



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollo de una herramienta de modelamiento para la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa en Colombia

Luis Rafael De la Rosa Ramos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá D.C., Colombia

2023

Desarrollo de una herramienta de modelamiento para la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa en Colombia

Luis Rafael De la Rosa Ramos

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Director:

M.Sc. Omar Prias Caicedo

Línea de Investigación:

Energías renovables y eficiencia energética

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano GRISEC

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2023

A Dios. A mi familia, que siempre me ha apoyado en todo momento, en especial a mi mamá Ludys, mi abuela Muno y mi hermana Yolis, por su amor y ayuda.

A mis hermanos de la vida Daniel, Ernesto y Pipe, por traer siempre luz en los momentos de mayor oscuridad. ¡Gracias!

A Oscar, por su apoyo incondicional y motivación para terminar este documento.

A Carlos, por siempre creer y confiar en mí, desde el inicio de esta travesía.

A Diana y Juan David, por su amistad y cariño.

A todos los que con sus enseñanzas de vida hicieron posible este sueño.

Declaración de obra original

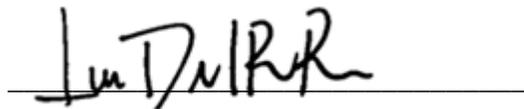
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Luis Rafael De la Rosa Ramos

Fecha 25/05/2023

Agradecimientos

Deseo agradecer a mi tutor, ingeniero Omar Prías quien como director del Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano – GRISEC, guió con su visión de la realidad energética del país este documento. Asimismo, la confianza que depositó en mí hace más de siete años cuando comencé a trabajar de su mano en la ciudad de Bogotá.

Mi profundo agradecimiento a mi colega y amigo, ingeniero Yulanderson Salguero, por su apoyo en la solución de dudas en la programación del modelo planteado en este trabajo y por su motivación constante.

Finalmente, agradezco mucho a todos mis profesores de los estudios de Maestría de la Universidad Nacional de Colombia, por el conocimiento impartido en sus clases y fuera de ellas. Todo lo aprendido en sus asignaturas contribuyó ampliamente al buen desarrollo de este trabajo.

Resumen

Desarrollo de una herramienta de modelamiento para la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa en Colombia

Se desarrolló una herramienta de modelación para la evaluación de rutas tecnológicas de aprovechamiento energético de biombras colombianas, a través del planteamiento y solución de un problema de programación lineal y la realización de casos de estudio bajo diferentes condiciones para su análisis. Las biombras estudiadas incluyen agrícolas como el tamo de arroz, rastrojo de maíz, vástago de plátano, entre otras, y residuos pecuarios como el estiércol bovino y avícola. Su caracterización fisicoquímica, así como los principales criterios a tener en cuenta para su uso energético, fueron obtenidos mediante revisión de literatura especializada. También, se llevó a cabo un estudio de vigilancia tecnológica para conocer las tendencias y principales características de los procesos que pueden utilizarse para las biombras estudiadas, definiéndose la combustión, pirólisis, gasificación, digestión anaeróbica y fermentación, como los procesos en este modelo. Con esta información se consultaron parámetros técnicos reportados, para la conversión de las biombras en los productos de interés, los cuales fueron definidos en calor, electricidad, aceite pirolítico (bioaceite) y bioetanol; y económicos como los costos de operación, de capital de inversión y precios de ventas de productos. Finalmente se realizó la programación del modelo matemático, que busca maximizar la utilidad por la venta de los productos generados, a través del mejor arreglo entre las biombras y tecnologías, obteniéndose bajo el escenario de exceso de materias primas, un máximo de la función objetivo de USD\$ 400 millones al año, así como un mejor desempeño de las tecnologías térmicas frente a las bioquímicas en los casos estudiados.

Palabras clave: biomasa, procesos termoquímicos, procesos bioquímicos, aprovechamiento energético, programación lineal.

Abstract

Development of a modeling tool for evaluation of energy alternatives uses of biomass in Colombia

A program was developed for technological routes evaluation in order to use Colombian biomass for energy uses, through the approach and solution of a linear programming problem. The types of biomass studied were rice straw, corn stover, banana stems, etc., and livestock residues such as bovine and manure poultry. Physicochemical characterization of these residues, as well as the criteria to be used for energetic purposes, was obtained through a review of specialized literature. A technological watch was also carried out to find out the trends and main characteristics of the processes that can be used for the main objective: combustion, pyrolysis, gasification, anaerobic digestion and fermentation were the processes used in this model. With this information, technical parameters were consulted for the conversion of biomasses into the products, which were defined as heat, electricity, pyrolytic oil (bio-oil) and bioethanol; and for economic parameters, such as operating costs, capital investment, and product sales prices. Finally, the programming of the mathematical model was carried out, which seeks to maximize the profit from the sale of the products, through the best arrangement between biomasses and technologies. Under the scenario of excess raw materials, a maximum of the objective function of USD\$400 million per year was obtained, as well as a better performance of thermal technologies compared to biochemical ones for the study cases.

Keywords: biomass, thermochemical processes, biochemical processes, energy use, linear programming.

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Estado del Arte.....	5
2. Biomasa en Colombia para la generación de energía: potenciales y características	11
2.1 Biomasa del sector agrícola.....	14
2.2 Biomasa del sector pecuario.....	16
2.3 Propiedades y características de la biomasa	18
3. Tecnologías para el aprovechamiento energético de biomasa: tendencias y características	29
3.1 Tendencias	29
3.2 Características de las tecnologías	36
3.2.1 Combustión.....	36
3.2.1.1 Reactores de Lecho Fijo	37
3.2.1.2 Reactores de Lecho Fluidizado	39
3.2.1.3 Reactores de Combustible Pulverizado.....	41
3.2.2 Pirólisis	43
3.2.2.1 Pirólisis Lenta.....	44
3.2.2.2 Pirólisis Rápida	45
3.2.2.3 Pirólisis <i>Flash</i>	48
3.2.3 Gasificación	49
3.2.3.1 Gasificador de lecho fijo	50
3.2.3.2 Gasificador de lecho fluidizado.....	51
3.2.3.3 Gasificador de flujo de arrastre	53
3.2.4 Digestión Anaeróbica	53
3.2.4.1 Laguna cubierta	55
3.2.4.2 Digestor perfectamente mezclado	56
3.2.4.3 Digestor de flujo tapón	57
3.2.4.4 Digestor de lecho fijo o película.....	58
3.2.5 Fermentación	58
3.2.5.1 Fermentador de tanque agitado	61
3.2.5.2 Fermentador <i>Airlift</i>	62

3.2.5.3	Fermentador de columna burbujeante	62
3.2.5.4	Fermentador de tambor giratorio.....	63
4.	Principales parámetros técnico-económicos para el aprovechamiento energético de biomasa	65
4.1	Parámetros técnicos.....	65
4.1.1	Combustión	65
4.1.2	Pirólisis	66
4.1.3	Gasificación	68
4.1.4	Digestión Anaeróbica.....	69
4.1.5	Fermentación.....	71
4.2	Parámetros económicos.....	72
5.	Herramienta de modelamiento para evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa	75
5.1	Caso de estudio 1: Cantidad total anual de biomasa del país.....	80
5.2	Caso de estudio 2: Cantidad total de una región del país.....	82
5.3	Caso de estudio 3: Proceso termoquímicos únicamente	84
5.4	Caso de estudio 4: Proceso bioquímicos únicamente.....	86
5.5	Caso 5: Biomosas con menores eficiencias únicamente	88
5.6	Caso 6: Biomosas con mayores eficiencias únicamente	90
5.7	Análisis comparativo de los casos de estudio.....	91
6.	Conclusiones y recomendaciones	95
6.1	Conclusiones.....	95
6.2	Recomendaciones.....	96
A.	Anexo: Memoria del ejercicio de vigilancia tecnológica.....	97
B.	Anexo: Memoria de cálculos.....	101
C.	Anexo: Programa de modelación	105
	Bibliografía	111

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Balance energético colombiano y consumo final de energía.	11
Figura 2-2. Fuente de biomasa residual	12
Figura 2-3. Cantidades de biomasa residual del sector agrícola por región.....	14
Figura 2-4. Cantidades de biomasa residual del sector pecuario por región.....	17
Figura 2-5. Propiedades a considerar en pretratamiento y conversión de biomasa lignocelulósica.....	21
Figura 2-6. Variación del LHV con la humedad en la cascarilla de arroz.	23
Figura 3-1. Publicaciones científicas sobre energías renovables 2020 – 2021.....	29
Figura 3-2. Procesos termoquímicos para conversión energética de biomasa	30
Figura 3-3. Publicaciones científicas sobre tecnologías termoquímicas para biomasa ...	32
Figura 3-4. Publicaciones científicas sobre tecnologías termoquímicas para biomasa por país	33
Figura 3-5. Procesos bioquímicos de conversión energética de biomasa.....	34
Figura 3-6. Publicaciones científicas sobre tecnologías bioquímicas para biomasa	35
Figura 3-7. Publicaciones científicas sobre tecnologías bioquímicas para biomasa por país	35
Figura 3-8. Reactores empleados para combustión	37
Figura 3-9. Esquemas en la tecnología de combustión de parrillas	38
Figura 3-10. Horno con sistema de subalimentación	39
Figura 3-11. Horno de lecho fluidizado burbujeante	40
Figura 3-12. Horno de lecho fluidizado circulante	40
Figura 3-13. Horno de combustible pulverizado.....	41
Figura 3-14. Esquema básico del proceso de pirólisis y sus productos	43
Figura 3-15. Esquemas de hornos típicos para carbonización.....	45
Figura 3-16. Esquemas típicos para pirólisis rápida	46
Figura 3-17. Esquema de reactor de lecho cónico chorreante.....	48
Figura 3-18. Diagrama del proceso de gasificación	50
Figura 3-19. Gasificadores de lecho fijo tipo <i>updraft</i> y <i>downdraft</i>	51
Figura 3-20. Gasificadores de lecho fluidizado tipo burbujeante y circulante	52
Figura 3-21. Gasificadores de flujo de arrastre	53
Figura 3-22. Etapas de la digestión anaeróbica.....	54
Figura 3-23. Diagrama de digestor de laguna cubierta	56
Figura 3-24. Diagrama de digestor perfectamente mezclado.....	56
Figura 3-25. Diagrama de digestor de flujo tapón	57

Figura 3-26. Diagrama de digestor de lecho fijo o película	58
Figura 3-27. Esquema producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico	59
Figura 3-28. Cadena de celulosa	59
Figura 3-29. Esquema fermentador de tanque agitado	61
Figura 3-30. Esquema fermentador Airlift.....	62
Figura 3-31 Esquema fermentador de columna burbujeante.....	63
Figura 3-32. Esquema fermentador de tambor giratorio	63
Figura 5-1. Estructura para el aprovechamiento energético de biomasa.....	77
Figura 5-2. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 1.....	81
Figura 5-3. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 2.....	83
Figura 5-4. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 3.....	85
Figura 5-5. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 4.....	87
Figura 5-6. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 5.....	89
Figura 5-7. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 6.....	90
Figura 5-8. Valor de la función objetivo para los diferentes casos de estudio.....	92
Figura 5-9. Valor de los productos para los diferentes casos de estudio.....	93

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Potencial energético de biomasa residual por cultivos en Colombia.....	13
Tabla 2-2. Potencial energético de biomasa por actividad pecuaria en Colombia.....	13
Tabla 2-3. Fuente, tipo y cantidad de residuos agrícolas en el país.....	15
Tabla 2-4. Fuente, tipo y LHV de residuos agrícolas en el país.....	16
Tabla 2-5. Fuente, tipo y cantidad de residuos pecuarios en el país.....	17
Tabla 2-6. Fuente, tipo y LHV de residuos del sector pecuario en el país.....	18
Tabla 2-7. Análisis próximo biomasa para combustión.....	19
Tabla 2-8. Análisis último biomasa para combustión.....	20
Tabla 2-9. Propiedades a considerar de acuerdo al proceso de conversión.....	20
Tabla 2-10. Características de la biomasa y su relevancia según tipos de procesos.....	21
Tabla 2-11. Análisis próximo y último de la cascarilla de arroz colombiana.....	22
Tabla 2-12. Análisis próximo y último del tamo de arroz.....	23
Tabla 2-13. Análisis próximo y último del bagazo de caña colombiana.....	24
Tabla 2-14. Análisis próximo para el cuesco y la fibra de la palma de aceite colombiana.....	24
Tabla 2-15. Análisis próximo y último para la cascarilla de café.....	25
Tabla 2-16. Análisis próximo y último para la pulpa de café.....	25
Tabla 2-17. Análisis próximo y último para el raquis de maíz.....	25
Tabla 2-18. Análisis próximo y último para el rastrojo de maíz.....	26
Tabla 2-19. Análisis próximo y último para la cáscara de plátano.....	26
Tabla 2-20. Análisis próximo y último para el vástago de plátano.....	26
Tabla 2-21. Análisis próximo de residuos del sector pecuario.....	27
Tabla 3-1. Características de algunas tecnologías típicas de combustión.....	42
Tabla 3-2. Tipos de pirólisis y parámetros típicos de operación.....	44
Tabla 3-3. Otros reactores empleados en pirólisis rápida.....	47
Tabla 3-4. Comparación de reactores usados en pirólisis flash.....	49
Tabla 3-5. Principales reacciones en el proceso de gasificación.....	50
Tabla 3-6. Principales reacciones químicas de la digestión anaeróbica.....	54
Tabla 3-7. Pretratamientos para material lignocelulósico en la fermentación.....	60
Tabla 4-1. Rendimientos de calor y electricidad por combustión para biomasa.....	66
Tabla 4-2. Rendimientos de aceite y gas y LHV por pirólisis para biomasa.....	67
Tabla 4-3. Rendimientos de calor y electricidad por pirólisis para biomasa.....	67
Tabla 4-4. Rendimientos de gas de síntesis y LHV por gasificación para biomasa.....	68
Tabla 4-5. Rendimientos de calor y electricidad por gasificación para biomasa.....	69

Tabla 4-6. Rendimientos de metano por digestión anaeróbica para biomasa	70
Tabla 4-7. Rendimientos de calor y electricidad por digestión anaeróbica para biomasa	70
Tabla 4-8. Rendimientos de etanol por fermentación para biomasa.....	71
Tabla 4-9. Costos de inversión de capital anualizado según la tecnología	73
Tabla 4-10. Costos operativos según el tipo de tecnología	73
Tabla 4-11. Precio de venta de los productos energéticos.	74
Tabla 5-1. Índices para identificación de biomasa, tecnología y producto en el modelo. .	78
Tabla 5-2. Condiciones fisicoquímicas de la biomasa para selección de tecnologías.....	79
Tabla 5-3. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 1	82
Tabla 5-4. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 2	84
Tabla 5-5. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 3	86
Tabla 5-6. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 4	88
Tabla 5-7. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 5	89
Tabla 5-8. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 6	91

Introducción

Motivados principalmente por las problemáticas ambientales y los efectos del cambio climático, debido a la creciente demanda de energía, el uso de fuentes fósiles, entre otros; al igual que los compromisos ambientales para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha hecho que los países se encuentren experimentando una transición energética, que busca el aumento de las energías renovables en sus matrices energéticas, al igual que la eficiencia energética, especialmente para disminuir el uso de fuentes convencionales [1]. Dentro de estas fuentes alternativas, como la energía solar, eólica, geotérmica, entre otras, la biomasa se ha perfilado en la actualidad como una fuente de energía atractiva, por su naturaleza renovable, carbono neutralidad, menor variabilidad que otras fuentes de energía renovable, versatilidad, entre otras [2].

De acuerdo con reportes del REN 21 para el año 2020 el total de la energía primaria mundial aportado por la biomasa, incluyendo usos tradicionales, fue de aproximadamente 44 millones de terajoules, lo que equivale al 12,3% del total de energía consumida en el planeta, y cuyos usos principales han sido para la generación de energía térmica, eléctrica y transporte [3], haciéndola una fuente renovable representativa para la transición energética actual.

La biomasa puede ser clasificada de diversas formas de acuerdo con diferentes criterios, por ejemplo, de acuerdo con su procedencia en: residuos de procesos agroindustriales, de actividades agrícolas, desechos sólidos municipales, residuos forestales, cultivos energéticos, entre otros [4], cada uno con sus características y propiedades.

En este sentido, para el aprovechamiento energético de la biomasa existen diversos tratamientos y tecnologías, entre los que se encuentran la conversión termoquímica como: combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción; por otra parte, dentro de los procesos bioquímicos se pueden resaltar la digestión anaeróbica y la fermentación [5]. Diferentes autores han estudiado numerosos tipos de biomasa, al igual que los procesos

para su conversión energética. La combustión de biomasa ha sido una de las rutas de tratamiento más ampliamente usadas para la obtención de energía a partir de esta fuente [6], por su facilidad operacional y técnica.

En el caso de procesos termoquímicos más complejos, como la gasificación de biomasa, en la que se busca producir gases combustibles que pueden ser utilizados para la producción de energía y otros productos [7], se presentan diversos estudios que han evaluado modelos de gasificación de biomasa [8], el estado reciente de la tecnología [9], entre otros. Por su parte, la pirólisis de biomasa es un proceso en el que ocurre una degradación del material, en la que los productos sólidos, líquidos y gaseosos, obtenidos pueden ser utilizados en diferentes usos, entre ellos los energéticos [10] [11].

Otra alternativa empleada para el aprovechamiento energético de biomasa es la digestión anaeróbica, en la que a partir del uso de agentes biológicos se logra la conversión de biomasa en productos como biogás (mezcla de metano y otros gases), que puede ser empleado para la generación de energía. Diversos parámetros como tipo de biomasa y de pretratamientos, así como agentes biológicos, deben ser considerados en este tratamiento [12].

Si bien, no toda la biomasa disponible debería ser utilizada para la generación de energía, ya que existen otros procesos útiles para su aprovechamiento, como recuperación de suelos, alimento animal, entre otros [13], en muchas regiones donde existe una gran generación de biomasa en los procesos agrícolas, su uso energético puede ser una alternativa para las demandas energéticas de las poblaciones, así como una solución a la disposición final de estos residuos [14].

En esta materia, el país también tiene gran interés y parte de su plan estratégico, define la necesidad de fortalecer las capacidades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación en la identificación y selección de las fuentes de biomasa presentes en el país, conocimiento de los potenciales energéticos de este recurso así como los costos asociados [15]. En este mismo sentido, la Ley colombiana 1715 de 2014 tiene como uno de sus principales objetivos el promover el desarrollo y uso de energías renovables en el país, entre ellas la biomasa agrícola, para promover su aprovechamiento energético,

como alternativa al abandono, quema incontrolada y los vertimientos derivados de su incorrecta disposición final [16].

Todos los estudios previos, entre otros relacionados con esta temática, presentan diversos insumos que pueden ser empleados para el análisis de configuraciones entre biomasa, tecnologías y uso final de energía, enmarcados en la eficiencia energética, que permitan obtener mejores configuraciones de acuerdo con los objetivos energéticos que se requieran y que funcionen como una aproximación al correcto uso de esta fuente de energía renovable para el país.

Por esto, la presente investigación contribuye al mejor uso y aprovechamiento del recurso biomásico del país para usos energéticos, por cuanto permite identificar mejores configuraciones tecnológicas para su utilización, sirviéndose de los potenciales del país en esta fuente de energía. De igual forma, puede contribuir en el planteamiento de soluciones energéticas en zonas o regiones del país con estas problemáticas, a través de proyectos energéticos con biomasa donde sean factibles sus usos para el desarrollo de las actividades de la población.

Los objetivos planteados en el presente trabajo incluyeron la determinación de los principales tipos, características, potenciales y criterios para la selección de la biomasa del país. También se propuso la determinación de las principales tecnologías usadas en la actualidad para el aprovechamiento energético de la biomasa identificada. Así como el planteamiento de los principales aspectos técnicos y económicos de las rutas planteadas para los usos energéticos de biomasa. Finalmente, se buscó obtener un modelo para la evaluación de las alternativas propuestas mediante metodologías de optimización, cuyo alcance está planteado para los tipos de biomasa priorizados, usos de energía y tecnologías de aprovechamiento contempladas.

La metodología empleada consistió en la revisión y análisis de literatura especializada y otras fuentes de información secundaria que permitió la obtención de parámetros fundamentales para el desarrollo de la herramienta de evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa colombiana. En cuanto al modelo desarrollado se emplearon técnicas de optimización y usos de software especializado para la programación del mismo.

En el primer capítulo, luego del estado del arte, se presentan los principales datos fisicoquímicos de la biomasa a estudiar, al igual que los principales criterios que estas deben tener en cuenta para su aprovechamiento energético. Se priorizaron algunos materiales para acotar el problema de estudio, teniendo en cuenta los criterios revisados en este capítulo.

El segundo apartado presenta los resultados de un estudio básico de vigilancia tecnológica, en el que se buscó analizar las principales tendencias tecnológicas de los procesos usados en la actualidad para la transformación de biomasa en productos de interés. Se encontró información importante de las condiciones de los procesos termoquímicos y bioquímicos que se deben considerar para la mejor selección de la tecnología, basado en la disponibilidad de materias primas y su naturaleza, así como los productos para usos finales de la energía obtenidos.

El siguiente capítulo aborda de una manera simplificada los parámetros técnicos y económicos asociados a los procesos usados para la conversión de las biomásas en productos. Se recopilaron los datos de conversión para los diferentes materiales según los diferentes procesos y de acuerdo con los productos buscados. Se realizaron los cálculos para obtener los productos finales a través de los intermedios, como el gas de síntesis y biogás. En cuanto a los parámetros económicos se consideraron los costos operativos y de capital asociados a cada tecnología por unidad de biomasa procesada.

Finalmente, el último capítulo plantea las consideraciones tenidas en cuenta para establecer un problema de programación lineal que permita optimizar la distribución de las diferentes biomásas en las tecnologías estudiadas. Se analizaron casos de estudio con la herramienta de modelación desarrollada bajo diferentes condiciones, a fin de conocer los mejores escenarios para el aprovechamiento energético de biomasa, dejando abierta la posibilidad de continuar con la metodología planteada para integrar nuevos procesos, biomásas y productos, en trabajos futuros.

1. Estado del Arte

La biomasa es principalmente materia orgánica derivada del crecimiento de las plantas, como: árboles, cultivos y algas, así como estiércol de animales, cuyos principales constituyentes son el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, que pueden ser aprovechados para la obtención de algunos productos como: i) Energía eléctrica y térmica ii) Combustibles para el transporte y iii) Materia prima para compuestos químicos. La biomasa está conformada por numerosas moléculas las cuales le brindan propiedades químicas y físicas diferentes para cada una, lo cual se constituye como un factor fundamental al momento de utilizarla en la generación de energía y/o productos químicos. Sus principales componentes son la celulosa, hemicelulosa, lignina y ceniza [17] en el caso de las tipo lignocelulósico.

La biomasa vegetal es un recurso con un ciclo neutral de carbono, puede ser convertida en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos mediante diversos procesos de transformación. La elección del proceso de conversión dependerá, entre otros, del tipo, propiedades y cantidades de la biomasa disponible, los usos finales de energía, aspectos ambientales y económicos y factores específicos de los proyectos.

Algunas de los principales criterios que se deben considerar al momento de estudiar la biomasa para sus diferentes usos son la densidad, contenido de humedad, composición química, contenido energético entre otras, las cuales dan información fundamental para considerar rutas de tratamiento energético y usos finales [5].

Las principales tecnologías utilizadas para la conversión energética de la biomasa se pueden clasificar en termoquímicas y bioquímicas, dentro de las primeras se destacan la combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción; para las bioquímicas se destacan la digestión anaeróbica y la fermentación [5].

Dentro de la literatura especializada se reportan estudios de diversos tipos de biomasa, así como los procesos empleados para su valorización. La combustión, por ejemplo, es uno de las tecnologías que más se ha empleado durante los años para la generación de productos energéticos a partir de biomasa [6], sin embargo, algunos criterios como contenido de humedad, y en general para los procesos termoquímicos, debe ser tenido en cuenta para mejorar la eficiencia del proceso [18].

En el caso de la gasificación de biomasa, el principal objetivo es la generación de una mezcla de gases, conocido como gas de síntesis, que cuentan con múltiples aplicaciones, tanto energéticas como en producción de otras sustancias químicas de interés [7], se encuentran varios reportes que han evaluado la gasificación de biomasa desde diferentes modelos [8], así como el estado tecnológico actual [9], entre otros.

Wernecke, realizó una comparación de gasificadores de lecho fijo y fluidizado para la gasificación de biomasa, mostrando los principales criterios a tener en cuenta para la selección de uno u otro, así como las principales ventajas y desventajas entre estos, como por ejemplo, la mejor transferencia de masa y energía en los de lecho fluidizado sobre el de lecho fijo [19].

Por otro lado, la pirólisis de biomasa es un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno, buscando principalmente la degradación de la biomasa u otros materiales, generando diversos productos en estados sólidos, líquidos y gaseosos, según la operación, parámetros y configuración del sistema [10] [11].

Como se muestra en el trabajo reportado por Al Arni, la pirólisis de biomasa para la obtención de combustibles, se puede llevar a cabo de forma rápida o lenta en función del producto de interés que se desee obtener, por lo que se destacan parámetros como tasa de calentamiento y tiempo de residencia en el reactor como fundamentales para lograr los objetivos deseados [20].

La licuefacción de biomasa, tanto directa como indirecta, es otra de las alternativas para la obtención de energía a partir de esta fuente renovable. El proceso consiste principalmente en convertir la biomasa en biocombustibles de alto valor. Para el caso de la licuefacción indirecta se realiza a través del proceso *Fischer-Tropsch* usando el gas de síntesis producido del material biomásico para la generación de combustibles líquidos

como el alcohol metílico, etílico y dimetil éter. Por su parte la licuefacción directa busca la obtención de biocombustibles a través de procesos fermentativos o térmicos [21].

La revisión presentada por Gollakota y colaboradores, muestra una amplia recopilación de condiciones de operación y tipos de biomasa reportadas por diferentes autores para licuefacción hidrotérmica, así como los diferentes mecanismos bajo los cuales se lleva a cabo, destacando procesos de degradación y polimerización [22]. Se resaltan menores valores de temperatura de operación y tasa de calentamiento comparado con la pirólisis.

