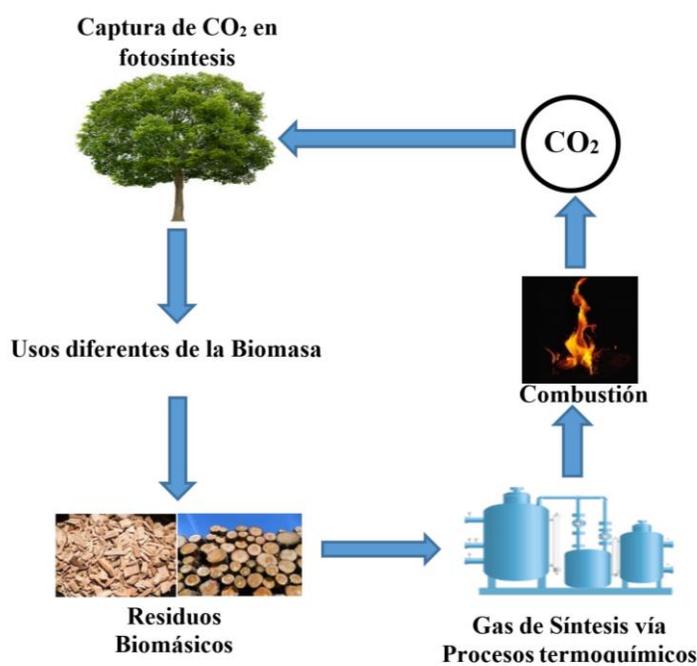


Figura 2.1. Esquema de las transformaciones de la biomasa (elaboración propia).

## 2.2 Propiedades de la Biomasa.

### 2.2.1 Análisis último.

La composición de la biomasa define su potencial de aprovechamiento energético. Es así como el contenido de ciertos elementos químicos afecta de forma significativa los



resultados alcanzados en la gasificación. El análisis último permite conocer el contenido de Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N) y Sulfuro (S) de la biomasa, usualmente expresados en % de masa en base seca (wt% dry) o en % de masa en base seca sin cenizas (wt% daf).

Dependiendo del tipo de biomasa, la composición química puede variar significativamente al igual que varía el contenido de cenizas. Para la madera por ejemplo la composición típica en promedio toma los siguientes valores: Carbono 40-50%, Hidrógeno 6%, Oxígeno <40%, Nitrógeno <1% y Sulfuro cercana a 0.5%. La tabla 2 muestra la composición de algunas biomásas [18].

### 2.2.2 Análisis próximo.

Al igual que para otros combustibles sólidos, es posible realizar un análisis próximo a la biomasa con el objetivo de conocer su humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo. Las cenizas son expresadas normalmente en % peso en base seca, el agua en % peso base húmeda, el material volátil en % peso base seca o en % peso base seca sin cenizas.

El carbono fijo se calcula basado en los demás componentes para completar el 100% de composición. La tabla 3 muestra el análisis próximo de diferentes tipos de biomásas en base húmeda [19]–[21].



Tabla 2. Composiciones de biomásas (análisis último)[18].

	Hardwood (%wt)	Softwood (%wt)	Mix. (%wt)
<b>Carbono</b>	49,7	51,2	50,8
<b>Hidrógeno</b>	5,8	5,9	5,9
<b>Oxígeno</b>	42,7	41,9	40,8
<b>Nitrógeno</b>	0,2	0,1	0,2
<b>Sulfuro</b>	171,2 mg kg <sup>-1</sup>	270,9 mg kg <sup>-1</sup>	243,3 mg kg <sup>-1</sup>
<b>Ceniza</b>	1,74	0,99	2,33
<b>HHV</b>	19811 kJ kg <sup>-1</sup>	20331 kJ kg <sup>-1</sup>	19947 kJ kg <sup>-1</sup>
<b>LHV</b>	18616 kJ kg <sup>-1</sup>	19128 kJ kg <sup>-1</sup>	18740 kJ kg <sup>-1</sup>

Tabla 3. Composiciones de biomásas (análisis próximo) [19]–[21].

	Eucalyptus (%wt)	Pine (%wt)	Pine Pellets (%wt)
<b>Cenizas</b>	1,34	0,53	0,4
<b>Material volátil</b>	83,01	84,94	82,6
<b>Carbono fijo</b>	15,66	14,53	17
<b>Humedad</b>	12,23%	7,94%	5,10%

### 2.2.3 Características de la combustión.

El poder calorífico de una sustancia corresponde al calor liberado durante la combustión de una cantidad específica de esta, suponiendo que los productos de la



combustión son enfriados hasta la temperatura inicial de la sustancia. Este contenido energético es conocido como poder calorífico superior o HHV por sus siglas en inglés (Higher heating value) y puede ser medido utilizando un dispositivo denominado bomba calorimétrica. El poder calorífico superior es corregido con el análisis del contenido de humedad de la sustancia analizada y al valor obtenido se le llama poder calorífico inferior o LHV (Lower heating value). Para la biomasa el LHV se encuentra alrededor de los 20 MJ/Nm<sup>3</sup>, sin embargo, el valor exacto varía dependiendo de la procedencia del combustible. Diferentes correlaciones para determinar el poder calorífico han sido propuestas a lo largo de los años[22]–[25], algunas basadas en el análisis último y otras en el análisis próximo de la biomasa. Las ecuaciones 2.1 y 2.2 muestran las correlaciones propuestas por Chun-yang en 2011 [26] para estimar el poder calorífico de biomásas con niveles de error cercanos al 1%.

$$HHV \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0.1905 \cdot VM + 0.2521 \cdot FC \quad (2.1)$$

$$HHV \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0.2949 \cdot C + 0.8250 \cdot H \quad (2.2)$$

Donde VM es el material volátil, FC es el carbono fijo, C y H son la fracción másica de carbono y de hidrógeno en base seca.

La figura 2.2 muestra el diagrama propuesto por Van Krevelen, el cual representa el poder calorífico inferior, y las relaciones de H/C y O/C en el combustible. En esta figura se puede apreciar que en general las fuentes de biomasa tienen un rango similar de poder calorífico y que su valor difiere significativamente del reportado para el carbón, los valores



bajos de H/C y O/C en el carbón le permiten tener niveles más altos de poder calorífico. Las biomazas por su parte tienen menor concentración de C y consecuentemente poderes caloríficos inferiores respecto al Carbón. Sin embargo, la mayor disponibilidad de la biomasa en el mundo la convierte en una alternativa adecuada para procesos de transformación térmica.

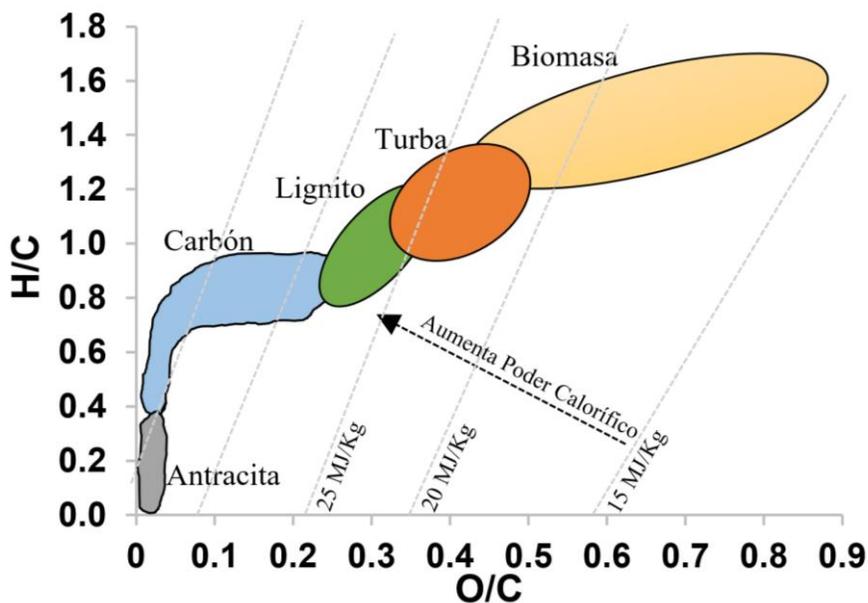


Figura 2.2. Diagrama de Van Krevelen [27].

## 2.3 Procesos de Transformación y Aprovechamiento Energético.

### 2.3.1 Proceso de conversión de la biomasa.

Los procesos de transformación utilizados para extraer energía de la biomasa deben ser elegidos considerando las características y la cantidad de biomasa disponible. La conversión de la biomasa se puede realizar por dos vías básicamente:



- Conversión termoquímica, incluye tres métodos que se basan en la combustión directa, pirólisis y gasificación, de los cuales sus productos principales pueden ser gas, líquido, carbón vegetal y/o energía térmica (ver figura 2.3), dependiendo de la tecnología empleada.
- Conversión Bioquímica, se basa en la descomposición de la biomasa, utilizando microorganismos con la presencia o ausencia de oxígeno, en este caso la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia como se muestra en la figura 2.3.

### 2.3.2 Conversión termoquímica.

En la figura 2.3, los procesos termoquímicos principales son la combustión, gasificación y pirólisis. Las diferencias principales entre estos procesos radican en la cantidad de agente oxidante utilizado y los niveles de producción de los diferentes subproductos que se obtienen.

La combustión es el proceso más utilizado para obtener energía de diferentes fuentes. Teóricamente consiste en la oxidación completa de un combustible, y puede ser utilizada en una amplia variedad de biomásas, aunque su eficiencia disminuye cuando el contenido de humedad supera el 50%. Uno de los principales parámetros en la combustión es el exceso de aire, que se define como la relación entre el aire utilizado durante el proceso y el aire necesario para la combustión estequiométrica. Durante la combustión, los procesos de secado, volatilización, reducción y oxidación ocurren simultáneamente y la energía química del combustible es transformada en calor sensible de los gases productos, los cuales son principalmente vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno. Normalmente el calor que se obtiene es utilizado dentro de ciclos de potencia.

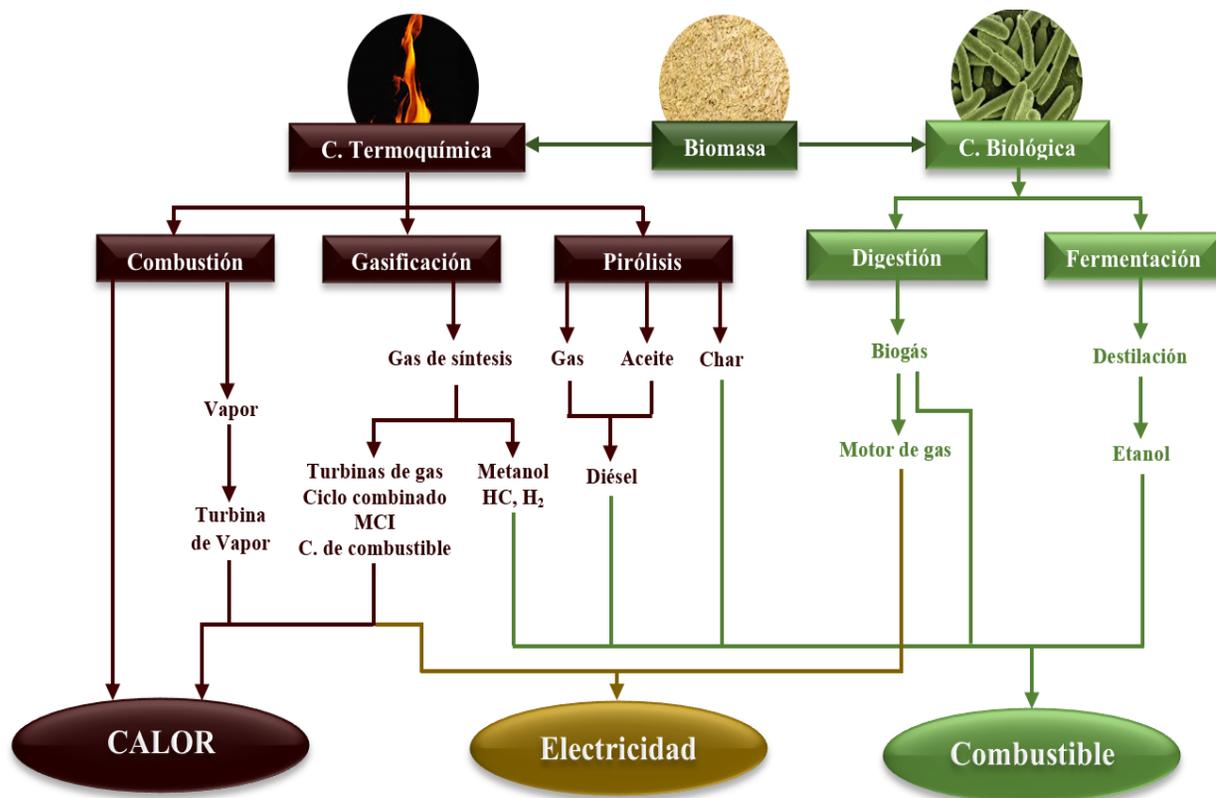


Figura 2.3. Procesos de conversión de la biomasa (elaboración propia).

El proceso de pirólisis consiste en una descomposición térmica en ausencia de oxígeno y de cualquier halógeno. La temperatura durante el proceso puede variar entre 200°C y 700°C. Los productos de la pirólisis son principalmente hidrocarburos líquidos, además de gases combustibles y algunos sólidos. La cantidad de cada producto depende de parámetros del proceso como la temperatura, presión, tamaño de partícula y composición del combustible alimentado. La pirólisis de biomasa incluye reacciones endotérmicas y exotérmicas, usualmente el proceso es endotérmico para temperaturas debajo de 450°C y exotérmico por encima de esta.



La gasificación es el proceso mediante el cual un combustible es degradado por reacciones térmicas en presencia de cantidades limitadas de agente oxidante (oxidación parcial-pirólisis), para generar un producto gaseoso combustible compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados (alquitranes). El agente gasificante es usualmente aire, aunque también existen otros procedimientos que utilizan vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de estos, controlando el proceso con el objetivo de maximizar la producción de hidrógeno, metano y monóxido de carbono. Es preferible que la biomasa a gasificar esté seca y fragmentada con el objetivo de maximizar el rendimiento del proceso.

### 2.3.3 Gasificación.

La gasificación no es una tecnología nueva, fue investigada por primera vez en 1659 por Thomas Shirley [28], [29] aplicada a procesos en minas de carbón. La figura 2.4 presenta algunos de los logros más importantes en el desarrollo de esta tecnología. De acuerdo con la tendencia de desarrollos en el campo de la generación de energía, las etapas de la tecnología de gasificación continúan enfocándose al *syngas*, con un número cada vez creciente de aplicaciones en energía, calor, combustibles y productos químicos [28]. En la figura 2.5 se ilustra el crecimiento histórico de la capacidad de gasificación en el mundo, así como la proyección para los próximos años, de la cual se puede decir que presenta un aumento significativo que puede ser atribuido a nuevas tecnologías y nuevas políticas y programas de apoyo a la utilización de energías renovables en respuesta a los intereses de la comunidad internacional.

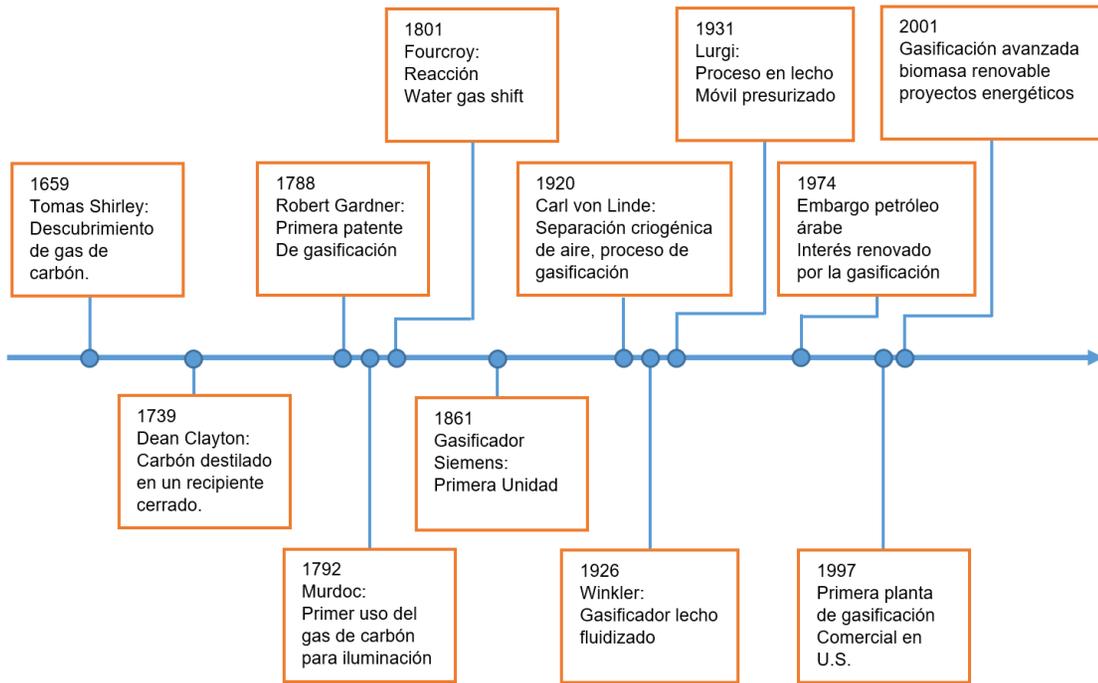


Figura 2.4. Hitos en el desarrollo de la gasificación [28].

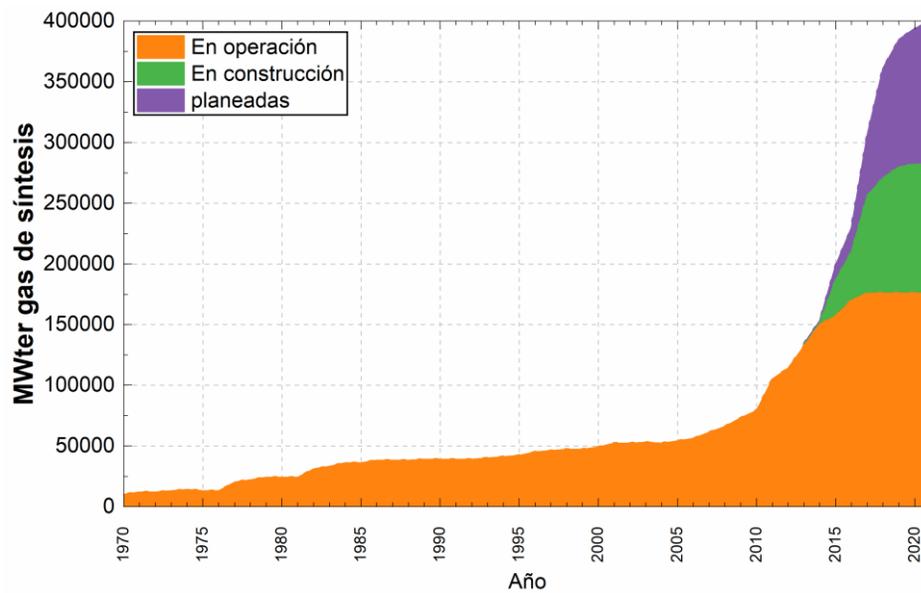


Figura 2.5 Capacidad de gasificación a nivel mundial [29].

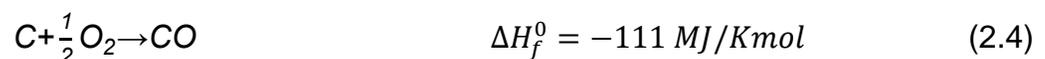
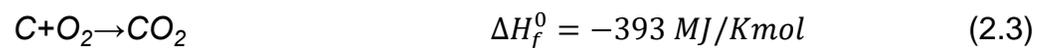


Definida como la conversión de un combustible sólido a gas energético ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) mediante la oxidación parcial a elevadas temperaturas, la gasificación representa una de las tecnologías más prometedoras a futuro, permitiendo transformar materiales de bajo o nulo valor en un combustible útil. El gas energético se produce de manera controlada en un reactor en donde un combustible sólido sufre transformaciones físicas y químicas. El proceso puede ser dividido en 5 subprocesos:

- Secado, en donde la humedad contenida en la biomasa es retirada mediante el aumento de la temperatura.
- Pirólisis o volatilización: el combustible es térmicamente degradado en gas, compuestos condensables y carbón.
- Los gases y alquitranes son sujetos a degradación térmica.
- El carbón es gasificado mediante dióxido de carbono o vapor de agua.
- Los subproductos (gas, alquitrán y carbón) son oxidados parcialmente.

La figura 2.6 muestra el proceso de gasificación. La etapa final tiene como productos monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrógeno y agua.

Las reacciones principales que involucra el proceso de gasificación se muestran a continuación. La zona de oxidación se caracteriza por la reacción heterogénea de combustión (ecuación 2.3) y la oxidación parcial (Ecuación 2.4).





Estas dos reacciones son exotérmicas y generan el calor necesario para los distintos procesos de la gasificación (secado, pirólisis y reducción).

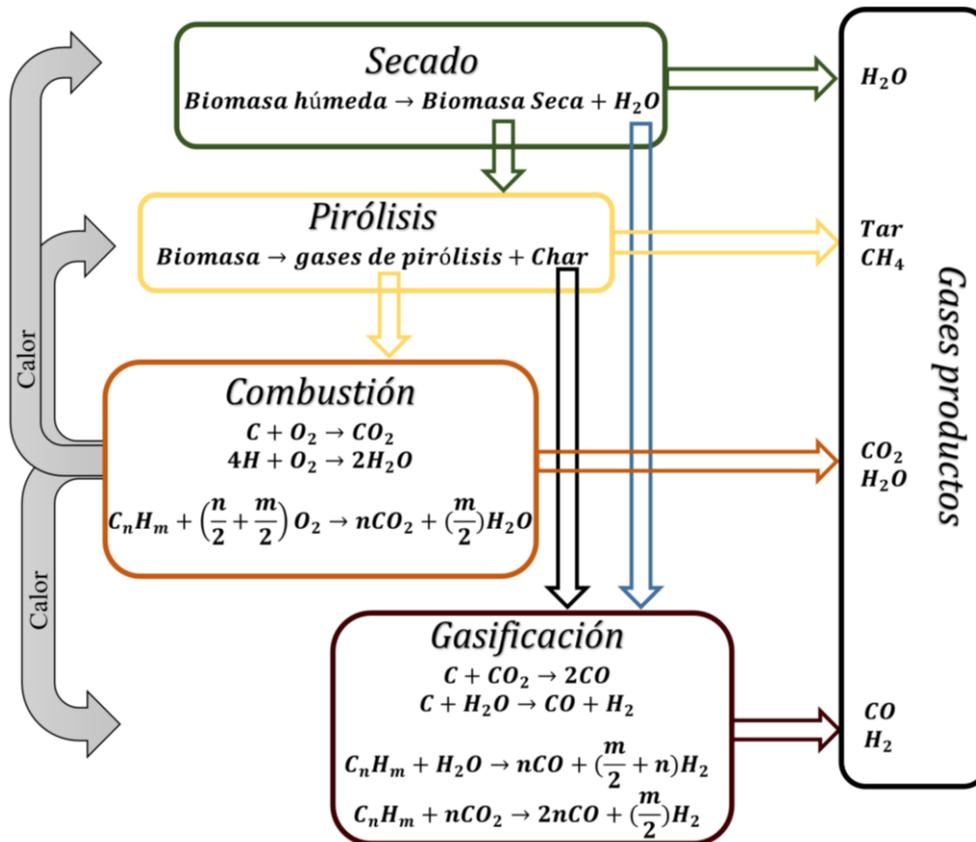
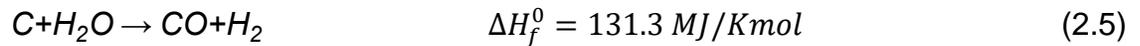


Figura 2.6. Mecanismo simplificado de la conversión de biomasa [28].

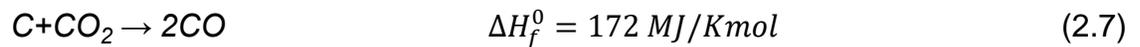
El vapor de agua usado en la gasificación que se obtiene durante el proceso de secado, es introducido como agente gasificante o incluso puede ser obtenido durante algunos mecanismos de reacción, de acuerdo con las reacciones reversibles agua-gas (2.5 y 2.6). Estas reacciones en conjunto con la reacción de Boudouard (2.7) son las principales



ecuaciones endotérmicas. Las anteriores reacciones permiten el aumento de la concentración de monóxido de carbono y de hidrógeno en el gas final, especialmente a altas temperaturas y bajas presiones.



Reacción de Boudouard:



Muchos otros mecanismos de reacción ocurren durante la gasificación, es así como se pueden utilizar cinéticas de reacción que incluyen en ocasiones más de 100 reacciones. Sin embargo, algunas de las reacciones consideradas importantes en la gasificación se listan a continuación:

Reacción water-gas shift:

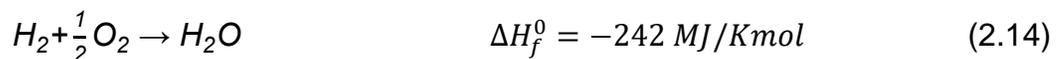
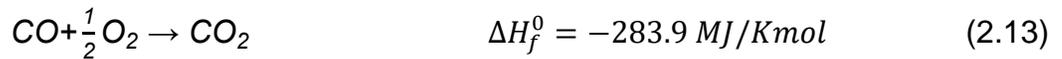


Producción de metano:





Incluso cuando el proceso ocurre en condiciones por debajo de la estequiometría, una fracción del monóxido de carbono y del hidrógeno pueden ser completamente oxidadas de acuerdo con las ecuaciones 2.13 y 2.14, es importante hacer notar que estas reacciones reducen el poder calorífico del gas producto.



Las reacciones agua-gas y *water-gas shift* son fundamentales y en gran parte determinan la composición final del gas obtenido. La tabla 4 y la figura 2.7 muestran las constantes de equilibrio y la fuerte influencia que tiene la temperatura en estas reacciones.



Tabla 4. Constantes de equilibrio de reacciones [28], [29].

Reacción	Constante de equilibrio
Ecuación 2.3	$\log(K_p) = 9.1106 - \frac{8841.7}{T}$
Ecuación 2.5	$\log(K_p) = 17.644 - \frac{30260}{1.8T}$
Ecuación 2.7	$\log(K_p) = 9.595 - \frac{9141}{T} - 0.000224T$
Ecuación 2.8	$\log(K_p) = T_e(T_e(0.63508 - 0.29353T_e) + 4.1778) + 0.31688,$ $T_e = \left(\frac{1000}{T}\right) - 1$
Ecuación 2.10	$\log(K_p) = 2.93964 \ln(T_d) - \frac{10.0135}{T_d} + 12.63843 - 1.3069T_d + 0.07604T_d^2,$ $T_d = \frac{T}{1000}$
Ecuación 2.12	$K_p = 2.06 \times 10^{-5} e^{\frac{18400}{1.8T}}$

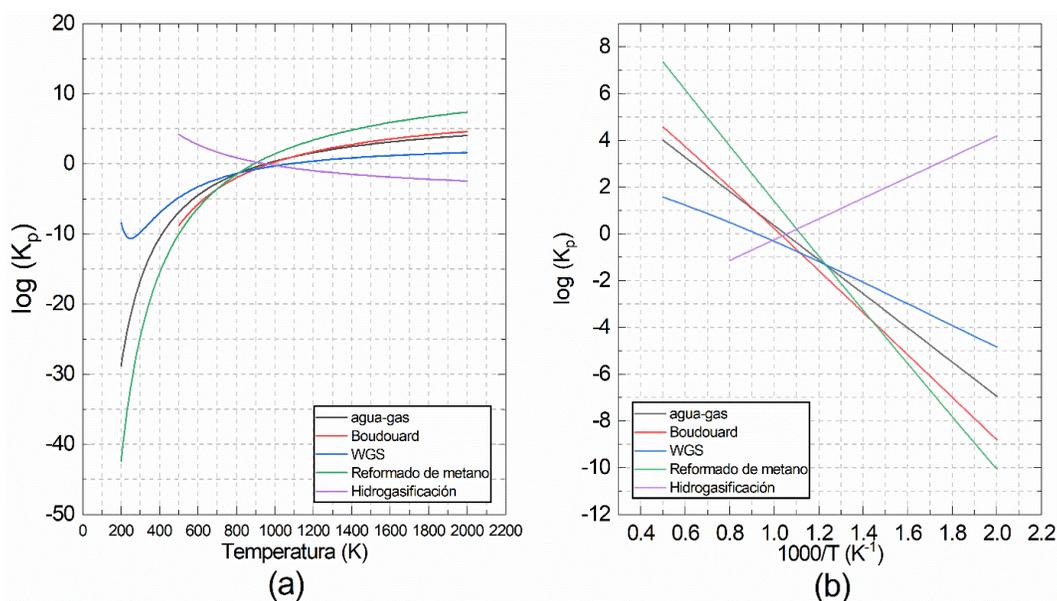


Figura 2.7. Constantes de equilibrio de reacciones de gasificación vs temperatura (a) y 1000/Temperatura (b) (elaboración propia).



Aunque es posible describir las reacciones más importantes ocurriendo durante la gasificación, en la práctica las diferentes sub-etapas ocurren simultáneamente y no es posible realizar el control del proceso adecuadamente.

Por otra parte, se puede estimar la composición final del gas considerando los valores de parámetros característicos que gobiernan el proceso y suponiendo que el tiempo de reacción es suficiente para alcanzar condiciones de equilibrio termodinámico. Los parámetros que gobiernan el proceso de gasificación son:

- Temperatura y presión.
- Flujo, humedad y composición de la biomasa.
- Tipo y cantidad de agente gasificante.
- Tipo de reactor empleado.

La temperatura de reacción es uno de los parámetros más importantes para la eficiencia global de la gasificación. Lo anterior se debe a que altas temperaturas favorecen las reacciones endotérmicas y afectan de manera directa sobre las fracciones de monóxido de carbono y de hidrógeno. Además, los alquitranes que resultan del proceso intermedio de pirólisis son en su mayoría craqueados térmicamente a temperaturas cercanas a 1000°C. Basándose en resultados numéricos y experimentales [30]–[37], es posible observar que la temperatura afecta la composición del gas producto hasta los 1100°C, por encima de este valor las diferentes fracciones del gas alcanzan



niveles de estabilización. Por su parte la presión tiene una menor influencia en la composición del gas y solamente cuando se utilizan muy altas presiones se observan modificaciones significativas [38]–[44].

La cantidad y el tipo de agente gasificante son también muy importantes en la gasificación. Aire, vapor, oxígeno puro y mezclas de estos pueden ser utilizados para esta función. El aire es la opción más utilizada debido a su disponibilidad y adicionalmente es menos costoso, sin embargo, el poder calorífico del gas es bajo debido al alto contenido de nitrógeno.

El oxígeno permite mejores rendimientos, pero es menos empleado debido a su alto costo y a las condiciones de seguridad necesarias en su manejo. El vapor es otra alternativa, aunque tiene un costo asociado con el calor necesario para su generación. Finalmente, el agente gasificante se cuantifica definiendo la relación entre la masa de agente suministrada y la masa necesaria para la combustión estequiométrica o frente a la cantidad de biomasa.

### 2.3.3.1 Relación de Equivalencia (ER)

Definida como la relación entre la masa de agente utilizada y la masa requerida para la combustión estequiométrica (Ecuación 2.15), este es el parámetro comúnmente utilizado en la gasificación cuando el aire o el oxígeno son el agente gasificante.

$$ER = \frac{m_{gas,actual}}{m_{stoich}} \quad (2.15)$$



Donde  $m_{\text{gas,actual}}$  es la relación aire combustible utilizada en la gasificación y  $m_{\text{stoich}}$  es la relación aire combustible calculada para el proceso estequiométrico. Para el caso de la gasificación con vapor se utiliza la relación de vapor a carbón SC (Steam to carbon ratio). Normalmente el ER se encuentra entre 0.2-0.3 cuando se utiliza biomasa, mientras que el SC varía de 1 a 3. Estos valores se escogen en función de la calidad del gas deseado, por ejemplo, al aumentar ER la cantidad de  $\text{CO}_2$  aumenta debido a la mayor disponibilidad de oxidante para la combustión, lo que resulta en un poder calorífico más bajo del gas producto.

#### *2.3.4 Tecnologías de la gasificación.*

El objetivo principal de las tecnologías de gasificación es la conversión eficiente de la energía almacenada en la biomasa en un gas utilizable dentro de un proceso productivo. La composición del gas y las impurezas presentes dependen como ya se mencionó, del agente gasificante y en general de las condiciones del proceso que son fuertemente influenciadas por la configuración en el reactor utilizado. Los reactores usados para los residuos biomásicos se pueden clasificar principalmente por el modo de interacción sólido-gas, que determinan la secuencia en que ocurren los subprocesos de la gasificación. La figura 2.8 presenta las categorías de los reactores para flujo arrastrado, lecho fijo y lecho fluidizado.

Cada una de estas alternativas presenta sus ventajas y características que la hacen apropiadas para diferentes escalas de generación del gas de síntesis. Como se puede apreciar en la figura 2.9 los reactores de lecho fijo tienen un rango de aplicación que va desde 10kW hasta 10MW, el lecho fluidizado desde 1 MW hasta 100 MW y el arrastrado desde los 50MW hasta 1000MW [45]–[48].



### 2.3.4.1 Lecho fijo.

Los reactores de lecho fijo han sido utilizados durante mucho tiempo en especial para la gasificación de carbón. Sus principales ventajas son las altas temperaturas en las que pueden operar y la simplicidad en su construcción, debido a que básicamente son un cilindro de metal recubierto de un material cerámico. Se pueden clasificar según la trayectoria de los flujos de biomasa y agente gasificante, en gasificadores de corrientes ascendentes (Updraft), descendentes (Downdraft) y de flujo cruzado (crossdraft).



Figura 2.8. Tecnologías de gasificación (elaboración propia).

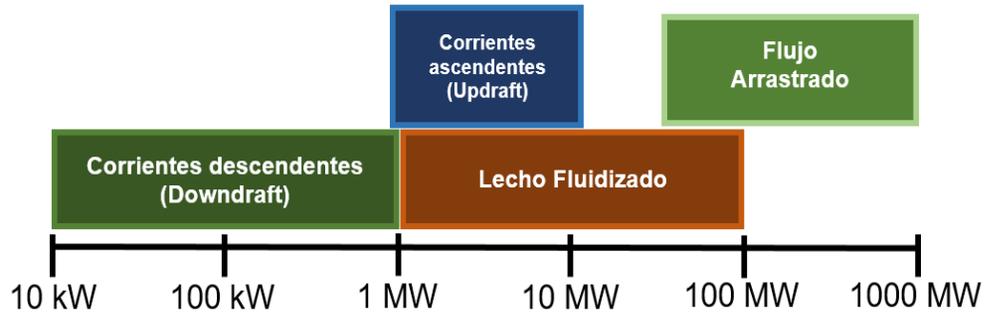


Figura 2.9. Rango de utilización de las tecnologías de gasificación [28].

Corrientes ascendentes (Updraft): Este tipo de reactor presenta un diseño simple en donde la biomasa es alimentada por la parte superior y el agente gasificante entra por el fondo pasando a través de una rejilla (Figura 2.10). La biomasa se desplaza por el reactor mientras ocurren los procesos de secado, volatilización, reducción/gasificación y finalmente oxidación.

El proceso de gasificación ocurre en la parte inferior del reactor y el gas producido sale por la parte superior con una temperatura alrededor de los 300°C. En esta configuración se obtienen altas eficiencias y el material particulado usualmente es bajo, debido al efecto de filtrado del lecho de biomasa por el cual pasa el gas en su camino a la salida del reactor. El aire es el agente gasificante comúnmente utilizado en reactores de corrientes ascendentes, y el poder calorífico del gas producto está alrededor de los 5 MJ/Nm<sup>3</sup>[49].

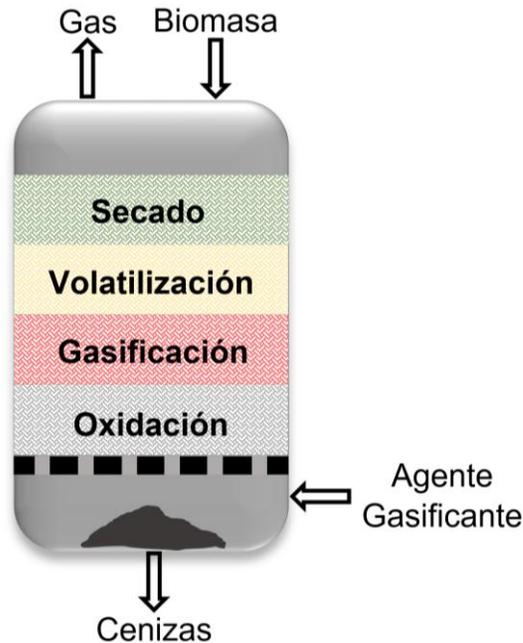


Figura 2.10. Esquema de operación del reactor de corrientes ascendentes (Updraft) [49].

Corrientes descendentes (Downdraft): En estos reactores la biomasa y el agente gasificante se mueven en la misma dirección, este último entra al gasificador a cierta distancia de la parte superior y se mezcla con los gases productos de la pirólisis mientras fluyen paralelamente hacia las zonas de oxidación y gasificación (Figura 2.11). El gas producto sale del gasificador pasando por la zona de mayor temperatura en el reactor, lo que permite el craqueo térmico de los alquitranes que se obtienen durante la pirólisis, resultando en niveles por debajo de  $3 \text{ g/Nm}^3$ . Por otra parte, se obtiene una eficiencia más baja debido a una temperatura de salida de los gases cercana a los  $800^\circ\text{C}$  y la concentración del material particulado es alta si se compara con los reactores ascendentes.

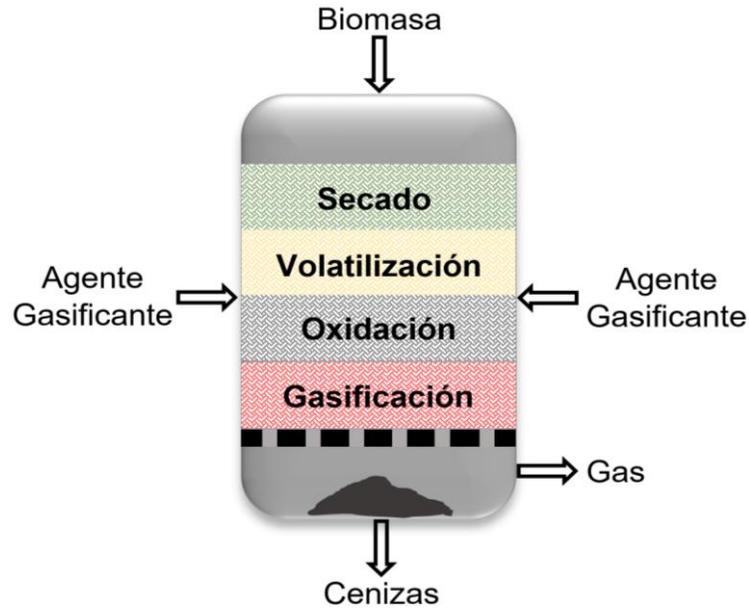


Figura 2.11. Esquema de operación del reactor de corrientes descendentes (Downdraft) [49].

**Corrientes cruzadas:** En un reactor de corrientes cruzadas la biomasa se alimenta por la parte superior, el agente gasificante entra lateralmente y el gas producto sale por el lado opuesto al ingreso del agente (Figura 2.12). El agente gasificante se introduce a alta velocidad en la zona de oxidación donde reacciona con parte del char dando lugar a temperaturas altas ( $>1500^{\circ}\text{C}$ ). Los gases se reducen a CO y  $\text{H}_2$  en la zona de gasificación.

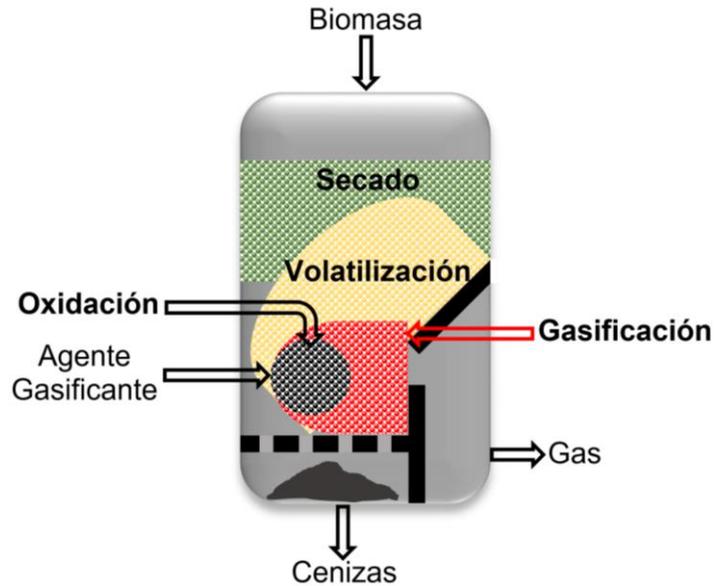


Figura 2.12. Esquema de operación del reactor de corrientes cruzadas [49].

Los procesos de secado y pirólisis ocurren por encima de la zona de alta temperatura y el calor necesario se transfiere desde la zona de oxidación por conducción. Este tipo de gasificadores no está diseñado para trabajar con combustibles de alto contenido de volátiles o cenizas, sin embargo, pueden usarse para humedades altas si la parte superior del reactor está abierta. Normalmente son utilizados para aplicaciones pequeñas (<10 kWe) debido a su corto periodo de arranque (<10 min) y buena respuesta a variaciones en la carga. La principal desventaja de este reactor es que el gas producto sale a alrededor de los 1000°C, lo que resulta en una baja eficiencia energética del proceso de gasificación.



#### 2.3.4.2 Lecho fluidizado.

Los reactores de lecho fluidizado fueron originalmente diseñados para gasificación de carbón, y tienen como principal ventaja una temperatura uniforme en la zona de conversión, lo cual es logrado con un pretratamiento adecuado de la biomasa para tener un tamaño de partículas pequeño y uniforme, además de utilizar un lecho de material inerte para mejorar la transferencia de calor. El lecho es fluidizado utilizando oxígeno, aire, vapor o una combinación de estos, lo que permite un mejor mezclado de la biomasa con los gases calientes del proceso. El secado, volatilización, oxidación y gasificación ocurren simultáneamente y de forma homogénea en la zona de conversión. El resultado es un gas de síntesis con un alto poder calorífico, de composiciones que oscilan entre 6-35% H<sub>2</sub>, 15-40% CO, 15-30% CO<sub>2</sub> y 3-8% CH<sub>4</sub>. Estos reactores tienen dos configuraciones principales, lecho fluidizado circulante (CFB) y lecho fluidizado burbujeante (BFB).

Los reactores de *lecho burbujeante (BFB)* son de los más utilizados para la gasificación de biomasa, principalmente porque permiten su uso a mediana escala (<25MWt). Básicamente es un cilindro en el que se introduce el agente gasificante por la parte inferior a una velocidad suficiente (0.5-1.0 m/s) para agitar el material del lecho que se encuentra en el fondo, evitando que este sea transportado fuera del reactor (Figura 2.13).

El reactor se divide en dos partes: el lecho fluidizado en la parte inferior y la parte superior denominada superficie libre. El char y los volátiles son gasificados mediante el contacto con el lecho fluidizado caliente, dando lugar a un gas con bajo a medio contenido de alquitranes. Si se utiliza aire como agente gasificante el poder calorífico del gas



producto se encuentra entre 3.5 y 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. Estos reactores son especialmente sensibles a la geometría y el tamaño de partícula, porque estos parámetros afectan el comportamiento fluido-dinámico de la biomasa.

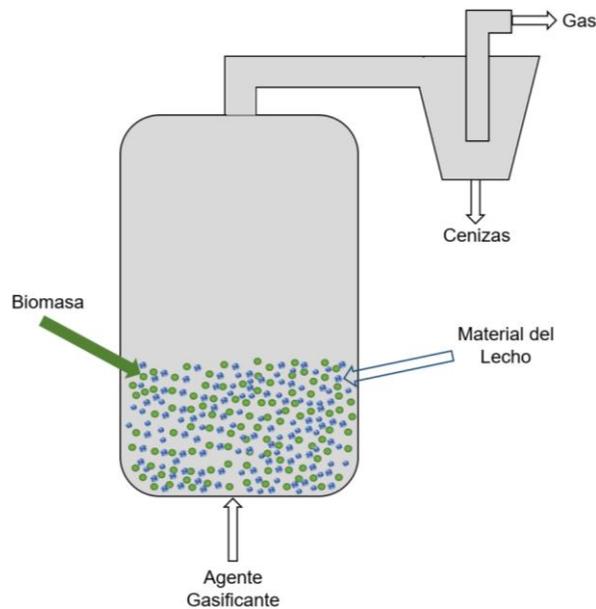


Figura 2.13. Esquema de operación del reactor de lecho fluidizado burbujeante (BFB) [49].

Los reactores de *lecho circulante* (CFB) son una alternativa para la mediana y alta escala (100 MW) en los procesos de gasificación de biomasa, principalmente por su largo periodo de residencia que permite el uso de materiales con alto contenido de volátiles. En estos reactores no existe superficie libre ya que el lecho está presente en toda su extensión, el agente gasificante se introduce desde la parte inferior con una velocidad



suficiente (3.5-5.5 m/s) para mover tanto el material del lecho como la biomasa en un lazo de recirculación (figura 2.14).

La biomasa es alimentada lateralmente y se mezcla con el lecho a alta temperatura que se encuentra en todo el gasificador. El material sólido en la corriente de salida es separado con la ayuda de un ciclón y llevado al fondo del reactor nuevamente.