Otra de las alternativas usadas en la valorización energética de material biomásico, es la digestión anaeróbica, donde mediante el uso de microorganismos y condiciones específicas, se consigue la producción de biogás, que luego de procesos de purificación, es útil para la producción de calor y electricidad. Debido a que el proceso utiliza organismos vivos para su desarrollo, es bastante sensible a las características de la biomasa empleada, los pretratamientos, así como los propios agentes biológicos, entre otros, los cuales deben ser tenidos en cuenta [12].

En la revisión llevada a cabo por Adekunle y Okolie se muestran los diferentes tipos de biomasa que puede ser usados para la digestión anaerobia y la obtención de productos energéticos de valor, que van desde los residuos sólidos urbanos, aguas residuales, hasta excremento de animales. Se explican las diversas etapas que la componen: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, indicando las condiciones en las que estas se llevan a cabo y los productos obtenidos. Para este proceso los principales parámetros a considerar son pH, temperatura, mezclado, substrato, relación C/N, y tiempo de retención hidráulica, los cuales están ligados a los tipos de microorganismos presentes y su balance [23].

Por su parte, la fermentación consiste en la transformación de la biomasa en azúcares simples a través de acción enzimática, el cual posteriormente mediante el uso de levaduras se puede transformar en etanol. En la revisión publicada por Yan y Shuzo, se realiza una recopilación de diversas levaduras utilizadas en el proceso de fermentación de material biomásico, indicando además valores de pH, temperatura y concentración de fuente de carbono y etanol producido, entre otros. Se destacan por su alto rendimiento las del tipo *Saccharomyces cerevisiae*. De igual manera se listan bacterias usadas en los procesos fermentativos y sus rendimientos. Finalmente se describen diversos modelos

estudiados en este proceso, así como plantas industriales productoras de bioetanol en el mundo [24].

De igual forma, se han realizado estudios teóricos sobre el modelamiento matemático del proceso de fermentación microbiónológico de biomasa lignocelulósica [25] pertinentes para la evaluación de escenarios con diferentes fuentes. A partir de los análisis elementales y rendimientos reportados en la literatura para diferentes tipos de biomasa, se cuentan con parámetros necesarios para el modelamiento cinético de la reacción, destacándose los de Primer Orden, Monod, Contoins, entre otros. No obstante, uno de los modelos que presenta mejores resultados para este tipo de procesos es el ADM1, si bien requiere un gran número de parámetros de entrada, dependiendo del tipo de sustrato a utilizar pueden ser empleados un número limitado de parámetros y los resultados siguen siendo adecuados.

Por otro lado, diferentes técnicas de programación matemática se han convertido en herramientas útiles para la evaluación de alternativas de aprovechamiento de biomasa, tomando como insumo parámetros técnicos y económicos. Entre otras técnicas, la programación lineal, ha presentado gran utilidad en el análisis de estos procesos. Para este último caso se reportan diversos trabajos donde utilizan estas técnicas para determinar estrategias óptimas y realizar diversos análisis de sensibilidad [26] [27].

En uno de estos estudios, se desarrolló un modelo de programación lineal donde las funciones objetivo dependían de la finalidad buscada, por ejemplo, minimización de costos de producción, etc. Las tecnologías y compuestos fueron representados como nodos y el consumo, la producción de compuestos, compras de materias primas entre otros, fueron representados como flujos. Las restricciones para la capacidad de la tecnología, la demanda, disponibilidad de materia prima, entre otras, también fueron establecidas [27].

En este mismo sentido, la modelación matemática y la simulación de los procesos para aprovechamiento energético de biomasa ha sido estudiado [28] [29]. White y colaboradores realizaron una amplia revisión sobre la cinética de la pirólisis usando biomasa, destacando entre otros aspectos los diferentes métodos experimentales usados para la determinación de las propiedades usadas en los modelos teóricos. Recopilan una variedad de expresiones para los principales mecanismos de reacción con sólidos.

Finalmente se presenta un caso de estudio con bagazo de caña, mostrando su composición, el modelo empleado y sus parámetros cinéticos en los rangos de temperatura aplicables. Los principales modelos cinéticos estudiados para este proceso siguen una expresión tipo Arrhenius expresando la dependencia de la temperatura en las tasas de conversión [28] [29].

De otra parte, en el contexto nacional también se han encontrado diversas investigaciones en asuntos relacionados con los procesos de conversión energéticas a partir de biomasa propia de las regiones del país. Hernández y colaboradores, realizaron un estudio en donde se clasificaron diferentes especies vegetales del país y su potencial energético de acuerdo a las hectáreas disponibles; asimismo de acuerdo a algunas especies identificadas se consideró que tecnologías como la gasificación y la pirólisis pueden ser usadas para la obtención de combustibles [30].

Otro estudio presenta el estudio del proceso de gasificación para diversos residuos agroindustriales colombianos como cáscaras de coco, cacao, café, entre otros, en un gasificador de lecho fijo diseñado y construido por el grupo de investigación. Parámetros como temperatura, agente oxidante, tiempo de residencia, entre otros, fueron establecidos de acuerdo a las investigaciones reportadas, obteniendo finalmente un gas de síntesis de condiciones aceptables al poseer un porcentaje mayor de CO [31].

El efecto de la composición de la biomasa en la gasificación del carbonizado también ha sido estudiado en el país. En el estudio de Marrugo y colaboradores, se tomaron muestras de bagazo de caña, cáscara de arroz y cáscara de almendra de palma, también se establecieron sus respectivas composiciones para el análisis. Se encontró que el mayor rendimiento de gas se obtuvo por la gasificación del carbonizado procedente del bagazo de caña, el cual presenta una composición principalmente de celulosa y hemicelulosa, los cuales requieren menor severidad termoquímica para producir el gas [32].

Otras investigaciones por su parte, han abordado la temática desde el punto de vista del modelamiento y simulación, por ejemplo, para el proceso de pirólisis rápida en un reactor de lecho fluidizado [33]. En este trabajo se consideraron balances de energía, de especies, cinética del proceso, entre otros, para la definición del modelo. De los resultados obtenidos se pudo concluir que para partículas pequeñas, del orden de 1 mm,

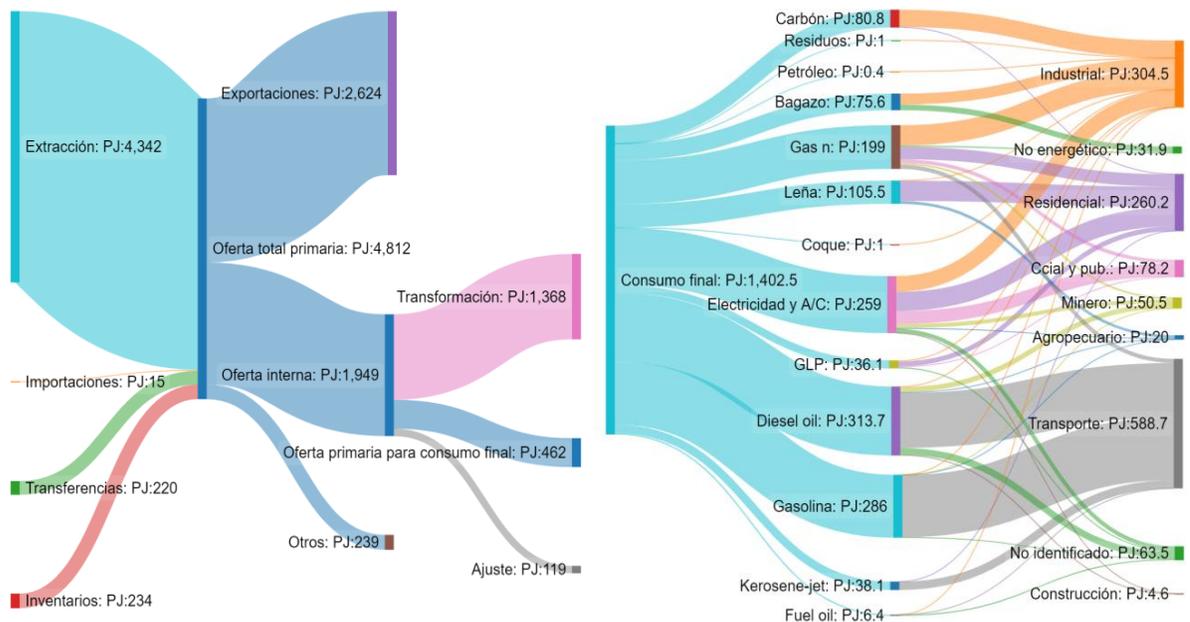
la tasa de calentamiento de las partículas no tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento; sin embargo, para partículas de mayor tamaño la disminución del calentamiento afectaba negativamente el rendimiento de los volátiles.

Todos los estudios previos, entre otros relaciones con esta temática, presentan diversos insumos que pueden ser empleados para el análisis de configuraciones entre biomasa, tecnologías y uso final de energía, que permitan obtener mejores configuraciones de acuerdo con los objetivos que se requieran y que funcionen como una aproximación al correcto uso de esta fuente de energía renovable para el país.

2. Biomasa en Colombia para la generación de energía: potenciales y características

En la actualidad la energía primaria de Colombia está dada principalmente por la extracción de energéticos como el carbón y petróleo, de los cuales el 60 % es exportado y el resto es empleado para satisfacer la demanda interna del país junto con otros energéticos, de acuerdo con las cifras de la Unidad de Planeamiento Minero Energético – UPME. Por su parte, se aprecia en la Figura 2-1 que el 82,3% del consumo final de energía se encuentra en el sector transporte, industrial y residencial, siendo el diesel, la gasolina y las electricidad los energéticos secundarios más utilizados [34].

Figura 2-1. Balance energético colombiano y consumo final de energía.



Fuente: UPME, 2022

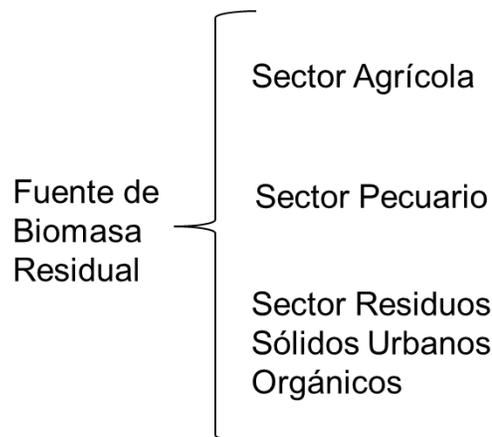
Dentro del balance se pueden apreciar cifras de material biomásico que son usados actualmente como energéticos tal es el caso del bagazo (5,4 %), la leña (7,5 %) y

residuos (0,1 %); el primero ampliamente usado en la industria azucarera y al segundo contribuyen los usos domésticos para la generación de calor, lo que hace necesario continuar contribuyendo dentro de la transición energética a continuar la investigación sobre la biomasa y sus amplios usos dentro del sector energético.

Por otra parte, dada las condiciones topográficas y de ubicación, el país cuenta con una gran diversidad de flora y suelos aptos para diversos tipos de cultivos, así como la crianza de diversas especies animales cuyos desechos orgánicos también pueden ser aprovechados energéticamente. De acuerdo con el Atlas de Biomasa Potencial en Colombia [35], la biomasa residual se puede clasificar como aparece en la

Figura 2-2.

Figura 2-2. Fuente de biomasa residual



Fuente: Adaptado de [35]

Para el caso del sector agrícola se encuentran los residuos agrícolas de cosechas y los agroindustriales; en el pecuario se presentan el estiércol de animales como vacas, cerdos y gallinas, finalmente para los sólidos orgánicos urbanos se destacan los residuos provenientes de plazas de mercado, centros de abastos, podas, entre otros. Los dos primeros se encuentran principalmente enfocados al campo y pueden integrarse a los procesos energéticos de zonas rurales y no interconectadas, por su parte los residuos sólidos urbanos orgánicos estarían concentrados en alternativas para las ciudades.

Este estudio se centrará principalmente en la biomasa proveniente de las dos primeras fuentes: sector agrícola y pecuario, debido a la vocación agrícola del país, así como el

poder brindar soluciones a zonas rurales del país que no cuenten con facilidades energéticas para su desarrollo y bienestar.

En la Tabla 2-1 se presentan algunos valores de potenciales energéticos de biomasa residual en Colombia, considerando algunos de los principales cultivos del país. De acuerdo con esto, el país podría generar solo con los residuos de estos cultivos cerca de 245 mil TJ al año (68190 GWh año), muy cerca de la demanda energética del país para 2018, según informe de demanda energética de la UPME [36].

Tabla 2-1. Potencial energético de biomasa residual por cultivos en Colombia

Cultivo	Residuo (t/año)	Potencial Energético (TJ/año)
Caña de Azúcar	15.534.600	118.578
Café	5.050.000	49.100
Arroz	6.282.400	27.736
Maíz	1.940.000	20.800
Palma	1.660.000	16.073
Plátano	11.500.000	6.600
Banano	11.551.000	6.600
Total	53.518.000	245.487

Fuente: Adaptado de [37]

De manera similar, se pueden establecer potenciales energéticos de la biomasa proveniente de residuos de animales, según los principales tipos de actividades pecuarias desarrolladas en el país, presentado en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. Potencial energético de biomasa por actividad pecuaria en Colombia

Residuo	Estiércol (t/año)	Potencial Energético (TJ/año)
Bovino	99.168.608	84.256
Avícola	3.446.348	29.183
Porcino	2.803.111	4.308
Total	105.418.067	117.714

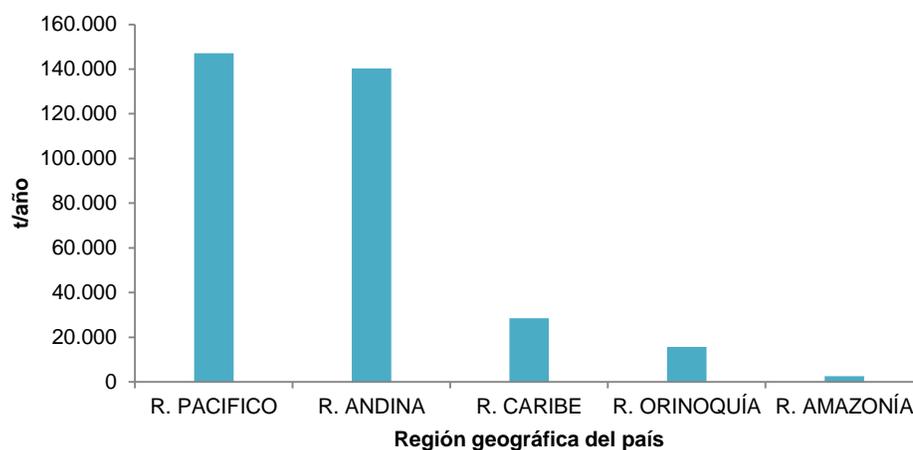
Fuente: adaptado de [35]

De acuerdo con los potenciales energéticos reportados para los diferentes tipos de biomasa generados en el país se puede apreciar que los residuos generados por el cultivo de la caña de azúcar, el café y el estiércol del sector bovino corresponden al 69% del potencial total para los residuos revisados, lo que los hace de gran interés para el estudio y su aprovechamiento energético.

2.1 Biomasa del sector agrícola

En cuanto a la generación de residuos del sector agrícola en el país, en la Figura 2-3, se observa que las regiones Andina y Pacífico son las que poseen la mayor cantidad de residuos con potencial energético con alrededor de 287 mil toneladas al año, representado principalmente en los residuos de los cultivos de arroz, café y caña.

Figura 2-3. Cantidades de biomasa residual del sector agrícola por región



Fuente: Adaptado de [35]

La Tabla 2-3 presenta valores reportados de la cantidad de residuos agrícolas de acuerdo con las principales fuentes de cultivos en el país, al igual que la discriminación del tipo de residuo como: raquis, rechazo, bagazo, entre otros. Dicha diferenciación es fundamental al momento de su utilización como materia prima para los diferentes tratamientos de generación de energía.

Tabla 2-3. Fuente, tipo y cantidad de residuos agrícolas en el país.

Fuente	Tipo	Cantidad [t/año]
Arroz	Tamo	5.789.669
	Cascarilla	492.738
Banano	Raquis	1.878.194
	Vástago	9.390.968
	Rechazo	281.729
Café	Pulpa	2.008.192
	Cisco	193.460
	Tallos	2.849.596
Caña de azúcar	Hojas - cogollo	8.525.718
	Bagazo	7.008.873
Maíz	Rastrojo	1.278.642
	Tusa	369.629
	Capacho	288.858
Palma de aceite	Cuesco	189.074
	Fibra	546.381
	Raquis	924.618
Plátano	Raquis	3.319.357
	Vástagos	16.596.783
	Rechazo	497.903

Fuente: Adaptado de [35]

Por su parte, la Tabla 2-4 presenta los valores de poder calorífico inferior (LHV por sus siglas en inglés) para algunos de las principales fuentes de residuos del sector agrícola en el país. Se diferencian los diversos tipos de residuos que puede generarse a partir de la misma fuente, dado que su composición y características son diferentes y en este sentido su potencial energético.

Tabla 2-4. Fuente, tipo y LHV de residuos agrícolas en el país.

Fuente	Tipo	LHV [Kcal/kg]
Arroz	Tamo	3.113
	Cascarilla	3.603
Banano	Raquis	1.809
	Vástago	2.032
	Rechazo	2.488
Café	Pulpa	4.259
	Cisco	4.430
	Tallos	4.384
Caña de azúcar	Hojas - cogollo	3.684
	Bagazo	4.456
Maíz	Rastrojo	3.429
	Tusa	3.390
	Capacho	3.815
	Hojas secas	4.274
Palma de aceite	Cuesco	3.988
	Fibra	4.274
	Raquis	4.021
Plátano	Raquis	1.808
	Vástagos	2.032

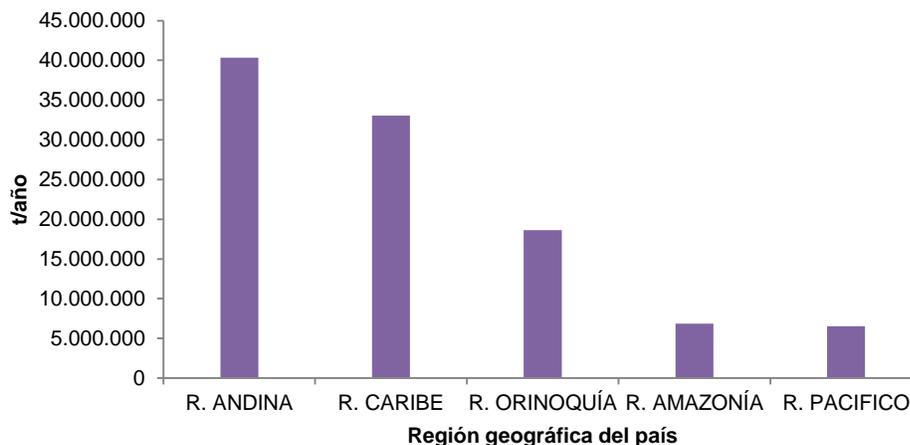
Fuente: Adaptado de [35]

Si bien existen muchos más y diversificados cultivos agrícolas en el país, cuyos residuos pueden ser utilizados para su aprovechamiento energético; los anteriores muestran una gran representatividad y alto potencial para su aprovechamiento, lo que permitiría ser un inicio para el desarrollo de la metodología que se pretende obtener.

2.2 Biomasa del sector pecuario

El estiércol generado por el sector pecuario también puede ser utilizado mediante algunas rutas tecnológicas para su conversión energética. En la Figura 2-4 se presenta a la región andina, seguida de la caribe, con la mayor generación de residuos pecuarios en el país, representados principalmente en el subsector bovino.

Figura 2-4. Cantidades de biomasa residual del sector pecuario por región



Fuente: Adaptado de [35]

Por su parte, la Tabla 2-5 presenta los diferentes valores de las cantidades estimadas de producción de diferentes residuos del sector pecuario dada las fuentes más significativas en el país.

Tabla 2-5. Fuente, tipo y cantidad de residuos pecuarios en el país.

Fuente	Tipo	Cantidad [t/año]
Porcino	Lechón lactante/ Precebos/ Levante/ Reproductor/ Hembra Lactante/ Hembra gestante	2.803.111
Bovino	Grupos etarios	9.916.8607
Avícola	Ponedoras	1.534.512
	Engorde	1.911.835

Fuente: Adaptado de [35]

De igual forma como en los residuos agroindustriales del país, la Tabla 2-6 presenta los valores de poderes caloríficos inferiores para tres de los principales subsectores de crianza pecuaria en el país, los cuales serán útiles si se utilizaran estos residuos en procesos térmicos para su aprovechamiento energético.

Tabla 2-6. Fuente, tipo y LHV de residuos del sector pecuario en el país.

Fuente	Tipo	LHV [Kcal/kg]
Porcino	Tecnificado	6.049
	No tecnificado	4.163
Bovino	Leche	2.801
	Doble propósito	3.680
	Carne	3.783
Avícola	Ponedoras	2.248
	Engorde	3.645

Fuente: Adaptado de [35]

Estas tres fuentes de residuos del sector pecuario en el país permiten tener un panorama inicial y de potenciales para este tipo de residuos en el país, que permitirán identificar los mejores mecanismos y tecnologías disponibles para su aprovechamiento energético.

2.3 Propiedades y características de la biomasa

Las propiedades inherentes del recurso biomásico serán las que determinarán la elección del proceso de conversión energética, al igual que las dificultades que puedan presentarse en uno u otro. De igual manera, la selección de la biomasa debe considerar la forma en que la energía es requerida, esto es el uso final de la energía, pues también determinará el mejor proceso a utilizar. Estos dos aspectos, proceso de conversión de acuerdo con las propiedades y uso final de energía, son los que principalmente permitirán sacar el mayor provecho de la biomasa como fuente de energía [38].

Muchos son los factores que influyen en las propiedades de la biomasa y su eventual uso como fuente para la generación de energía, entre otros aspectos, se pueden destacar, la composición química de la biomasa, la composición de su fase orgánica e inorgánica, de la fase mineral y química de sus cenizas. En este mismo sentido, la composición y propiedades de este recurso dependerán de factores como: tipo de biomasa, especie de planta, procesos y condiciones de crecimiento, pretratamiento utilizado para su aprovechamiento energético en el caso de tratamientos termoquímicos. [39]

La Tabla 2-7 presenta el análisis próximo típico de biomasa, principalmente usada en procesos térmicos para aprovechamiento energético. Si bien cada fuente de biomasa

posee características diferentes, estos valores y rangos típicos permiten su uso indicativo para los respectivos valores de la biomasa estudiada en el presente estudio, así como en la determinación mediante el uso de expresiones empíricas.

Tabla 2-7. Análisis próximo biomasa para combustión

Característica	Biomasa [%wt]¹
Material Volátil	64,4 (30,4 – 79,7)
Carbono fijo	16,0 (6,5 – 35,3)
Humedad	14,7 (2,5 – 62,9)
Rendimiento de cenizas	4,9 (0,1 – 34,3)
Total	100,0

Fuente: adaptado de [39]

El alto contenido de material volátil es una de las principales ventajas de la biomasa para los procesos de conversión termoquímico dado que es un criterio para la elevada reactividad de este combustible. Por otro lado, el alto contenido de humedad en la biomasa, es uno de las más grandes desventajas al momento de utilizarse en procesos térmicos de aprovechamiento energético, usualmente se encuentra entre los 3 y 63%, aunque puede alcanzar valores más altos y debe ser considerado en sus tratamientos [39].

De igual manera, la Tabla 2-8 presenta un análisis último de biomasa típica para combustión, predominado principalmente por la presencia de carbono, oxígeno e hidrógeno. Los contenidos de carbono fijo, carbono e hidrógeno favorecen directamente los valores caloríficos de la biomasa, generalmente más altos en biomasa terrestre, perenne, forestal y leñosa que en la biomasa acuática, herbácea y agrícola [39]. El contenido de azufre debe ser contralado y tenido en cuenta para los procesos de purificación de los productos y generación de subproductos indeseables.

¹ Porcentaje en peso

Tabla 2-8. Análisis último biomasa para combustión

Elemento (base seca libre de cenizas)	Biomasa [% wt]
Carbono	51,1 (42,2 – 60,5)
Oxígeno	41,4 (20,8 – 49,0)
Hidrógeno	6,2 (3,2 – 10,2)
Nitrógeno	1,1 (0,1 – 12,2)
Azufre	0,20 (0,01 – 1,69)
Total	100,0

Fuente: adaptado de [39]

Por su parte autores como McKendry, han realizado revisiones de literatura especializada, sobre las principales propiedades a tener en cuenta para el aprovechamiento energético de la biomasa [38]. En la Tabla 2-9 se relacionan una cierta variedad de características a considerar, de acuerdo con el proceso de conversión y del tipo de biomasa.

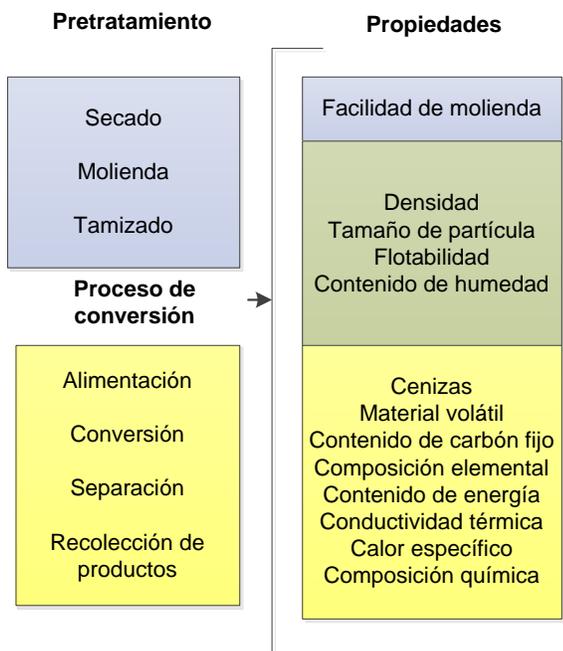
Tabla 2-9. Propiedades a considerar de acuerdo al proceso de conversión

Procesos de conversión de biomasa seca	Procesos de conversión de biomasa húmeda
Contenido de humedad	
Valor calorífico	Contenido de humedad
Proporciones de carbón y volátiles	Relación carbono/nitrógeno
Contenido de ceniza/residuo	Relación celulosa/lignina
Contenido de metales alcalinos	

Fuente: adaptado de [38]

Por su parte, Cai y colaboradores, describe para diferentes etapas del proceso de conversión de la biomasa lignocelulósica, las principales propiedades a considerar en cada uno de estos [5]. La Figura 2-5 esquematiza de manera general propiedades a considerar en el pretratamiento (azul), proceso de conversión (amarillo) y similares para ambas (verde).