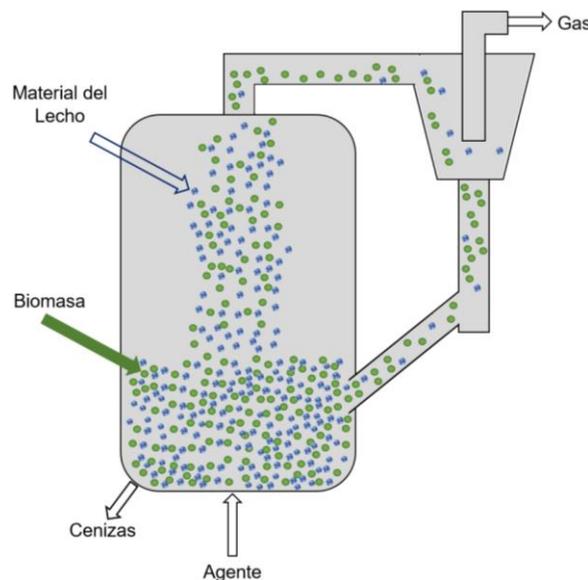


Figura 2.14. Esquema de operación del reactor de lecho fluidizado circulante (CFB) [49].

#### 2.3.4.3 Flujo arrastrado.

Este tipo de reactores tienen una gran importancia porque han sido los seleccionados para ser utilizados a nivel comercial en centrales de energía de ciclo combinado que incorporan tecnología de gasificación (IGCC). Normalmente se utilizan para generaciones altas (>100MW). En un gasificador de lecho arrastrado, la biomasa y el agente gasificante se introducen por la parte superior del reactor.



Las reacciones de gasificación ocurren a velocidades de reacción muy altas a causa de las altas temperaturas de operación (1000-1200°C) y altas presiones (25-60 Bar), por lo que se requiere poco tiempo para que los gases productos se generen y abandonen el reactor por la sección inferior (Figura 2.15).

La biomasa de alimentación debe ser pre-tratada para lograr partículas pequeñas (<0.075 mm) que son alimentadas en la zona de gasificación, lo que facilita la transferencia de masa y el arrastre del material en el gas. Aire u oxígeno son normalmente el agente gasificante y debido a las altas temperaturas de operación, se tiene poca concentración de alquitranes en el gas producto. Debido a las altas temperaturas requeridas, estos reactores necesitan de mejores materiales si se quiere tener un tiempo de vida adecuado, lo que resulta en un incremento considerable del costo comparando con otro tipo de tecnologías de reactores.

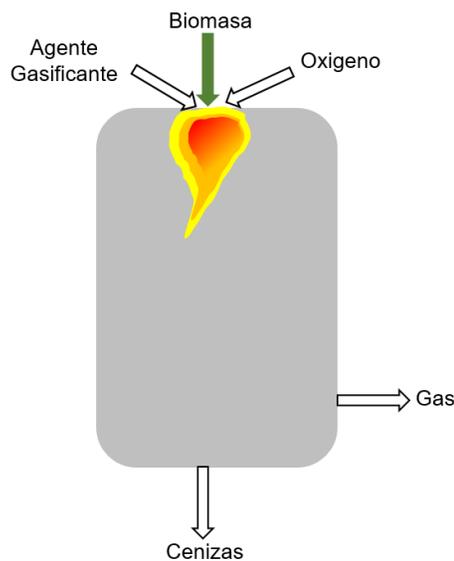


Figura 2.15. Esquema de operación del reactor de flujo arrastrado [49].



La tabla 5 resume las características de los procesos cuando se utiliza cada uno de los reactores disponibles. Por su parte, la tabla 6 muestra las principales ventajas y desventajas para los grupos de reactores de acuerdo al tipo del lecho, desde el punto de vista de la gasificación de biomasa.

Tabla 5. Características de los reactores principales operando con biomasa [49].

	Downdraft	Updraft	BFB	CFB
<b>Temperatura de operación</b>	Zona de gasificación: 700-900°C. Zona de oxidación: 1000-1400°C.	Zona de gasificación: 700-900°C. Zona de oxidación: 1200-1800°C.	800-900°C.	800-900°C.
<b>Requerimientos de biomasa</b>	Humedad 10-25 wt%. Cenizas <6 wt% base seca Tamaño: 2-10 cm	Humedad <60 wt% Cenizas <25 wt% base seca Tamaño: 0.5-10 cm	Humedad 10-55 wt% Cenizas <25 wt% base seca Tamaño < 15 cm	Humedad 5-60 wt% Cenizas <25 wt% base seca Tamaño < 2 cm
<b>Desempeño</b>	Alquitranes (TAR): 0.015-3 g/Nm <sup>3</sup> Temp. Salida gas: 700°C LHV: 4.5-5 MJ/Nm <sup>3</sup>	Alquitranes (TAR): 30-150 g/Nm <sup>3</sup> Temp. Salida gas: 200-400°C LHV: 5-6 MJ/Nm <sup>3</sup>	Alquitranes (TAR): 1- 3 g/Nm <sup>3</sup> Temp. Salida gas: 800-900°C LHV: 5 MJ/Nm <sup>3</sup>	Alquitranes (TAR): 5 g/Nm <sup>3</sup> Temp. Salida gas: 800-900°C LHV: 5 MJ/Nm <sup>3</sup>



Tabla 6. Principales ventajas y desventajas de los reactores [49].

	Downdraft	Updraft	BFB	CFB
<b>Ventajas</b>	Rejilla a baja temperatura. Baja cantidad de alquitrán. Periodo de arranque bajo.	Uso de biomasa con alta humedad, biomasa con bajo contenido de volátiles y alto contenido de cenizas. Alta conversión de carbón.	Uso de biomasa con alto contenido de cenizas. Alta conversión de carbón. Fácil control de temperatura.	Uso de biomasa con alto contenido de cenizas. Capacidad de trabajo con tamaños de partículas <400 µm. Alta conversión de carbón.
<b>Desventajas</b>	Sensible a calidad de la biomasa (tamaño de partícula, humedad, cenizas). Alto contenido de cenizas en el gas producto. 4-7 wt% de carbón sin convertir.	Alto contenido de alquitrán en el gas producto. Periodo largo de arranque del proceso.	Temperatura de salida del gas alta. Operación y control del proceso complejos. Periodo largo de arranque del proceso.	Temperatura de salida del gas alta. Operación y control del proceso complejos. Periodo largo de arranque del proceso. Problemas de corrosión.

## 2.4 Ciclos combinados de generación de potencia.

### 2.4.1 Generadores en ciclo combinado.

Un sistema de generación de potencia de este tipo se caracteriza por tener al menos una turbina de gas y una turbina de vapor. A diferencia de las configuraciones convencionales, en un ciclo combinado los gases calientes provenientes de la combustión en la turbina de gas se utilizan en una caldera recuperadora para generar vapor de agua que posteriormente se emplea para el proceso de generación de energía



eléctrica en una turbina de vapor. Finalmente, el vapor sale de la turbina y entra a un condensador donde cambia de fase y queda preparado para iniciar el ciclo nuevamente en la caldera de recuperación. Los ciclos combinados son más eficientes que su contraparte (turbinas individuales) porque emplean el calor residual generado durante el proceso, el cual sería energía de desecho en otros casos.

La figura 2.16 muestra un esquema para una planta de generación y sus 3 componentes principales (una turbina de gas, una turbina de vapor y una caldera recuperadora de calor). La turbina de gas opera a alta temperatura y presión para generar potencia mecánica que se utiliza en la producción de energía eléctrica. Los gases de combustión de la turbina de gas que se encuentran a alta temperatura y contienen una gran cantidad de energía son alimentados a la caldera recuperadora para generar agua a alta presión y temperatura (Vapor sobrecalentado), que es utilizado entonces en una turbina de vapor donde se expande para generar potencia adicional.

Normalmente las turbinas de gas generan cerca del 60% del total de la energía eléctrica del ciclo combinado, mientras que las de vapor generan el 40% restante [50]. Los ciclos combinados alcanzan niveles altos de complejidad ya que existen diferentes configuraciones que pueden ser seleccionadas para suplir las diferentes necesidades que se presentan en un ambiente productivo. Existen desde aquellos que generan potencia con un solo nivel de presión, hasta una combinación de niveles de presión y generación de vapor para procesos. Además, pueden contar con diferentes combinaciones en el número de turbinas (gas y vapor) utilizadas.

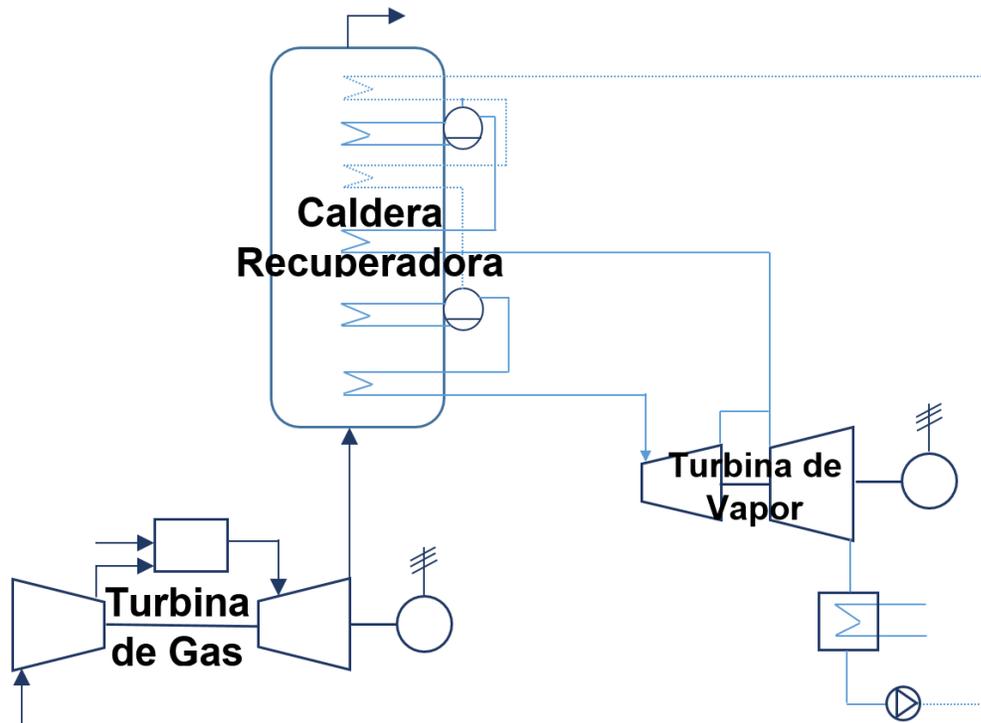


Figura 2.16 Componentes principales de una central en ciclo combinado (elaboración propia).

Esta tecnología de generación de potencia es de las más utilizadas alrededor del mundo porque ofrece varias ventajas, dentro de las cuales una muy importante es la eficiencia térmica que puede llegar a superar el 50% dependiendo de las condiciones del sitio en que se ubica y de los equipos utilizados.

#### 2.4.2 Sistemas de gasificación integrados en ciclos combinados.

Una de las aplicaciones recientes de la gasificación es su uso en centrales de generación de potencia. En algunos casos se sustituye parcial o totalmente el



combustible del generador de vapor y en centrales de ciclo combinado el gas de síntesis se utiliza para el proceso de combustión en la turbina de gas, en el llamado ciclo combinado con gasificación integrada o IGCC (por sus siglas en ingles).

El principal objetivo de un IGCC es la producción de energía eléctrica de forma eficiente y más limpia comparada con la combustión directa de combustibles fósiles. La generación mediante un IGCC presenta grandes ventajas que van desde el ámbito ambiental con una huella de carbono menor, hasta la flexibilidad del uso de diversas fuentes combustibles (incluyendo renovables) para producir el gas. La característica de producción más limpia se logra porque, al transformar el combustible a gas siguen procesos de limpieza en etapas previas a su combustión. Esto permite la eliminación de sulfuros, mercurio y otras trazas de elementos no deseados. El gas limpio puede ser enviado entonces para su uso en una central de ciclo combinado en la producción de electricidad.

La generación de potencia de forma limpia es un objetivo principal de un IGCC. Sin embargo, aumentar la eficiencia de la planta es un objetivo no menos importante. Para aumentar la eficiencia se utiliza integración entre los subsistemas de la planta, la cual se busca en todos los aspectos posibles, incluyendo procesos mecánicos, térmicos y de control de procesos. La figura 2.17 muestra el esquema básico de una central que utiliza gasificación; en ella el combustible utilizado en el gasificador puede variar desde carbón hasta biomasa incluyendo mezclas de estos. El tipo de gasificador también puede variar, aunque comercialmente ya se mencionó que el más utilizado es el de lecho arrastrado, principalmente porque debido a su temperatura de trabajo el sistema de filtros es menos complejo.

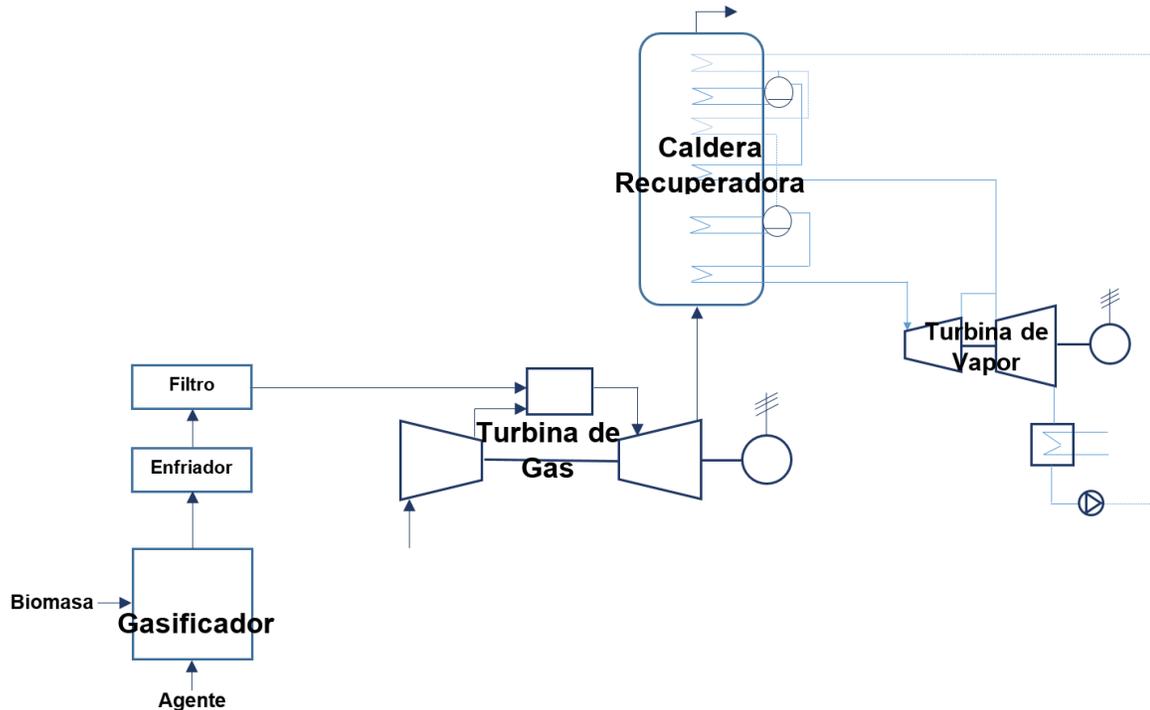


Figura 2.17. Diagrama básico de un IGCC (elaboración propia).

## 2.5 Diseños experimentales.

Cuando se analiza el proceso de gasificación, entre los principales inconvenientes se encuentran la simultaneidad de las etapas del proceso (secado, pirólisis, oxidación y reducción) y la gran cantidad de reacciones que pueden llegar a presentarse, las cuales pueden modificar su comportamiento en función de diferentes factores como el agente gasificante, la relación de equivalencia y la temperatura entre otros. Debido a esta complejidad, los modelos teóricos desarrollados no permiten describir en su totalidad los resultados que se obtienen durante la gasificación, razón por la cual los estudios experimentales asociados a la descripción de la fenomenología del proceso tienen un papel importante en el conocimiento y desarrollo de nuevos métodos que permitan



avanzar en las tecnologías de gasificación. Durante los estudios experimentales se requiere de diferentes etapas, las cuales tienen como propósito realizar modificaciones en los parámetros de entrada y observar los cambios que se puedan presentar en el proceso, a la vez que identificar las razones para estos cambios. Es así como adquiere una gran importancia la planeación para el desarrollo de cada experimento, de forma que se reduzca la influencia de los distintos tipos de errores que pueden llevar a conclusiones no acertadas.

En general un proceso puede describirse como una combinación de métodos, personas y otros recursos que permiten la transformación de una entrada en una salida que puede tener una o más respuestas observables. Normalmente algunas variables del proceso son controlables ( $X_i$ ), mientras que otras no es posible controlarlas ( $Z_i$ ) por su naturaleza, como son las condiciones ambientales [51]–[53]. La figura 2.18 muestra un esquema general de un proceso, en el que se tienen variables controladas y no controladas, una entrada y finalmente la salida deseada.

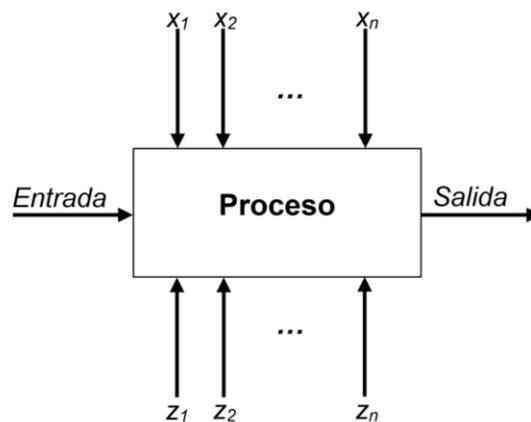


Figura 2.18. Diagrama general de un proceso (elaboración propia).



Realizar una planeación o diseño experimental es muy importante, porque los resultados y conclusiones que se pueden extraer del experimento dependen en gran medida de la cantidad y la forma en se recogen los datos del experimento. Las principales razones por las que en las ciencias se realizan experimentos son las siguiente:

- Determinar la razón fundamental de la variación en la respuesta de un sistema o proceso.
- Encontrar las condiciones que dan lugar a un máximo o mínimo en la respuesta del sistema.
- Comparar las respuestas que se obtienen para los distintos valores posibles de las variables controlables.
- Encontrar un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de las respuestas del sistema frente a cambios en las entradas y en las variables controladas.

### *2.5.1 Aleatorización.*

El propósito de la aleatorización es prevenir la introducción de influencias sistemáticas en el experimento por parte del grupo experimentador. Normalmente una asignación aleatoria del material de prueba o de los métodos empleados, realizada con anterioridad al experimento es suficiente para garantizar que las observaciones afectadas por fuentes desconocidas de variación son seleccionadas por el azar y no sistemáticamente.



La falta de aleatorización durante la realización de pruebas deja abierta la posibilidad de la introducción de errores experimentales, que llevan a resultados donde las variaciones del proceso que son resultado de la modificación de los parámetros controlables puede quedar inmersa en errores sistemáticos o de observación del grupo encargado del experimento.

Como medio para disminuir este tipo de errores existen diferentes técnicas de aleatorización que pueden ser utilizadas, incluso un simple sorteo para elegir el orden de las pruebas cumple con esta tarea, sin embargo, el uso de un software que incluya generadores aleatorios del orden de las corridas, teniendo en cuenta la posible existencia de bloques y las características de los factores es la opción más recomendada.

### 2.5.2 *Análisis factorial.*

Los diseños factoriales se utilizan para realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos durante un experimento, permiten tener en cuenta la influencia de las variables analizadas de forma independiente y la relevancia de sus posibles interacciones.

En un diseño experimental factorial cada réplica realizada contiene todas las posibles combinaciones de los niveles de las variables analizadas. La ecuación 2.16 es la representación de un modelo simple de regresión para el caso de dos variables cuantitativas [52].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (2.16)$$



Donde  $y$  es la respuesta, las  $\beta_i$  son coeficientes que deben ser determinados,  $x_1$  y  $x_2$  representan las variables del proceso y  $\epsilon$  es el término del error. La figura 2.19 muestra un posible resultado que utiliza este modelo para encontrar posibles zonas de operación dentro de un rango de las variables.

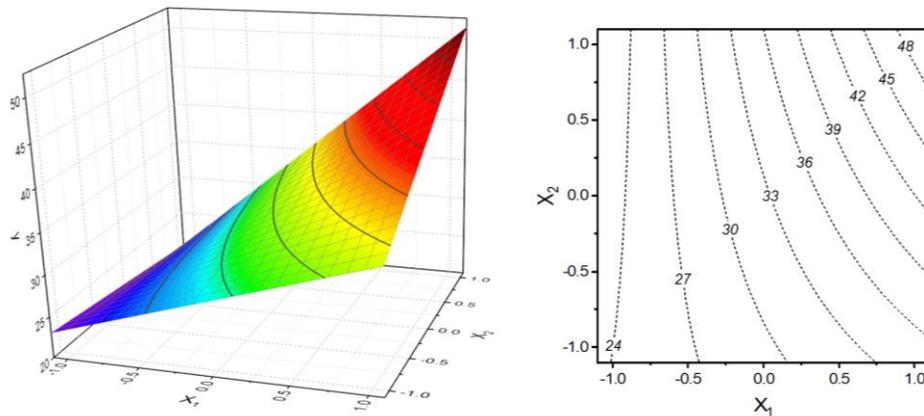


Figura 2.19. Superficie de respuesta (Izq.) y gráfico de contorno (Der.) [52].

### 2.5.3 Experimentos con mezclas.

Normalmente cuando se desarrolla un experimento los niveles de cada factor son independientes de los niveles de los factores restantes. Para el caso de los experimentos con mezclas, los niveles no cuentan con esa independencia debido a que el aumento o disminución de la proporción de uno de los componentes de la mezcla afecta directamente a los demás componentes. Esta restricción se ilustra en la figura 2.20 para dos componentes de la mezcla, en donde a cada valor de la variable  $x_1$  le corresponde un valor de  $x_2$  para que la suma de las proporciones sea igual a 1.

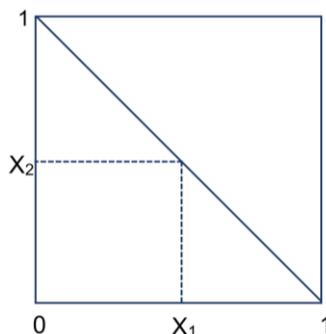


Figura 2.20. Restricción de las variables de una mezcla (elaboración propia).

## 2.6 Estado del Arte de la Gasificación de Biomasa.

En los últimos años se ha trabajado considerablemente en el aprovechamiento de residuos biomásicos y diferentes autores han mostrado los beneficios de la conversión termoquímica realizando estudios experimentales y computacionales. Estos beneficios dependen del método usado para la gasificación y de la biomasa utilizada. Algunas investigaciones emplean gasificadores Updraft [54]–[61] con la reducción de alquitranes y la optimización de la conversión de carbón como objetivos principales. En la búsqueda de altas eficiencias térmicas varios investigadores [62]–[67] utilizaron gasificadores Downdraft, aprovechando los bajos niveles de alquitrán característicos de los procesos en esta clase de reactores. Finalmente, otros estudios [21], [68]–[71] identificaron posibilidades de mejora en el control de temperatura y velocidades de reacción cuando se trabaja con gasificadores de lecho fluidizado.