Figura 2-5. Propiedades a considerar en pretratamiento y conversión de biomasa lignocelulósica



Fuente: Adaptado de [5]

En este mismo sentido, Sadhukhan y colaboradores, presentan una serie de parámetros a considerar, para el tratamiento de biomasa a través de las diferentes categorías tecnológicas disponibles para este objetivo [40]. La Tabla 2-10 presenta un resumen de estos criterios.

Tabla 2-10. Características de la biomasa y su relevancia según tipos de procesos

Característica	Termoquímico	Bioquímico	Físico	Químico
Composición química	X	X		X
Análisis próximo y último	X			
Contenido de humedad	X	X	X	X
Contenido de cenizas	X	X	X	
Contenido de energía	X		X	X
Densidad			X	
Tamaño de partícula	X	X	X	X
Digestibilidad		X		
Contenido y tipo de nutrientes		X		

Fuente: adaptado de [40]

De acuerdo con esto, las principales propiedades fisicoquímicas a considerar en este estudio para los procesos de aprovechamiento energético de la biomasa son: la composición química y la humedad. La revisión bibliográfica permitió obtener los valores de estas propiedades para los diferentes tipos de biomasa inicialmente expuestos y que tienen un alto potencial en las regiones del país para su uso energético. A continuación se presentarán algunas características fisicoquímicas reportadas de las biomásas estudiadas.

En el caso de la cascarilla de arroz colombiana Valverde y colaboradores, presentan resultados del análisis próximo y último de este residuo, cuyos valores son acordes a los reportados por otros autores en cascarilla de arroz de Canadá, Estados Unidos y China [41]. La Tabla 2-11 presenta dichos valores.

Tabla 2-11. Análisis próximo y último de la cascarilla de arroz colombiana

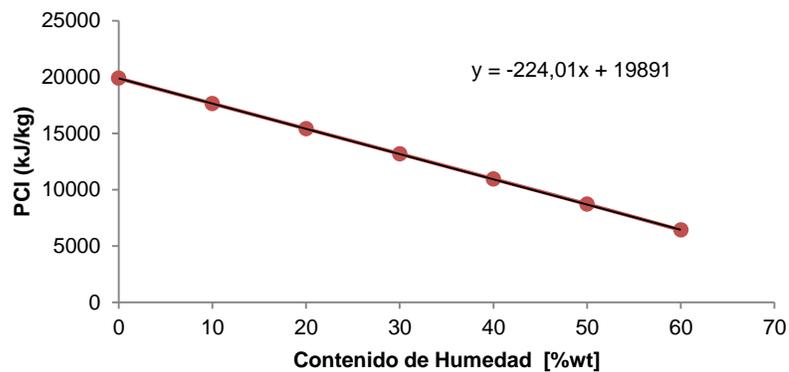
Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	-	Carbono	39,10
Cenizas	17,89	Hidrógeno	5,20
Material volátil	-	Nitrógeno	0,27
Carbono fijo	16,67	Oxígeno	37,20
HHV ² [MJ/kg]	15,14	Azufre	0,43

Fuente: adaptado de [41]

Como se ha venido indicando anteriormente, otro de los factores determinantes en el aprovechamiento energético de la biomasa, es su contenido de humedad, el cual afecta entre otras propiedades, al poder calorífico inferior, y por tanto la cantidad de energía final que puede ser obtenida de los procesos térmicos de esta. La Figura 2-6 presenta la disminución del LHV a medida que aumente la humedad de este residuo

² Poder calorífico superior

Figura 2-6. Variación del LHV con la humedad en la cascarilla de arroz.



Fuente: adaptado de [41].

Dentro de los residuos de arroz también se ha estudiado ampliamente las propiedades y características del tamo de arroz, el cual es un residuo abundante dentro de la cosecha e industria arroceras del país. La Tabla 2-12 presenta la caracterización de este residuo, que será considerando en este estudio dentro de las posibles materias primas.

Tabla 2-12. Análisis próximo y último del tamo de arroz

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	10,00	Carbono	39,13
Cenizas	10,40	Hidrógeno	5,15
Material volátil	60,71	Nitrógeno	0,60
Carbono fijo	18,90	Oxígeno	36,24
HHV [MJ/kg]	17,2	Azufre	0,09

Fuente: adaptado de [40]

Otro de los residuos de la producción agraria con alto potencial en el país y tal vez uno de los más utilizados en la actualidad en los procesos de generación de energía es el bagazo de la caña de azúcar. Algunas de sus propiedades y composición se presentan en la Tabla 2-13.

Tabla 2-13. Análisis próximo y último del bagazo de caña colombiana

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	7,60	Carbono	46,60
Cenizas	3,90	Hidrógeno	5,92
Material volátil	82,55	Nitrógeno	0,14
Carbono fijo	8,30	Oxígeno	43,35
HHV [MJ/kg]	16,91	Azufre	0,15

Fuente: adaptado de [42]

En este caso se aprecia un gran porcentaje de material volátil en este tipo de biomasa, lo que favorece la generación de gases de síntesis, a través de los procesos termoquímicos [42].

Por otro lado, otros de los cultivos que generan grandes volúmenes de desechos y con los que se cuenta con grandes plantaciones en el país, es la palma de aceite, con la cual también generan combustibles como el biodiesel. Al igual que los otros tipos de biomasa residual, de un mismo cultivo pueden generarse diferentes tipos de residuos, los cuales poseen características y propiedades que los hacen diferentes y que deben ser consideradas al momento de su aprovechamiento. La Tabla 2-14 presenta el análisis próximo para el cuesco y la fibra de la palma de aceite colombiana.

Tabla 2-14. Análisis próximo para el cuesco y la fibra de la palma de aceite colombiana

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	11,54	Carbono	43,52
Cenizas	1,68	Hidrógeno	5,72
Material volátil	68,32	Nitrógeno	1,20
Carbono fijo	18,46	Oxígeno	48,90
HHV [MJ/kg]	19,36	Azufre	0,66

Fuente: adaptado de [43] [44]

Para el caso de los residuos de café en el país tales como la cascarilla y los granos de café desgastados (pulpa), se han reportado caracterizaciones de este material a través de análisis próximo y último para sus usos en procesos de combustión y pirólisis. La Tabla 2-15 y la tabla 2-16 representan los resultados de estos análisis respectivamente.

Tabla 2-15. Análisis próximo y último para la cascarilla de café

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	8,58	Carbono	48,61
Cenizas	4,43	Hidrógeno	5,01
Material volátil	71,43	Nitrógeno	0,22
Carbono fijo	15,29	Oxígeno	41,1
HHV [MJ/kg]	16,07	Azufre	0,18

Fuente: adaptado de [45]

Tabla 2-16. Análisis próximo y último para la pulpa de café

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	8,10	Carbono	54,50
Cenizas	1,35	Hidrógeno	7,10
Material volátil	77,51	Nitrógeno	2,40
Carbono fijo	19,83	Oxígeno	34,20
HHV [MJ/kg]	23,2	Azufre	0,1

Fuente: adaptado de [46]

Otro de los residuos agroindustriales ampliamente encontrados en el país es la biomasa proveniente de los cultivos de maíz, en este caso el raquis o tusa de maíz colombiano ha sido investigado en procesos de gasificación para la generación de energía, se reporta además la caracterización de este material presentado en la Tabla 2-17 y de manera análoga los resultados reportados para el rastrojo de maíz en la Tabla 2-18.

Tabla 2-17. Análisis próximo y último para el raquis de maíz

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	10,52	Carbono	43,72
Cenizas	7,71	Hidrógeno	5,44
Material volátil	65,23	Nitrógeno	0,66
Carbono fijo	16,54	Oxígeno	50,09
HHV [MJ/kg]	16,50	Azufre	0,10

Fuente: adaptado de [47]

Tabla 2-18. Análisis próximo y último para el rastrojo de maíz

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	11,75	Carbono	42,37
Cenizas	4,63	Hidrógeno	4,83
Material volátil	69,72	Nitrógeno	1,93
Carbono fijo	13,90	Oxígeno	34,40
HHV [MJ/kg]	18,6	Azufre	0,09

Fuente: adaptado de [40]

Finalmente, dentro de este tipo de residuos se presentan los relacionados con el cultivo de plátano en el país. La Tabla 2-19 presenta el análisis próximo y último para cáscara de plátano, donde los autores realizaron comparaciones con otros resultados reportados en la literatura obteniendo valores similares. Para el caso del vástago de plátano se relaciona su caracterización en la Tabla 2-20, donde se evidencia, por ejemplo, la amplia diferencia entre la composición de los residuos biomásicos del mismo cultivo.

Tabla 2-19. Análisis próximo y último para la cáscara de plátano

Análisis próximo (bs)	[% wt]	Análisis último (bs libre de cenizas)	[% wt]
Humedad Total	84,94	Carbono	48,40
Material volátil	74,00	Hidrógeno	7,27
Cenizas	8,18	Nitrógeno	1,36
Carbono fijo	17,82	Azufre	0,06
Poder Calorífico [MJ/kg]	17,39	Oxígeno	42,91

Fuente: adaptado de [47]

Tabla 2-20. Análisis próximo y último para el vástago de plátano

Análisis próximo [% wt]		Análisis último [% wt]	
Humedad	10,20	Carbono	21,95
Cenizas	12,5	Hidrógeno	2,86
Material volátil	80,60	Nitrógeno	0,24
Carbono fijo	12,50	Oxígeno	74,95
HHV [MJ/kg]	14,29	Azufre	-

Fuente: adaptado de [48]

En cuanto a los residuos del sector pecuario, se estiman altos potenciales para los generados por el ganado bovino, avícola y porcino del país. En el estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia y TECSOL, para la UPME [49], se llevaron a cabo pruebas experimentales para la determinación del análisis próximo en estos tres residuos y son importantes al momento de plantear las estrategias para la generación de biogás u otros productos. Los resultados se presentan en la Tabla 2-21.

Tabla 2-21. Análisis próximo y último de residuos del sector pecuario

Residuo	Humedad [%wt]	Sólidos secos [%wt]	Cenizas [%wt]	Sólidos volátiles [%wt]
Estiércol Bovino	50	12,8	1,30	11,48
Estiércol Avícola	30	27,1 – 41,8	3,17 – 21,4	20,31 – 23,98
Estiércol Porcino	30	17,7	3,28	14,42

Fuente: adaptado de [49]

Residuo	Carbono [%wt]	Hidrógeno [%wt]	Nitrógeno [%wt]	Oxígeno [%wt]	Azufre [%wt]
Estiércol Bovino	40,52	5,25	1,56	38,03	0,42
Estiércol Avícola	42,08	5,62	1,45	39,85	0,05
Estiércol Porcino	30,67	4,41	2,51	61,70	0,71

Fuente: adaptado de [50]

En este caso se observa, que el residuo bovino posee el mayor contenido de agua dentro de los residuos pecuarios estudiados, haciéndola menos promisoría para un aprovechamiento térmico. Por su parte el contenido de sólidos volátiles más alto se presenta en el estiércol avícola, lo que representa un favorecimiento en producción de biogás dada las mayores fuentes de carbono para los microorganismos [49].

Con base en toda la información revisada sobre los tipos de biomasa en el país, se puede evidenciar su gran variedad en características, cantidades y potenciales. Basado en las cantidades anuales generadas de los diversos tipos de residuos, sus propiedades fisicoquímicas, y su información disponible en la literatura, se seleccionaron en total ocho (8) tipos de biomásas para el presente estudio: tamo de arroz, rastrojo de maíz, bagazo de caña, raquis de palma, desechos de pulpa de café, vástago de plátano, estiércol bovino y avícola.

Como se ha presentado a lo largo de este capítulo, existen diversos criterios o parámetros que deben tenerse en cuenta la momento de utilizar algún tipo de biomasa en los diversos procesos de transformación, sin embargo, con el fin de acotarlos se establecieron la humedad de las biomosas y la composición de estas como parámetros a considerar al momento de elegir las tecnologías de transformación, dada su relevancia en los procesos [40] y a la mayor disponibilidad de estos datos en la literatura, fácilmente obtenibles a partir de los análisis próximo y último, en comparación a otros como digestibilidad, por ejemplo.

En el caso de las tecnologías térmicas altos valores de humedad comprometen la eficiencia del proceso al tener que utilizar gran parte de la energía del proceso en evaporar el contenido de agua contenida en la biomasa, por lo que se hace necesario establecer esta condición como un criterio en la herramienta de selección de aprovechamiento de biomasa.

Por su parte, las tecnologías bioquímicas al tener etapas que involucran microorganismos y que requieren condiciones óptimas de alimento para poder desarrollar sus actividades metabólicas y generar los productos de interés, la composición de los tipos de biomosas se vuelve vital dentro de los parámetros a considerar para su selección, por tanto, se definió la relación carbono nitrógeno (C/N) como criterio de decisión para su uso en estos procesos [51], y que puede ser calculada a partir de los valores reportados en este capítulo sobre la composición química de las biomosas .

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo de un ejercicio de vigilancia tecnológica que permitió identificar los principales tipos de tecnologías usadas en la actualidad para el aprovechamiento energético de biomasa, considerando su desarrollo a través de la investigación desarrollada en torno a ellas, así como los productos generados para los diferentes usos finales de energía.

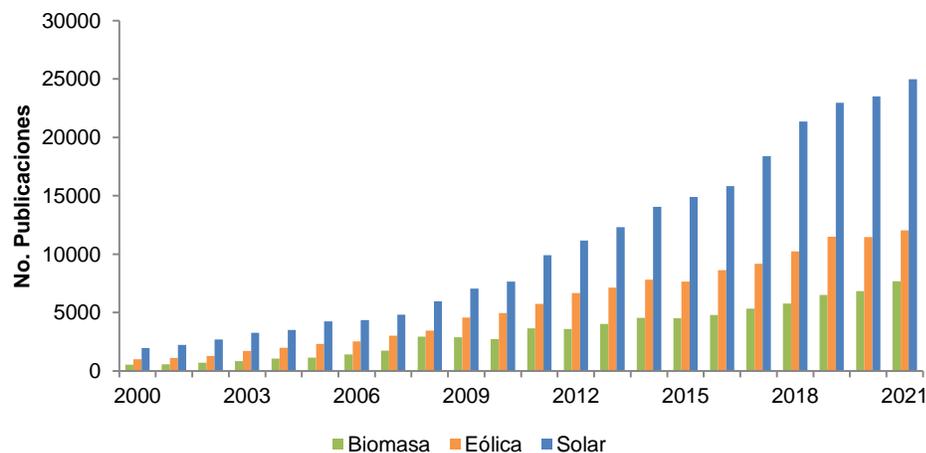
3. Tecnologías para el aprovechamiento energético de biomasa: tendencias y características

3.1 Tendencias

En términos sencillos la vigilancia tecnológica se puede definir como una herramienta que permite la identificación de oportunidades y tendencias para los estudios y las organizaciones, a través de la aplicación de metodologías para la captación y análisis de la información.

Aplicando este concepto y con el fin de conocer el estado de las más recientes investigaciones respecto a fuentes de energía renovables, se procedió a desarrollar un caso comparativo de publicaciones científicas en torno a algunas tecnologías. Se comparó el estado de las publicaciones en los últimos 20 años, entre la energía de biomasa, solar y eólica. Los resultados se presentan en la Figura 3-1.

Figura 3-1. Publicaciones científicas sobre energías renovables 2020 – 2021.



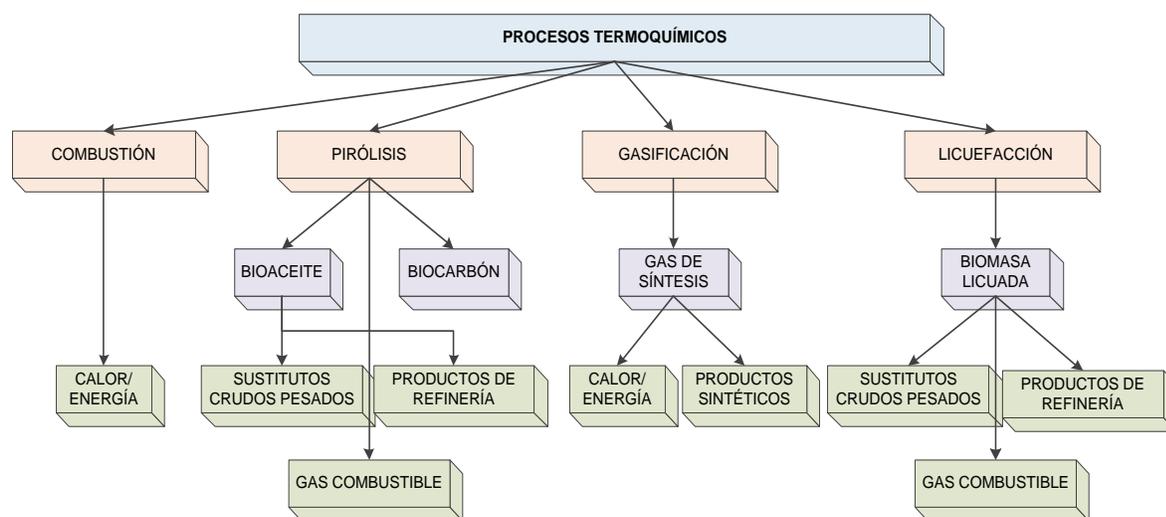
Fuente: Scopus, 2022.

La tendencia creciente de las investigaciones en las tres fuentes de energía consultadas refleja el especial interés actual por la diversificación de las matrices energéticas de los países, principalmente en el 2010 donde por ejemplo las investigaciones sobre energía solar incrementaron a partir de ese año en aproximadamente un 250% comparado con el periodo del 2000 al 2010. En cuanto a la energía proveniente de biomasa, aún se presenta un rezago comparado con la energía solar y eólica, lo cual es consecuente con los principales proyectos de energías renovables y la actual disponibilidad de tecnologías en el mercado como la amplia masificación de paneles solares en el mundo, entre otros.

Como el interés del presente trabajo se centra en la conversión energética de biomasa, se llevaron a cabo ejercicios de vigilancia tecnológica para analizar el estado y tendencias sobre estas. La variedad de los procesos que existen para la conversión de biomasa en energía dependen del tipo y cantidad de residuos, condiciones económicas y ambientales, entre otras. Existen dos grandes procesos principalmente para esto: procesos o tecnologías termoquímicas y bioquímicas/biológicas.

En la Figura 3-2 se observa un esquema de los principales procesos termoquímicos que se han estudiado y desarrollado para la conversión energética y de otros productos de interés a partir de biomasa.

Figura 3-2. Procesos termoquímicos para conversión energética de biomasa



Fuente: Adaptado de [52]

La combustión es la quema de la biomasa en presencia de aire para la conversión de la energía química almacenada en calor. Cualquier tipo de biomasa puede ser quemada, sin embargo, para mejorar este proceso es recomendable que la biomasa tenga una humedad inferior al 50% o secada previamente para tener este porcentaje. Los principales equipos asociados son los hornos, quemadores, turbinas de vapor y hervidores. Las eficiencias netas de conversión energética para plantas de combustión de biomasa oscilan entre el 20% y 40% [4].

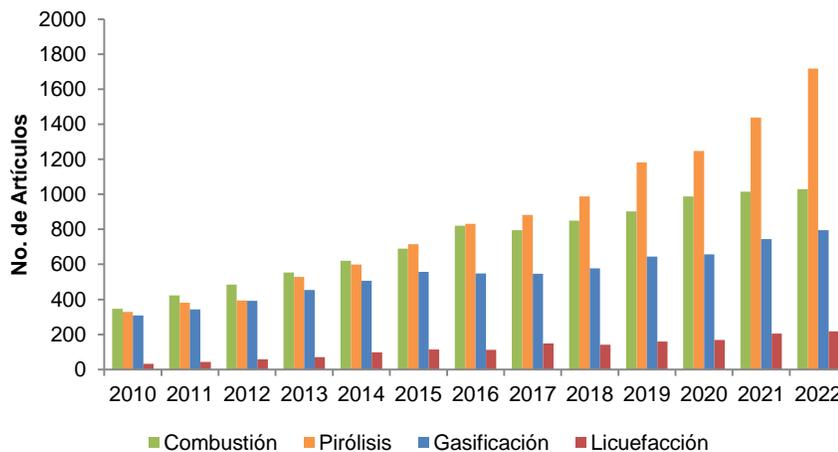
Por su parte la gasificación se define como la conversión de biomasa en una mezcla de gases combustibles a causa de una oxidación parcial de esta a altas temperaturas, en rangos típicos de 800 – 900 °C. La mezcla puede ser usada directamente en combustión o en motores y turbinas a gas. De igual manera, uno de sus usos puede ser la obtención de otros productos químicos como metanol. El ciclo combinado de gasificación consiste en el acople de turbinas de gas para la transformación de la mezcla obtenida en energía eléctrica. El gas se limpia antes de su combustión en la turbina para mejorar el proceso. Esta combinación de gasificación-combustión asegura altas eficiencias de conversión, con valores alrededor de 40% hasta 50% para plantas de capacidad de 30 a 60 MWeI [4].

Otro proceso termoquímico es la pirólisis, en este proceso la biomasa puede ser transformada por el calentamiento de esta en ausencia de oxígeno, con temperaturas que rondan los 500°C en fracciones líquidas, sólidas y gaseosas correspondientes a productos de valor agregado. La pirólisis rápida se utiliza para producir principalmente la fracción líquida o 'bioaceite' con eficiencias que pueden alcanzar hasta el 80%. Este puede ser utilizado en motores y turbinas para su aprovechamiento energético. Algunas consideraciones a tener en cuenta son la corrosividad y la baja estabilidad térmica [4].

Finalmente la licuefacción es una tecnología promisoría para la conversión de biomasa en biocombustibles. La licuefacción indirecta integra procesos como el aprovechamiento del gas de síntesis obtenido de la gasificación de biomasa para la producción de combustibles líquidos como alcoholes y éteres a través del proceso de *Fischer-Tropsch*; en el caso de la directa, se refiere a la obtención de biocombustibles como el alcohol principalmente mediante tecnologías de hidrólisis enzimática y fermentación, aunque también se ha estudiado la licuefacción termodinámica [21]

Con el propósito de analizar el estado reciente de las investigaciones realizadas sobre las tecnologías termoquímicas indicadas anteriormente, se realizó una revisión de las publicaciones científicas que involucraran al proceso de interés y el uso de biomasa mediante el buscador Scopus. Posteriormente se realizó una depuración de los datos y se graficaron los datos en el periodo de tiempo observado, los resultados se presentan en la Figura 3-3.

Figura 3-3. Publicaciones científicas sobre tecnologías termoquímicas para biomasa



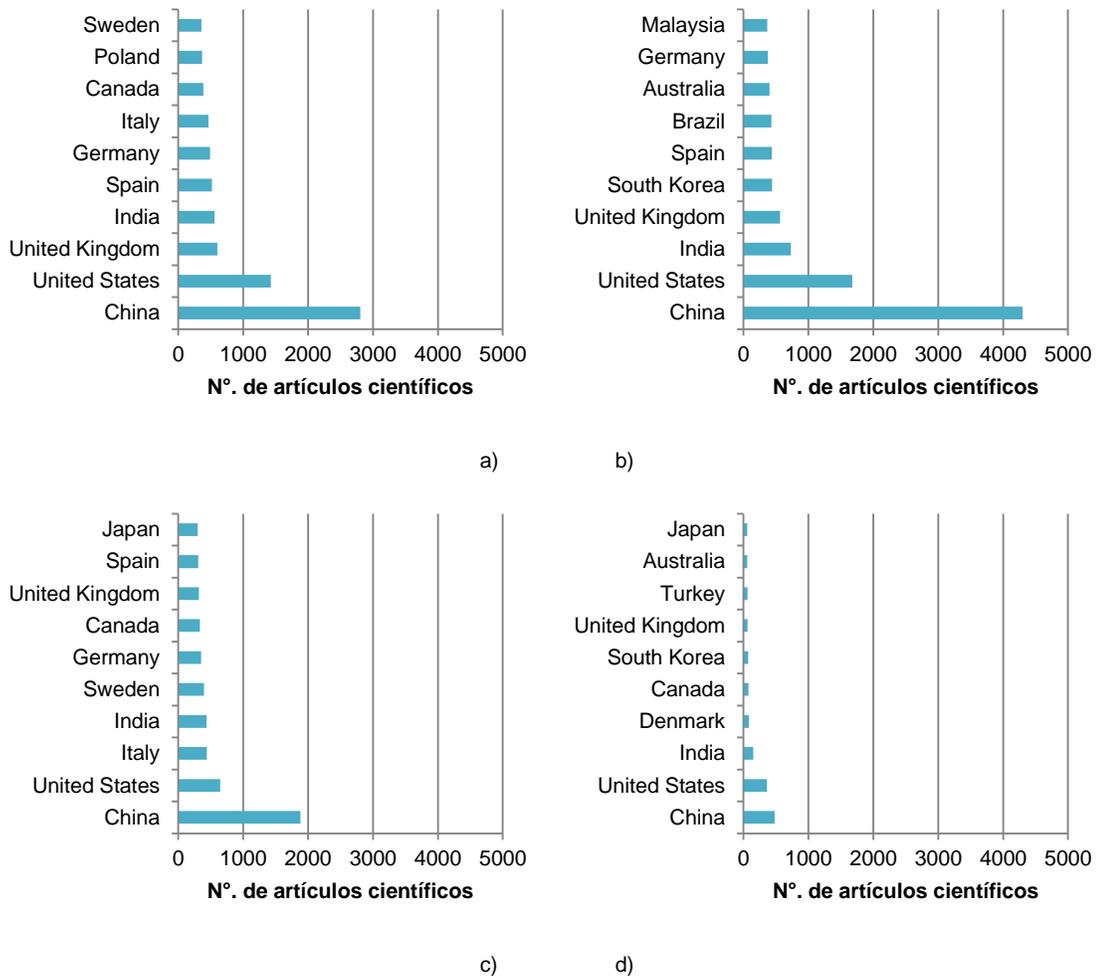
Fuente: Scopus, 2023.

La combustión es un proceso ampliamente estudiado y utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa, se observa que la mayor cantidad de publicaciones durante el 2010 al 2014 corresponden a esta tecnología, sin embargo, a partir de 2015 en adelante el proceso de pirólisis es quien exhibe mayores publicaciones, lo cual puede deberse al especial interés en los diferentes productos de valor agregado que genera esa tecnología, buscando mejorar su operación y factibilidad.

Por otro lado, la Figura 3-4 muestra el número de publicaciones de estas tecnologías en los diez primeros países que con más reportes. Los resultados muestran a China y Estados Unidos como las dos naciones que mayor número de artículos científicos publicaron en los cuatro procesos de tratamiento consultados, mostrando también una relación con estos dos países como unos de los mayores productores de tecnología en el mundo, en este mismo sentido se perfila India y Reino Unido principalmente en las referentes a combustión y pirólisis. Sin embargo, se reconoce que países como China y

Estados Unidos también cuenta con mayores recursos disponibles para investigación, lo que a la vez puede influir en el mayor número de publicaciones en estos países.

Figura 3-4. Publicaciones científicas sobre tecnologías termoquímicas para biomasa por país

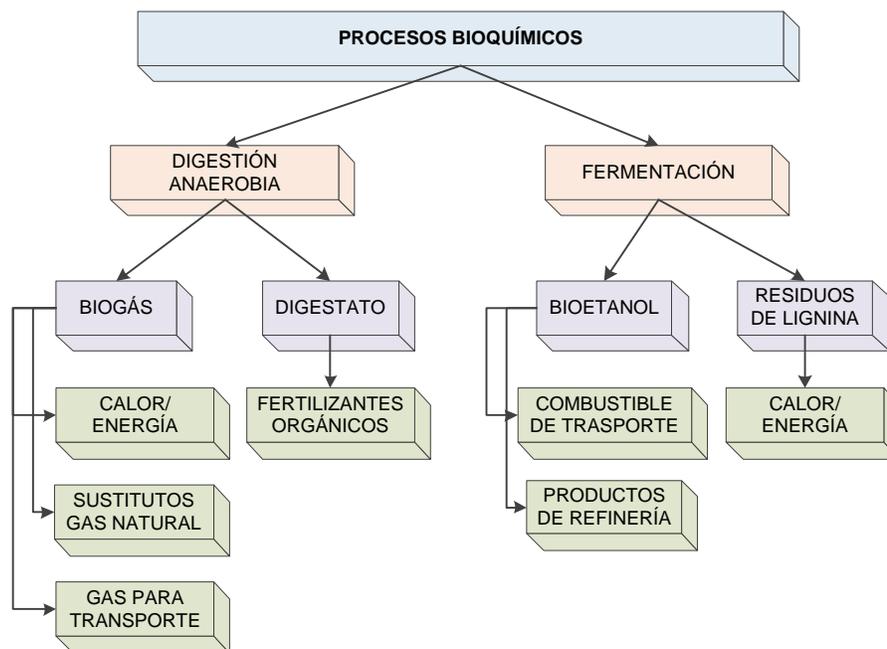


Fuente: Scopus 2023. a) Combustión b) Pirólisis c) Gasificación d) Licuefacción.

Por su parte, los procesos bioquímicos incluyen tecnologías como la digestión anaerobia, fermentación, entre otras conversiones enzimáticas, que emplean microorganismos teniendo un potencial para la transformación de sustratos en productos finales de valor agregado, a través de condiciones de reacción moderadas, que permiten una producción más sostenible a razón de menores requerimientos energéticos y menos generación de residuos [40]. La Figura 3-5 presenta las dos principales rutas de aprovechamiento

bioquímico de biomasa, así como los productos intermedios y finales, donde se destacan biocombustibles y gases combustibles para la generación de energía.

Figura 3-5. Procesos bioquímicos de conversión energética de biomasa

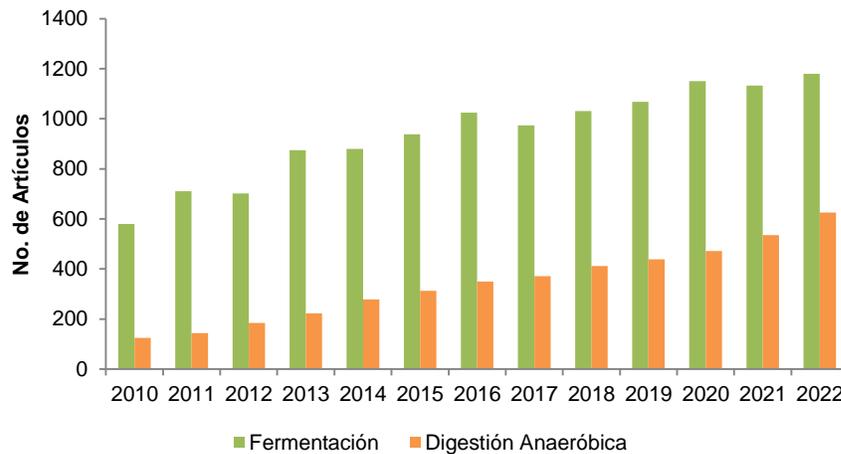


Fuente: Adaptado de [52]

La fermentación consiste en la transformación de la biomasa en azúcares simples a través de acción enzimática, el cual posteriormente mediante el uso de levaduras se puede transformar en etanol y otros productos químicos de interés. Por su parte en el proceso de digestión anaeróbica la materia orgánica es convertida directamente en gas, el cual es principalmente una mezcla de metano y dióxido de carbono, presenta trazas de sulfuro de hidrógeno. Esta acción es llevada a cabo por bacterias, teniendo valores de bajo poder calorífico para el gas entre 20% y 40% del de la materia prima utilizada.[4].

De forma análoga se realizó la revisión de los artículos científicos para estas tecnologías y los resultados se muestran en la Figura 3-. De acuerdo con los criterios de búsqueda los cuales usaron en todos los casos como palabras clave 'biomasa' y la tecnología a consultar, se encuentra que el proceso de fermentación obtuvo un 50 % más de resultados que la digestión anaeróbica, pudiendo indicar principal interés por la obtención de alcoholes y combustibles que por la producción de biogás.

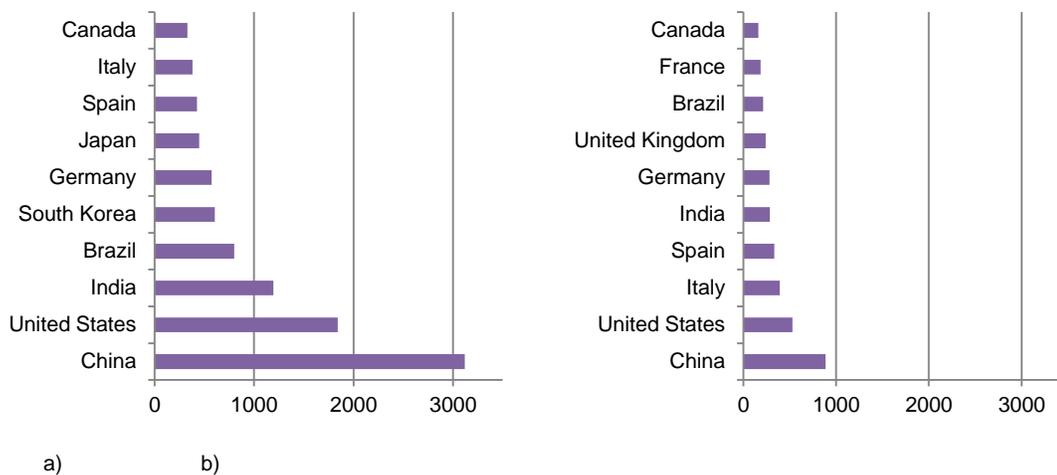
Figura 3-6. Publicaciones científicas sobre tecnologías bioquímicas para biomasa



Fuente: Scopus 2023.

En cuanto a los principales países que reportan publicaciones sobre las tecnologías bioquímicas consultadas, se observa en la Figura 3-7 que nuevamente están encabezados por China y Estados Unidos, sin embargo, se resalta en el caso de la fermentación principalmente para la producción de alcohol carburante la presencia del país latinoamericano Brasil, el cual se ha perfilado dentro de la región como uno de los países con mayor producción de este biocombustible, el cual puede ser un buen referente para el presente estudio por la cercanía y similitud de condiciones de los países

Figura 3-7. Publicaciones científicas sobre tecnologías bioquímicas para biomasa por país



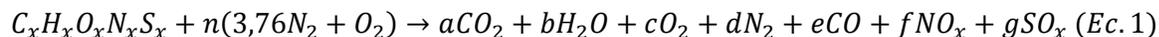
Fuente: Scopus 2023. a) Fermentación b) Digestión Anaeróbica.

La memoria de la estructuración del ejercicio de vigilancia tecnológica se presenta en el Anexo A, el cual también contiene los resultados de las ecuaciones de búsqueda utilizadas para obtener la información utilizada en la obtención de los tipos y características de las tecnologías empleadas para el aprovechamiento energético de biomasa.

3.2 Características de las tecnologías

3.2.1 Combustión

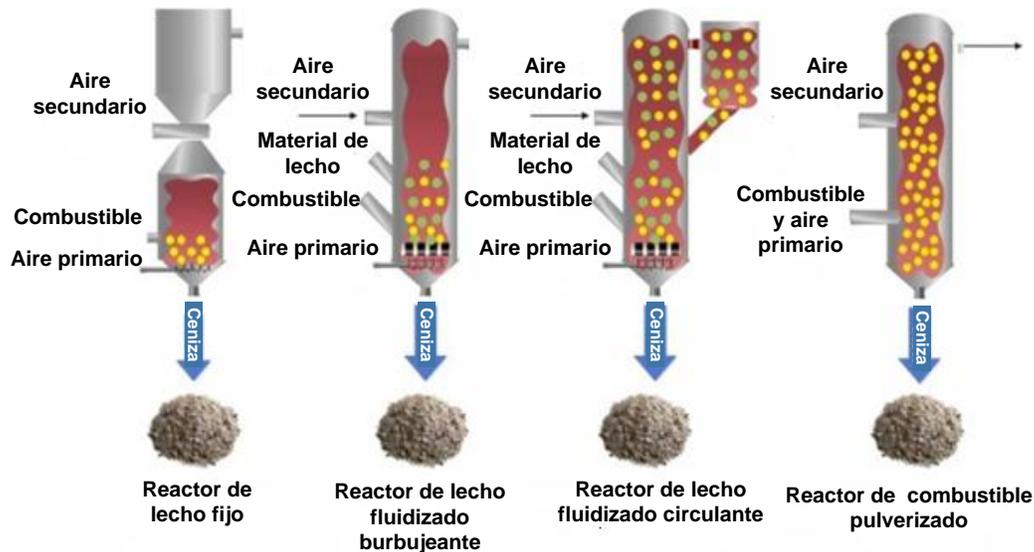
La combustión se puede definir como la reacción exotérmica entre un combustible y oxígeno para formar principalmente dióxido de carbono y agua, al igual que la liberación de energía en forma de calor, el cual puede ser usado para usos de calentamiento e incluso la producción de electricidad. La combustión directa es una tecnología bien establecida, aunque las más recientes plantas que combinan calor y electricidad pueden llegar a alcanzar eficiencias globales alrededor del 90 % [53]. La ecuación química general para la reacción de combustión se presenta a continuación:



De acuerdo con la fuente de carbono y las relaciones de aire (oxígeno), así como el proceso mismo de combustión, se obtendrán en mayor o menor cantidad los productos indicados anteriormente. Los mecanismos de reacción, que pueden tener cientos de sub-reacciones, son herramientas capaces de modelar de manera más precisa la reacción de combustión y comprender este proceso.

Por lo general la combustión se clasifica de acuerdo con: el tipo de combustible, si es solo uno o co-combustión cuando existen dos o más, también según la forma de suministrar el oxígeno al proceso y el pretratamiento dado al combustible. En este último se destacan el peletizado, torrefacción y carbonización hidrotérmica [54].

Algunos de los esquemas más utilizados para el proceso de combustión se presentan en la Figura 3-8. De manera general, los reactores de combustión empleados a grandes escalas son los de lecho fijo (hornos de parrilla, fogones subalimentados), de lecho fluidizado (circulante, burbujeante) y reactor de combustible pulverizado.

Figura 3-8. Reactores empleados para combustión

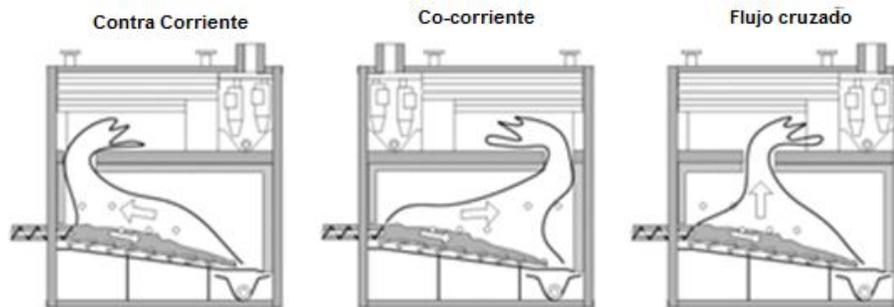
Fuente: tomado de [54]

3.2.1.1 Reactores de Lecho Fijo

El reactor de combustión de lecho fijo empleado en las plantas de energía suelen implementar el sistema de encendido de parrillas, los cuales pueden ser fijos, móviles y rotativos, así como la orientación vertical u horizontal, que dependerá del tamaño de la planta y la producción. La alimentación suele ser por la parte de abajo a través de sistemas mecánicos [55]. En estos, el aire primario atraviesa la cama de combustible y se llevan a cabo procesos como el secado, gasificación, para luego pasar a una segunda cámara, usualmente separada de la cama de combustible, donde los gases combustibles son quemados. Este reactor no es el más adecuado para todo tipo de biomasa [56].

- **Hornos de parrilla**

Los hay de diferentes tipos disponibles en la actualidad: de parrillas fijas, móviles, viajeras, rotativas y vibrantes. En general los hornos de parrilla son bastante apropiados para biomasa con altos contenidos de humedad, variedad de tamaño de partícula y altos contenidos de ceniza. Se hace importante un buen diseño y operación de las parrillas con el objetivo de que se lleve a cabo una correcta homogenización del combustible y el lecho, con el fin de evitar ensuciamiento, grandes cantidades de cenizas volantes y pérdidas de calor en la caldera [56].

Figura 3-9. Esquemas en la tecnología de combustión de parrillas

Fuente: Tomado de [56]

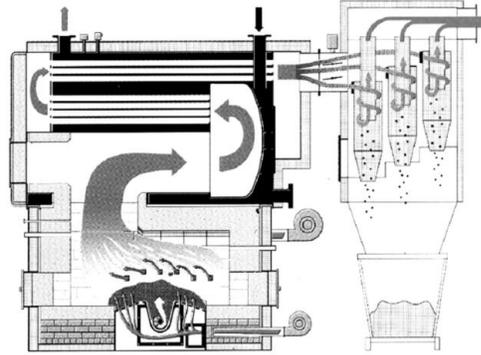
De acuerdo con la dirección de los flujos de la biomasa y de los gases, se pueden destacar tres configuraciones en el reactor de lecho fijo: contracorriente, co-corriente y flujo cruzado, como se esquematizan en la Figura 3-9.

La combustión en contracorriente resulta ser la más adecuada para biomásas con poderes caloríficos bajos como: cortezas húmedas, virutas de madera y aserrín, dado que favorece el secado del material fresco que ingresa al reactor por el efecto de los gases calientes generados. El proceso en co-corriente debe ser dejado para combustibles más secos como desechos de madera seca o paja. El flujo cruzado combina los sistemas anteriores y se encuentra principalmente en plantas donde la cámara de combustión secundaria se encuentra de forma vertical.

- **Sistema subalimentado (*underfeed*)**

Este tipo de horno se considera una tecnología barata y operacionalmente segura para sistemas pequeños y medianos con capacidades nominales de caldera de 6 MW_{th} . El combustible ingresa por la parte de debajo de la cámara a través de tornillos transportadores que lo llevan a parrillas interiores o exteriores, siendo estas últimas las más usadas en las plantas modernas. La Figura 3-10 muestra este tipo de horno.

Figura 3-10. Horno con sistema de subalimentación



Fuente: tomado de [56]

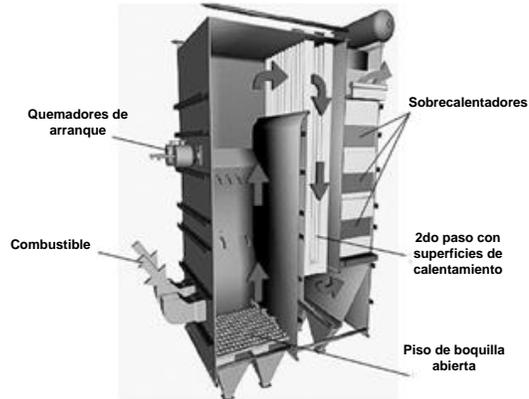
Este tipo de hornos es recomendable para biomasa que posean un bajo contenido de cenizas y tamaños de partículas pequeños (hasta 50 mm), de lo contrario se requerirá un sistema de remoción de cenizas más eficiente. Como ventaja se puede destacar que presenta un buen comportamiento para cargas parciales y un sistema de carga simple, fácilmente adaptable a los cambios en la alimentación que se puedan presentar.

3.2.1.2 Reactores de Lecho Fluidizado

En el caso de los reactores de lecho fluidizado, la biomasa o el combustible sólido se mezcla con una corriente de gas durante el proceso de combustión. Esto permite que se mejore la interacción química en la reacción, la transferencia de calor durante el proceso, así como menores demandas de aire en exceso. La temperatura de combustión debe mantenerse baja, entre 650 a 900 °C, para disminuir la sinterización en la ceniza. Esta tecnología permite mezclar diferentes tipos de biomasa, pero puede verse limitada por los tamaños de partícula y las impurezas en la alimentación [56].

- **Lecho fluidizado burbujeante**

Este tipo de sistema empieza a considerarse adecuado para calderas con capacidades nominales mayores a los 20 MW_{th}. En estos hornos el lecho del material se ubica en la parte baja, por donde ingresa el aire primario a través de boquillas distribuidoras que suspende al lecho. Las velocidades típicas se encuentran entre 1 y 2 m/s. La figura 3-11 presenta un ejemplo de este sistema.

Figura 3-11. Horno de lecho fluidizado burbujeante

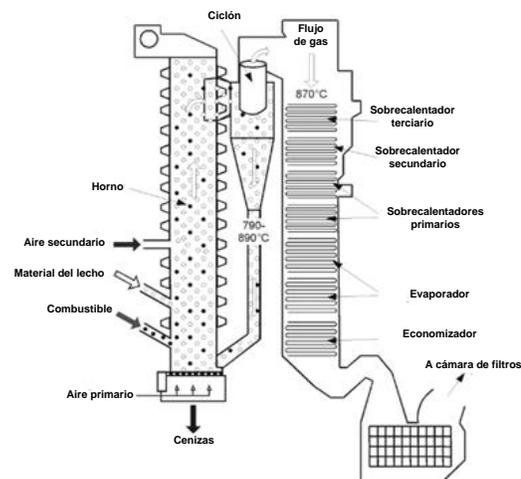
Fuente: tomado de [56]

Dentro de sus ventajas está la flexibilidad para tratar mezclas de varios tipos de biomasa y contenidos variables de humedad. Permite un buen control de temperatura del lecho entre los 650 y 850 °C. Es posible operarlo con cargas parciales en un rango de 60 a 100% de la carga nominal [56].

- **Lecho fluidizado circulante**

Otro lecho fluidizado se muestra en la

Figura 3-12. Alcanza su mayor factibilidad en plantas con capacidades nominales superiores a los 30 MW_{th} dado que requieren un mayor tamaño que otros sistemas y sus costos de capital y operación son mayores.

Figura 3-12. Horno de lecho fluidizado circulante

Fuente: tomado de [56]

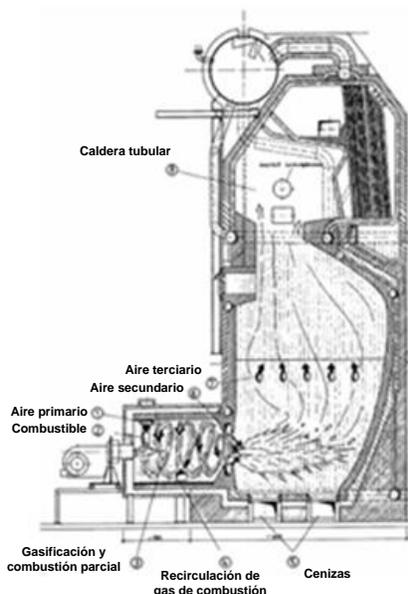
Este horno posee mayores velocidades de fluidización (5 a 10 m/s) lo que hace posible una mayor turbulencia que favorece la transferencia de calor y mejora el perfil de temperatura el cual suele estar entre los 750 a 900 °C para el material del lecho.

Gran parte del material del lecho es arrastrado junto con los gases de combustión generados, por lo que se utiliza un sistema de separación, como ciclones, para lograr su recuperación y devolverlo a la cámara de combustión. Los tamaños de partícula de la biomasa alimentada deben ser pequeños (0,1 a 40 mm de diámetro) lo que tiende a incrementar los costos del pretratamiento [56].

3.2.1.3 Reactores de Combustible Pulverizado

En estos sistemas (Figura 3-13) los combustibles como el aserrín y las virutas finas de biomasa son inyectados de manera neumática al horno, usando aire como medio para el transporte siendo sirviendo también como aire primario. Los tamaños de partículas deben encontrarse entre 10 a 20 μ m y la humedad no debe sobrepasar el 20 % en peso en base húmeda. La inyección de la mezcla combustible aire suele hacerse de forma tangencial para proveer un flujo rotacional (vórtice) [56].

Figura 3-13. Horno de combustible pulverizado



Fuente: tomado de [56]

Requiere menor cantidad de oxígeno en exceso lo que incrementa la eficiencia del proceso, así como la reducción de óxidos de nitrógeno en los gases de escape. Posee un buen control de cargue y variación de la alimentación. Como desventaja requiere un quemador extra al inicio del proceso y la limitación del tamaño de partícula de la biomasa utilizada [56].

Finalmente, el rango de las plantas de combustión de biomasa es amplio (Tabla 3-1), se pueden encontrar en muy pequeña escala, por ejemplo para usos domésticos, así como grandes plantas a escala industrial entre los 100 a 3000 MW. Las eficiencias de conversión de bioenergía neta para plantas de combustión de biomasa en potencia, se encuentran entre el 20 % al 40 %, estas aumentan a medida que se incrementa el tamaño de los sistemas, por lo general sobre los 100 MWe o cuando se realizar procesos de co-combustión [4]

Tabla 3-1. Características de algunas tecnologías típicas de combustión

Tecnología de combustión	Capacidad térmica promedio	Tipo de combustibles
Chimenea abierta/cerrada	2 – 15 kW	Leña, briquetas de madera
Horno individual	3 – 12 kW	Leña, briquetas de madera
Horno de losas	2 – 15 kW	Leña, briquetas de madera
Horno de Pellets	3 – 10 kW	Pellets
Horno de tronco de madera	10 – 500 kW	Leña, briquetas de madera
Sistema de encendido de gasificación	20 kW – 2 MW	Astillas, virutas y limaduras de madera
Sistema de alimentación bajo (<i>under feed</i>)	20 kW – 2 MW	Astillas de madera
Sistema de encendido de parrilla para madera	150 kW – 15 MW	Madera, corteza
Sistema de lecho fluidizado	Desde 10 MW	Madera, corteza, lodos de depuradoras, licor negro
Sistema de encendido de parrilla para biomasa herbácea	50 kW – 20 MW	Fardos, biomasa herbácea en astillas
Soplador en sistema de encendido	200 kW – 50 MW	Polvos, virutas y limaduras

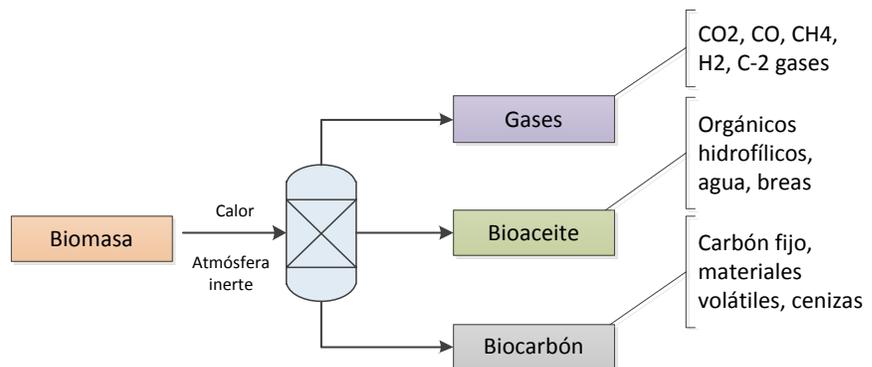
Fuente: adaptado de [57]

3.2.2 Pirólisis

La pirólisis es un proceso mediante el cual los materiales como lo biomasa son calentados en una atmosfera inerte, a temperaturas iniciales de entre 300 a 550 °C y posteriormente elevadas a 700 – 800 °C, con el objetivo de descomponer térmicamente el material orgánico, es decir, romper las largas cadenas de la biomasa para generar biocarbón, bioaceite y gases combustibles (Figura 3-14) [55]. Las fuentes de residuos para aplicar esta tecnología abarcan los residuos agroindustriales, desechos sólidos urbanos, de madera, forestales, cultivos energéticos y estiércol de animales, lo que lo hace atractiva para expandir las posibilidades de materias primas menos deseadas [58].

Existen dos principales diferencias entre la pirólisis y la combustión, la primera es que la combustión es un proceso exotérmico, mientras que la pirólisis es endotérmica. La segunda diferencia radica en sus productos, la primera genera principalmente CO₂, agua y cenizas, por su parte la pirólisis produce productos gaseosos, líquidos y sólidos que poseen características valiosas para la producción de energéticos y productos químicos [59].

Figura 3-14. Esquema básico del proceso de pirólisis y sus productos



Fuente: adaptado de [60]

El rendimiento de los productos se ve impactado por la composición inicial de la biomasa, así como del tipo de pirólisis realizada, los cuales dependen, entre otros, de la temperatura y el tiempo de residencia [55]. Se puede clasificar a esta tecnología como lenta, rápida o flash. En la Tabla 3-2 se muestra una comparación entre estas, de acuerdo con parámetros de operación.