El estado actual de las tecnologías de gasificación, estudios fluidodinámicos, y caracterizaciones en el aprovechamiento de residuos biomásicos se presenta a continuación:



Arena [45] desarrolló un análisis con 5 tipos de residuos en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante, utilizando una capacidad de alimentación de 100 kg/h y aire como agente gasificante. Su planta cuenta con una salida térmica de 500 kW y está compuesta de 3 secciones principales: alimentación, reactor y unidad de tratamiento del gas producto. En sus resultados principales muestra que el contenido de hidrógeno y metano disminuye al aumentar la relación de equivalencia para todos los residuos analizados. Además, afirma que el olivino es un buen candidato para material del lecho, con propiedades catalíticas para las reacciones de transformación de alquitranes. Reporta que para todos los residuos el proceso es factible, con fracciones de hidrógeno entre 20% y 30% y en general con un gas de suficiente calidad para ser utilizado en aplicaciones energéticas.

Luo [72], gasificó residuos municipales a escala laboratorio en un reactor de lecho fijo con el objetivo de evaluar el efecto del tamaño de las partículas a diferentes temperaturas, en la cantidad y composición del gas producto. Los residuos fueron clasificados en 3 dimensiones: 5 mm, 5-10 mm y mayores a 10 mm. Sus resultados muestran que la temperatura tiene una influencia significativa en el aumento de la cantidad de gas obtenido y en la disminución del biocarbón y los alquitranes. Observó que tamaños pequeños favorecen el aumento de la concentración de hidrógeno y monóxido de carbono en el gas. Otro estudio realizado para reactores de lecho fijo fue desarrollado por Chen [73], el cual modeló mediante herramientas computacionales (Aspen plus) la producción de gas en un reactor de lecho fijo, utilizando residuos municipales como alimentación. Usó una temperatura de gasificación de 900 °C, suponiendo procesos isotérmicos y que la biomasa solo está compuesta por Carbón y cenizas, usó un flujo de 1kg/h y relaciones de equivalencia entre 0.2 y 0.8. En su



investigación encontró que temperaturas altas mejoran el proceso, mientras que una mayor relación de aire-combustible disminuye el poder calorífico del gas producto. Continuando con su investigación Chen [74] comparó computacionalmente (Aspen plus) alternativas de gasificación utilizando dos tipos de configuraciones para gasificadores con lecho fijo donde el aire se usa como el agente gasificante. Uno de los reactores es un reactor de lecho fijo ascendente convencional, en donde se permitió el paso de los gases productos de la combustión hacia la sección de gasificación y en el otro reactor se realizaron modificaciones para que estos gases fueron desviados y en la zona de gasificación se inyectara aire secundario. En sus resultados se muestra que el aumento de la temperatura y la desviación de gases de combustión favorecen la conversión de carbón y el poder calorífico del gas de síntesis.

Otros investigadores realizaron estudios en lecho fijo [75]–[77], empleando modificaciones dirigidas principalmente al pretratamiento como secado y dimensionamiento de la biomasa, que permitieron mejorar la calidad de los gases productos. Antonopoulos [78] presenta en su investigación un nuevo esquema de reactor de tres etapas (pirólisis, buffer combustión, gasificación), el cual utiliza ventiladores para modificar el flujo al interior del reactor, creando un patrón controlable de los gases, reduciendo los alquitranes en el gas producto. Muestra que este esquema es viable para pequeña a mediana escala de generación de energía eléctrica con eficiencias eléctricas cercanas al 30%.

Tanigaki [79] evaluó la gasificación de residuos municipales a gran escala, utilizando dos plantas comerciales. Empleó un sistema simple y un esquema de cogasificación de residuos municipales con cenizas residuales en un proceso de



recirculación, logrando conversiones cercanas al 90% y eficiencias de gasificación alrededor de 20%. Por su parte, Lombardi [80] analiza computacionalmente (Aspen plus) el potencial de recuperación de energía de dos alternativas, una con gasificación de alta temperatura y la otra utilizando gasificación por proceso de plasma, ambas en un ciclo de generación de potencia y comparadas con el sistema de generación convencional, siendo la gasificación por plasma la de mejor desempeño, pero requiriendo la inclusión de sistemas auxiliares complejos en el ciclo.

Otra modificación al proceso de gasificación utilizando herramientas computacionales es presentada por Vitasari [81], donde se muestra un análisis exergético de la gasificación indirecta de residuos biomásicos, en la que el calor necesario para el proceso es producido por combustión de Char en una sección separada. Utiliza un flujo de 10 kg/s, vapor de agua es el agente gasificante y se analiza el sistema bajo distintas presiones entre 1bar y 15 bar. Vitasari explica que las ventajas de este proceso incluyen gas producto no diluido con nitrógeno y que no requiere una fuente de calor externa, además en sus resultados muestra que la eficiencia del sistema aumenta con la presión de gasificación y exergéticamente el sistema responde mejor dependiendo de la calidad de la biomasa utilizada.

Hassan [82] estudió mediante simulaciones numéricas, la viabilidad de utilizar residuos municipales para la producción de energía mediante gasificación y lo comparó con procesos como la combustión directa. Sus resultados mostraron que el plástico y los textiles presentan mayores velocidades de conversión que los desechos forestales. Por otro lado, Hassan encontró que las temperaturas altas afectan fuertemente el proceso, generándose menores cantidades de hidrógeno como resultado del proceso de



combustión completa a temperaturas mayores a las normales en un proceso de gasificación (>1300 °C).

Begum [83] utilizó un gasificador de lecho fluidizado con residuos municipales, alcanzando niveles de conversión de carbón cercanos al 65%, de 23% para biocarbón y del 12% como pérdidas residuales, además complementó sus resultados con el modelado computacional de una planta de producción en la que se obtienen resultados acordes a los experimentales [84], aportando una herramienta para realizar pruebas sobre el proceso de manera relativamente confiable. Pandey [85] contribuye en este sentido, con el desarrollo de un modelo predictivo basado en algoritmos genéticos para encontrar la composición del gas producto y el poder calorífico del proceso de gasificación en lecho fluidizado cuando se utilizan residuos municipales. Para obtener resultados esta técnica requiere de características fisicoquímicas de la biomasa, así como los parámetros principales del proceso.

Recientemente Campoy [16] estudio la gasificación de residuos en una planta piloto con un reactor de lecho fluidizado de 100 kWte de capacidad, para cuatro biomásas diferentes (Orujillo (residuo de aceite de oliva), lodos secos de aguas residuales, harinas residuales (MBM) y residuos municipales), con temperaturas entre 770°C y 870°C y relaciones de equivalencia entre 0.23 y 0.43. La investigación describe las ventajas y desventajas de la utilización de cada tipo en términos de la producción de carbón, calidad del gas, eficiencia de la gasificación y contenido de alquitranes. Se presenta al orujillo como el de mejor desempeño para la configuración en lecho fluidizado con un gas de calidad similar a la obtenida para gasificación de pellets de madera.



Zhang [86] analiza la tecnología de plasma en la gasificación para residuos municipales, su reactor es en principio un gasificador de lecho ascendente con fuentes de plasma ubicadas cerca de los inyectores del agente gasificante, para incrementar la temperatura de estos hasta 6000 °C. La relación de equivalencia utilizada varía entre 0.08 y 0.12 para aire y la relación vapor/residuos usada fue 0.33. En su estudio obtuvo poderes caloríficos (LHV) del orden de 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. En sus resultados comenta que el poder calorífico disminuye al aumentar la relación de equivalencia, mientras que la eficiencia de la gasificación aumenta, además afirma que si se suministra vapor a alta temperatura se mejoran el poder calorífico y la cantidad del gas producto. Más recientemente el mismo grupo de investigadores realizó el modelado de la gasificación por plasma [87], confirmando que la inyección de vapor a altas temperaturas proporciona ventajas sobre la calidad del gas y la eficiencia de la conversión, además reportan que la inyección es afectada por parámetros adicionales de alimentación y sugieren una configuración de operación que maximiza los efectos deseados como mayor poder calorífico. Wang [88] estudió la gasificación de 5 residuos municipales (textiles, madera, residuos de cocina, plástico y papel) con vapor, utilizando NiO como catalizador, logrando eliminar significativamente el alquitrán y al mismo tiempo aumentar la concentración de hidrógeno en el gas producto. En sus resultados muestra que la relación óptima de vapor/residuos es 1.23 bajo sus parámetros de operación y con el catalizador mencionado.

Las investigaciones anteriores utilizan diferentes tipos de residuos como papel, plástico, residuos domiciliarios y recientemente residuos forestales en los procesos de conversión, con el objetivo de mejorar la calidad del gas producto. Algunos de los trabajos con residuos forestales reportan mejoras cuando se utilizan sistemas de pretratamientos, logrando biomásas con humedad inferior al 20% y tamaños de partículas pequeños (< 5 cm).



Dentro de los precedentes para gasificación de residuos forestales se encuentra el trabajo de Luo [89], donde se evalúa experimentalmente el efecto del tamaño de partícula (inferiores a 0.075 mm, 0.075-0.15 mm, 0.15-0.3 mm, 0.3-0.6 mm y 0.6-1.2 mm) a diferentes temperaturas del lecho (entre 600 y 900 °C) en el desempeño de la gasificación. Luo reporta que disminuir el tamaño de partícula resulta en un aumento en la eficiencia de la conversión de carbón y la concentración de hidrógeno en el gas producto, mientras disminuyen el contenido de char y de alquitranes, lo que coincide con investigaciones anteriores utilizando diferentes biomásas.

Además de los efectos del tipo de biomasa, temperatura de reacción y proceso de pretratamiento, la relación de equivalencia (ER) es un parámetro muy importante en la gasificación de residuos forestales y varios trabajos han realizado estudios sobre su influencia en las condiciones del proceso [31], [32], [54], [90]–[95]. En términos generales en estas investigaciones se encontró que al aumentar la relación de equivalencia las concentraciones de hidrógeno y monóxido de carbono disminuían, mientras que el dióxido de carbono aumentaba como consecuencia de una mayor presencia de oxígeno disponible para las reacciones de combustión.

Las anteriores investigaciones demuestran el potencial de la utilización de residuos biomásicos como combustible a alimentar dentro de un proceso de gasificación, además de la gran oportunidad de avance que existe en este tipo de proceso que, aunque cuenta con muchos estudios, presenta un amplio margen para la mejora de la eficiencia de la conversión y la calidad del gas producto en función de las diferentes materias primas y condiciones de proceso utilizadas.



Adicionalmente, los residuos de pino y pasto son una biomasa abundante y adecuada para su uso en procesos de conversión térmica, suministrando una alternativa para transferir su bioenergía a un gas que puede ser utilizado en un proceso productivo. En un esfuerzo por encontrar una alternativa de mejorar al proceso y basados en investigaciones anteriores que utilizan catalizadores en el proceso de gasificación [96]–[103], este trabajo desarrolla una investigación experimental con el propósito de determinar el efecto de la adición de residuos de pasto, en la gasificación de residuos de madera de pino en un reactor de corrientes ascendentes (Updraft) y a presión atmosférica. Para lograr este objetivo se utilizan tres mezclas (en masa): 90% madera de pino-10% pasto, 80% madera de pino-20% pasto y 70% madera de pino-30% pasto y se analizan los parámetros principales del proceso, prestando especial interés en la conversión de carbón, el Biocarbón generado y las concentraciones de gases combustibles en la corriente de salida del gasificador.



### 3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y COMBUSTIBLES.

#### 3.1 Caracterización de la Biomasa.

##### 3.1.1 Poder calorífico.

El poder calorífico está relacionado directamente con el contenido de humedad relativa de la muestra, y en la mayoría de los procesos de conversión energética es necesario que la humedad sea inferior al 20% para obtener buenos resultados. Un elevado porcentaje de humedad relativa reduce la eficiencia de la combustión, debido a que parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en otras etapas del proceso. En este estudio para el análisis de la biomasa empleada durante la experimentación, se utilizó una bomba calorimétrica de combustión de oxígeno modelo *Parr 1108* que se muestra en la figura 3.1 y de la cual se describe el procedimiento experimental en la siguiente sección.

##### 3.1.1.1 Bomba calorimétrica de combustión de oxígeno Parr 1108.

En el proceso de obtención del poder calorífico se ubica una muestra de la sustancia a estudiar (1 - 2 gramos) en compañía de oxígeno a una presión de aproximadamente 40 atm (590 psig) en un contenedor de acero inoxidable (A en la figura 3.1). El contenedor a su vez es sumergido en agua (B) mediante una vasija metálica (C). El montaje del calorímetro se completa con un termómetro (D) que mide la temperatura del baño de agua (con una escala de décimas de grado), además un agitador (E) favorece la uniformidad de la temperatura en el sistema, finalmente el sistema se aísla mediante una camisa externa no conductora (F).

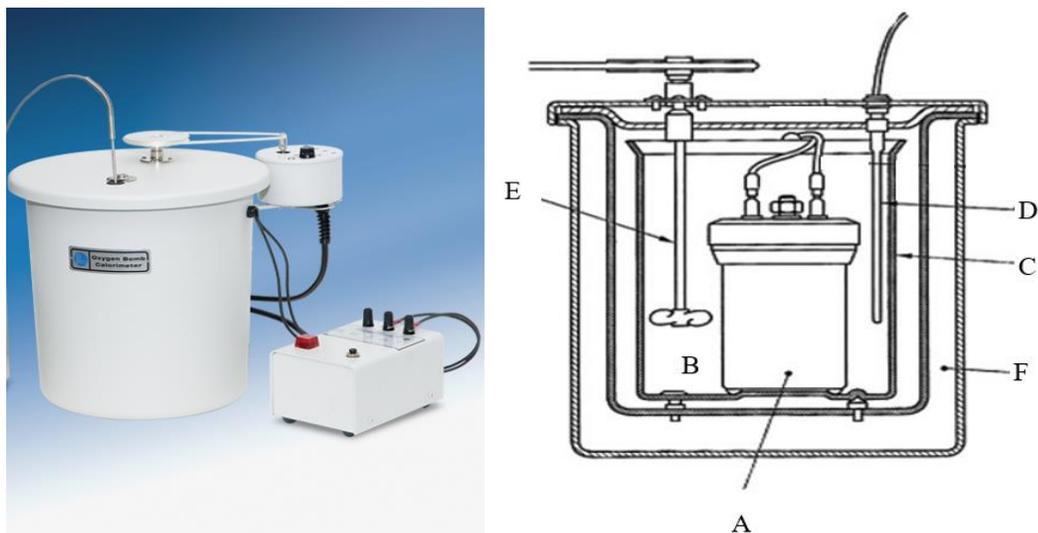


Figura 3.1. Bomba calorimétrica de combustión de oxígeno Parr 1108.

El procedimiento de operación de la bomba incluye la preparación de una muestra de 1,0 gr la cual debe estar en forma de pastilla (aglomerada) para facilitar su posicionamiento en una cápsula de combustión de acero, la cual se coloca en el anillo del electrodo al final de la cabeza de la bomba (ver figura 3.2). Un segmento de alambre de ignición se ajusta en los orificios de los electrodos haciendo que toque ligeramente la muestra, pero evitando el contacto con las paredes de la cápsula. Este conjunto se introduce al cuerpo de la bomba y se cierra el sistema teniendo presente que la válvula de purga debe estar abierta para facilitar la operación. Posteriormente se conecta la válvula del tanque de oxígeno a la válvula de llenado de la bomba y se cierra la válvula de purga de la bomba para realizar el llenado de la bomba hasta una presión 590 psig.

A continuación, el sistema completo se posiciona al interior de la vasija metálica que previamente se llenó con 2 litros de agua destilada, se conectan los electrodos en



las entradas correspondientes de la parte superior de la bomba y se posiciona la tapa de la camisa aislante, la correa de transmisión para el agitador y finalmente se introduce el termómetro para iniciar la corrida calorimétrica.

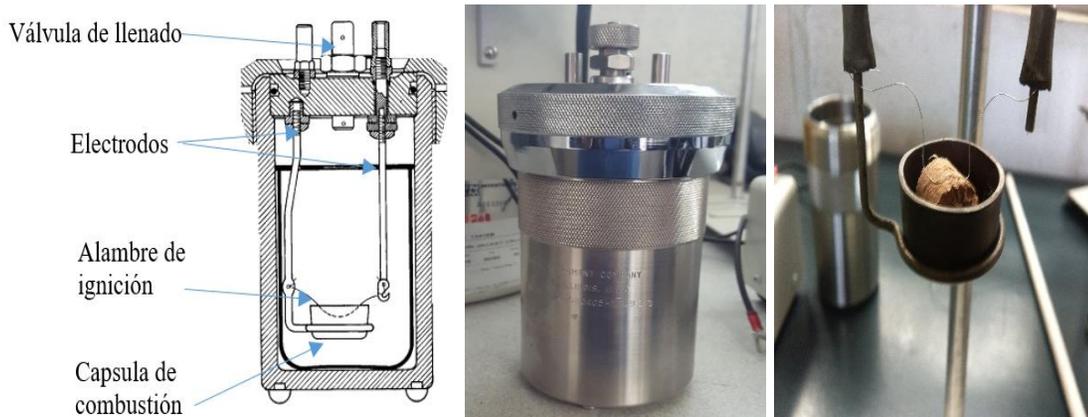


Figura 3.2. Recipiente y cápsula de la bomba calorimétrica.

La tabla 7 muestra algunos de los resultados obtenidos para las muestras de madera de pino y pasto procedente de ciudad universitaria. En ella se aprecian resultados cercanos a 20 MJ/kg y 18 MJ/kg respectivamente, lo que es acorde con los resultados publicados en relación a estas variedades de residuos.

Tabla 7. Poder calorífico de la biomasa (elaboración propia).

Nombre Común	Nombre Científico	Poder calorífico (MJ/kg)				Promedio	Desviación estándar
Pino	<i>pinus radiata</i>	20,514	21,302	18,73	19,658	20,051	1,107
Pasto kikuyo	<i>pennisetum clandestinum</i>	20,959	18,833	17,95	17,117	18,715	1,651



### 3.2 Instalación experimental.

#### 3.2.1 Molino.

El proceso de gasificación utilizado en los experimentos consta de 3 etapas principales, la primera de las cuales hace referencia a la preparación inicial de la biomasa o pretratamiento que corresponde al dimensionamiento mediante un molino de cuchillas (ver figura 3.3), que lleva la biomasa a un tamaño de 50 mm aproximadamente partiendo de dimensiones mayores.



Figura 3.3. Molino de cuchillas y dimensiones finales.

#### 3.2.2 Sistema de aire comprimido.

El agente gasificante utilizado para el proceso es aire proveniente de un sistema de compresión que utiliza un compresor craftsman modelo 919.184191 de 60 gal y 3 HP.



Durante el funcionamiento la línea se mantiene a 600 kPa y el flujo es regulado mediante una válvula para responder a las tres condiciones de operación utilizadas durante la investigación, las cuales se midieron utilizando un rotámetro de área variable (ver figura 3.4)



Figura 3.4. Sistema de aire comprimido.

### 3.2.3 Sensores de temperatura.

Para el sistema de sensores de temperatura se utilizó el módulo Almemo 5690-2 (ver figura 3.5) acompañado de termopares que fueron ubicados en las posiciones disponibles en el reactor. El sistema permitió conocer la temperatura en el interior del reactor durante el proceso inicial de precalentamiento, las etapas de gasificación y finalmente hasta llegar al proceso de enfriamiento producto del consumo del combustible.



Figura 3.5. Sistema de adquisición de temperatura.

#### 3.2.4 Sistema de filtrado del gas producto.

El gas proveniente del reactor ingresa a un sistema para retirar las partículas contaminantes que son arrastradas con los gases productos (figura 3.6). Este sistema de filtros utiliza tres columnas, dos de agua para enfriamiento del gas y retención de alquitranes remanentes y la tercera que contiene carbón activado para retirar la mayor parte de los contaminantes restantes, posteriormente se utiliza un filtro de aceite para impedir el paso de cualquier cantidad que haya escapado a las etapas anteriores y el gas es dirigido hacia el sistema de análisis de composición.



Figura 3.6. Sistema de filtros.

### 3.2.5 Analizador de gases.

Esta etapa corresponde a la última del sistema experimental de gasificación; en ella el gas producto proveniente del sistema de filtros ingresa a un equipo de análisis de composición Gasboard 3000L (ver figura 3.7) que permite observar el contenido de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), y oxígeno (O<sub>2</sub>). Cada una de estas especies puede observarse en línea durante todo el desarrollo de la prueba, lo que favorece el análisis sobre el estado del proceso de gasificación en el reactor.



Figura 3.7. Analizador Gasboard 3000L.



### 3.2.6 *Materia prima.*

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados en el proceso de gasificación con el objetivo de suplir la demanda energética de un sistema. Normalmente estas se clasifican en biomasa que se genera espontáneamente en la naturaleza como la hojarasca, cultivos energéticos que tienen por finalidad su transformación en combustible y biomasa residual que constituye los subproductos de las distintas actividades desarrolladas por la sociedad como la agricultura y la transformación de la madera. Dependiendo de las características químicas y físicas de la biomasa se obtendrá un combustible de mayor o menor calidad energética; por ejemplo, los residuos animales tienden a generar mayores concentraciones de metano y los residuos forestales favorecen la producción de monóxido de carbono.

El combustible principal seleccionado en la realización de esta investigación es madera de pino procedente de Ciudad Universitaria. Se trata de una opción de interés, ya que los residuos de madera en ciudad universitaria alcanzan niveles que serían suficientes para la generación del gas de síntesis necesario para la producción de energía a pequeña escala. Por otro lado, el gas de síntesis generado a partir de residuos biomásicos tiene el potencial de ser utilizado en motores diésel como medio de sustitución parcial de los combustibles convencionales. Para las pruebas se realizó un pretratamiento a los residuos de madera, para llevarlos a dimensiones de aproximadamente 50 mm de longitud y un contenido de humedad alrededor de 20%.

Adicionalmente, para el estudio del efecto de las mezclas con pasto se utilizaron muestras procedentes de Ciudad Universitaria que también poseen un nivel de generación suficiente para sustentar una producción continua de gas de síntesis a



pequeña escala. Las mezclas estudiadas corresponden a sustituciones del 10%, 20% y 30% en peso (90% madera de pino-10% pasto, 80% madera de pino-20% pasto, 70% madera de pino-30% pasto) con el objetivo de analizar el comportamiento del proceso y del gas producto. La tabla 8 muestra el análisis próximo, último y de cenizas de estos combustibles utilizados durante las pruebas experimentales.

Tabla 8. Valores promedio análisis próximo, último y de cenizas de la madera de pino y pasto (elaboración propia).

Biomasa	LHV (MJ/kg)	Análisis próximo (% wt, base seca)			Análisis último (% wt, base seca)					
		Carbono Fijo	cenizas	Material Volátil	C	H	N	O	S	Cl
Pino	20.05	24.2	2.90	72.90	52.90	6.30	0.50	37.60	0.05	0.01
Pasto	18.71	16.5	6.90	76.60	48.20	5.56	0.36	45.19	0.07	0.62

Análisis químico de cenizas (% wt)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Pino	39.56	7.63	4.78	0.53	35.56	2.48	0.92	6.17	0.8
Pasto	38.02	1.61	1.03	0.19	13.73	5.18	3.05	24.69	6.93

### 3.2.7 Reactor gasificador.

La siguiente etapa ocurre al interior del reactor gasificador, construido en acero de 0.0127 m de espesor que forma un cilindro con 0.32 m de diámetro y 0.8 m de longitud cerrado en su parte inferior con acero del mismo espesor (ver figura 3.8), al interior del reactor se encuentra una capa de cemento refractario que disminuye el diámetro del



reactor hasta 0.254 m. El reactor cuenta con tres orificios en su cuerpo principal de 0.00635 m de diámetro. El primero ubicado a 0.040 m de su base, es utilizado para la alimentación del agente gasificante requerido para completar las distintas etapas de la gasificación y los dos restantes permiten observar la temperatura al interior del sistema durante todo el proceso de gasificación. En la parte superior del cilindro se posiciona una tapa que se fija utilizando tornillos y además se utiliza un sello de grafito para evitar el escape del gas durante el proceso. La tapa cuenta con dos orificios de 0.021 m de diámetro, uno para la salida del gas producto y el otro para observar la temperatura en esta zona.