Tabla 3-2. Tipos de pirólisis y parámetros típicos de operación

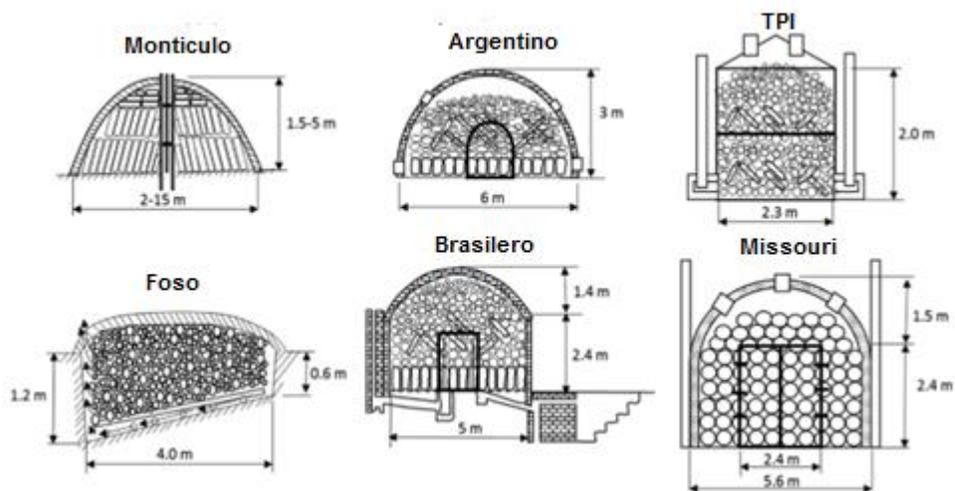
Tipo	Productos	Tamaño de partícula	Tiempo de residencia	Tasa de calentamiento
Flash	1. Bioaceite (75%) 2. Gas (13%) 3. Biocarbón (12%)	Menor de 0,2 mm	Menor de 0,5 s	1000 °C/s
Rápida	1. Bioaceite (50%) 2. Gas (30%) 3. Biocarbón (20%)	Menor de 1 mm	0,5 a 10 s	10 a 200 °C/s
Lenta	1. Biocarbón (35%) 2. Gas (35%) 3. Bioaceite (30%)	5 a 50 mm	600 a 6000 s	0,1 a 1 °C/s

Fuente: adaptado de [55] [61]

3.2.2.1 Pirólisis Lenta

En la pirólisis lenta la materia prima es calentada a bajas tasas de calentamiento y de temperatura, donde las moléculas de la biomasa atraviesan algunas reacciones de re-polimerización, por lo general suele ser un proceso tipo batch donde se busca generar principalmente biocarbón. El rendimiento de los productos dependerá en gran medida de las características de la biomasa, tasa de calentamiento, temperatura de pirólisis y el material del lecho. Algunas limitaciones de este tipo de pirólisis son los altos tiempos de procesamiento que pueden ser incluso de días, lo que resulta en altos consumos energéticos [55] [62].

Los reactores mayormente empleados para este tipo de pirólisis son los hornos como los esquematizados en la Figura 3-15, donde se busca carbonizar el material para producir un sólido con mejores propiedades que la materia prima utilizada. Los tipo montículo y foso son fáciles de construir y operar. Se puede trabajar con leña y cuenta con capacidades desde los 50 a 32000 kg. El suelo sirve como barrera para mantener una atmósfera inerte, aunque los subproductos líquidos y gaseosos no se recuperan con esta tecnología además que requiere mucha mano de obra y produce mucha suciedad en la zona.

Figura 3-15. Esquemas de hornos típicos para carbonización

Fuente: Tomado de [63]

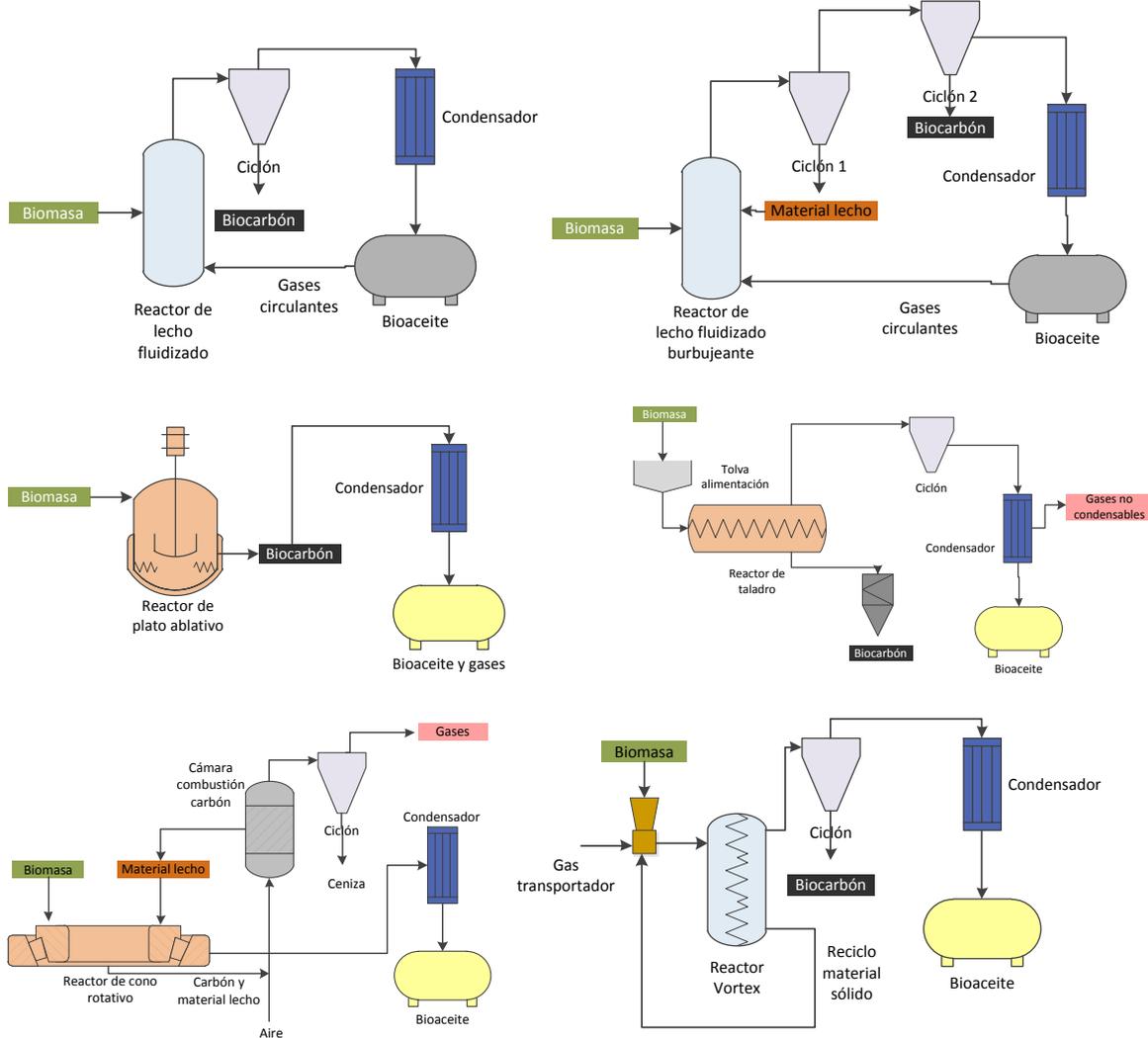
Por su parte, los hornos del tipo ladrillo, bloque o de metal, son auto-térmicos y operan con la quema de parte del material alimentado. Presentan mejores rendimientos que los revisados previamente. La capacidad de cargue está entre las 20 y 80 toneladas por lote. El proceso de carbonización puede estar entre los 10 y 30 días.

3.2.2.2 Pirólisis Rápida

Las tasas de calentamiento y temperaturas alcanzadas en la pirólisis rápida son mucho mayores que en la lenta. El principal producto es el bioaceite cuya mayor producción se ha encontrado alrededor de los 500 °C, también se producen gases combustibles y biocarbón, sin embargo, el rendimiento del bioaceite disminuye en la medida que estos dos subproductos aumenten. Los mayores rendimientos se han visto con biomasa maderera, debido principalmente a los altos contenidos de celulosa y hemicelulosa en comparación con cultivos energéticos y residuos agrícolas, de igual manera a menores tamaño de partícula se ha visto que mejora el rendimiento del bioaceite [58].

La pirólisis rápida presenta ventajas como la simplicidad del almacenamiento, transporte y la posibilidad de refinar los productos en otros de mayor valor y utilidad, además de ser un proceso con alta eficiencia energética y de costo moderado comparado con otras tecnologías [55]. Algunas de las principales configuraciones de este proceso se presentan en la Figura 3-16.

Figura 3-16. Esquemas típicos para pirólisis rápida



Fuente: Adaptado de [55]

El reactor de lecho fluidizado utiliza como fuente de calor un material de lecho caliente (por lo general arena) el cual transfiere la energía a las partículas de biomasa. Las capacidades se encuentran entre 0,5 y 200 t/día, con una complejidad media y un requerimiento de partículas finas. Diversas investigaciones han reportado resultados de pirólisis en reactores de lecho fluidizado con biomásas como rastrojo de maíz, cascarilla de arroz, bagazo de caña, pasto, entre otros, donde alcanzaron rendimientos para el bioaceite desde el 35 % hasta el 73 % [63].

Elgarahy y colaboradores., Garcia-Nunez y colaboradores, y De Wild, realizaron publicaciones donde revisaron diferentes tipos de reactores usados en la pirólisis rápida,

parte de esa información, principalmente sobre el funcionamiento y otros parámetros de interés se resumen en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Otros reactores empleados en pirólisis rápida

Tipo	Características
Reactor ablativo	El material particulado es empujado hacia un disco caliente rotatorio, dando inicio a la reacción pirolítica debido al calor y la presión, sin gases inertes. Esto genera una capa oleosa que es luego evaporada. Pueden procesar grandes cantidades de biomasa. El diseño y la rotación permiten que biomasa fresca que ingresa, pueda estar más expuesta para las reacciones. El método de calentamiento es indirecto y existen hasta con capacidad de 6 t/día. Los productos finales esperados son el bioaceite y el biocarbón.
Reactor de taladro	En este proceso el material gira a través de un cilindro caliente en ausencia de oxígeno por la acción de un taladro o tornillo, durante el trayecto con un rango de temperatura entre 400 – 800 °C se inician las reacciones de volatilización y gasificación. Los gases y vapores son llevados hasta un condensador. Su operación es continua y pueden trabajar o no con portadores como arena caliente o bolas cerámicas, los cuales han demostrado mejorar los rendimientos de los productos. El rendimiento del bioaceite suele ser menor que en los reactores de lecho fluidizado. Sus capacidades están en órdenes superiores a las 50 t/día y admite partículas finas y virutas.
Reactor cono rotativo	Las partículas de biomasa son mezcladas con arena caliente, sin presencia de gases inertes en un reactor cónico giratorio, cuyo movimiento, hace que las partículas suban y se rebosen, y no requiera grandes cantidades de gas transportador. Esta tecnología ha sido aplicada con éxito en países como Malasia y Países Bajos. El calentamiento se hace directa e indirectamente y con capacidad para procesar 50 t/día de biomasa. Su operación es compleja y requiere de material fino para su adecuado funcionamiento.
Reactor vortex	En este tipo de reactor las partículas de biomasa son transportadas por un

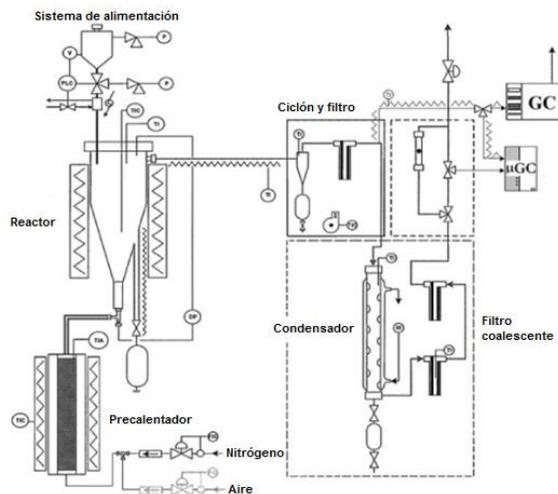
gas inerte a una gran velocidad e ingresan de forma tangencial al reactor con el fin de generar un vórtice en su interior, logrando velocidades de deslizamiento mayores entre el gas y el sólido, comparado con la tecnología de lecho fluidizado. Se han desarrollado simulaciones, modelamientos y pruebas a escala laboratorio de esta prometedora tecnología.

Fuente: elaboración propia a partir de [55], [63], [64]

3.2.2.3 Pirólisis *Flash*

Este tipo de pirólisis ocurre a temperaturas y tasas de calentamiento mayores a la de pirólisis rápida, caracterizándose por tener muy bajos tiempos de residencia de vapor (por lo general menor a 1 segundo), y un veloz enfriamiento de los vapores pirolíticos, así como la remoción del biocarbón del sistema. Al suceder de manera tan rápida, se evitan segundas reacciones de rompimiento de cadenas, lo que permite que se aumente el rendimiento de la fase líquida, estando alrededor del 75% del total de los productos [65].

Figura 3-17. Esquema de reactor de lecho cónico chorreante.



Fuente: tomado de [65].

Las configuraciones usadas para este proceso son iguales a las de pirólisis rápida y también han sido estudiadas por diferentes autores, sin embargo, de acuerdo con Ighalo y colaboradores, una variación del reactor fluidizado, conocido como reactor de lecho cónico chorreante, se ha identificado como una buena opción para llevar a cabo pirólisis

flash con biomasa, obteniéndose rendimientos de hasta 71 % a 400°C para el bioaceite. Un esquema general se presenta en la Figura 3-17.

Finalmente, algunas ventajas y desventajas de otros tipos de reactores usados para los procesos de pirólisis flash se muestran en la Tabla 3-4, los cuales son importantes tener en cuenta al momento de elegir la mejor configuración para la biomasa y los productos de interés.

Tabla 3-4. Comparación de reactores usados en pirólisis flash

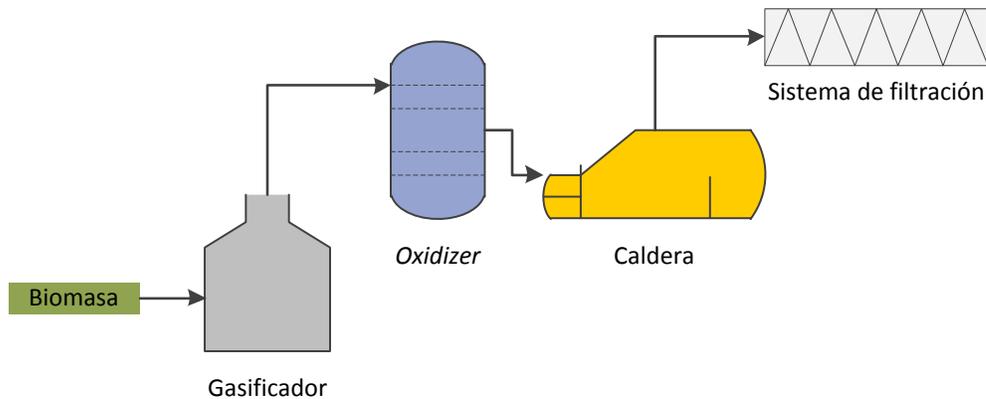
Tipo de reactor	Ventajas	Desventajas
Lecho fijo	Diseño simple	Largos tiempo de residencia de la fase sólida
Lecho cónico chorreante	Puede lograr altas tasas de calentamiento	Altos costos operativos
De Vacío	Fácil condensación de líquidos	Bajas tasas de transferencia de energía y masa
Microondas	Sin gradientes de temperatura internas	Consume intensivamente energía eléctrica

Fuente: adaptado de [65]

3.2.3 Gasificación

El proceso de gasificación de biomasa (Figura 3-18) hace referencia a la transformación de material orgánico (residuos agrícolas, sólidos domésticos e industriales) en productos gaseosos y sólidos, llevado a cabo en un rango de temperatura entre los 700 a 900 °C. La mezcla de gases que se generan suele contener en mayor medida CO, H₂, H₂O, CO₂ e hidrocarburos de uno a cuatro carbonos; la cual posee un gran poder calorífico que puede ser usado para producir energía, biocombustibles y sustancias químicas [66].

El proceso global es endotérmico y con una baja emisión de NO_x en comparación con el la combustión convencional. Se pueden distinguir cuatro etapas fundamentales a lo largo de la gasificación: secado, pirólisis, oxidación y reacciones de reducción. El gas de síntesis tratado puede ser usado en turbinas de gas para la generación de electricidad.

Figura 3-18. Diagrama del proceso de gasificación

Fuente: adaptado de [66]

El proceso de gasificación ocurre en reactores comúnmente llamados gasificadores, los cuales cuentan con diversas presentaciones en forma, tamaño y funcionamiento, cuya elección dependerá entre otras de: tipo de biomasa y humedad, agentes gasificantes, forma de transferir el calor. Las principales reacciones que ocurren durante las diferentes etapas de la gasificación se resumen en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Principales reacciones en el proceso de gasificación.

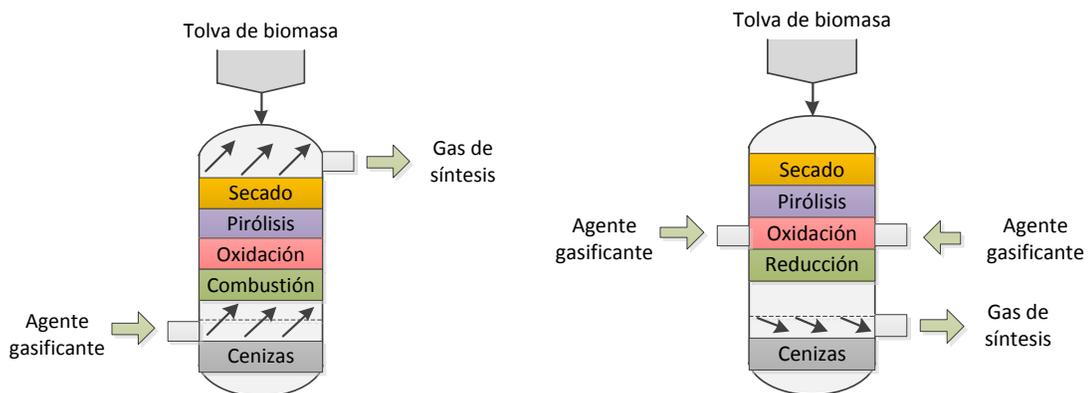
Reacción	Nombre
$Biomasa \rightarrow Carbón + Alquitrán + H_2O + Gases\ ligeros$	Pirólisis de biomasa
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	Oxidación parcial del carbono
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidación del monóxido de carbono
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidación del carbono
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	Oxidación del hidrógeno
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Reacción desplazamiento agua-gas
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Reformación a vapor de metano
$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	Reformación a vapor
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	Gasificación de hidrógeno
$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	Metanización

3.2.3.1 Gasificador de lecho fijo

Es el tipo de gasificador de mayor generalización y la forma más convencional para la obtención de gas de síntesis. Se suelen reconocer dos tipos, de acuerdo con la dirección del flujo del agente gasificante que atraviesa el proceso, de tipo ascendente (*updraft*) e descendente (*downdraft*). Se estima que alrededor del 75 % de los gasificadores

comercializados en la actualidad son de tipo *downdraft*. En los reactores de tipo ascendente el agente gasificante y el combustible fluyen en forma contraria, y los productos salen por la parte superior, en el descendente todo el proceso ocurre de forma opuesta. Ambas configuraciones suele tener temperaturas de operación superiores a los 1500 °C [67]. Estas configuraciones son presentadas en la Figura 3-19.

Figura 3-19. Gasificadores de lecho fijo tipo *updraft* y *downdraft*



Fuente: adaptado de [67]

El gasificador tipo ascendente tiene una construcción fácil y cuenta con una alta eficiencia para la conversión de carbono, así como de transferencia de masa por la configuración. Puede procesar biomasa con alta humedad y baja caída de presión en sistema. Sin embargo, la conversión en gas de síntesis es baja y la generación de alquitrán es alta [67] [68].

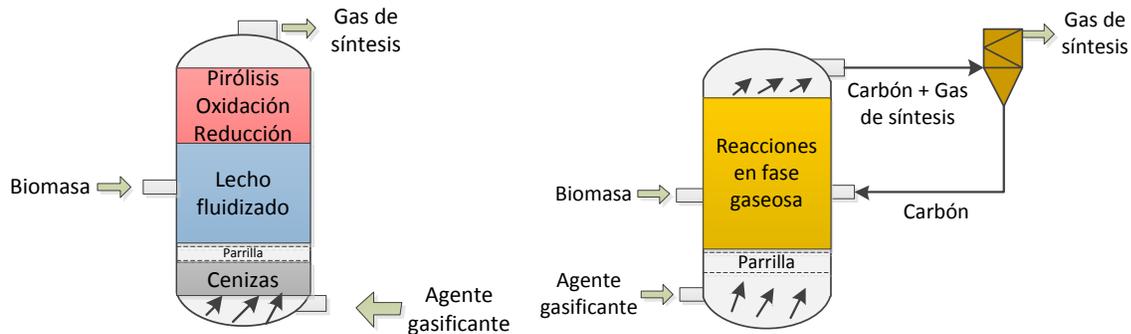
En el caso del *downdraft*, este comparte la simpleza y robustez de construcción del ascendente, junto con la alta eficiencia de conversión de carbono. Solo produce trazas de alquitrán en el gas producido y bajo arrastre de ceniza. Como desafíos de esta tecnología están su baja eficiencia térmica, menor capacidad y altos costos de mantenimiento [67] [69].

3.2.3.2 Gasificador de lecho fluidizado

En este tipo de reactores el material sólido alcanza una mezcla más estrecha con el material del lecho y los gases combustibles, por acción del agente gasificante. Su rango

de temperaturas de operación típicos están entre los 800 y 900 °C. La Figura 3-20 presenta los dos principales esquemas: burbujeante y circulante.

Figura 3-20. Gasificadores de lecho fluidizado tipo burbujeante y circulante



Fuente: adaptado de [67]

- **Gasificador de lecho fluidizado circulante**

En este equipo el calor se entrega por medio de una fuente externa a la temperatura deseada, y la biomasa ingresa desde arriba o un costado, según el diseño del gasificador. Debido a las altas velocidades de fluidización se hace necesario recuperar los sólidos que se van con los gases, a través de ciclones para retornarlos al lecho. Es un proceso flexible, escalable y con alta capacidad volumétrica. Entre algunas desventajas se pueden mencionar pérdida de carbón en las cenizas, altos costos de inversión y pretratamientos para la obtención de tamaños de partículas muy pequeños se requieren para su operación [60] [66].

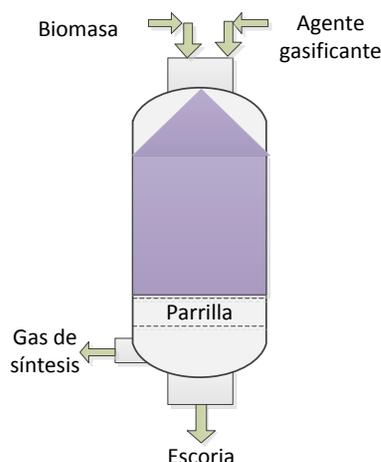
- **Gasificador de lecho fluidizado burbujeante**

Este tipo de reactor es bastante flexible respecto al tipo de biomasa que puede ser utilizado para su operación, ya que puede manejar materiales con diferentes características. Se favorece la transferencia de calor entre el lecho y el combustible gasificante. La relación biomasa – agente gasificante permite ajustar la temperatura del proceso. Presenta altas conversiones y productos uniformes. Por otro lado, es un proceso con altos costos de inversión y mantenimiento, así como, pérdida de carbón en las cenizas y mayor material particulado en el producto gaseoso [60] [66].

3.2.3.3 Gasificador de flujo de arrastre

Estos sistemas operan a altas temperaturas, por lo general entre los 1300 a 1500°C, el agente gasificante y la biomasa entran en co corriente, con partículas pequeñas de alimento para mejorar la conversión de carbono, en la cual en pocos segundos se puede obtener un gas de síntesis de alta calidad y sin la presencia de alquitranes [70]. La figura 3-21 presenta un diagrama de este proceso.

Figura 3-21. Gasificadores de flujo de arrastre



Fuente: adaptado de [67]

Como ventajas de este tipo de gasificador se encuentran una distribución uniforme de la temperatura, cortos tiempos de residencia, alta conversión de carbón y una rápida conversión a los productos. Como aspectos por mejorar están los altos costos de los materiales de construcción, tamaños de partículas finos y un secado de la materia prima es necesario para su mejor funcionamiento [60] [66].

3.2.4 Digestión Anaeróbica

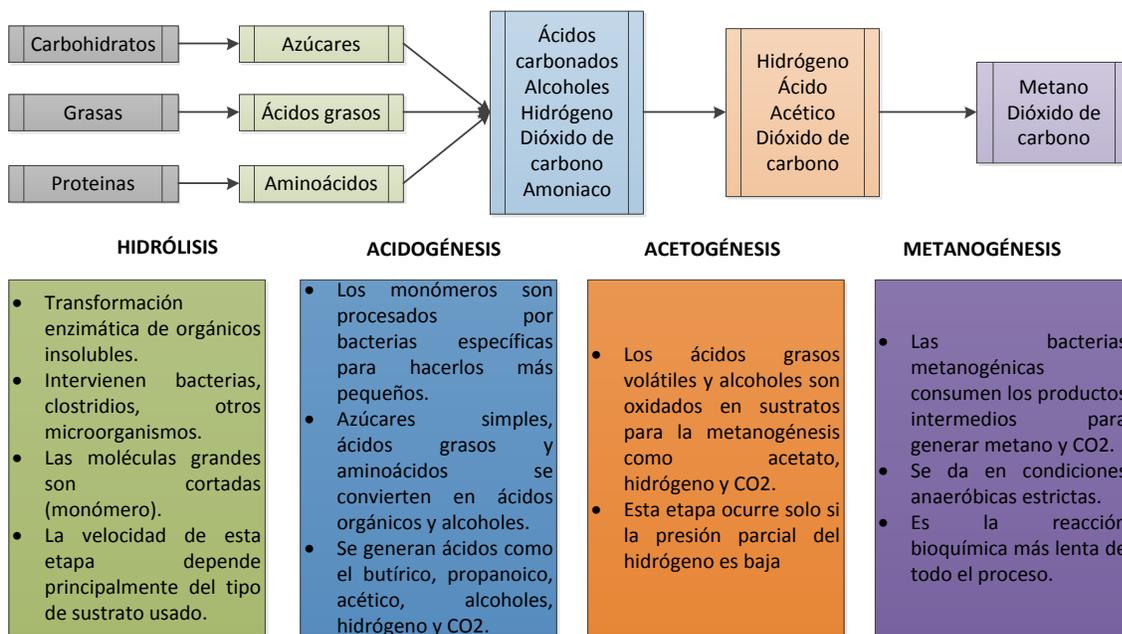
La digestión anaeróbica es la conversión microbiana de material orgánico directamente a gas, conocido como biogás, el cual presenta una mezcla de metano y dióxido de carbono principalmente, en conjunto con otros gases en menor proporción, como el sulfuro de hidrógeno y amoníaco según el tipo de material usado [71].

Esta tecnología ha sido ampliamente aplicada comercialmente con buenos resultados en diversos contextos y con una amplia variedad de materia prima como alimento, tales

como los desechos orgánicos domésticos e industriales, estiércol, lodos, entre otros. Su versatilidad la convierte en un proceso capaz de procesar materiales con muy altas humedades [52].

El proceso están compuesto por una variedad de reacciones bioquímicas que se dan en condiciones anóxicas. Para la generación del metano se dan cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Las principales características de estos pasos y sus principales productos se presentan en la Figura 3-22.

Figura 3-22. Etapas de la digestión anaeróbica

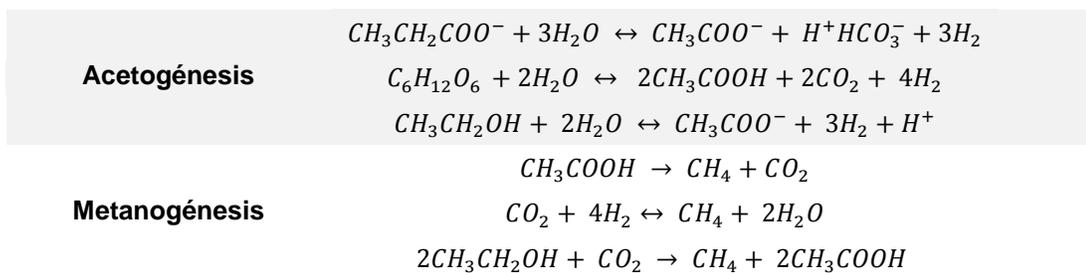


Fuente: adaptado de [23]

Las principales reacciones que ocurren durante las diferentes etapas de la gasificación se resumen en la Tabla 3-6. Es así como los productos de una etapa van sirviendo como aporte de las etapas subsecuentes, donde unos tipos de bacterias tendrán mayor actividad en una que en otra fase del proceso.

Tabla 3-6. Principales reacciones químicas de la digestión anaeróbica

Etapa	Reacción
Hidrólisis	$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \leftrightarrow nC_6H_{12}O_6 + nH_2$
	$C_6H_{12}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
Acidogénesis	$C_6H_{12}O_6 + H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_3COOH$



Fuente: adaptado de [72].

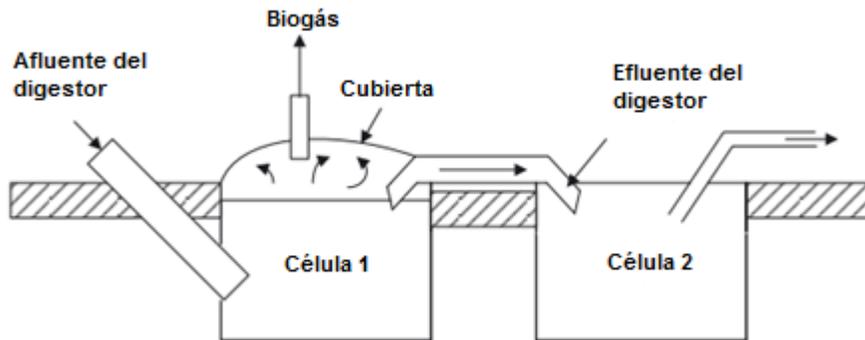
El rendimiento de la digestión anaeróbica depende de diversos factores, principalmente debido al uso de microorganismos, condiciones favorables deben ser garantizadas para garantizar el correcto balance de estos, como por ejemplo: temperatura, pH, sustrato, relación C/N, tiempo de retención hidráulica, etc. El proceso es lento, pudiendo tomar semanas para la generación de metano, y varias otras para lograr la adaptación de las bacterias cuando las condiciones son cambiadas [23].

Se reportan en la literatura algunas plantas instaladas y comercialmente funcionales con capacidades que van desde los 8 mil hasta 29 mil t/año de biomasa, en biodigestores que abarcan los 250 m³ y 2700 m³, de acuerdo con la configuración y los sustratos utilizados como estiércol de vaca, residuos de maíz y tomate [73]

Algunos retos generales que presenta esta tecnología para la transformación de biomasa en productos energéticos están la variabilidad de la materia prima, bajas eficiencias debido al alto control de variables de proceso y un producto de baja calidad que requiere acondicionamiento posterior para sus usos [72].

3.2.4.1 Laguna cubierta

Se puede decir que es la tecnología más sencilla para la realización de la digestión anaeróbica a una escala significativa. La materia prima se encuentra almacenada en una laguna subterránea, donde también se lleva a cabo la reacción, sirviendo para ambos propósitos. La Figura 3-23. Diagrama de digestor de laguna cubierta presenta un esquema general de esta tecnología. En la primera celda se da la producción de biogás, mientras que la segunda funciona como contenedor de los efluentes del primero el cual puede ser usado posteriormente [72].

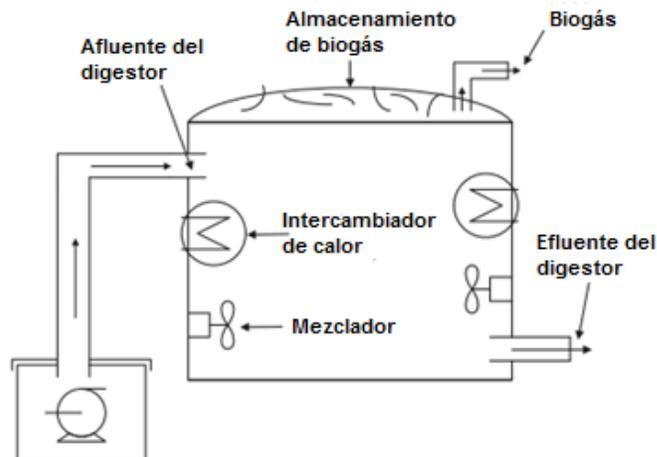
Figura 3-23. Diagrama de digester de laguna cubierta

Fuente: tomado de [72]

Esta configuración es ideal para zonas con climas cálidos dado que favorece el alcanzar las temperaturas de digestión requeridas. El tiempo de retención hidráulico para este sistema está entre los 30 y 40 días. Deben prevenirse las partículas sólidas de gran tamaño para evitar incrustaciones en la laguna, lo que conllevaría a una disminución en la eficiencia de generación de biogás [72].

3.2.4.2 Digestor perfectamente mezclado

Este reactor se encuentra a nivel de piso y suele estar fabricado en concreto o acero, donde con una cubierta rígida o flexible se logra contener la producción de biogás, que luego es enviada a tanques de almacenamiento mediante sistemas de tuberías. La Figura 3-2 muestra el esquema de este equipo [72].

Figura 3-24. Diagrama de digester perfectamente mezclado

Fuente: tomado de [72]

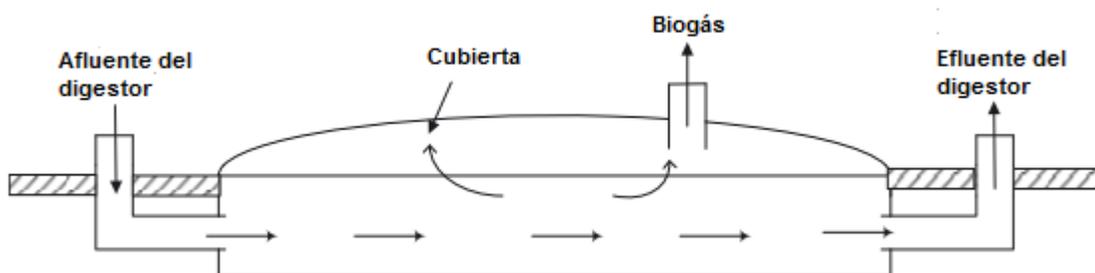
Además se emplean intercambiadores de calor para preservar las condiciones de temperatura adecuadas para el proceso. El uso de un mezclador mecánico ayuda en la homogenización de la materia prima, por lo que puede aceptar para su operación materiales poco homogéneos y con contenidos de sólidos entre el 3 al 10 % [72].

Algunas desventajas de este sistema es la restricción en la producción de biogás debido a que no se mantienen altos niveles de biomasa en el reactor por causa de la constante agitación, así como las altas velocidades de agitación pueden desfavorecer la acción bacteriana. También se incurre en altos costos energéticos para garantizar el mezclado continuo [74].

3.2.4.3 Digestor de flujo tapón

Su funcionamiento es similar a la del digestor perfectamente mezclado, con la diferencia de que la alimentación no cuenta con un mezclado mecánico. Se trata de un reactor en forma cilíndrica horizontal donde la biomasa ingresa desde uno de sus extremos y sale por el otro, haciendo que la alimentación que ingresa desplace una cantidad igual del sustrato mientras la digestión ocurre durante todo el trayecto (Figura 3-25).

Figura 3-25. Diagrama de digestor de flujo tapón



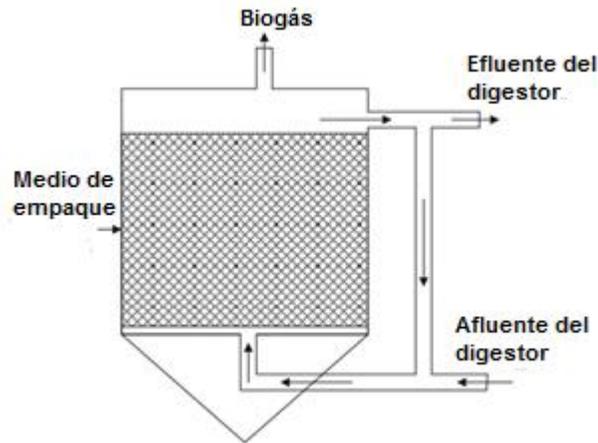
Fuente: tomado de [72]

Resultan ideales para materias primas con contenidos de humedad entre 60 al 85 %, conocido como digestión seca, el cual es considerado ambientalmente más favorable por su menor consumo de agua y energía debido al efecto tapón para mover el sustrato sin requerimiento de equipos adicionales de mezclado, especialmente para el tratamiento de residuos con carga orgánica baja. No obstante, por lo general resulta con rendimientos de biogás más bajo que el proceso anaeróbico húmedo (superior al 85 %) [75].

3.2.4.4 Digestor de lecho fijo o película

En este digestor se utiliza en el interior un soporte físico, como una película, para el crecimiento microbiano comúnmente llamado biopelícula (Figura 3-26), construido principalmente de materiales inertes o biodegradables como carbón activado, cerámicas, entre otros [74].

Figura 3-26. Diagrama de digestor de lecho fijo o película

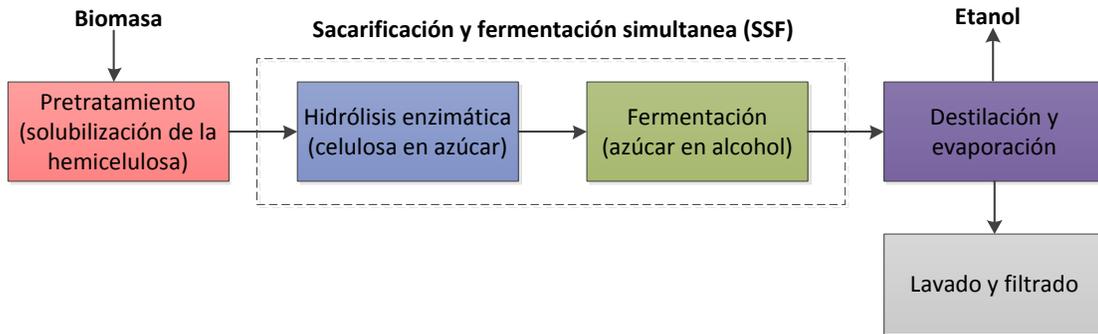


Fuente: tomado de [72]

Esta configuración se caracteriza por tener baja turbulencia hidráulica, lo que resulta en dificultades para la transferencia de masa, teniendo menores tasas de conversión de sustrato y generación de hidrógeno. La dificultad de flujo hace que sea necesario contenidos de sólidos no tan altos (1 a 2 %) para evitar obstrucciones de sustratos dentro de la película soporte. Como beneficio de este esquema se encuentran bajos tiempos de retención hidráulica, típicamente de 2 a 6 días, lo que resulta en disminución del volumen del digestor [72].

3.2.5 Fermentación

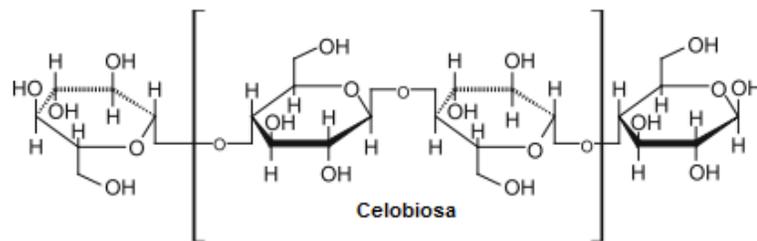
La fermentación es una tecnología capaz de producir bioetanol a partir de cualquier material que contenga azúcar o macromoléculas que la contengan, entre los que se pueden destacar sustancias ricas en azúcares (caña, remolacha, frutas), almidones (maíz, papas, yuca) y materiales lignocelulósicos (madera, residuos agrícolas, papel). Para este último caso, en el que se ubica a la biomasa, dado que los azúcares no se encuentran disponibles de forma inmediata, se hacen necesarias algunas etapas adicionales para lograr obtener el alcohol [24] como se aprecian en la Figura 3-27.

Figura 3-27. Esquema producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico

Fuente: adaptado de [57]

La composición del material lignocelulósico varía de una especie a otra, no obstante por lo general entre el 50 y 60 % corresponde a carbohidratos en forma de celulosa y hemicelulosa, seguido por la lignina en un 20 a 30 %, y otros componentes como ácidos grasos, cenizas, entre otros [57].

La celulosa es un polímero lineal el cual presenta características de dureza, insolubilidad en agua y se encuentra en la parte maderada de las plantas, la fFigura 3-28 presenta una cadena de celulosa. Se compone por alrededor de 3000 a 14000 moléculas de glucosa. Debido a que presenta puentes hidrógeno entre sus estructuras, se hace más compleja la hidrólisis de este tipo de material [76].

Figura 3-28. Cadena de celulosa

Fuente: tomado de [57]

Por su parte, la hemicelulosa es un polímero heterogéneo que posee una gran diversidad de polisacáridos como: pentosas, hexosas, siendo el xilano su principal componente. Se encuentra presente en la pared celular en la mayoría de las plantas terrestres. Tiende a cristalizarse y sus ramificaciones a ser menores en longitud que las de la celulosa. Los ácidos y bases débiles, así como una gran variedad de enzimas pueden hidrolizarla [77].

Finalmente, el tercer componente más abundante en este tipo de materiales es la lignina, también es un heteropolímero aromático que brinda mayor soporte estructural e impermeabilidad a las plantas, haciéndola la principal barrera para la producción de biocombustibles a partir de la biomasa por la resistencia que exhibe a la hidrólisis y la degradación [76].

En este punto es necesario resaltar que para el aprovechamiento energético de biomasa a través de las tecnologías de fermentación, se hace necesario llevar a cabo pretratamientos que permitan romper las cadenas poliméricas que estas presentan, para conseguir que los microorganismos realicen el proceso fermentativo y se generen los productos de interés.

Los pretratamientos pueden ser clasificados de acuerdo con el método: físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos, o una combinación de estos. Preethi y colaboradores, realizaron una amplia recopilación de condiciones óptimas y rendimientos de pretratamientos para sustratos como rastrojo de maíz, paja de cebada y arroz, entre otros, destacando pretratamiento con bases como NaOH y ácidos como el acético, tratamientos con bacterias y hongos, así como microondas [57].

La Tabla 3-7 presenta diferentes tipos de pretratamientos para materiales lignocelulósicos y el mecanismo de acción utilizado para mejorar las etapas posteriores del proceso de fermentación y obtención de alcohol.

Tabla 3-7. Pretratamientos para material lignocelulósico en la fermentación

Método	Tipo	Mecanismo
Físico	Fragmentación (molienda, trituración)	Rompimiento del material en estructuras más pequeñas para facilitar ataque de otros agentes
	Radicación por microondas	Reduce la estructura cristalina de la celulosa
	Ultrasonido	Ruptura de puentes de hidrógeno
	Pirólisis	Carbonización de la celulosa < 300 °C
Químico	Hidrólisis ácida	Descomposición de hemicelulosa y disolución lignina
	Pretratamiento alcalino	Saponificación de lignocelulosa. Modifica estructura de la lignina.
	Oxidación y ozonización	Disolución de lignina y hemicelulosa
	Tratamiento con solventes	Ruptura de enlaces de hemicelulosa y disolución de la lignina.

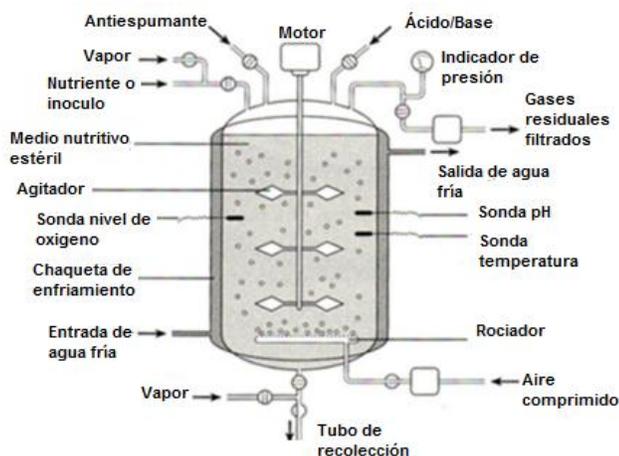
Físico-químico	Explosión de vapor	Disolución de hemicelulosa a 150 °C y de lignina a 180 °C o más.
	Explosión de CO ₂	Descomposición de lignina y hemicelulosa
	Explosión de fibra de amoníaco (AFEX)	Eliminación de lignina y parcialmente a la hemicelulosa.
Biológico	Descomposición blanca (<i>Cyathus steercoreus</i> , otras)	Descomposición de hemicelulosa y lignina.
	Descomposición marrón (<i>Gloeophyllum trabeum</i>)	Descomposición de lignina.
	Descomposición suave (<i>Ceretocystis</i> sp., otras)	Descomposición de hemicelulosa y lignina.
	Tratamiento bacteriano	Descomposición de hemicelulosa y lignina.
	Tratamiento enzimático	Descomposición de celulosa y hemicelulosa.

Fuente: adaptado de [78].

3.2.5.1 Fermentador de tanque agitado

En este equipo la concentración de los componentes en el medio y los microorganismos en el fermentador no se mide respecto al tiempo. El estado estacionario puede alcanzarse a través de la modificación del flujo para que las cantidades de microorganismos, sustratos y productos permanezcan en los niveles adecuados.

Figura 3-29. Esquema fermentador de tanque agitado



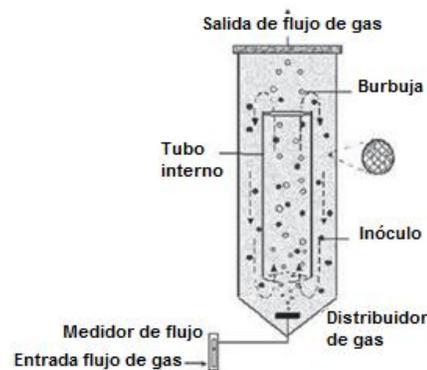
Fuente: tomado de [51]

Algunos de los beneficios de esta tecnología son su operación en forma continua, fácil control de la temperatura y operación, bajos costos de construcción y operación [51]. La Figura 3-29 presenta un esquema general de esta tecnología.

3.2.5.2 Fermentador *Airlift*

Generalmente son dispositivos de contacto gas – líquido o gas – líquido – sólido, teniendo una circulación fluida conocido como patrón de ciclo (Figura 7). Una corriente de aire u otros gases proporcionan la agitación al interior del reactor. De acuerdo con la configuración de las corrientes de alimento y gas, se puede tener en co-corriente o contraflujo. El diseño hace que no requiera de agitadores, por lo que sus requerimientos energéticos son menores, así como los costos [51].

Figura 7. Esquema fermentador Airlift

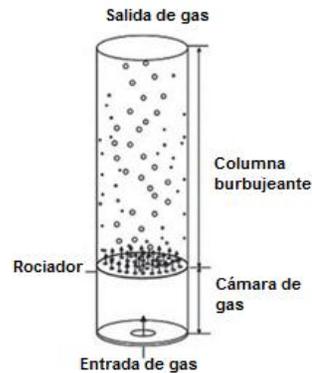


Fuente: tomado de [51]

3.2.5.3 Fermentador de columna burbujeante

Estos reactores son de fácil construcción, mantenimiento y bajo costo operativo. Son de forma cilíndrica y desde la base se introduce aire o gas a través de tubos o platos perforados. El flujo inyectado mantiene con buena precisión que la transferencia de oxígeno y su mezclado se alcancen. Se muestra un diagrama en la Figura 3-31.

Figura 3-31. Esquema fermentador de columna burbujeante



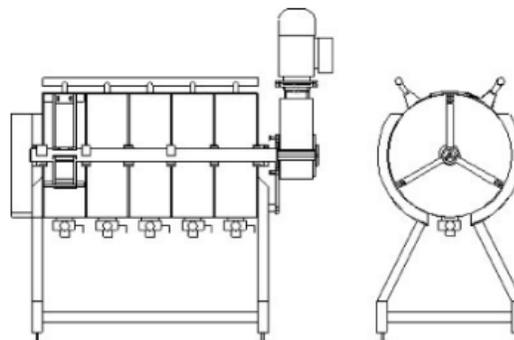
Fuente: tomado de [51]

3.2.5.4 Fermentador de tambor giratorio

Estos equipos tienen como principio de funcionamiento el mezclado por gravedad, donde la biomasa es sujeta a caídas libres por la rotación del reactor, como se aprecia en la Figura 8. Comparado con reactores convencionales de tanque agitado, estos permiten un mezclado más eficiente de materiales secos (superiores a 40 % en peso) a un bajo costo energético.

Estos biorreactores son fáciles de escalar y su posición horizontal ayuda en la eliminación de asentamientos de partículas y formación de zonas muertas, favoreciendo la transferencia de calor a través de las paredes del reactor [79].

Figura 82. Esquema fermentador de tambor giratorio



Fuente: tomado de [80]

Como conclusiones finales, al principio de este capítulo se presentaron las tendencias en cuanto a investigaciones realizadas para algunas fuentes de energía renovables,

mostrando que los estudios sobre biomasa siguen siendo mucho menores que los reportados para tecnologías ampliamente masificadas como la solar. Sin embargo, la tendencia de crecimiento sostenido en los últimos años en los procesos energéticos con biomasa permiten observar su cada vez mayor participación en los desarrollos tecnológicos a nivel mundial, aunque debe seguir avanzado su desarrollo para mejorar competitividad frente a otras fuentes de energía renovables como la solar fotovoltaica.

En cuanto a los procesos o tecnologías para la transformación del material biomásico, se destacan dos grandes grupos: termoquímicos y bioquímicos, cada uno con sus características y particularidades, que permiten seleccionar una u otra de acuerdo con las materias primas y los productos finales buscados. Para este trabajo se tuvieron en cuenta para los procesos térmicos únicamente la combustión, pirólisis y gasificación, al ser los más ampliamente estudiados en la actualidad, con mayor escalabilidad comercial e información disponible. Para el caso del segundo grupo, se tuvieron en cuenta ambas tecnologías revisadas: digestión anaeróbica y fermentación.

Se puede resaltar por ejemplo, en el caso de la pirólisis, la versatilidad en las condiciones de operación para favorecer la generación de ciertos productos de interés en lugar de otros. Con el fin de contar con más productos para los análisis, se optó en este trabajo por seleccionar la pirólisis rápida como la tecnología de interés para el desarrollo de la herramienta de modelación, dado que favorece la generación de bioaceite el cual es un producto de mayor valor por sus propiedades térmicas, pero también por su utilidad en procesos de transformación en sustancias químicas de mayor valor comercial.

De acuerdo con los diferentes sistemas y configuraciones disponibles para cada uno de estas tecnologías, se tendrán en cuenta dentro del siguiente capítulo, algunos parámetros técnicos y económicos de las tecnologías revisadas anteriormente, procurando favorecer los procesos con sistemas más simples y que sean menos costosos, de acuerdo con la información especializada consultada.

4.Principales parámetros técnico-económicos para el aprovechamiento energético de biomasa

4.1 Parámetros técnicos

En este apartado se presentan las diferentes consideraciones técnicas que deben tenerse en cuenta a la hora de utilizar las diferentes fuentes de biomasa en las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético, como lo son la humedad, los valores caloríficos y la composición de elementos como el carbono y nitrógeno.

Por otra parte, se realizó una amplia búsqueda de información en fuentes especializadas en la temática con el fin de obtener los datos de rendimientos de los productos de interés y su potencial energético, para cada uno de las tecnologías térmicas y biológicas, los cuales serán empleados en el modelo de programación a plantear, para la definición de rutas de aprovechamiento energético de la biomasa.

4.1.1 Combustión

Como en todos los procesos termoquímicos para el tratamiento de biomasa, el contenido de humedad en la materia prima es fundamental para el mejor desarrollo del proceso y eficiencia. Algunos autores reportan que es necesario garantizar biomasas con contenidos de humedad inferiores al 60 % en base húmeda [56] o entre el 10 y el 50 % por otros [81], debido al alto gasto energético para evaporar el agua y posteriormente calentar dicho vapor, hace que disminuya la eficiencia para la generación de energía.