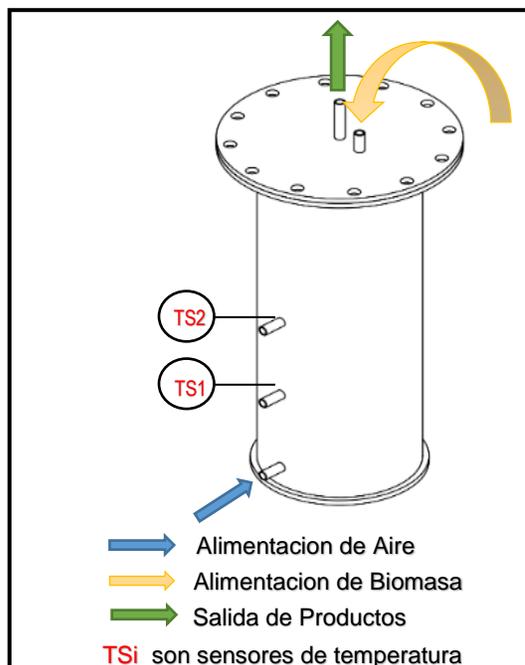


Figura 3.8. Reactor de gasificación (elaboración propia).



### 3.2.8 Sistema gasificador de biomasa.

El funcionamiento en conjunto del sistema de gasificación aparece en el esquema del proceso mostrado en la figura 3.9. El agente gasificante es aire, el cual se transporta desde el sistema de compresión a 600 KPa mediante una línea de 0.0127 m de diámetro hasta llegar a la válvula donde se regula el flujo para alcanzar el nivel deseado que es medido utilizando un rotámetro de área variable. Una vez dentro del reactor el aire facilita el oxígeno requerido para las etapas de la gasificación, en el reactor se mide la temperatura usando sensores que envían su señal hasta un sistema de adquisición (Almemo 5690-2) que a su vez permite enviarlas a un computador para su captura y procesamiento. El gas producto de las reacciones sale del reactor por la parte superior y es dirigido hacia el sistema de filtros que permite disminuir la temperatura y retirar el material particulado, finalmente el gas se dirige hacia el analizador de gases que registra su composición en línea y la envía al computador para su posterior análisis.

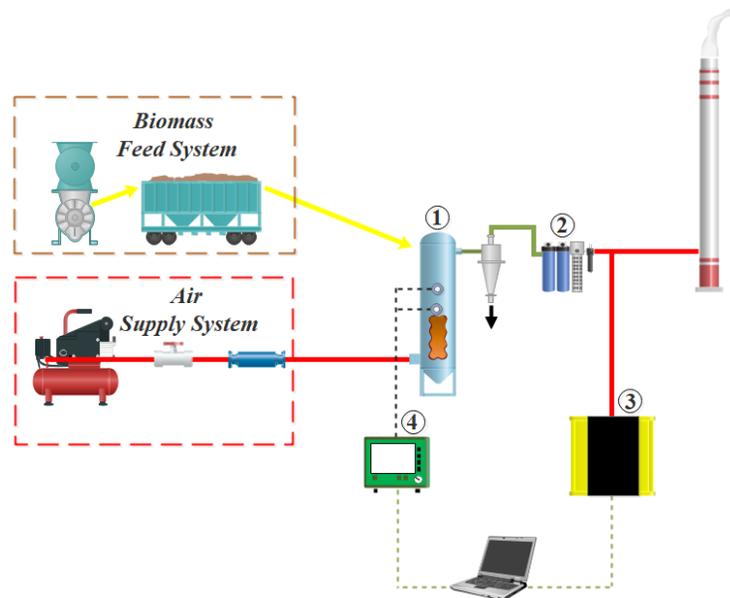


Figura 3.9. Esquema del sistema de gasificación. 1) gasificador, 2) filtros, 3) analizador de gases, 4) módulo de adquisición de temperatura (elaboración propia).



### 3.3 Diseño experimental.

Definiendo el problema experimental como la descripción del proceso de transformación termoquímica de la biomasa forestal y en la búsqueda del grado de relevancia de las variables involucradas, se procede a escoger los factores, niveles y rangos de estudio. Se analiza la capacidad de medición de las variables de respuesta, que para el caso particular son la temperatura del reactor y las concentraciones de gases combustibles en la corriente de salida. A continuación, se escoge el diseño experimental a utilizar que, debido al carácter de las variables es un diseño mixto conformado por una variable a tratar como una mezcla que hace referencia a los porcentajes de madera de pino y pasto, y una segunda variable que es factorial numérica y corresponde a la relación de equivalencia (ER). Definidas todas las características del experimento se procede a realizar las pruebas (Corridas experimentales) y finalmente se desarrolla el análisis de los datos recogidos.

Dentro de los factores de diseño tenemos la sustitución de biomasa y la relación de equivalencia, además están presentes factores que no se pueden controlar, pero que durante la realización de las pruebas fueron observados como son la temperatura y la presión ambiental.

- Para la sustitución de madera por pasto fueron elegidos 3 niveles basándose en los niveles de disponibilidad de la biomasa recogida. (10%, 20% y 30% en peso).
- Las relaciones de equivalencia ( $ER_i$ ) utilizadas para el proceso se eligieron basándose en el rango que presenta mejores resultados para la configuración utilizada, estos valores están en los rangos normalmente utilizados a nivel



operacional y son reportados en gran número de investigaciones anteriores sobre gasificación. (ER1=0.25, ER2=0.30 y ER3=0.34).

En cuanto a las variables de respuesta, se seleccionaron las que proporcionan mayor información acerca del proceso y que podían ser medidas con la instrumentación disponible. Concentración de gases en la corriente de salida y temperatura del reactor.

Una vez definidos los factores se procedió a elegir el diseño experimental, el objetivo es determinar el grado de influencia de los factores sobre la variable de respuesta en los rangos de estudio. Como se mencionó anteriormente el diseño escogido es un diseño mixto, con tres niveles para la sustitución que tienen la característica de ser dependientes ya que al aumentar o disminuir la cantidad de pasto de igual forma debe aumentar o disminuir la cantidad de madera para preservar una misma masa en el reactor durante el experimento.

Para garantizar la aleatorización del experimento se utilizó un software estadístico al cual se le suministró la información de los factores y niveles objeto de estudio, obteniéndose el orden de aleatorización de las pruebas que fue utilizado durante la investigación. En la tabla 9 aparecen los factores y sus correspondientes niveles utilizados durante el estudio.



Tabla 9. Niveles de los factores (elaboración propia).

<b>Variable</b>	<b>Nivel Bajo</b>	<b>Nivel Medio</b>	<b>Nivel alto</b>
(A) Sustitución (%)	10	20	30
(B) Relación de equivalencia	0.25	0.30	0.34

Establecido el diseño se procede a realizar cada uno de los ensayos:

El experimento fue realizado en su totalidad en el laboratorio de gasificación de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para empezar las pruebas experimentales, lo primero es la configuración del software de captura de datos provenientes del analizador de gases y de los sensores de temperatura. El objetivo es observar en todo instante de las pruebas, el comportamiento de las variables analizadas además de supervisar el correcto almacenamiento de la información.

Durante cada prueba se introdujo aproximadamente 1 kg de biomasa y 0.3 kg de carbón que se utilizaron en un proceso de combustión inicial hasta que la temperatura del reactor permaneció cercana a los 800 °C, posteriormente 2kg de biomasa se colocaron en el reactor hasta alcanzar 60% de su capacidad de almacenamiento, luego de 30 min de operación se obtuvieron los gases productos. La composición del gas fue medida durante la mayor parte del experimento incluyendo parte del calentamiento inicial. Sin embargo, se consideraron para objeto de análisis las composiciones del gas cuando la temperatura en el reactor permaneció entre 800 °C y 1100 °C.



Transcurrido el tiempo considerado adecuado y de acuerdo con el diseño experimental se detiene la prueba, los datos generados son procesados y se desarrolla un análisis preliminar sobre el comportamiento general del sistema. Finalmente se identifica el grado de influencia de las variables en el contenido de gases combustibles del gas producto y los niveles de generación de biocarbón y alquitranes. La figura 3.10 presenta una visión general del proceso seguido para el desarrollo experimental de la investigación.



Figura 3.10. Diagrama de flujo del experimento (elaboración propia).



#### 4. RESULTADOS.

Existen diferencias significativas en el comportamiento de la gasificación cuando se utilizan como combustible mezclas de madera de pino-pasto ( $MX_i$ ), si se comparan con el proceso cuando se gasifica 100% madera de pino (W). Dentro de los rangos de los parámetros de este estudio, las diferencias más notables se encuentran en el contenido de monóxido de carbono en el gas producto, el nivel de conversión de carbón y la cantidad de residuos del proceso.

##### 4.1 Perfil de temperatura y tiempo de proceso.

Los perfiles de temperatura durante las pruebas de gasificación comparten la misma tendencia, la temperatura incrementa rápidamente como consecuencia de la combustión inicial hasta alcanzar los 800 °C, disminuye con la adición de biomasa y posteriormente aumenta para mantenerse entre los 800 °C y 1100 °C como resultado del proceso de gasificación, al finalizar desciende debido al consumo del combustible. La figura 4.1 muestra un comportamiento tipo de la temperatura al interior del reactor durante la gasificación con respecto al tiempo. Este comportamiento se mantiene para las pruebas realizadas con madera de pino 100% y para las mezclas de madera de pino y pasto.

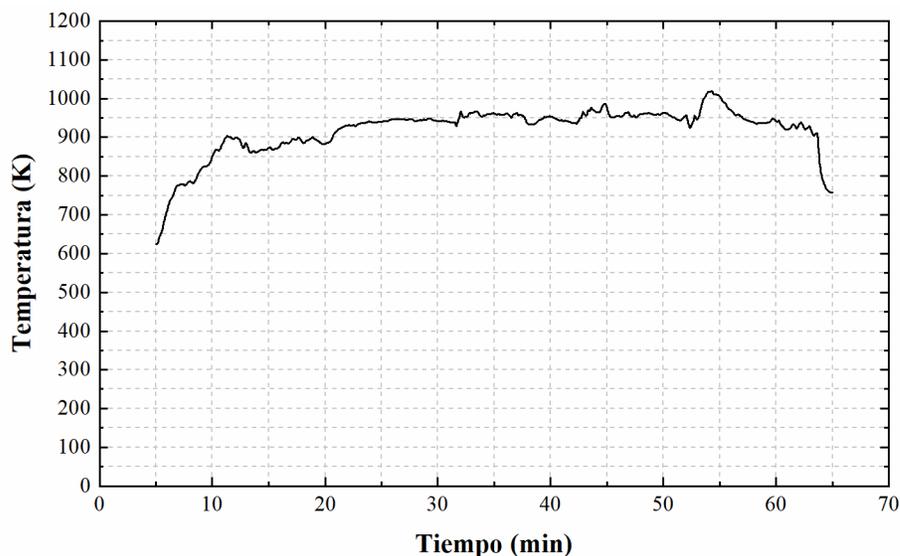


Figura 4.1. Perfil de temperatura tipo del proceso (elaboración propia).

Como se aprecia en la figura 4.1, existe variación en la temperatura durante la gasificación, incluso en el periodo de producción estable del gas de síntesis. Lo anterior se debe a variaciones propias del proceso como la cantidad de combustible reaccionando, la distribución del agente oxidante y la generación de mayor o menor cantidad de alquitranes que absorben energía antes de salir con los gases productos. A pesar de los factores propios del proceso, las variaciones presentes durante la producción estable de gas se encuentran dentro de parámetros aceptables y la temperatura solo disminuye rápidamente cuando el total del combustible es consumido. La composición del gas y la temperatura del proceso para una prueba usando madera de pino se muestra en la figura 4.2. En esta se aprecia que inicialmente existe mayor cantidad de  $\text{CO}_2$  resultado del proceso de combustión en el precalentamiento del reactor y posteriormente esta desciende para dar paso a la gasificación de los residuos, finalmente el  $\text{CO}_2$  aumenta debido a una mayor disponibilidad de oxígeno resultado de la disminución de residuos



disponibles al interior del reactor. Un comportamiento opuesto presenta el CO y H<sub>2</sub> que de acuerdo a lo esperado tienen una mayor concentración durante la gasificación, el CH<sub>4</sub> mantiene una producción baja durante la mayor parte del proceso tendiendo a disminuir con el consumo de la biomasa.

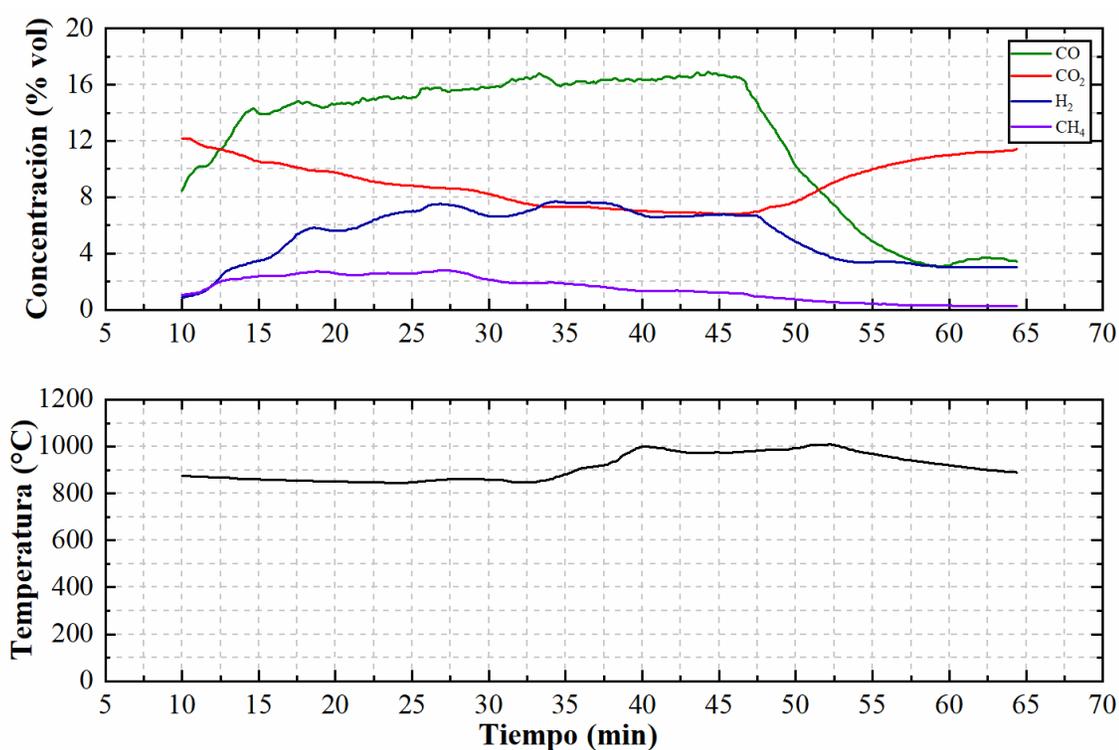


Figura 4.2. Perfil de concentración y temperatura en gasificación de madera de pino (elaboración propia).

#### 4.2 Relación de equivalencia y composición del gas.

La relación de equivalencia (ER) definida como el cociente entre la cantidad de agente gasificante empleado y el necesario para el proceso estequiométrico, es un



parámetro muy importante en el proceso de gasificación. Específicamente, una ER baja puede llevar a altas concentraciones de alquitranes como resultado de temperaturas bajas en el reactor. La composición del gas producto fue observada mediante el analizador de gases Gasboard 3000L que permite conocer el contenido de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), y oxígeno (O<sub>2</sub>) en la corriente de salida del reactor, esta composición se verificó utilizando un cromatógrafo de gases Buck scientific 910 para el cual se tomaron muestras de acuerdo con los requerimientos del equipo. Durante los experimentos la composición del gas fue medida bajo 3 condiciones de operación: 0.25 (ER1), 0.30 (ER2) y 0.34 (ER3). Las figuras 4.3 y 4.4 muestran la composición para cada una de estas relaciones de equivalencia.

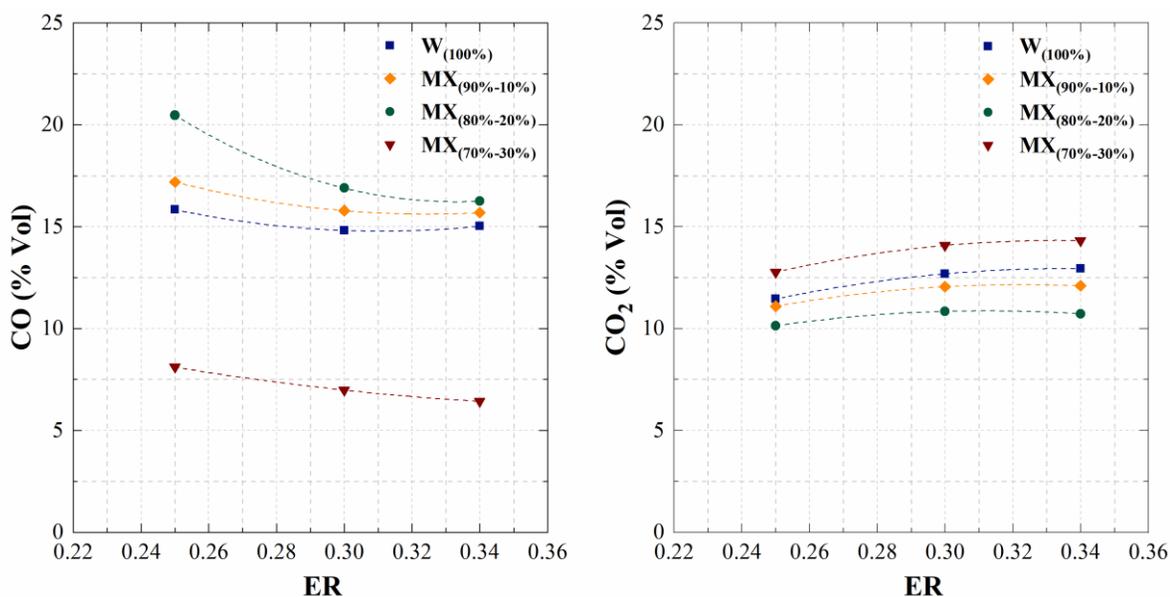


Figura 4.3. Perfiles de concentración de CO y CO<sub>2</sub> para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% (elaboración propia).

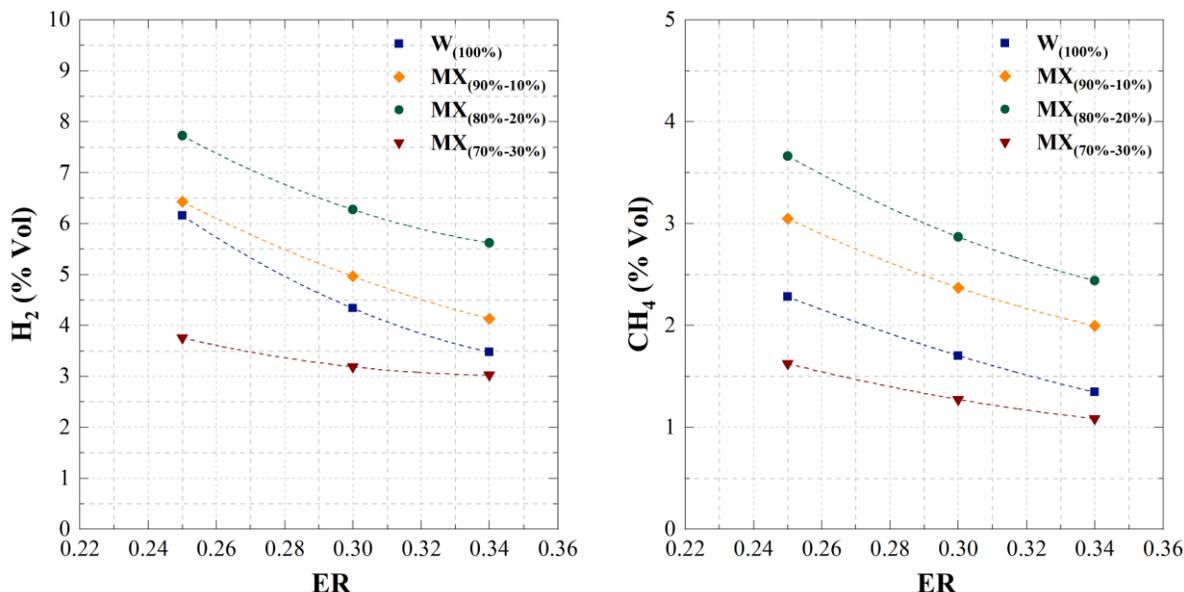


Figura 4.4. Perfiles de concentración de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% (elaboración propia).

En estas gráficas se observa que una relación de equivalencia alta tiene como consecuencia una concentración de CO<sub>2</sub> mayor debido a que más flujo de aire (mayor disponibilidad de oxígeno) favorece las reacciones de oxidación, mientras los niveles de CO, CH<sub>4</sub> y de H<sub>2</sub> disminuyen.

Las figuras 4.3 y 4.4 también muestran que la mezcla MX<sub>80%-20%</sub> presenta concentraciones mayores de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>. Este resultado puede ser explicado por el efecto catalítico del potasio (K<sub>2</sub>O) presente en las cenizas del pasto (Tabla 8), que puede incrementar la conversión de carbón en la biomasa mediante una mejora en el mecanismo de las reacciones de vapor y que mejora las condiciones del proceso en general, como se ha encontrado en diferentes investigaciones sobre gasificación que



utilizan biomasa, carbón y mezclas de estos [104]–[107] catalizadas por la presencia de compuestos de potasio.

Adicionalmente, un menor tamaño de las partículas de pasto favorece el proceso de gasificación como se menciona en trabajos anteriores que utilizan biomásas y reactores similares [54], [89]. Sin embargo, es importante anotar que en sustituciones superiores al 20% (MX<sub>70%-30%</sub>) se generan tasas de combustión de la biomasa más altas debido a la presencia de una mayor masa de partículas pequeñas [108], [109]. En general, una sustitución de este nivel permite interacciones que llevan a una reducción en la conversión de carbón, disminuyendo el contenido de CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, mientras aumenta la cantidad de CO<sub>2</sub> en el gas producto. Específicamente, una cantidad mayor de pasto lleva a condiciones de proceso en donde el efecto positivo de la adición de potasio es mitigado por una alta concentración del CO<sub>2</sub>.

La figura 4.5 muestra la cantidad de gas de síntesis obtenido en kilogramos (kg gas/kg biomasa), en donde se puede observar que la producción del gas aumenta con la relación de equivalencia. Sin embargo, este aumento no es pronunciado porque es parcialmente compensado por la reducción en la conversión de carbón con la mayor disponibilidad de oxígeno cuando se usan relaciones de equivalencia más grandes.