En cuanto a los rendimientos en los procesos de combustión se estiman eficiencias de hasta el 95 % para sistemas de combustión combinados de calor y potencia (CHP por sus siglas en inglés) [81]. En el caso de grandes plantas se suelen operar bajo control de la electricidad con eficiencias típicas para esta de 0,25 % para casos como el de la biomasa [56].

De acuerdo con los poderes caloríficos inferiores (LHV) de la recopilación realizada en el primer capítulo sobre caracterización de la biomasa, se realizaron los cálculos necesarios para obtener los rendimientos en los productos establecidos para este tratamiento, con base de cálculo una tonelada (1 t), y cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-1 y el detalle de los cálculos en el anexo B.

Tabla 4-1. Rendimientos de calor y electricidad por combustión para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento Electricidad [kWh/t]	Rendimiento Calor [kWh/t]
Estiércol de vaca	816,96	2222,13
Estiércol de pollo	655,67	1783,41
Tamo de arroz	907,96	2469,65
Rastrojo de maíz	1000,13	2720,34
Bagazo de caña	1299,67	3535,10
Pulpa de café	1242,21	3378,81
Raquis de palma	1172,79	3190,00
Vástago de plátano	592,67	1612,05

Fuente: elaboración propia

4.1.2 Pirólisis

El estudio se centra en la generación de aceite pirolítico o bioaceite y los gases no condensables como principales productos de interés para el aprovechamiento energético de biomasa a través de esta tecnología. Por tanto, se centró la búsqueda en los procesos de pirólisis rápida para cada una de las materias primas estudiadas.

En cuanto a los criterios técnicos de la biomasa para su uso en procesos de pirólisis, se recomiendan valores de humedad en la biomasa inferior a 30% para favorecer los procesos térmicos en la pirólisis [82].

La Tabla 4-2 recopila información del rendimiento de bioaceite y gases y sus poderes caloríficos, en el proceso de pirólisis rápida para los tipos de biomasa seleccionados, de acuerdo con la información reportada en la literatura según la referencia indicada.

Tabla 4-2. Rendimientos de aceite y gas y LHV por pirólisis para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento de bioaceite [kg/kg]	LHV bioaceite [MJ/kg]	Rendimiento de gas [kg/kg]	LHV gas [MJ/kg]	Ref.
Estiércol de vaca	0,34	13,06	0,27	12,00*	[50]
Estiércol de pollo	0,33	12,83	0,26	5,59*	[50]
Tamo de arroz	0,43	18,00	0,32	15,11	[83]
Rastrojo de maíz	0,54	21,89	0,22	5,45	[84]
Bagazo de caña	0,53	18,79	0,21	9,56	[85]
Pulpa de café	0,55	20,99	0,19	3,45	[86]
Raquis de palma	0,55	22,79	0,21	10,54	[87]
Vástago de plátano	0,52	12,97	0,20	8,47	[48]

Fuente: elaboración propia. *MJ/m³

En el caso del subproducto gaseoso, se realizó de manera similar que en el caso de la tecnología de combustión para la generación de calor y electricidad según el LHV del gas reportado, utilizando la eficiencia de las plantas de calor y electricidad combinadas de 60% y 28% respectivamente, los cálculos se detallan en el anexo B. Los resultados se presentan en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22. Rendimientos de calor y electricidad por pirólisis para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento Electricidad [kWh/t]	Rendimiento Calor [kWh/t]
Estiércol de vaca	176,40	378,00
Estiércol de pollo	79,13	169,56
Tamo de arroz	376,07	805,87
Rastrojo de maíz	93,26	199,83
Bagazo de caña	156,15	334,60
Pulpa de café	50,98	109,25
Raquis de palma	172,15	368,90
Vástago de plátano	131,76	282,33

Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Gasificación

Dentro de las principales ventajas para la generación de energía a partir de la gasificación, en lugar de la combustión directa, están que las tecnologías basadas en combustibles gaseosos como los motores o turbinas a gas pueden alcanzar mayores eficiencias que las de la combustión, por otro lado los combustibles gaseosos tiene mejores características para la combustión que los sólidos [9].

La humedad al momento de usar biomasa para llevar a cabo este proceso deber ser menor al 35 % [61], también se indica que valores mayores a 40 % entorpecen la eficiencia global del proceso [7]. El rendimiento del gas de síntesis en el proceso de gasificación y su poder calorífico inferior (LHV), a partir de las diferentes materias primas estudiadas se presentan en la Tabla .

Tabla 4-4. Rendimientos de gas de síntesis y LHV por gasificación para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento de syngas [m ³ /kg]	LHV syngas [MJ/m ³]	Ref.
Estiércol de vaca	1,87	4,19	[88]
Estiércol de pollo	1,70	2,00	[89][90]
Tamo de arroz	0,96	7,39	[91]
Rastrojo de maíz	2,06	9,57	[92]
Bagazo de caña	1,55	4,86	[93]
Pulpa de café	1,46	3,61	[94]
Raquis de palma	1,76	4,53	[44]
Vástago de plátano	1,83	5,81	[95]

Fuente: elaboración propia.

Para este estudio se consideraron como productos finales en el proceso de gasificación la generación de energía eléctrica y térmica a través de plantas combinadas (CHP) a partir del gas de síntesis generado, empleando eficiencias de 28 % y 60 % para la electricidad de potencia y calor, respectivamente [96], [97]. Los rendimientos de calor y electricidad por gasificación para la biomasa estudiada se listan en la Tabla 4-5 y los cálculos se detallan en el Anexo B.

Tabla 4-5. Rendimientos de calor y electricidad por gasificación para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento Electricidad [kWh/t]	Rendimiento Calor [kWh/t]
Estiércol de vaca	609,41	1305,88
Estiércol de pollo	264,44	566,67
Tamo de arroz	551,79	1182,40
Rastrojo de maíz	1533,33	3285,70
Bagazo de caña	585,90	1255,50
Pulpa de café	409,94	878,43
Raquis de palma	620,11	1328,80
Vástago de plátano	826,96	1772,05

Fuente: elaboración propia.

4.1.4 Digestión Anaeróbica

Tanto la cantidad de carbono como de nitrógeno presente en la biomasa, son fundamentales para la generación de biogás, dado que son dos de los principales nutrientes que necesitan las bacterias anaeróbicas para llevar a cabo sus procesos metabólicos. Gran parte de la literatura especializada indica que un rango de relación C/N entre 20/1 y 30/1 es adecuada desde el punto de vista operativo para el crecimiento bacteriano en sistemas de digestión anaeróbica [98][99].

De acuerdo con la cantidad de humedad, el proceso de digestión anaeróbica puede clasificarse en húmeda o seca. La digestión húmeda es la más común dado que permite tratar materias primas con altos contenidos de humedad (hasta más del 85%) principalmente para sustancias como lodos de aguas residuales y estiércol de animales. Por su parte la digestión seca se reserva para materiales con alto contenido de sólidos (mayores al 15 %) incluido los biosólidos, residuos de comida, estiércol y cultivos energéticos [72]. La Tabla 4-6 recopila el rendimiento de metano obtenido a través de la digestión anaeróbica para los diferentes tipos de biomasa estudiadas.

Tabla 4-6. Rendimientos de metano por digestión anaeróbica para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento de metano [m ³ /kg VS ³]	Ref.
Rastrojo de maíz	0,13	[99]
Estiércol de pollo	0,35	[99]
Tamo de arroz	0,231	[12]
Bagazo de caña	0,299	[100]
Estiércol de vaca	0,37	[101]
Pulpa de café	0,28	[102]
Raquis de palma	0,3	[103]
Vástago de plátano	0,171 ⁴	[104]

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de la información anterior así como de la recopilada en el capítulo uno sobre caracterización de la biomasa, se realizaron los cálculos necesarios para obtener los rendimientos en los productos establecidos para este tratamiento, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-7 y el detalle de los cálculos en el anexo B.

Tabla 4-7. Rendimientos de calor y electricidad por digestión anaeróbica para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento Electricidad [kWh/t]	Rendimiento Calor [kWh/t]
Estiércol de vaca	168,96	211,20
Estiércol de pollo	308,38	385,47
Tamo de arroz	748,88	936,10
Rastrojo de maíz	470,31	587,89
Bagazo de caña	877,15	1096,44
Pulpa de café	856,83	1071,04
Raquis de palma	918,03	1147,54
Vástago de plátano	523,28	654,10

Fuente: Elaboración propia

³ VS: sólidos volátiles.

⁴ Rendimiento por kg de sólidos totales

4.1.5 Fermentación

Contrario a los procesos termoquímicos donde la eficiencia de los procesos se ve afectada por un contenido de humedad elevado, en los procesos fermentativos el bajo contenido de humedad de la materia prima puede disminuir la solubilidad y disponibilidad de nutrientes, desfavoreciendo el crecimiento de microorganismos. Diversos autores han establecido un rango de humedad adecuado entre 60 y 75% [51].

Otro criterio destacado en las materias primas para mejorar la eficiencia de esta tecnología es la relación C/N presente en la biomasa, como principal fuente de nutrientes para los microorganismos, se recomienda generalmente contar con relaciones carbono/nitrógeno de 20 a 60 [51].

Para esta tecnología se consideró la generación de bioetanol como producto energético de interés, debido a su uso como combustible en motores de vehículos, principalmente mezclado con gasolina. De acuerdo con las materias primas estudiadas, la Tabla 4-8 presenta el rendimiento de etanol por cantidad de biomasa utilizada en el proceso.

Tabla 4-8. Rendimientos de etanol por fermentación para biomasa

Tipo de biomasa	Rendimiento de etanol [kg/kg biomasa]	Ref.
Estiércol de vaca	0,19	[105]
Estiércol de pollo	0,14	[106]
Tamo de arroz	0,30	[107]
Rastrojo de maíz	0,16	[108]
Bagazo de caña	0,49	[109]
Pulpa de café	0,15	[110]
Raquis de palma	0,14	[111]
Vástago de plátano	0,46	[112]

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la información de rendimientos recopilada y calculada para las diferentes biomásas en los respectivos procesos, se puede indicar que se evidencian diferencias entre los materiales estudiados según la tecnología de conversión. Residuos como el arroz, presentan buenas conversiones en procesos como la combustión y pirólisis, pero no es el mejor para la gasificación, comparado con las otras biomásas estudiadas.

Por su parte, los residuos pecuarios cuentan con los mejores rendimientos reportados para el proceso de digestión anaeróbica, lo cual es acorde con la naturaleza del proceso donde materiales más húmedos pueden ser usados para la generación de biogás.

En general se aprecian buenos desempeños para productos en los procesos térmicos para la biomasa agrícola en los procesos térmicos, por cuenta de su composición, bajo contenido de humedad, mejores poderes caloríficos, respecto del estiércol animal.

4.2 Parámetros económicos

Con el fin de considerar dentro del modelo desarrollado algunos aspectos económicos dentro de la selección de rutas de aprovechamiento energético de biomasa, se realizó la búsqueda en la literatura especializada de información relacionada con los costos de capital y operativos de las tecnologías estudiadas, de acuerdo con los productos de interés y las características de las biomásas y de los procesos estudiados.

Todos los valores se reportan en dólares estadounidenses y fueron calculados al valor presente del año 2022, de acuerdo con los datos de índices de precios al consumidor de Estados Unidos según el *Annual Statistical Abstracts of the United States*.

De acuerdo con las características técnicas de los procesos termoquímicos y bioquímicos estudiados, así como la variedad que estos presentan, se tomaron como aproximación a los costos solo un tipo particular de tecnología para los diferentes tipos de biomasa estudiados. En el caso de la fermentación, dado que se trata de biomasa lignocelulósica es necesario incluir una etapa de pretratamiento que permita liberar los compuestos carbonados necesarios para la transformación enzimática en alcohol, por lo que se incluyó el costo del tratamiento con ácidos para este fin [113].

Para el caso de los costos de inversión de capital se consideran plantas con capacidad de 2000 t/día como referencia, según los datos reportados. Esta capacidad fue considerada para obtener los valores por unidad de biomasa procesada. Asimismo, se consideró un factor de depreciación de 0,149 [114] con el fin de distribuir la inversión en las plantas en un periodo de 20 años en promedio anual. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Costos de inversión de capital anualizado según la tecnología

Tecnología	Costo capital de inversión [USD\$/t biomasa]	Ref.
Combustión	54,6	[115]
Pirólisis	82,86	[116]
Gasificación	89,21	[117]
Digestión anaeróbica	72,3	[118]
Fermentación	108,55	[113]

Fuente: Elaboración propia

Los costos operativos incluyen los valores asociados a la producción de los diferentes productos de valor. En la mayoría de los casos estos se encontraron expresados en términos de las unidades de los productos generados, sin embargo, con las eficiencias de conversión calculadas más arriba, se estimaron en términos de las materias primas procesadas. Los resultados se presentan en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10. Costos operativos según el tipo de tecnología

Tecnología	Costo operativo [USD\$/t biomasa]	Ref.
Combustión	23,4	[115]
Pirólisis	144,57	[119]
Gasificación	61,38	[119]
Digestión anaeróbica	39,16	[118]
Fermentación	198,29	[119]

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que se llevará a cabo un análisis basado en los parámetros económicos, se hace necesario incluir el precio de venta los diferentes productos finales obtenidos a partir de los diferentes tipos de biomasa, mediante las tecnologías estudiadas. Para el caso de los productos como el calor y la electricidad se expresaron en términos de dólar por kWh, mientras que el bioaceite y bioetanol en dólar por toneladas, todos los datos se reportan según precios obtenidos o actualizados al año 2022. La Tabla 4-11 presenta los valores usados en este estudio.

Tabla 4-11. Precio de venta de los productos energéticos.

Producto	Precio de Venta	Ref.
Calor	0,056 USD\$/kWh	[120]
Electricidad	0,166 USD\$/kWh	[121]
Bioaceite	288,3 USD\$/t	[122]
Bioetanol	1029 USD\$/t	[123]

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros económicos de las tecnologías y productos estudiados, pretenden dar una idea, aunque bastante resumida y simple de las características económicas asociadas a las plantas de producción, tanto en su instalación como en la operación, así como la venta de los productos en el mercado actual, con el fin de que los análisis realizados no solo tengan en cuenta los aspectos técnicos de los procesos, sino también un factor que es el que principalmente inviabiliza este tipo de tecnologías, sus costos.

Se observa que en cuanto a las tecnologías termoquímicas, la pirólisis y gasificación resultaron con los mayores costos operativos y de capital por unidad de biomasa procesada, que la combustión, lo cual refleja que si bien estas tecnologías presentan buenos rendimientos de productos y la facilidad de obtener productos de mayor valor agregado, siguen siendo más costosas que el proceso ampliamente usado de la combustión.

Se destaca también que el proceso más costoso, según los datos recopilados, es el de fermentación dado que se tuvieron en cuenta pretratamientos que eran necesarios para las biomásas utilizadas, así como la gran cantidad de etapas necesarias para la producción del bioetanol. Sin embargo, el precio de venta estándar para este producto no es bajo y en muchos países existen leyes encaminadas a su uso o incentivos para su producción, lo cual hace que sea un proceso y producto de interés para el estudio.

5.Herramienta de modelamiento para evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa

Diversos autores han planteado el desarrollo de modelos matemáticos que buscan determinar las mejores configuraciones tecnológicas para la generación de productos de valor comercial a partir de diversos residuos, enmarcados en muchos casos dentro del concepto de biorrefinería, donde no solo se producirían energía, sino también otras sustancias útiles para industrias como la química y para otros usos.

En general los modelos revisados se expresan en función de los beneficios y costos de los procesos de transformación de la materia prima, buscando principalmente maximizar las ganancias a través de la venta de los productos obtenidos y disminución de costos, teniendo en cuenta restricciones de tipo másico, energético, operacional, político, logístico, entre otros.

Najm y colaboradores, presentaron la elaboración y optimización de un modelo matemático para la gestión integral de residuos sólidos municipales [124]. La formulación matemática del modelo de programación lineal consistió en una función objetivo que buscaba minimizar la diferencia amortizada entre los costos y los ingresos asociados a tecnologías de tratamiento de estos residuos como tratamientos térmicos, biológicos y la disposición en relleno sanitario, considerando además factores ambientales y sociales simples.

Los resultados del caso de estudio aplicado permitieron concluir, entre otras cosas, que a medida que los costos operativos aumentaban el relleno sanitario representaba la mejor alternativa desde lo económico para tratar los residuos municipales, así como los

procesos de compostaje. Sin embargo, también se apreció una mejora significativa en los otros procesos considerados, cuando fueron aplicadas algunas políticas mínimas de procesamiento de residuos [125].

Eason y Cremaschi, reportaron la optimización multiobjetivo de una superestructura para la generación de biocombustibles como biodiesel, bioetanol y biogás a partir de colza, granos de maíz y césped [126]. El modelo tecnológico incluyó los datos de conversión eficiente de las materias primas, los costos de procesamiento, requerimiento de entrada para el procesamiento y productos en cada etapa. El trabajo publicado muestra que se tuvieron en cuenta las reacciones químicas envueltas en cada uno de los procesos para definir las variables de decisión del modelo. La formulación del problema de optimización multiobjetivo consistió en la disminución de los costos de producción y emisiones de CO₂, así como la maximización de los productos.

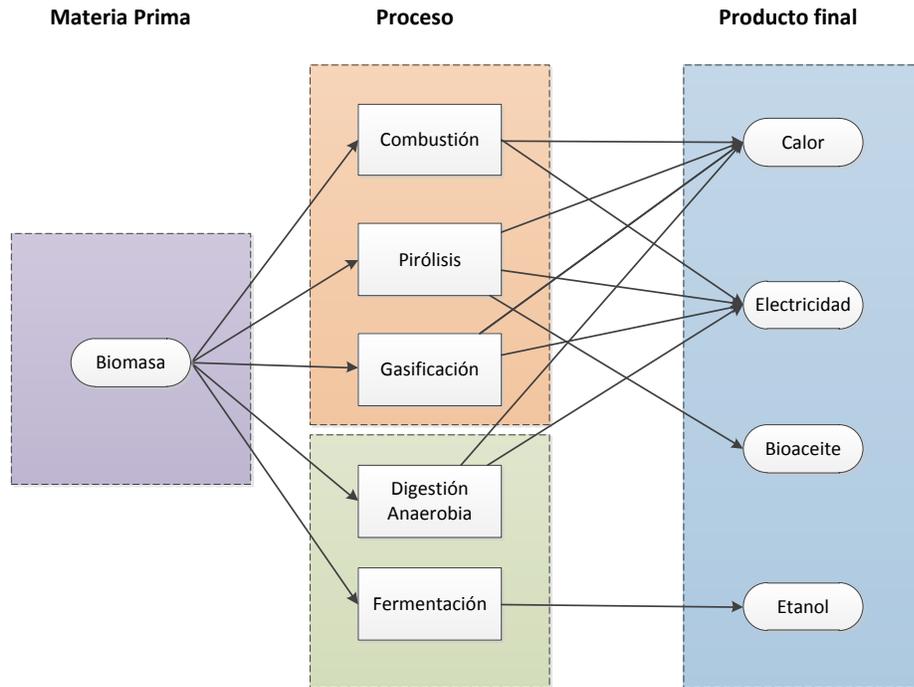
Otro trabajo como el de Kong y colaboradores, desarrolló un marco para la optimización de una superestructura que llevara a cabo un análisis simultáneo del procesos de síntesis, integración energética y planta de servicios para una tecnología no enzimática para la producción de bioetanol [26]. El estudio usó un modelo de programación no lineal, dado que se contaban con variables enteras y binarias y ecuaciones con variables elevadas a potencias diferentes a la unidad; para resolver de manera simultánea la optimización paramétrica de todo el sistema.

En todos los artículos revisados sobre esta temática se aprecia la elaboración de un diagrama que permite conocer las relaciones entre la materia prima, los procesos o tecnologías y los productos finales. Con mayor o menor complejidad estos diagramas llamadas en algunos casos superestructuras, se construyen mediante bloques y flechas de manera que sea más fácil plantear el modelo que permita definir las rutas de transformación o aprovechamiento.

En este trabajo se plantea una estructura que parte de los diferentes tipos de biomasa estudiados, los procesos termoquímicos y bioquímicos, y los productos energéticos finales, como se muestra en la Figura 5-1. Para este caso se considera al bioaceite como

un producto comercializable que puede ser empleado directamente en diferentes procesos o reprocesado para obtener otros combustibles de interés [114].

Figura 5-1. Estructura para el aprovechamiento energético de biomasa



Fuente: elaboración propia

En el caso de la gasificación donde se produce gas de síntesis, se planteó su uso exclusivamente para la generación de energía térmica y eléctrica con el fin de simplificar la estructura evitando contar con un conjunto adicional de ecuaciones para los productos intermedios, sabiendo que es posible su aplicación para transformación en otros productos químicos de interés y combustibles.

Con el fin de contar con un modelo que tenga en cuenta parámetros técnicos y económicos, se estableció un problema de programación lineal (PL) que busca maximizar la utilidad por la venta de productos menos los costos de capital y operativos. Las variables que integrarán el modelo son las siguientes:

- w = cantidad de biomasa que va a un determinado proceso/tecnología
- n = conversión de un tipo de biomasa en producto a través de un proceso
- p = precio de venta de un producto

- CO = Costos operativos del proceso
- CF = Costos de capital del proceso

Se resumen en la Tabla 5-1 los tipos de biomasa, tecnologías de transformación y productos que fueron tenidos en cuenta para el desarrollo del modelo, así como los índices utilizados para su identificación.

Tabla 5-1. Índices para identificación de biomasa, tecnología y producto en el modelo.

Biomasa	Índice (i)	Tecnología	Índice (j)	Producto	Índice (k)
Arroz	1	Combustión	1	Calor	1
Maíz	2	Pirólisis	2	Electricidad	2
Caña	3	Gasificación	3	Bioaceite	3
Café	4	Digestión anaeróbica	4	Bioetanol	4
Palma	5	Fermentación	5		
Plátano	6				
Bovino	7				
Aviar	8				

Fuente: elaboración propia

La función objetivo para este trabajo se expresa en la ecuación 2:

$$Z = \sum_{j \in T} \sum_{i \in B} \sum_{k \in P} w_{ij} n_{jk} p_k - \sum_{j \in T} \sum_{i \in B} w_{ij} CO_j - \sum_{j \in T} \sum_{i \in B} w_{ij} CF_j \quad (Ec. 2)$$

Dónde:

w_{ij} = es la variable de decisión e indica la cantidad de biomasa i que debe ir a la tecnología j [t]

n_{jk} = es la conversión de un tipo de biomasa a través de la tecnología j en un producto k [kWh/t] para calor y electricidad y [t/t] para bioaceite y bioetanol.

p_k = es el precio de venta del producto k [\$/kWh] o [\$/t]

CO_j = costo de operación asociado a la tecnología j [\$/t]

CF_j = costo de inversión de capital asociado a la tecnología j [\$/t]

B = conjunto de todas las biomásas

T = conjunto de todas las tecnologías

P = conjunto de todos los productos

Para completar el problema de programación lineal se hace necesario establecer las restricciones que se deben cumplir para hallar la solución óptima, por lo que se planteó la restricción del balance de masa como se muestra:

$$\sum_{j \in T} w_{ij} \leq W_i ; \quad \forall i \in B \quad (Ec.3)$$

Donde W_i corresponde a la cantidad total inicial de biomasa i que puede ir a cualquier tecnología j . Por tanto, la suma de todas las cantidades de biomasa i que van a las diferentes tecnologías j , siempre deberá ser menor o igual a la cantidad total inicial de biomasa i . Otra restricción que se tuvo en cuenta fue la de la capacidad máxima que una tecnología puede recibir de cualquier tipo de biomasa, la cual se estableció de manera matemática como se indica en la ecuación:

$$\sum_{i \in B} w_{ij} = CP_j \quad ; \quad \forall j \in T \quad (Ec.4)$$

Donde CP_j corresponde a la capacidad máxima de la tecnología j para procesar cualquier tipo de biomasa, es decir, la cantidad de todas las biombras i que van a la tecnología j deben ser iguales a la capacidad máxima de la planta de esa tecnología, con el fin de emplear la capacidad total de las plantas y no subutilizarlas.

Finalmente se estableció la restricción de no negatividad, con el fin de que ninguna variable de decisión pudiera tomar valores menores a cero. La expresión que se utilizó fue la siguiente:

$$w_{ij} \geq 0 \quad ; \quad \forall i \in B \wedge \forall j \in T \quad (Ec.5)$$

Como se indicó en el primer y segundo capítulo, es necesario tener en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los tipos de biomasa a utilizar en las diversas tecnologías con el fin de mejorar sus rendimientos y evitar problemas operacionales. Por esa razón, se planteó dentro del modelo, restricciones al tipo de biomasa que podría ir a una tecnología específica, según el contenido de humedad (H) y relación carbono/nitrógeno (C/N) de las biombras. La Tabla 5-2 presenta la expresión matemática de estas últimas condiciones.

Tabla 5-2. Condiciones fisicoquímicas de la biomasa para selección de tecnologías

Tecnología	Condición	Variable
Combustión	$H_{i1} \geq 25\%$	$w_{i1} = 0 ; \forall i \in B$
Pirólisis	$H_{i2} \geq 15\%$	$w_{i2} = 0 ; \forall i \in B$
Gasificación	$H_{i3} \geq 20\%$	$w_{i3} = 0 ; \forall i \in B$
Digestión anaerobia	$C/N_{i4} \geq 30$	$w_{i4} = 0 ; \forall i \in B$
Fermentación	$C/N_{i5} \geq 60$	$w_{i5} = 0 ; \forall i \in B$

Fuente: elaboración propia

Para realizar la programación del modelo matemático planteado y obtener la solución al problema de PL, se utilizó el software MATLAB y su función ‘*linprog*’, la cual encuentra el mínimo de un problema de PL especificado mediante la aplicación del método simplex y que tengan la siguiente forma:

$$\min f^T x \text{ tal que } \begin{cases} A \cdot x \leq b, \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq}, \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

Donde A y A_{eq} representan las matrices de los coeficientes que acompañan a las variables de decisión, para las restricciones de desigualdad e igualdad, respectivamente. Por su parte, x es el vector de decisión, b y b_{eq} son vectores con los valores de resultado de las desigualdades e igualdades del modelo, y lb y ub representan los límites inferior y superior de las variables de decisión.