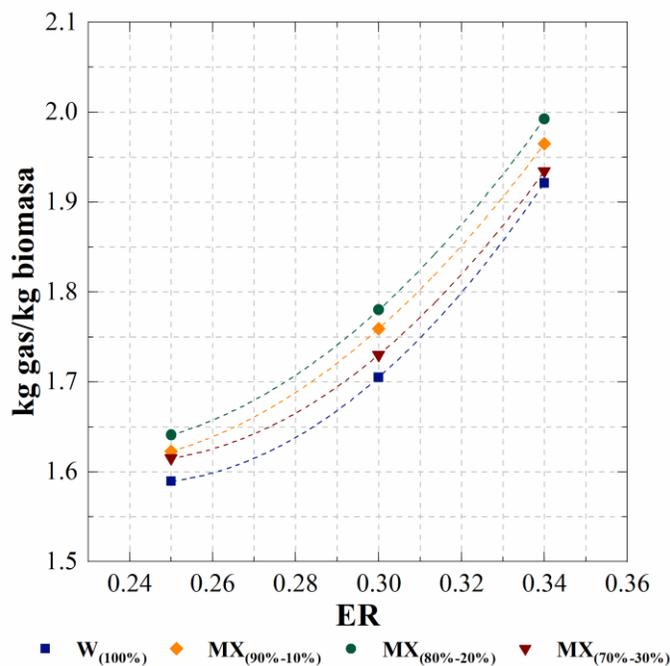


Figura 4.5. Producción de gas para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% (elaboración propia).

### 4.3 Temperatura del proceso y composición del gas.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran el efecto de la temperatura del reactor sobre la composición del gas y la producción de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (kg/kg de biomasa) cuando se utiliza una relación de equivalencia de 0.34 (ER3). Estas figuras presentan los resultados para 100% madera y para la mezcla más relevante encontrada en cuanto al rendimiento de la gasificación (MX<sub>80%-20%</sub>). Es importante señalar que el comportamiento es similar para todas las relaciones de equivalencia y mezclas analizadas. Se puede afirmar que la influencia de la temperatura sobre el proceso de gasificación no es igual de significativa que la observada para el caso de la relación de equivalencia. En general, y de acuerdo con el principio de Le Chatelier, las reacciones endotérmicas progresan en



la dirección positiva si la temperatura de gasificación aumenta. Las reacciones endotérmicas como la de reformado ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ ), la reacción agua-gas ( $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ ) y la de Boudouard ( $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ ) son impulsadas hacia los productos cuando aumenta la temperatura del proceso, lo que conduce a mayores niveles de CO y de  $\text{H}_2$ . De forma similar, la reacción exotérmica wáter-gas shift ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) es responsable de la disminución en el contenido de  $\text{CO}_2$  cuando aumenta la temperatura de gasificación, debido a que la conversión de reactantes a producto es menos favorable bajo esta condición [58], [110]–[114]. Sin embargo, este comportamiento cuando se utilizan mezclas deberá ser estudiado en detalle en trabajos posteriores. En las figuras se aprecia que las cantidades de hidrógeno y monóxido de carbono muestran un incremento cercano al 20% para la mezcla  $\text{MX}_{80\%-20\%}$  respecto a la gasificación de 100% madera, de igual forma en la mezcla el metano obtenido es un 30% mayor y la producción de dióxido de carbono es ligeramente menor.

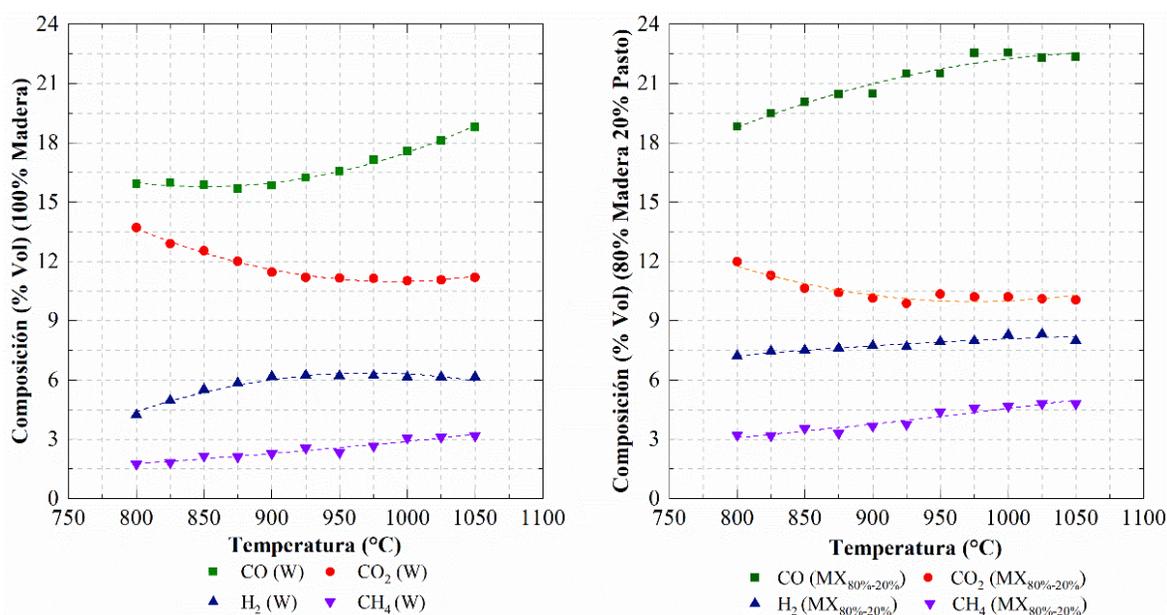


Figura 4.6. Perfiles de concentraciones en función de la temperatura para 100% madera (W) y mezcla 80%-20% ( $\text{MX}_{80-20}$ ) (elaboración propia).

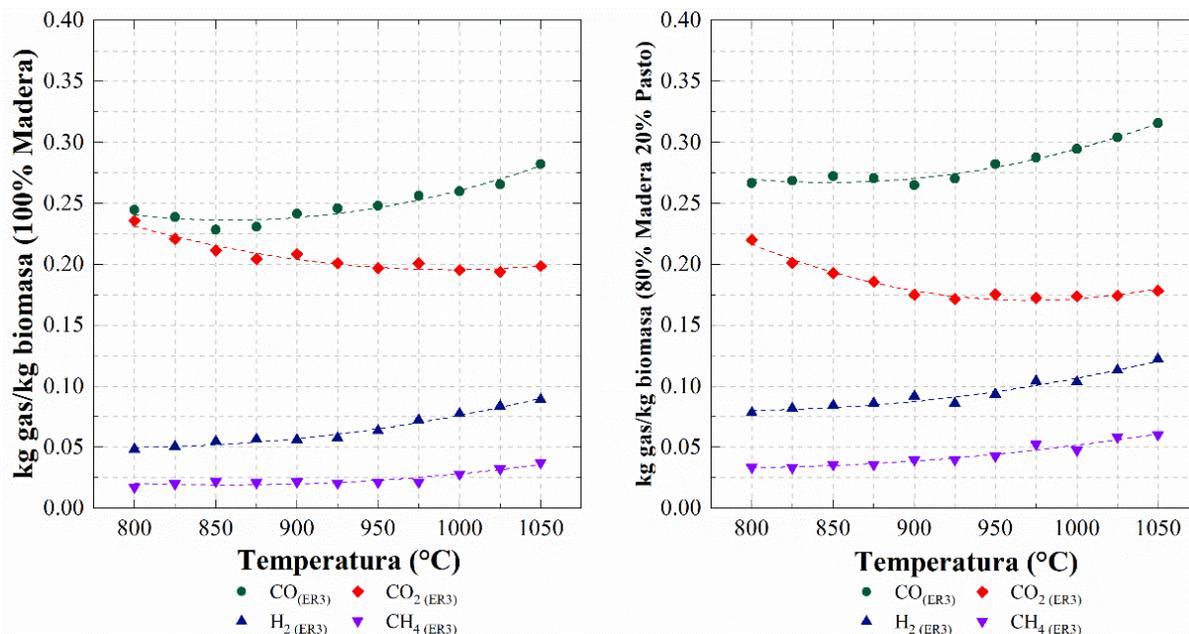


Figura 4.7. Producción de gases en función de la temperatura para 100% madera (W) y mezcla 80%-20% (MX<sub>80-20</sub>) (elaboración propia).

Esta mejora en el proceso de gasificación de la mezcla, como se ha mencionado, puede explicarse por el contenido de K<sub>2</sub>O en el pasto que ayuda a la estabilidad térmica, la liberación de volátiles y la conversión del carbón en la gasificación. Adicionalmente durante todas las pruebas, la producción fue estable dentro de un rango de temperaturas cercano a 300°C para todas las especies observadas. Estos resultados implican que la adición de pasto permite una mejora significativa en la gasificación de residuos forestales.

#### 4.4 Nivel de bio-carbón y alquitranes en el proceso.

La relación de equivalencia, como ya se mencionó es uno de los parámetros más importantes en la gasificación debido a su influencia en la conversión, poder calorífico y



nivel de producción de biocarbón y alquitranes. La figura 4.8 muestra la producción de biocarbón, calculada como la masa de biocarbón con respecto a la cantidad de biomasa alimentada al reactor durante una prueba experimental. Se puede observar que para el caso de 100% madera, la producción de biocarbón disminuye de 0.22 a 0.17 kg/kg de biomasa cuando la relación de equivalencia aumenta de 0.25(ER1) a 0.34 (ER3). Este comportamiento está de acuerdo con estudios previos en los que se concluye que en general, la cantidad de biocarbón disminuye cuando aumenta el agente oxidante suministrado.

La utilización de mezclas nuevamente adquiere importancia por su influencia en este parámetro de la gasificación. Como se puede observar en la figura 4.8, la adición de pasto en los niveles propuestos permite estabilizar el proceso, mediante la reducción del efecto de la mayor cantidad de oxígeno disponible (a altas ER) en la conversión de carbón y en el subproceso de combustión. Este efecto se encuentra ausente cuando se gasifica 100% madera, por lo que los niveles de biocarbón reportados tienen una pendiente de disminución más pronunciada como se aprecia en la figura. El anterior resultado está de acuerdo con investigaciones anteriores que utilizan madera de pino y en general biomásas similares [54], [92], [95], [115].

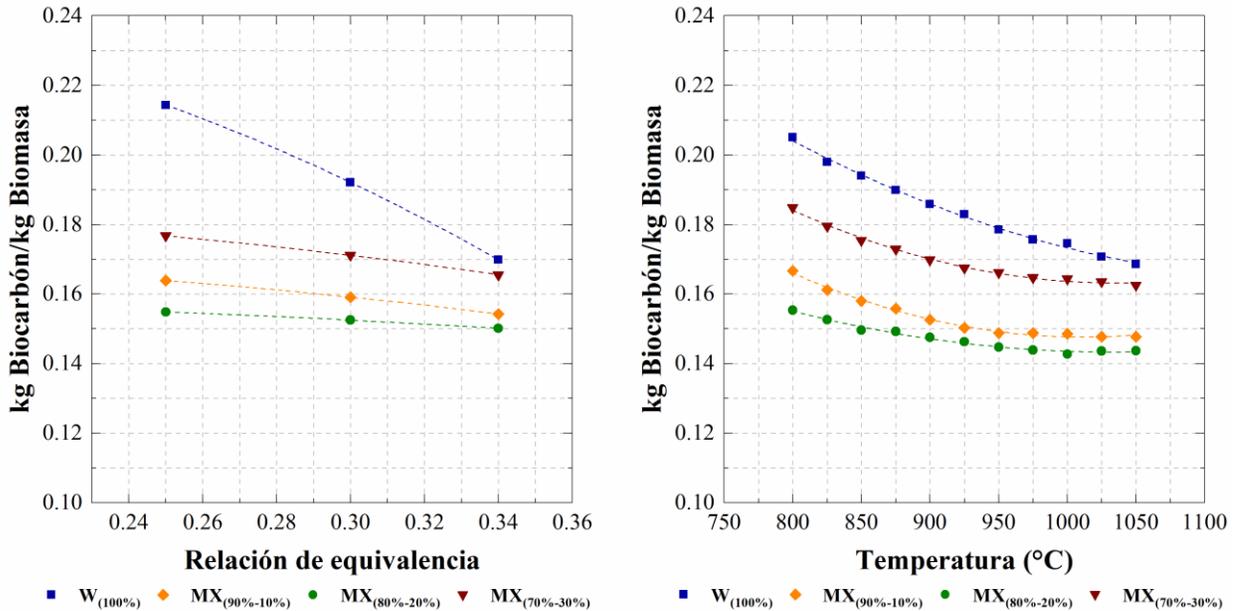


Figura 4.8. Producción de Biocarbón en función de ER (Izq.) y de la Temperatura (Der.) (elaboración propia).

Por otra parte, en la figura 4.9 se puede observar que los alquitranes disminuyen con el aumento tanto de la relación de equivalencia como de la temperatura, lo cual es un resultado acorde al obtenido en estudio previos [116], [117]. En la figura se aprecia que para las distintas composiciones se tiene un comportamiento análogo en cuanto a la tendencia a disminuir, además los niveles de alquitranes son inferiores en las mezclas lo que se convierte en una razón adicional para suponer que la adición de pasto en la gasificación de madera de pino permite mejorar el proceso. Es importante hacer notar que al utilizar una cantidad mayor al 20% de sustitución se tiene un resultado menos favorable y los niveles de alquitrán aumentan, aunque siguen permaneciendo por debajo de los alcanzados con 100% madera.

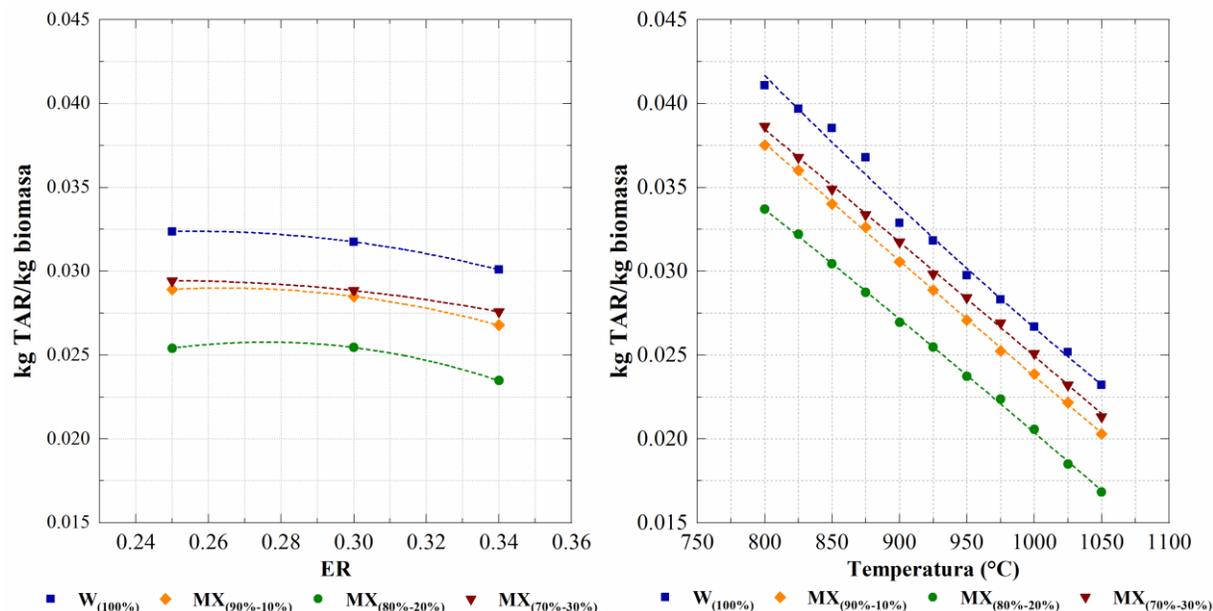


Figura 4.9. Alquitranes en función de ER (Izq.) y de la temperatura (Der.) (elaboración propia).

Los resultados anteriores tienden a hacer pensar que el aumento de la relación de equivalencia (ER) y la temperatura, es el camino a seguir para mejorar el proceso de gasificación de residuos forestales. Sin embargo, si bien es cierto que la conversión es mayor, los niveles en el biocarbón y los alquitranes son inferiores, se debe observar el efecto de estos parámetros en el proceso completo de gasificación, principalmente la calidad del gas y la eficiencia energética del proceso.

#### 4.5 Poder calorífico del gas producto.

Existe una variación en la composición del gas producto, como resultado de las distintas variables que afectan los fenómenos asociados a la gasificación tanto de madera



de pino como de las mezclas. Esta variación influye directamente en el poder calorífico del gas obtenido, el cual depende en su totalidad de las especies en la corriente de salida. La figura 4.10 muestra el comportamiento tipo del poder calorífico del gas para temperaturas entre 800°C y 1100 °C. Se puede apreciar que el poder calorífico varía entre 2 MJ/Nm<sup>3</sup> y 6 MJ/Nm<sup>3</sup>, lo que es coherente con estudios publicados anteriormente [21], [58], [118]–[120] que utilizan biomasa.

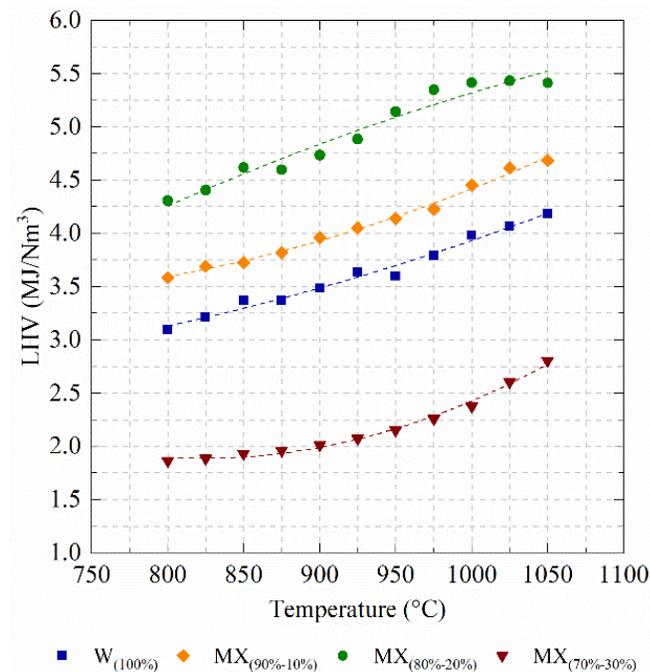


Figura 4.10. Poder calorífico inferior (LHV) para 100% madera (W), mezclas (MX) 90%-10%, 80%-20% y 70%-30% (elaboración propia).



#### 4.6 Caso de estudio: gas de síntesis en una planta de generación de potencia.

La siguiente sección muestra las mejoras en la eficiencia que se pueden alcanzar con la inclusión de un sistema de gasificación en una planta existente de generación de potencia. Para esto se utilizan de forma ilustrativa dos plantas, la primera de estas es una planta con turbina de vapor en un ciclo convencional en donde el gas de síntesis reemplaza el combustible utilizado en la caldera y la segunda es un ciclo combinado en el que se sustituye el combustible de la turbina de gas. Con este fin se utiliza la herramienta computacional *Thermoflex* que permite analizar completamente el ciclo realizando los balances de masa y energía requeridos. Además, el software *Thermoflex* proporciona información sobre los parámetros de funcionamiento del sistema. Este modelado computacional busca ilustrar el potencial de aprovechamiento energético asociado al uso de la tecnología de gasificación. Sin embargo, no se debe pasar por alto que se requiere una inversión para la implementación del sistema de gasificación y aunque se ha demostrado en múltiples ocasiones que es viable económicamente, es necesario evaluar cada caso particular.

##### 4.6.1 Central de vapor.

El caso de estudio analizado es una planta de potencia que funciona con una turbina de vapor con las acostumbradas mejoras de precalentamiento y recalentamiento del fluido de trabajo. La capacidad total de la planta es de 320 MW a máxima carga. Esta central cuenta con 3 calentadores de agua de media presión, un deaerador y un calentador de agua de baja presión. El agua entra a 171 bar al generador de vapor donde es sobrecalentado hasta 540 °C, condiciones a las cuales entra en la etapa de alta presión de la turbina. Una fracción del vapor que se expande en la primera etapa pasa



por un proceso de recalentamiento hasta los 536 °C a una presión de 31 bar. Al finalizar el proceso de expansión en la última etapa de la turbina (0.1 bar), el vapor se lleva a un condensador para regresar el fluido de trabajo a las condiciones de inicio de ciclo. La figura 4.11 muestra el diagrama de la central de vapor analizada y la tabla 10 muestra el detalle de las principales condiciones de operación.

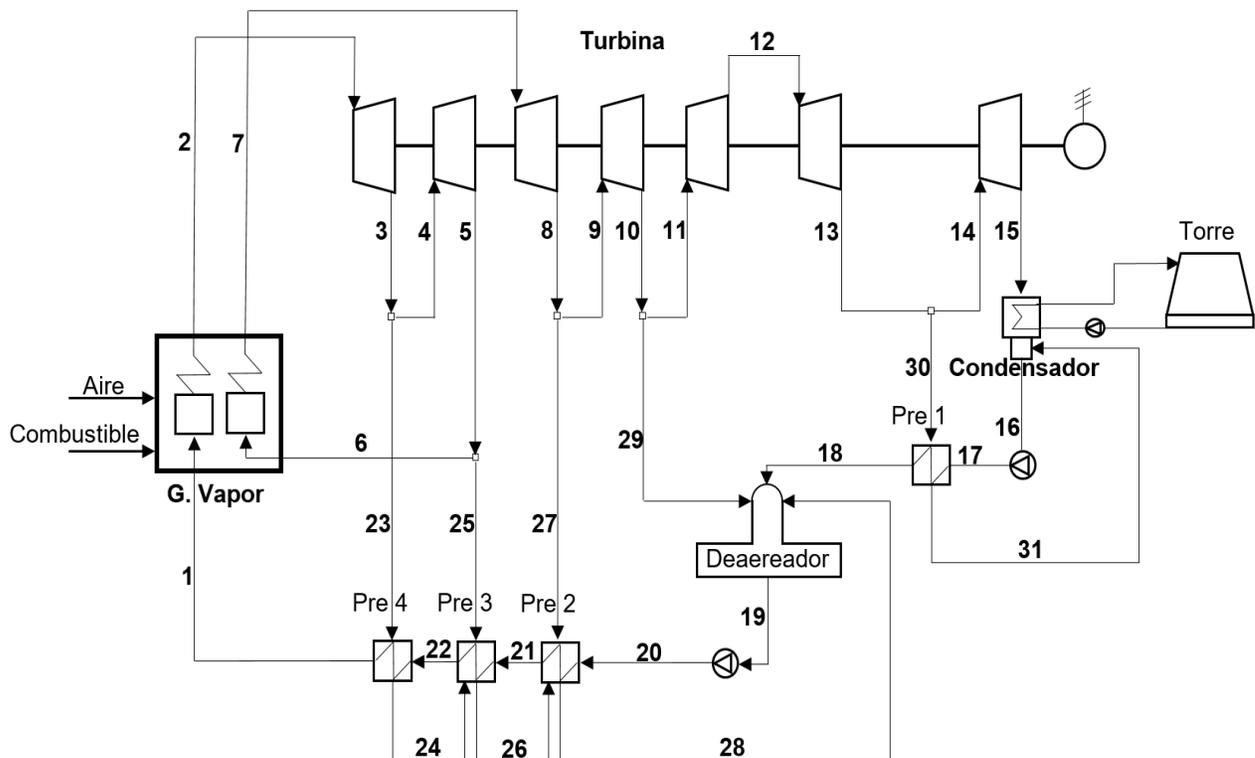


Figura 4.11. Diagrama planta 320 MW (elaboración propia).



Tabla 10. Parámetros de operación planta de 320MW (elaboración propia).

Parámetro	Valor
Flujo másico agua de alimentación	204.4 kg/s
Temperatura agua de alimentación	252 °C
Presión de vapor	171 bar
Temperatura vapor	540 °C
Flujo másico en recalentamiento	325 kg/s
Flujo Agua de enfriamiento	10200 kg/s
Presión en el condensador	0.1 bar
Temperatura gases de escape	130 °C

La modificación a esta central implica la adición de un sistema de gasificación (gasificador, unidad de separación si se desea emplear oxígeno como agente, sistema de enfriamiento, sistema de filtrado) y la cadena de suministro del nuevo combustible (biomasa). Existen varias opciones para el tipo de gasificador y el agente gasificante que se pueden utilizar en el modelado computacional. Con el objetivo de hacer esta representación lo más general posible, se utiliza un gasificador de Thermoflex que utiliza un modelo termodinámico para determinar las condiciones de operación requeridas para el suministro del flujo de gas de síntesis a emplear en el generador de vapor, y al cual se le introdujo la composición de gas de síntesis alcanzada para la mezcla 80% madera de pino - 20% Pasto. En la figura 4.12 se muestra un diagrama de bloques en thermoflex del gasificador y los sistemas adicionales.

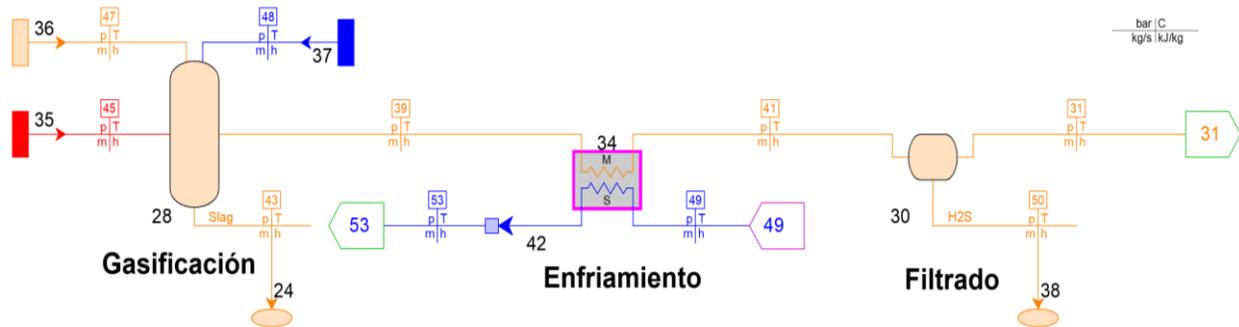


Figura 4.12. Esquema del sistema de gasificación thermoflex (elaboración propia).

La tabla 11 muestra un resumen para los resultados de los distintos parámetros de la planta en el caso convencional y en la configuración con gasificación. En el anexo A se pueden apreciar las simulaciones en thermoflex de donde se extraen estos resultados.

Tabla 11. Parámetros principales de las configuraciones (elaboración propia).

	Convencional	Gasificación
Potencia bruta	320 MW	320 MW
Eficiencia eléctrica bruta	39.6%	43.4%
Potencia neta	300 MW	300 MW
<b>Eficiencia eléctrica neta</b>	<b>36.9%</b>	<b>40.6%</b>
<b>Régimen térmico</b>	<b>9745 kJ/kWh</b>	<b>8859 kJ/kWh</b>
Auxiliares	21483 kW	20402 kW
Consumo de agua	204.4 kg/s	222.7 kg/s



Es necesario comentar que con la adición del sistema de gasificación y si la turbina de vapor instalada lo permite, se puede aumentar la generación de potencia de la planta. Sin embargo, el caso analizado contempla la sustitución total del combustible utilizado para mantener los niveles de generación de la planta estudiada. Como era de esperarse la utilización de un sistema de gasificación mejora significativamente el régimen térmico de la planta y en general la eficiencia del sistema, esto sumado al beneficio de utilizar residuos que de otro modo entrarían a influir en las condiciones ambientales de su zona de deposición.

Finalmente, el uso del gas de síntesis obtenido de la mezcla de residuos forestales permite tener una idea de los niveles de generación que se pueden alcanzar, si se cuenta con la biomasa suficiente para trabajar de forma estable en el sistema de generación de potencia deseado.

#### *4.6.2 Central de ciclo combinado.*

Una de las principales aplicaciones de la gasificación a nivel comercial, es su utilización en plantas de generación de energía para sustituir el combustible de la turbina de gas. El caso de estudio analizado es una planta de potencia que funciona con dos turbinas de gas con sus respectivos sistemas de recuperación para la generación de vapor y una turbina de vapor. La capacidad total de la planta es de 450 MW. Las turbinas de gas tienen una máxima potencia de salida neta de 173 MW (SGT6-3000E) y 260 MW (SGT6-5000F). La central cuenta con 3 niveles de presión para la generación del vapor, con sus respectivos procesos de precalentamiento y sobrecalentamiento del fluido de trabajo, además de un deaerador para el nivel de presión más bajo. Los tres niveles de presión son 125 bar, 37 bar y 5 bar con temperaturas de salida de la caldera recuperadora



de 557°C, 300°C y 230°C respectivamente. Al finalizar el proceso de expansión en la última etapa de la turbina (0.1 bar), el vapor se lleva a un sistema de condensación para regresar el fluido de trabajo a las condiciones de inicio de ciclo. La tabla 12 muestra el detalle de las principales condiciones de operación del ciclo.

Tabla 12. Parámetros de operación planta de ciclo combinado (elaboración propia).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Flujo másico agua de alimentación	142 kg/s
Temperatura agua de alimentación (alta)	200 °C
Presión de vapor (alta)	125 bar
Temperatura vapor (alta)	557 °C
Flujo Agua de enfriamiento	7514 kg/s
Presión en el condensador	0.1 bar
Temperatura gases de escape	110 °C

Para la realizar las modificaciones a la central de potencia se requiere la adición de un sistema de gasificación (gasificador, unidad de separación si se desea emplear oxígeno como agente, sistema de enfriamiento, sistema de filtrado) con la capacidad necesaria para suplir la demanda de combustible de las turbinas de gas y la cadena de suministro del nuevo combustible (biomasa), existen varias opciones para el tipo de gasificador y el agente gasificante que se pueden utilizar. En este caso nuevamente se utiliza el gasificador de Thermoflex que utiliza un modelo termodinámico para determinar las condiciones de operación requeridas para el suministro del flujo de gas de síntesis y



al cual se le introdujo la composición de gas de síntesis obtenida para la mezcla 80% madera de pino - 20% pasto.

La tabla 13 muestra un resumen para los resultados de los distintos parámetros de la planta, en el caso de ciclo combinado convencional y en la configuración con gasificación IGCC. En el anexo A se pueden apreciar las simulaciones en thermoflex de donde se extraen estos resultados.

Tabla 13. Parámetros principales de las configuraciones de ciclo combinado (elaboración propia).

	<b>Convencional</b>	<b>IGCC</b>
Potencia bruta	450 MW	573 MW
Eficiencia eléctrica bruta	53.2%	66.8%
Potencia neta	438 MW	300213 MW
<b>Eficiencia eléctrica neta</b>	<b>51.8%</b>	<b>65.0%</b>
<b>Régimen térmico</b>	<b>6952 kJ/kWh</b>	<b>5537 kJ/kWh</b>
Auxiliares	11925 kW	15859 kW
Consumo de agua	142 kg/s	196.4 kg/s

La inclusión del sistema de gasificación como ya se ha demostrado mejora el desempeño del sistema de ciclo combinado. En el caso analizado y con la utilización del gas de síntesis de la mezcla 80% madera de pino-20% pasto, la central al convertirse en



IGCC aumentaría su eficiencia alrededor de un 10% con los respectivos beneficios asociados a esta mejora; además debido a que en el caso particular los modelos de las turbinas lo permiten, la generación de potencia también puede ser aumentada con la inclusión del proceso de gasificación.



## 5. CONCLUSIONES.

El objetivo del presente trabajo es contribuir a aumentar el conocimiento en la gasificación de mezclas de residuos biomásicos. La información lograda tiene el potencial de ayudar a soportar el desarrollo de procesos con mejores resultados en términos de calidad del gas de síntesis y de los residuos correspondientes. El estudio está enfocado en observar el efecto de parámetros de operación y de la composición promedio de la biomasa utilizada, en la composición de los gases combustibles ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2$ ) de la corriente de salida del reactor.

El proceso de gasificación para los casos analizados presenta un comportamiento análogo desde el punto de vista de la temperatura. Luego del proceso de calentamiento inicial, la temperatura se mantiene al interior del reactor entre  $800\text{ }^\circ\text{C}$  y  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  mientras se consume el combustible (madera de pino o mezcla madera de pino-pasto) y posteriormente disminuye cuando la biomasa es consumida por el proceso.

Dentro de los rangos de estudio de las relaciones de equivalencia (0.25, 0.30 y 0.34), se alcanzaron concentraciones de  $\text{CO}$  máximas y mínimas en la mezcla  $\text{MX}_{80\%-20\%}$  de 23 % y 19 % Vol. respectivamente, en el caso del  $\text{H}_2$  de 8 % y 6 % Vol.; para el  $\text{CH}_4$  de 4 % y 3 % Vol., y finalmente en el  $\text{CO}_2$  de 12 % y 9 % Vol. En el caso de 100% madera de pino los valores correspondientes a  $\text{CO}$  son 19 % y 16 % Vol., en el  $\text{H}_2$  de 6 % y 4 % Vol., para el  $\text{CH}_4$  3 % y 1 % Vol. y en el  $\text{CO}_2$  14 % y 11 % Vol. Estos resultados muestran que la gasificación de mezclas de residuos de biomasa presenta características favorables para los objetivos de la conversión energética, alcanzándose potencialmente mejoras en



los niveles de conversión de carbón y una mayor calidad del gas de síntesis, comparados con el proceso cuando no se realiza sustitución (100% madera de pino).

Por otra parte, la producción de gas en términos de kg gas por kg de biomasa suministrada, es aproximadamente un 5% mayor en el caso de la mezcla de mejor desempeño (MX<sub>80%-20%</sub>), alcanzando 2 kg gas/kg biomasa para una relación de equivalencia de 0.34. De igual forma se tiene un mejor desempeño en el parámetro de producción de biocarbón (kg biocarbón/kg biomasa), en donde a lo largo de todo el rango de operación de temperatura y para todas las relaciones de equivalencia, las mezclas de residuos presentan menores niveles, alcanzando hasta un 30% menos de este material residual, si se compara la gasificación de la mezcla MX<sub>80%-20%</sub> con la de 100% madera de pino.

En cuanto a los niveles de alquitrán, el panorama observado es igualmente favorable para las mezclas de residuos. En los rangos de temperatura y de relación de equivalencia estudiados, los niveles de alquitrán (TAR) son inferiores entre un 8% y 20% dependiendo de la mezcla y los parámetros de operación utilizados.

Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los márgenes esperados y son acordes con los derivados de publicaciones anteriores que utilizan biomazas del mismo tipo. En todos los escenarios experimentales, que incluyen variaciones en la temperatura, composición de la biomasa y agente gasificante, se puede observar que los gases combustibles en la corriente de salida siguen un comportamiento ajustado a la misma tendencia, con una mayor concentración del monóxido de carbono seguido del hidrógeno y metano.



Los análisis muestran que se puede alcanzar un incremento del 30% en la concentración de metano y del 20% para el caso del monóxido de carbono y del hidrógeno cuando se utiliza una sustitución del 20% (MX<sub>80%-20%</sub>). Esta mejora puede ser explicada mediante varios factores, uno de estos es el tamaño de partícula inferior en el pasto que permite una mejor distribución de la biomasa en el gasificador, mientras que facilita la homogenización de las etapas al interior del reactor. Otro factor que se supone relevante es el contenido de óxido de potasio en el pasto que puede favorecer la conversión de carbón mediante una mejora en el mecanismo de reacción con un efecto catalizador.

Por otro lado, las sustituciones superiores al 20% utilizando pasto resultan en un incremento de la combustión que afecta la conversión de carbón y la concentración de gases combustibles en la corriente de salida, esto se produce porque una masa mayor de partículas pequeñas tiende a facilitar la combustión, lo cual en conjunto con el contenido de K<sub>2</sub>O del pasto da lugar a un aumento del contenido de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, en el rango de sustitución estudiado se obtienen niveles de alquitrán menores que los logrados para el caso de 100% madera. Esto resulta en una alternativa si lo que se desea es tener una producción de biocarbón ligeramente mayor y disminuir las necesidades de limpieza del gas, aunque exista una disminución del poder calorífico del gas final.

Aunque en primera instancia, la mezcla MX<sub>80%-20%</sub> sea mejor desde el punto de vista de la generación y calidad del gas, se debe analizar cuáles son los requerimientos o necesidades en la producción de biocarbón. Es posible que, para determinada aplicación o industria, se necesite aumentar la producción de gas que se obtiene cuando se está



empleando 100% madera como la biomasa alimentada, pero de igual forma el nivel de producción de biocarbón sea relevante (uso en otros procesos). En este caso la utilización de la mezcla MX<sub>90%-10%</sub> podría ser interesante e incluso considerada una opción de mejor relación kg gas/kg biocarbón.

El poder calorífico obtenido para todas las configuraciones incluyendo las distintas mezclas está en el rango de lo esperado para el agente gasificante y el tipo de biomasa utilizados. Se alcanzaron composiciones del gas producto con un contenido energético coherente con publicaciones anteriores y consistentes durante las experiencias realizadas, con poderes caloríficos variando entre 3 MJ/m<sup>3</sup> y 4.5 MJ/m<sup>3</sup> para 100% madera y entre 3.5 MJ/m<sup>3</sup> y 6 MJ/m<sup>3</sup> para las mezclas de 10% y 20% de sustitución.

Por otra parte, luego de realizar el modelado computacional de dos sistemas de generación de potencia con la ayuda del software especializado thermoflex, en los cuales se emplea el gas de síntesis obtenido de la mezcla MX<sub>80%-20%</sub> como combustible, se tiene una idea clara del potencial de aprovechamiento que se puede alcanzar con la implementación de la gasificación de mezclas de residuos. En este caso se obtuvieron eficiencias eléctricas netas superiores hasta en un 10% cuando se sustituye el combustible convencional por gas de síntesis.

### **5.1 Trabajos futuros sugeridos.**

Existe una gran variedad de trabajos que se pueden realizar en el campo de estudio de la gasificación y que pueden contribuir a un mejor entendimiento del proceso cuando se utilizan mezclas madera-pasto



La primera de las actividades recomendadas, es la evaluación del uso de distintos gasificantes que son comúnmente utilizados en el proceso de gasificación (oxígeno, vapor de agua y mezclas), con el objetivo de establecer si alguna de estas opciones presenta resultados que permitan mejorar los subprocesos o los productos finales (mayor concentración de gases combustibles, mayor conversión de carbón, nivel de residuos).

El análisis de las características de la gasificación bajo una atmósfera presurizada sería una de las actividades obligadas, si se desea tener un conocimiento completo de la gasificación cuando se utilizan mezclas de biomásas forestales, evaluando los distintos parámetros para determinar si se mantiene la tendencia de baja influencia de la presión en el proceso.

Estudiar la formación de alquitranes, de modo que se pueda llegar a una disminución de sus niveles, ayudando a corregir una de las desventajas más nombradas en la configuración de reactores ascendentes (Updraft).

Realizar una caracterización del biocarbón que se obtiene, con el objetivo de determinar su posible uso como mejorador de suelos o incluso estudiar una posible recirculación de este al reactor dentro del proceso de gasificación, actividad que se ha demostrado favorece el proceso en otros tipos de biomásas.

## REFERENCIAS.

- [1] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, "What a waste: a global review of solid waste management," 2012.
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," 2018.
- [3] United States Environmental Protection Agency EPA, "Advancing Sustainable Materials Management : 2013 Fact Sheet," 2015.
- [4] a. Papageorgiou, J. R. Barton, and a. Karagiannidis, "Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 10, pp. 2999–3012, 2009.
- [5] U. Arena, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 625–639, 2012.
- [6] U.S. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2017," 2017.
- [7] Secretary of Energy Mexico, "Balance Nacional de Energía 2017," 2017.
- [8] B. Leckner, "Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy ( WtE ) units," *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 13–25, 2015.
- [9] Q. Zhang, L. Dor, L. Zhang, W. Yang, and W. Blasiak, "Performance analysis of municipal solid waste gasification with steam in a Plasma Gasification Melting reactor," *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 219–229, 2012.
- [10] M. Materazzi, P. Lettieri, L. Mazzei, R. Taylor, and C. Chapman, "Fate and behavior of inorganic constituents of RDF in a two stage fluid bed-plasma gasification plant,"

*FUEL*, vol. 150, pp. 473–485, 2015.

- [11] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, and C. S. Ho, “Energy , economic and environmental ( 3E ) analysis of waste-to-energy ( WTE ) strategies for municipal solid waste ( MSW ) management in,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 111–120, 2015.
- [12] M. Materazzi, P. Lettieri, L. Mazzei, R. Taylor, and C. Chapman, “Tar evolution in a two stage fluid bed – plasma gasification process for waste valorization,” *Fuel Process. Technol. J.*, vol. 128, pp. 146–157, 2014.
- [13] M. Niu, Y. Huang, B. Jin, and X. Wang, “Oxygen Gasification of Municipal Solid Waste in a Fixed-bed Gasifier,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 22, pp. 1021–1026, 2014.
- [14] J. Río, L. Castrill, E. Mara, and Y. Fern, “Life cycle assessment of different municipal solid waste management options : a case study of Asturias ( Spain ),” *J. Clean. Prod. J.*, vol. 81, pp. 178–189, 2014.
- [15] D. Beneroso, J. M. Bermúdez, A. Arenillas, and J. A. Menéndez, “Integrated microwave drying , pyrolysis and gasification for valorisation of organic wastes to syngas,” *FUEL*, vol. 132, pp. 20–26, 2014.
- [16] M. Campoy, A. Gómez-Barea, P. Ollero, and S. Nilsson, “Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 121, pp. 63–69, 2014.
- [17] International Energy agency, “World Energy Balances 2018,” 2018.
- [18] E. Peduzzi, G. Boissonnet, and F. Maréchal, “Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition,” *Fuel*, vol. 181, pp. 207–217, 2016.
- [19] A. L. Galindo, E. S. Lora, R. V. Andrade, S. Y. Giraldo, R. L. Jaén, and V. M. Cobas, “Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of

- operating conditions on gas quality," *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 236–244, 2014.
- [20] D. Eriksson *et al.*, "Characterization of Scots pine stump-root biomass as feed-stock for gasification," *Bioresour. Technol.*, vol. 104, pp. 729–736, 2012.
- [21] A. Kulkarni, R. Baker, N. Abdoumomine, S. Adhikari, and S. Bhavnani, "Experimental study of torrefied pine as a gasification fuel using a bubbling fluidized bed gasifier," *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 460–468, 2016.
- [22] G. J. Lyons, F. Lunny, and H. P. Pollock, "A procedure for estimating the value of forest fuels," *Biomass*, vol. 8, no. 4, pp. 283–300, 1985.
- [23] A. Demirba, "Calculation of higher heating values," vol. 76, no. 5, pp. 431–434, 1997.
- [24] J. Parikh, S. A. Channiwala, and G. K. Ghosal, "A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels," *Fuel*, vol. 84, no. 5, pp. 487–494, 2005.
- [25] D. R. Nhuchhen and P. Abdul Salam, "Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach," *Fuel*, vol. 99, pp. 55–63, 2012.
- [26] Z. T. Yu, X. Xu, Y. C. Hu, L. W. Fan, and K. F. Cen, "Unsteady natural convection heat transfer from a heated horizontal circular cylinder to its air-filled coaxial triangular enclosure," *Fuel*, vol. 90, no. 3, pp. 1128–1132, 2011.
- [27] M. Simone, C. Nicolella, and L. Tognotti, "Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of woody residues," *Bioresour. Technol.*, vol. 133, pp. 92–101, 2013.
- [28] C. Higman and M. Van der Burgt, *Gasification*. Gulf Professional Publishing, 2008.
- [29] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. 2010.
- [30] G. Buceti, S. Tosti, E. Barbuza, A. Pozio, and M. Santarelli, "Gasification of wood

biomass with renewable hydrogen for the production of synthetic natural gas," *Fuel*, vol. 242, no. November 2018, pp. 520–531, 2019.

- [31] S. B. Sethupathy, V. Chokkalingam, E. Natarajan, S. B. Sethupathy, V. Chokkalingam, and E. Natarajan, "An experimental exploration of the biomass gasification in a fluidized bed," vol. 043113, no. May 2013, 2012.
- [32] Z. S. Chen and L. Q. Wang, "Energy and exergy analysis of gas production from biomass intermittent gasification," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 6, pp. 1–11, 2013.
- [33] H. Yu, Z. Li, X. Yang, L. Jiang, and Z. Zhang, "Experimental research on oxygen-enriched gasification of straw in an entrained-flow gasifier," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, pp. 1–13, 2013.
- [34] A. Herlambang, S. Amrullah, D. Daniyanto, Y. S. Pradana, Rochmadi, and A. Budiman, "The effect of temperature and biomass pre-treatment on non-catalytic gasification of Indonesian sugarcane bagasse," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2026, 2018.
- [35] C. Loha, H. Chattopadhyay, and P. K. Chatterjee, "Energy generation from fluidized bed gasification of rice husk," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, 2013.
- [36] C. C. Sreejith, C. Muraleedharan, and P. Arun, "Equilibrium modeling and regression analysis of biomass gasification," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 6, 2012.
- [37] X. Yao *et al.*, "Syngas production through biomass/CO<sub>2</sub> gasification using granulated blast furnace slag as heat carrier," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 5, 2017.
- [38] H. Kitzler, C. Pfeifer, and H. Hofbauer, "Pressurized gasification of woody biomass-Variation of parameter," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 908–914, 2011.
- [39] R. A. Knight, "Experience with raw gas analysis from pressurized gasification of

- biomass,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 1, pp. 67–77, 2000.
- [40] F. Weiland, H. Hedman, M. Marklund, H. Wiinikka, O. Öhrman, and R. Gebart, “Pressurized oxygen blown entrained-flow gasification of wood powder,” *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 2, pp. 932–941, 2013.
- [41] S. Gül, F. Akgün, E. Aydar, and N. Ünlü, “Pressurized gasification of lignite in a pilot scale bubbling fluidized bed reactor with air, oxygen, steam and CO<sub>2</sub> agents,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 203–210, 2018.
- [42] L. Han, Q. Wang, Z. Luo, N. Rong, and G. Deng, “H<sub>2</sub> rich gas production via pressurized fluidized bed gasification of sawdust with in situ CO<sub>2</sub> capture,” *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 36–43, 2013.
- [43] C. Berrueco, J. Recari, B. M. Güell, and G. del Alamo, “Pressurized gasification of torrefied woody biomass in a lab scale fluidized bed,” *Energy*, vol. 70, pp. 68–78, Jun. 2014.
- [44] W. Li, Y. Qin, K. Xie, J. Feng, Z. Wu, and H. Huang, “Characterization of tar from sawdust gasified in the pressurized fluidized bed,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 4, pp. 243–249, 2006.
- [45] U. Arena, L. Zaccariello, and M. L. Mastellone, “Fluidized bed gasification of waste-derived fuels,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 7, pp. 1212–1219, 2010.
- [46] T. H. Kwak, S. Maken, S. Lee, J. W. Park, B. R. Min, and Y. D. Yoo, “Environmental aspects of gasification of Korean municipal solid waste in a pilot plant,” *Fuel*, vol. 85, no. 14–15, pp. 2012–2017, 2006.
- [47] A. Papageorgiou, J. R. Barton, and A. Karagiannidis, “Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste : A case for England,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 10, pp. 2999–3012, 2009.

- [48] M. Thamavithya and A. Dutta, "An investigation of MSW gasification in a spout-fluid bed reactor," *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, no. 10, pp. 949–957, 2008.
- [49] J. C. Rafael Luque, Carol Sze Ki Lin, Karen Wilson, *Handbook of Biofuels Production (Second Edition) Processes and Technologies*. 2016.
- [50] M. P. Boyce, *Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants*, Second. 2010.
- [51] A. Dean, D. Voss, and D. Draguljic, *Design and Analysis of Experiments*, Second. 2017.
- [52] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Ninth Edit. TEMPE: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [53] J. Lawson, *Design and Analysis of Experiments with R*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [54] T. M. Ismail and M. A. El-Salam, "Parametric studies on biomass gasification process on updraft gasifier high temperature air gasification," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 1460–1473, 2017.
- [55] S. Ayyadurai, L. Schoenmakers, and J. J. Hernández, "Mass and energy analysis of a 60 kWth updraft gasifier using large size biomass," *Fuel*, vol. 187, pp. 356–366, 2017.
- [56] J. Yu and J. D. Smith, "Validation and application of a kinetic model for biomass gasification simulation and optimization in updraft gasifiers," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 125, no. November 2017, pp. 214–226, 2018.
- [57] G. K. Ngusale, Y. Luo, R. Zhang, R. Yin, and W. Zhao, "Gasification of wood pellets in a bench-scale updraft gasifier," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 38, no. 13, pp. 1875–1881, Jul. 2016.

- [58] W. Chen, K. Annamalai, R. J. Ansley, and M. Mirik, "Updraft fixed bed gasification of mesquite and juniper wood samples," *Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 454–461, 2012.
- [59] A. Saravanakumar, T. M. Haridasan, T. B. Reed, and R. K. Bai, "Experimental investigation and modelling study of long stick wood gasification in a top lit updraft fixed bed gasifier," *Fuel*, vol. 86, no. 17–18, pp. 2846–2856, 2007.
- [60] W. Chen, S. Thanapal, K. Annamalai, and R. J. Ansley, "Updraft gasification of juniper wood biomass using CO<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> and Air (N<sub>2</sub>–O<sub>2</sub>)," *Int. J. Green Energy*, vol. 13, no. 13, pp. 1380–1387, 2016.
- [61] T. M. Ismail and M. A. El-Salam, "Numerical and experimental studies on updraft gasifier HTAG," *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 484–497, 2015.
- [62] A. N. Rollinson and M. K. Karmakar, "On the reactivity of various biomass species with CO<sub>2</sub> using a standardised methodology for fixed-bed gasification," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 128, pp. 82–91, 2015.
- [63] Y. A. Lenis and J. F. Pérez, "Gasification of Sawdust and Wood Chips in a Fixed Bed under Autothermal and Stable Conditions," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 36, no. 23, pp. 2555–2565, Dec. 2014.
- [64] F. Guo, Y. Dong, L. Dong, and C. Guo, "Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 11, pp. 5625–5633, 2014.
- [65] A. C. Gujar, J. Baik, N. Garceau, N. Muradov, and A. T-Raissi, "Oxygen-blown gasification of pine charcoal in a top-lit downdraft moving-hearth gasifier," *Fuel*, vol. 118, pp. 27–32, 2014.
- [66] A. Kuhe, H. A. Iortyer, and E. I. Kucha, "Experimental investigation of a 'throatless' downdraft gasifier with palm kernel shell," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, 2013.

- [67] L. Van De Steene, J. P. Tagutchou, F. Mermoud, E. Martin, and S. Salvador, "A new experimental Continuous Fixed Bed Reactor to characterise wood char gasification," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3320–3329, 2010.
- [68] B. Li, H. Yang, L. Wei, J. Shao, X. Wang, and H. Chen, "Hydrogen production from agricultural biomass wastes gasification in a fluidized bed with calcium oxide enhancing," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–8, 2017.
- [69] Z. S. Liu, C. L. Lin, T. J. Chang, and W. C. Weng, "Waste-gasification efficiency of a two-stage fluidized-bed gasification system," *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 250–256, 2016.
- [70] T. Robinson, B. Bronson, P. Gogolek, and P. Mehrani, "Comparison of the air-blown bubbling fluidized bed gasification of wood and wood-PET pellets," *Fuel*, vol. 178, pp. 263–271, 2016.
- [71] S. B. Sethupathy, V. Chokkalingam, E. Natarajan, S. B. Sethupathy, V. Chokkalingam, and E. Natarajan, "An experimental exploration of the biomass gasification in a fluidized bed An experimental exploration of the biomass gasification in a fluidized bed," vol. 043113, no. May 2013, 2012.
- [72] S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, Y. Guan, and L. Cai, "Influence of particle size on pyrolysis and gasification performance of municipal solid waste in a fixed bed reactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 16, pp. 6517–6520, 2010.
- [73] C. Chen, Y. Jin, J. Yan, and Y. Chi, "Simulation of municipal solid waste gasification for syngas production in fixed bed reactors," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 11, no. 8, pp. 619–628, 2010.
- [74] C. Chen, Y. Jin, J. Yan, and Y. Chi, "Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors," *Fuel*, vol. 103, pp. 58–63, 2013.
- [75] G. Xiao, B. Jin, M. Ni, K. Cen, Y. Chi, and Z. Tan, "A steam dried municipal solid

waste gasification and melting process,” *Front. Environ. Sci. Eng. China*, vol. 5, no. 2, pp. 193–204, 2011.

- [76] S. Luo, Y. Zhou, and C. Yi, “Syngas production by catalytic steam gasification of municipal solid waste in fixed-bed reactor,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 391–395, 2012.
- [77] J. Li, S. Liao, W. Dan, K. Jia, and X. Zhou, “Experimental study on catalytic steam gasification of municipal solid waste for bioenergy production in a combined fixed bed reactor,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 174–180, 2012.
- [78] I. S. Antonopoulos, a. Karagiannidis, L. Elefsiniotis, G. Perkoulidis, and a. Gkouletsos, “Development of an innovative 3-stage steady-bed gasifier for municipal solid waste and biomass,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 12, pp. 2389–2396, 2011.
- [79] N. Tanigaki, K. Manako, and M. Osada, “Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system,” *Waste Manag.*, vol. 32, pp. 667–675, 2012.
- [80] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, “Analysis of energy recovery potential using innovative technologies of waste gasification,” *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 640–652, 2012.
- [81] C. R. Vitasari, M. Jurascik, and K. J. Ptasinski, “Exergy analysis of biomass-to-synthetic natural gas (SNG) process via indirect gasification of various biomass feedstock,” *Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 3825–3837, 2011.
- [82] H. a. Arafat and K. Jijakli, “Modeling and comparative assessment of municipal solid waste gasification for energy production,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 8, pp. 1704–1713, 2013.
- [83] S. Begum, M. G. Rasul, D. Cork, and D. Akbar, “An Experimental Investigation of

Solid Waste Gasification Using a Large Pilot Scale Waste to Energyplant,” *Procedia Eng.*, vol. 90, pp. 718–724, 2014.

- [84] S. Begum, M. G. Rasul, and D. Akbar, “A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus,” *Procedia Eng.*, vol. 90, pp. 710–717, 2014.
- [85] D. S. Pandey, I. Pan, S. Das, J. J. Leahy, and W. Kwapinski, “Multi-gene genetic programming based predictive models for municipal solid waste gasification in a fluidized bed gasifier,” *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 524–533, 2015.
- [86] Q. Zhang, L. Dor, D. Fenigshtein, W. Yang, and W. Blasiak, “Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process,” *Appl. Energy*, vol. 90, no. 1, pp. 106–112, 2012.
- [87] Q. Zhang, L. Dor, A. K. Biswas, W. Yang, and W. Blasiak, “Modeling of steam plasma gasification for municipal solid waste,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 106, pp. 546–554, 2013.
- [88] J. Wang *et al.*, “Hydrogen-rich gas production by steam gasification of municipal solid waste (MSW) using NiO supported on modified dolomite,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 8, pp. 6503–6510, 2012.
- [89] S. Luo, B. Xiao, X. Guo, Z. Hu, S. Liu, and M. He, “Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of particle size on gasification performance,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1260–1264, 2009.
- [90] M. Lapuerta, J. J. Hernández, A. Pazo, and J. López, “Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, no. 9, pp. 828–837, 2008.
- [91] Y. Niu, F. Han, Y. Chen, Y. Lyu, and L. Wang, “Experimental study on steam gasification of pine particles for hydrogen-rich gas,” *J. Energy Inst.*, vol. 90, no. 5,

pp. 715–724, 2017.

- [92] J. Chen *et al.*, “Analysis of biomass gasification in bubbling fluidized bed with two-fluid model,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 6, 2016.
- [93] J. He, K. Göransson, U. Söderlind, and W. Zhang, “Simulation of biomass gasification in a dual fluidized bed gasifier,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2012.
- [94] H. Olgun, S. Ozdogan, and G. Yinesor, “Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 572–580, 2011.
- [95] F. Meng, J. Meng, and D. Zhang, “Influence of higher equivalence ratio on the biomass oxygen gasification in a pilot scale fixed bed gasifier,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 5, 2018.
- [96] M. Seggiani, S. Vitolo, M. Puccini, and A. Bellini, “Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier,” *Fuel*, vol. 93, pp. 486–491, 2012.
- [97] M. Kaewpanha *et al.*, “Steam co-gasification of brown seaweed and land-based biomass,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 120, pp. 106–112, 2014.
- [98] S. J. Seo, S. J. Lee, and J. M. Sohn, “The catalytic effect of lignite-CO<sub>2</sub> gasification with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, alkali earth and transition metal salts as catalytic additives,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 5, pp. 1–11, 2014.
- [99] T. J., S. P.K., and B. P., “Thermal behavior and pyrolytic kinetics of palm kernel shells and Indian lignite coal at various blending ratios,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 4, pp. 88–95, 2018.
- [100] J. Rizkiana *et al.*, “Effect of biomass type on the performance of cogasification of low rank coal with biomass at relatively low temperatures,” *Fuel*, vol. 134, no. June, pp. 414–419, 2014.

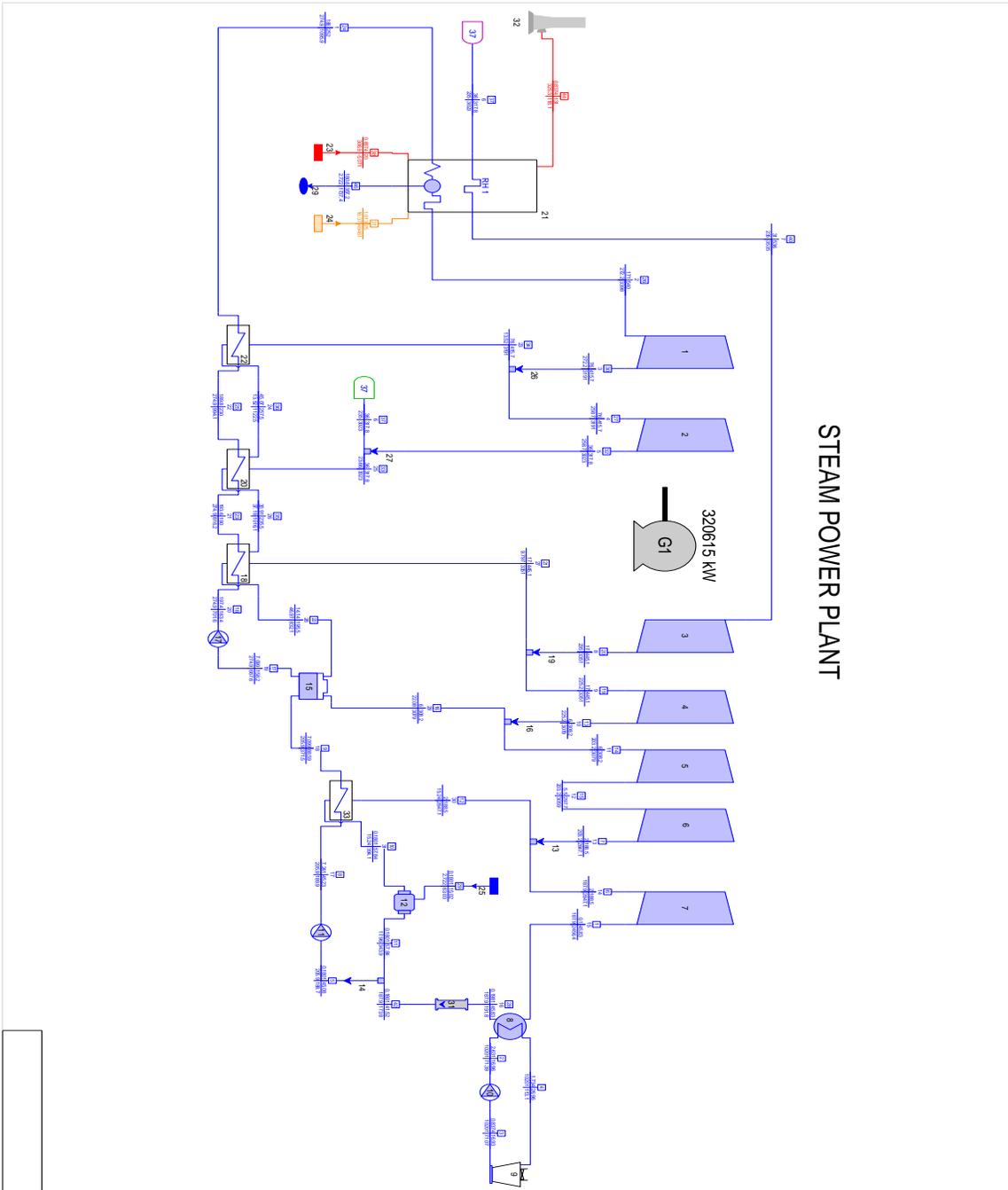
- [101] D. Mallick, P. Mahanta, and V. S. Moholkar, "Co-gasification of Coal/Biomass Blends in 50 kWe Circulating Fluidized Bed Gasifier," *J. Energy Inst.*, no. xxxx, 2019.
- [102] M. Inayat, S. A. Sulaiman, J. C. Kurnia, and M. Shahbaz, "Effect of various blended fuels on syngas quality and performance in catalytic co-gasification: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 105, no. January, pp. 252–267, 2019.
- [103] J. George, P. Arun, and C. Muraleedharan, "Experimental investigation on co-gasification of coffee husk and sawdust in a bubbling fluidised bed gasifier," *J. Energy Inst.*, no. November, pp. 1–10, 2018.
- [104] T. S. Farrow, C. Sun, and C. E. Snape, "Impact of biomass char on coal char burn-out under air and oxy-fuel conditions," *Fuel*, vol. 114, pp. 128–134, 2013.
- [105] M. S. Masnadi, J. R. Grace, X. T. Bi, C. J. Lim, and N. Ellis, "From fossil fuels towards renewables: Inhibitory and catalytic effects on carbon thermochemical conversion during co-gasification of biomass with fossil fuels," *Appl. Energy*, vol. 140, pp. 196–209, 2015.
- [106] N. Sadhwani, S. Adhikari, M. R. Eden, Z. Wang, and R. Baker, "Southern pines char gasification with CO<sub>2</sub>—Kinetics and effect of alkali and alkaline earth metals," *Fuel Process. Technol.*, vol. 150, pp. 64–70, 2016.
- [107] D. Tristantini, D. Supramono, and R. K. Suwignjo, "Catalytic effect of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in steam gasification of lignite char on mole ratio of H<sub>2</sub>/CO in syngas," *Int. J. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 22–30, 2015.
- [108] C. Ryu, Y. Bin Yang, A. Khor, N. E. Yates, V. N. Sharifi, and J. Swithenbank, "Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments - Fuel type, equivalence ratio and particle size," *Fuel*, vol. 85, no. 7–8, pp. 1039–1046, 2006.
- [109] Y. Bin Yang, C. Ryu, A. Khor, N. E. Yates, V. N. Sharifi, and J. Swithenbank, "Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach - Identification

of the controlling factors,” *Fuel*, vol. 84, no. 16, pp. 2116–2130, 2005.

- [110] S. Rodrigues, A. Almeida, A. Ribeiro, P. Neto, E. Ramalho, and R. Pilão, “Influence of temperature on the gasification of cork wastes,” *Energy Procedia*, vol. 136, pp. 127–132, 2017.
- [111] L. Liu *et al.*, “Experimental study of biomass gasification with oxygen-enriched air in fluidized bed gasifier,” *Sci. Total Environ.*, vol. 626, pp. 423–433, 2018.
- [112] H. Gu, Y. Tang, J. Yao, and F. Chen, “Study on biomass gasification under various operating conditions,” *J. Energy Inst.*, 2018.
- [113] W. Lan, G. Chen, X. Zhu, X. Wang, X. Wang, and B. Xu, “Research on the characteristics of biomass gasification in a fluidized bed,” *J. Energy Inst.*, vol. 92, pp. 613–620, 2019.
- [114] A. Almeida, P. Neto, I. Pereira, A. Ribeiro, and R. Pilão, “Effect of temperature on the gasification of olive bagasse particles,” *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 1, pp. 153–160, 2019.
- [115] K.-W. Lee, W. C. Lee, H. J. Lee, and J. I. Dong, “Gasification characteristics of sewage sludge combined with wood biomass,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 16, no. 4, pp. 642–649, 2014.
- [116] J. J. Hernández, R. Ballesteros, and G. Aranda, “Characterisation of tars from biomass gasification: Effect of the operating conditions,” Elsevier Ltd, 2013.
- [117] T. a Milne and R. J. Evans, *Biomass Gasifier “Tars ”: Their Nature , Formation , and Conversion*, no. November. 1998.
- [118] G. Pu, H. P. Zhou, and G. T. Hao, “Study on pine biomass air and oxygen/steam gasification in the fixed bed gasifier,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 35, pp. 15757–15763, 2013.

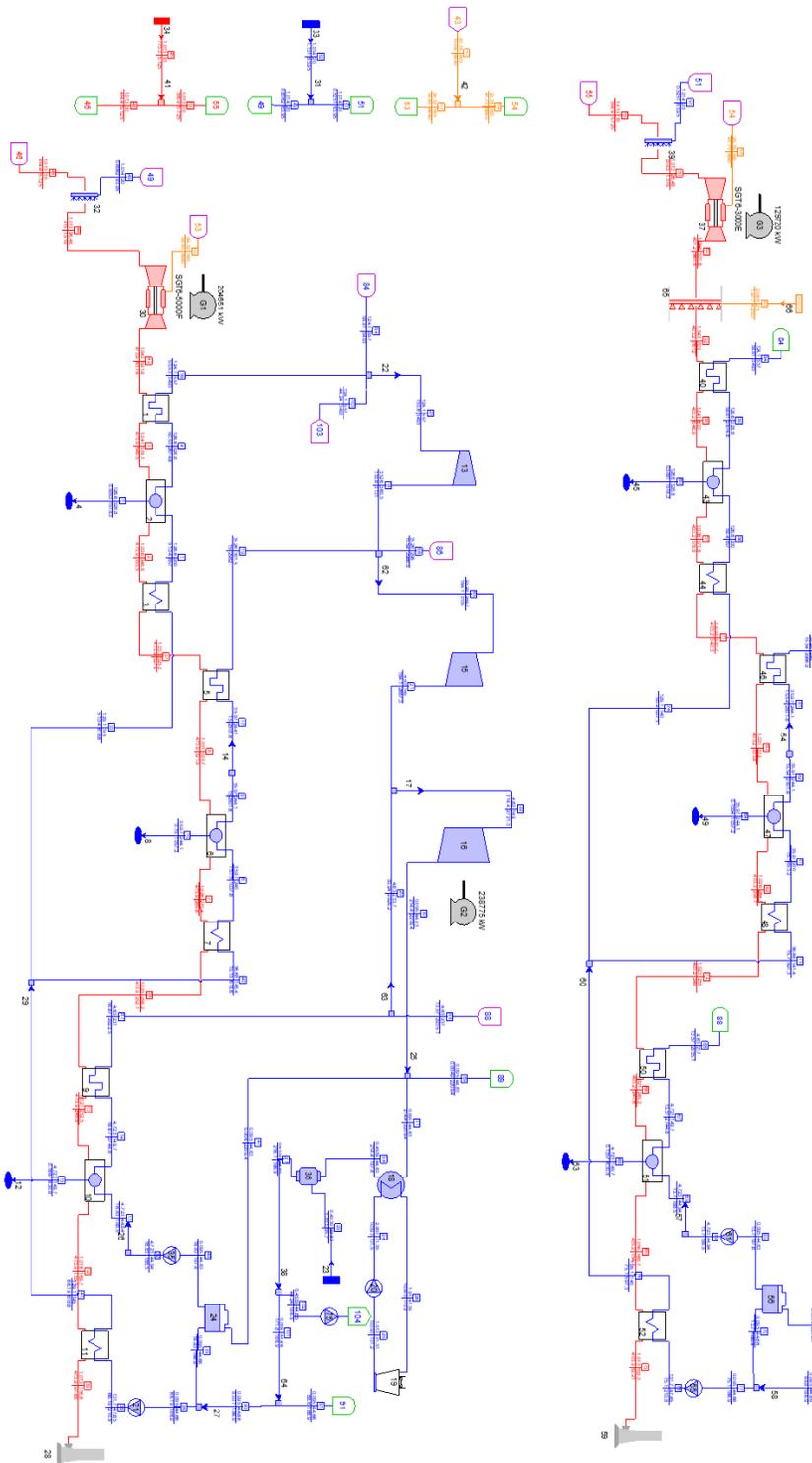
- [119] J. Gao, Y. Zhao, S. Sun, H. Che, G. Zhao, and J. Wu, "Experiments and numerical simulation of sawdust gasification in an air cyclone gasifier," *Chem. Eng. J.*, vol. 213, pp. 97–103, Dec. 2012.
- [120] P. Lv, Z. Yuan, L. Ma, C. Wu, Y. Chen, and J. Zhu, "Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2173–2185, 2007.

# Anexo A









### IGCC POWER PLANT