De esta manera, quedó definido el modelo matemático junto con sus restricciones para desarrollar la herramienta que permitiera establecer las mejores configuraciones tecnológicas para el aprovechamiento en productos energéticos de interés a partir de las biomásas estudiadas. El código base se muestra en el Anexo C. A continuación se presentan los resultados y análisis de los diferentes casos de estudios revisados, con el fin de analizar el programa desarrollado.

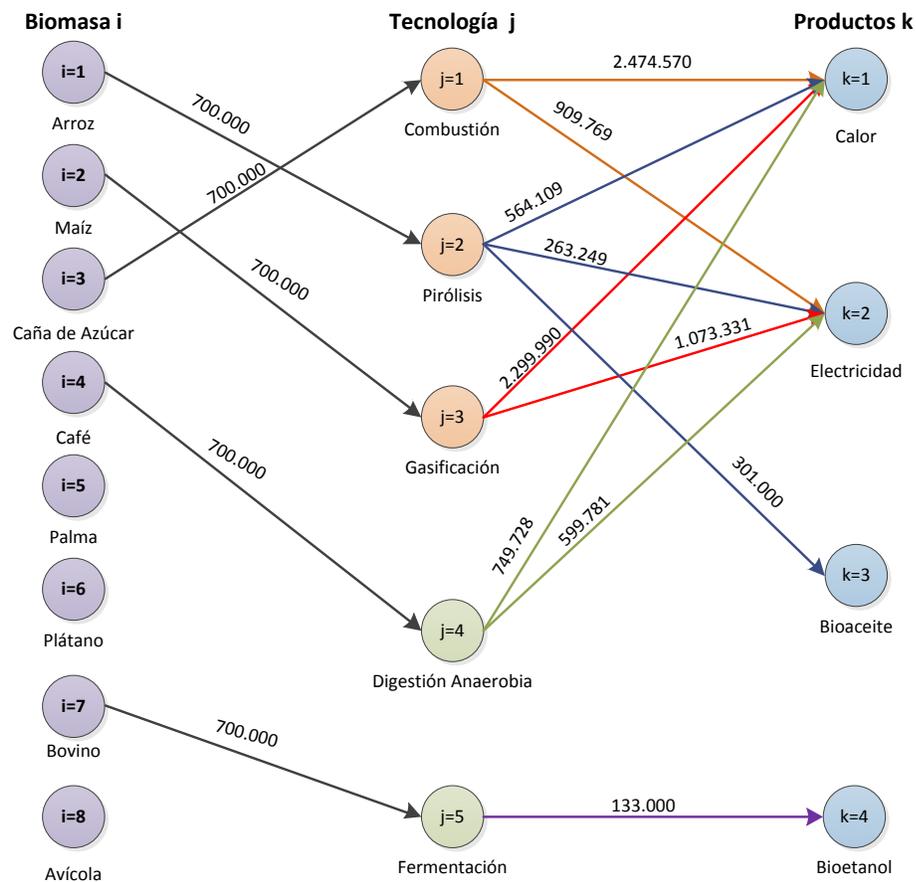
5.1 Caso de estudio 1: Cantidad total anual de biomasa del país

En el capítulo uno se estableció de acuerdo con el “*Atlas de Biomasa de Colombia*”, los valores totales de generación anual de los diferentes tipos de residuos estudiados (Tabla 2-3 y Tabla 2-5), los cuales superan por mucho la capacidad de las plantas que se consideraron en este estudio (700 mil toneladas/año). Bajo este escenario, es decir, donde existe un exceso de materia prima, se modeló el primer caso de estudio y se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 5-2.

Bajo estas condiciones la herramienta encontró un máximo en la función objetivo seleccionando solo cinco de las ocho materias primas disponibles, las cuales fueron la biomasa de arroz, maíz, caña, café y bovino; llevándolas a las tecnologías de pirólisis,

gasificación, combustión, digestión y fermentación, respectivamente. Se aprecia también que toda la capacidad definida para las plantas se completa con la totalidad de la biomasa seleccionando, definiendo que no es necesario incluir otras biomazas a la tecnología seleccionada. Esto también indica que para este escenario, debido al exceso de biomasa que se tiene, comparado con la capacidad de las tecnologías, se priorizan las biomazas con mejores eficiencias y menos costos para que completen la totalidad de una sola planta.

Figura 5-2. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 1.



Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

La función objetivo obtuvo un valor de USD\$ 400 millones, lo cual corresponde a la utilidad obtenida bajo las condiciones y los parámetros tecno-económicos dados. Se puede decir que este sería el mayor valor a obtener para la función objetivo, teniendo en cuenta las capacidades de las plantas y los rendimientos de estas biomazas, las cuales

exhiben el mejor compartimiento para las tecnologías elegidas. La Tabla 5-3 resume el total de productos obtenidos en este caso.

Tabla 5-3. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 1

Biomasa	Cantidad [t]	Proceso	Producto	Cantidad
Arroz	700.000	Pirólisis	Calor	6.088.397 MWh
Maíz	700.000	Gasificación	Electricidad	2.846.130 MWh
Caña	700.000	Combustión	Bioaceite	301.000 t
Café	700.000	Digestión A.	Bioetanol	133.000 t
Bovino	700.000	Fermentación		

Fuente: elaboración propia

Bajo las condiciones de exceso de biomasa, se puede indicar además que las biomásas de arroz, maíz, caña, café y estiércol bovino cuentan con los mejores rendimientos tecnológicos, a la vez que cumplen con los límites de humedad y relación C/N para ser tratados en las tecnologías seleccionadas.

5.2 Caso de estudio 2: Cantidad total de una región del país

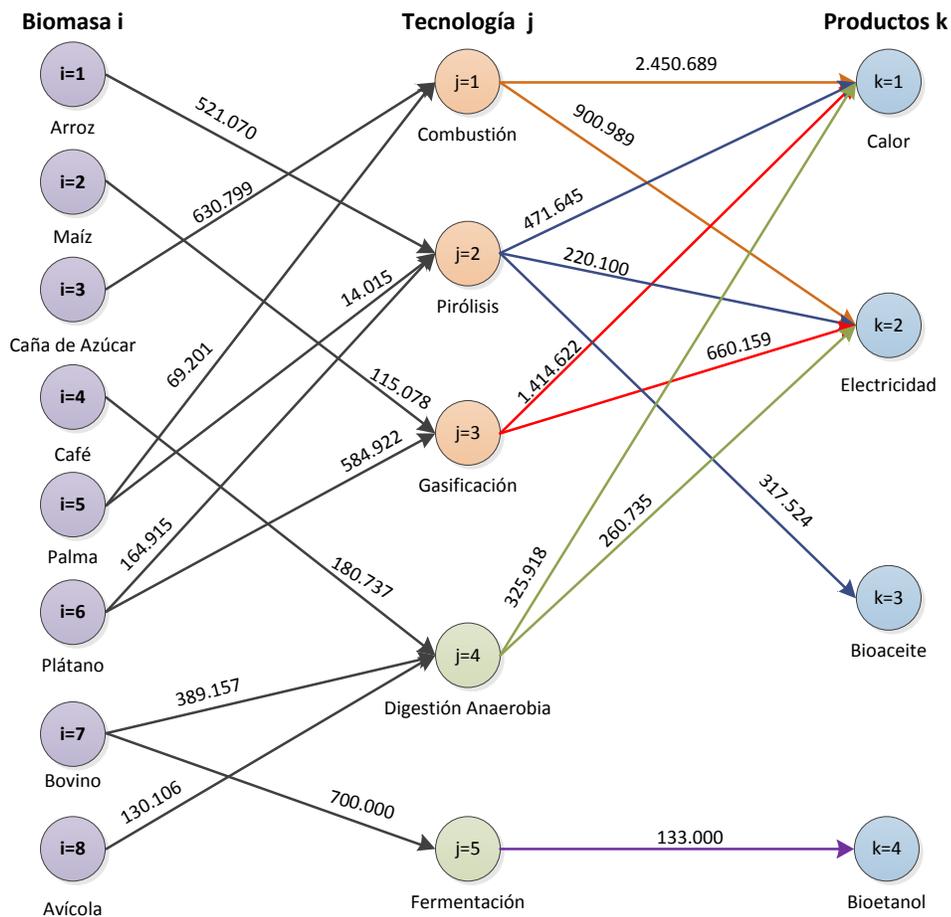
Teniendo en cuenta que no es factible contar con la disponibilidad total de los residuos agrícolas y pecuarios del país para su aprovechamiento en un punto específico del país, a menos que se incurriera en altos costos de transporte. Se seleccionó un escenario en donde solo se contara con la cantidad disponible en una región del país.

Como se aprecia en la Figura 2-3, las regiones donde existe una mayor cantidad de generación de residuo biomásico son la Pacífica y la Andina, sin embargo, con el fin de analizar el comportamiento de un escenario donde existan limitaciones de algunos de los residuos y que con uno solo de estos no logre completarse la capacidad de las plantas, se escogió a la región Caribe, tercera en su orden, para revisar el comportamiento del modelo bajo este escenario. Los resultados se muestran en la Figura 5-3.

Para este caso, se logra apreciar una participación de todos los tipos de biomásas disponibles, dado que al no tener exceso de las que resultaron ser más eficientes en el

caso 1, se hace necesario elegir las que les seguían en orden de mejor desempeño. Por ejemplo, el arroz ha resultado ser la biomasa predilecta para el proceso de pirólisis, sin embargo, al no contar con la cantidad total de la capacidad de esta tecnología, se adicionan residuos de palma y plátano, para cubrir la demanda, indicando que son estas dos, de todas las demás disponibles, las mejores opciones desde lo tecno-económico y fisicoquímico, de acuerdo con las parámetros establecidos para este caso.

Figura 5-3. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 2



Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

Otro caso a destacar es el de la digestión anaeróbica, donde para este caso se incorporan la participación de los residuos pecuarios estudiados, los cuales son principalmente usados para la generación de biogás para este proceso. Si bien el residuo de café presenta buenos rendimientos de biogás, al igual que con la pirólisis la falta de

materia prima hizo que la herramienta eligiera el estiércol bovino y avícola para cubrir este faltante y maximizar el resultado.

La Tabla 5-3 resume los resultados de cantidades por proceso y productos, los cuales como se indicó desde el caso 1, son menores dado que se debieron utilizar biomásas menos eficientes para cubrir las demandas de los procesos, asimismo la función objetivo tuvo un valor de 216 millones USD\$ lo cual equivale al 54% del total obtenido en el primer caso. Bajo este escenario se redujo casi a la mitad la ganancia obtenida en el primer caso, pudiendo deberse a la menor cantidad de productos obtenidos y a la necesidad de incluir materias primas menos eficientes en los procesos para satisfacer los requerimientos de producción.

Tabla 5-3. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 2

Biomasa	Cantidad [t]	Proceso	Producto	Cantidad
Arroz	521.070	Pirólisis	Calor	4.662.875 MWh
Maíz	115.078	Gasificación	Electricidad	2.041.984 MWh
Caña	630.799	Combustión	Bioaceite	317.524 t
Café	180.737	Digestión A.	Bioetanol	133.000 t
Palma	69.201	Combustión		
	14.015	Pirólisis		
Plátano	164.915	Pirólisis		
	584.922	Gasificación		
Bovino	389.157	Digestión A.		
	700.000	Fermentación		
Avícola	130.106	Digestión A.		

Fuente: elaboración propia

Si bien la magnitud del valor de la función objetivo es menor que el primer caso, este escenario muestra una mejor realidad respecto a la disponibilidad del recurso biomásico para los procesos, por tanto, se continuará usando los valores iniciales de los tipos de biomasa de este caso, para analizar si es posible bajo otras condiciones mejorar los valores de productos y de esta manera la utilidad expresada en la función objetivo.

5.3 Caso de estudio 3: Proceso termoquímicos únicamente

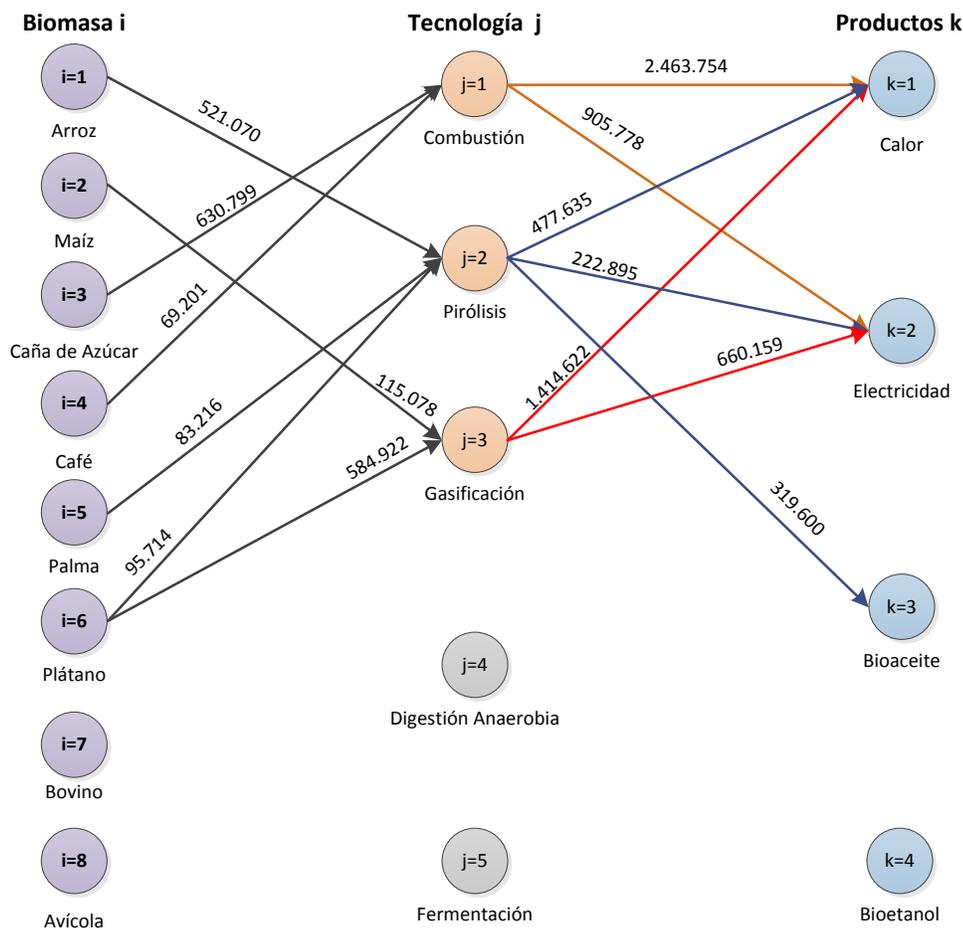
En este escenario se quiso evaluar el uso exclusivo de las tecnologías termoquímicas para el aprovechamiento energético de las biomásas estudiadas, y conocer el

comportamiento de las rutas elegidas respecto de los casos anteriores, como se observa en la Figura 5-4.

En estas condiciones se aprecian cambios de destino en algunas biomases respecto a los casos anteriores. Los residuos de café que se enviaban al proceso de digestión, al no tener esta posibilidad, se direccionó al proceso de combustión junto con la biomasa de caña que no cambió. Debido al reajuste en el proceso de combustión, en este escenario no se envió residuos de palma a este proceso, como en el caso 2, yendo solamente al pirólisis.

Teniendo en cuenta la alta humedad de los residuos pecuarios, no era factible su uso en los procesos termoquímicos, por lo que no bajo este escenario no fueron seleccionados para ninguna ruta de aprovechamiento.

Figura 5-4. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 3



Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

El resultado de la función objetivo estuvo en USD\$ 313 millones, lo cual representa un incremento del 45% respecto al escenario 2, que contó con la misma cantidad de biomasa y todas las tecnologías disponibles. La generación de productos estuvo marcada por un pequeño aumento del calor generado, una disminución de la electricidad y un mejor rendimiento del aceite pirolítico (Tabla 5-5), el cual tiene un valor más alto que los dos primeros. Al no estar disponible la tecnología de fermentación, la generación de bioetanol fue nula.

Tabla 5-5. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 3

Biomasa	Cantidad [t]	Proceso	Producto	Cantidad
Arroz	521.070	Pirólisis	Calor	4.356.013 MWh
Maíz	115.078	Gasificación	Electricidad	1.788.833 MWh
Caña	630.799	Combustión	Bioaceite	319.600 t
Café	69.201	Combustión	Bioetanol	-
Palma	83.216	Pirólisis		
Plátano	95.714	Pirólisis		
	584.922	Gasificación		

Fuente: elaboración propia

Este escenario presenta un mejor comportamiento de las tecnologías termoquímicas sobre las bioquímicas cuando se tienen en conjunto. Esto muestra que presenta cierta ventaja, desde lo tecno-económico, el uso de los procesos térmicos para la mayoría de las biomasa estudiadas.

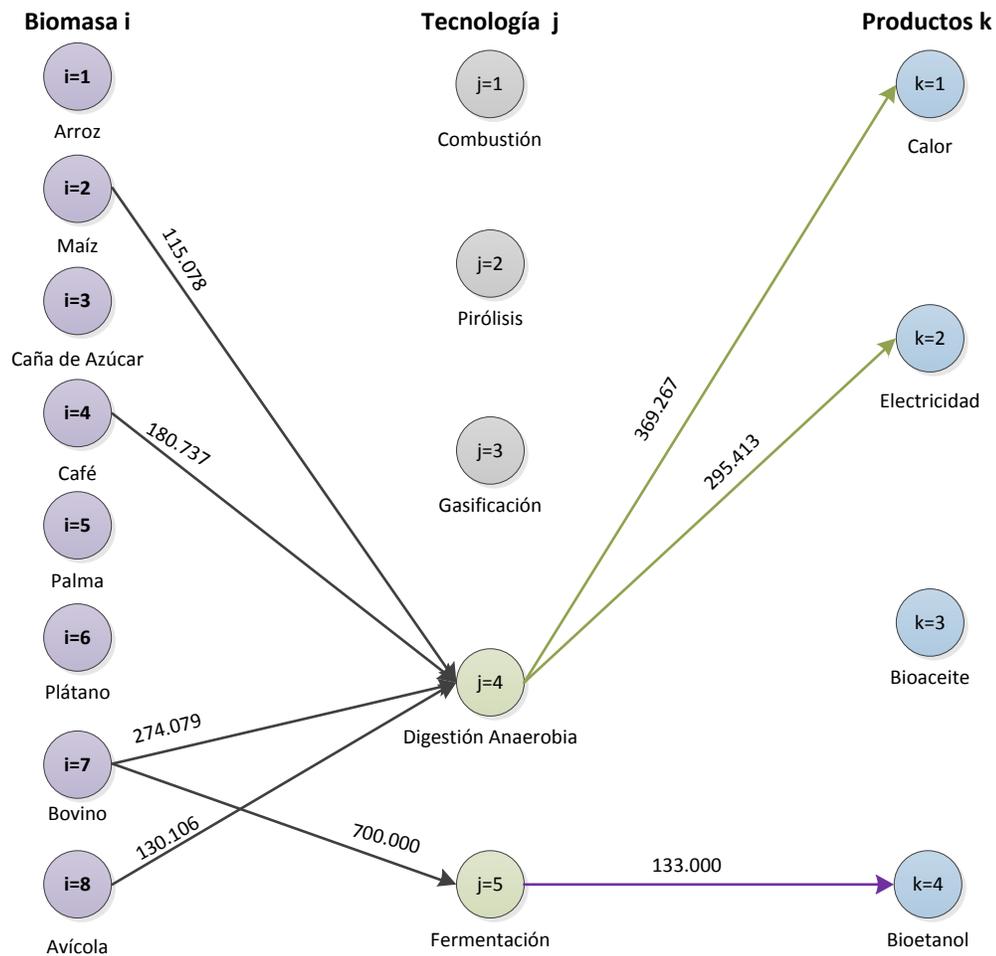
5.4 Caso de estudio 4: Proceso bioquímicos únicamente

Se quiso estudiar ahora el comportamiento del modelo bajo la condición que solo fuera posible utilizar las tecnologías de digestión anaeróbica y fermentación con las biomasa disponibles. Los resultados presentados en la Figura 5-5, muestran nuevamente la participación de las biomasa pecuarias y dos de las lignocelulósicas: maíz y café.

La biomasa de maíz y café por su contenido de carbono y nitrógeno, los cuales son fundamentales para los procesos biológicos de estas tecnologías, fueron seleccionadas para complementar las capacidades de las plantas de digestión, cuyo procesamiento está principalmente liderado por el estiércol bovino y avícola.

El valor óptimo de la función objetivo para esta configuración cae a USD\$ 81 millones, con lo cual se puede inferir que, si bien son dos procesos comparados con los tres del caso anterior, estas tecnologías reportan menos transformación a productos, además de los mayores costos de la fermentación por sus pretratamientos y mayores operaciones unitarias que otros.

Figura 5-5. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 4



Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

El bioetanol es un producto de alto valor en la comercialización, sin embargo, bajo los parámetros usados, su costo puede seguir resultado bastante alto para que solo se tenga en cuenta esta tecnología en el tratamiento de las biomasa estudiadas.

Tabla 23-6. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 4

Biomasa	Cantidad [t]	Proceso	Producto	Cantidad
Maíz	115.078	Digestión A.	Calor	369.267 MWh
Café	180.737	Digestión A.	Electricidad	295.413 MWh
Bovino	274.079	Digestión A.	Bioaceite	-
	700.000	Fermentación		
Avícola	130.106	Digestión A.	Bioetanol	133.000 t

Fuente: elaboración propia

Los resultados de calor y electricidad a través de la digestión anaeróbica bajo este escenario es un poco mayor que en el caso 2 donde están presente todas las tecnologías, no obstante, sigue siendo significativamente menor que las tecnologías térmicas, demostrando su mejor eficiencia sobre este proceso (tabla 5-6).

5.5 Caso 5: Biomosas con menores eficiencias únicamente

Teniendo en cuenta que para el caso de estudio 1 hubo tres biomosas que no fueron seleccionadas para ninguna tecnología (palma, plátano y avícola), se realizó un caso para analizar el resultado de la modelación en el caso que solo se contara con éstas para cualquier tipo de proceso. El resultado gráfico se presenta en la Fuente: elaboración propia

La función objetivo alcanzó el valor máximo para este escenario en USD\$ 2,1 millones lo que representa una caída drástica respecto a los otros casos estudiados, dejando ver los bajos rendimientos de estos tipos de biomosas en el esquema estudiado.

Figura 5-6 y los valores de cantidades por proceso y productos en la Tabla 5-7.

Las tres biomosas se distribuyen entre las cinco tecnologías abordando todos los procesos y generando todos los productos en su resultado óptimo. Como en otros casos estudiados, la biomasa agrícola con baja humedad es ideal para los procesos termoquímicos por lo que en este escenario se mantiene también ese resultado. Se destaca el uso de residuos de palma para el proceso de fermentación, contribuyendo a la producción de bioetanol, dado que gran parte del residuo avícola resultó más conveniente para la digestión anaeróbica.

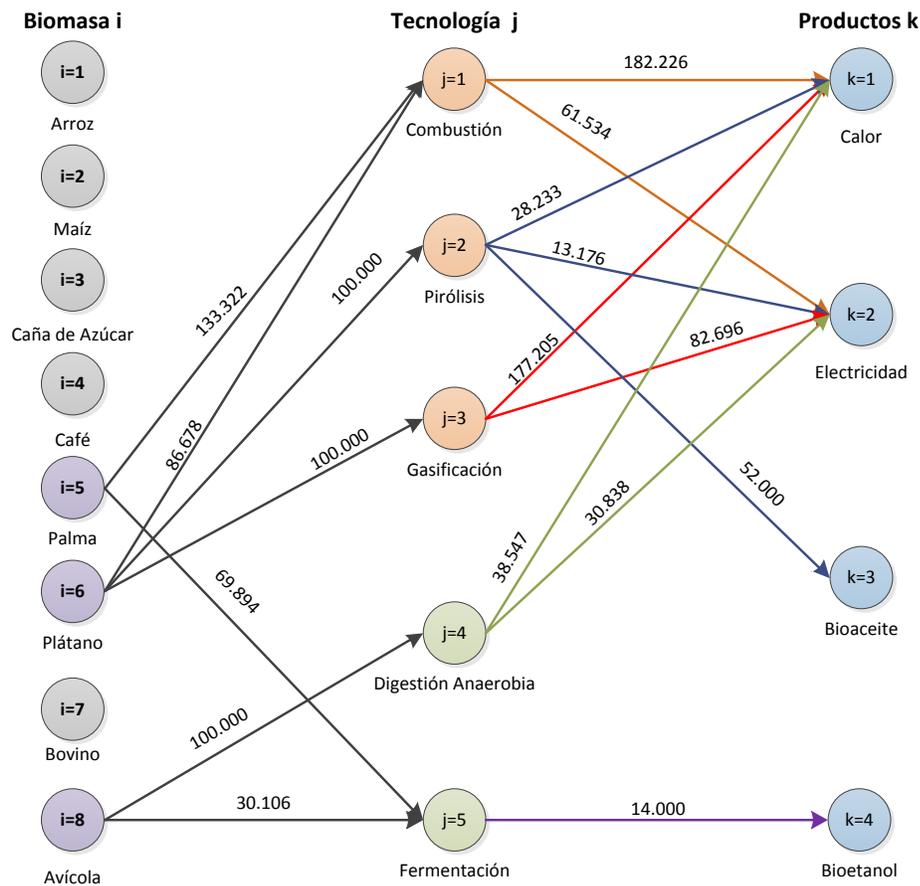
Tabla 5-7. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 5

Biomasa	Cantidad [t]	Proceso	Producto	Cantidad
Palma	133.322	Combustión	Calor	426.211 MWh
	69.894	Fermentación		
Plátano	86.678	Combustión	Electricidad	188.244 MWh
	100.000	Pirólisis		
	100.000	Gasificación		
Avícola	100.000	Digestión A.	Bioaceite	52.000 t
	30.106	Fermentación	Bioetanol	14.000 t

Fuente: elaboración propia

La función objetivo alcanzó el valor máximo para este escenario en USD\$ 2,1 millones lo que representa una caída drástica respecto a los otros casos estudiados, dejando ver los bajos rendimientos de estos tipos de biomazas en el esquema estudiado.

Figura 5-6. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 5



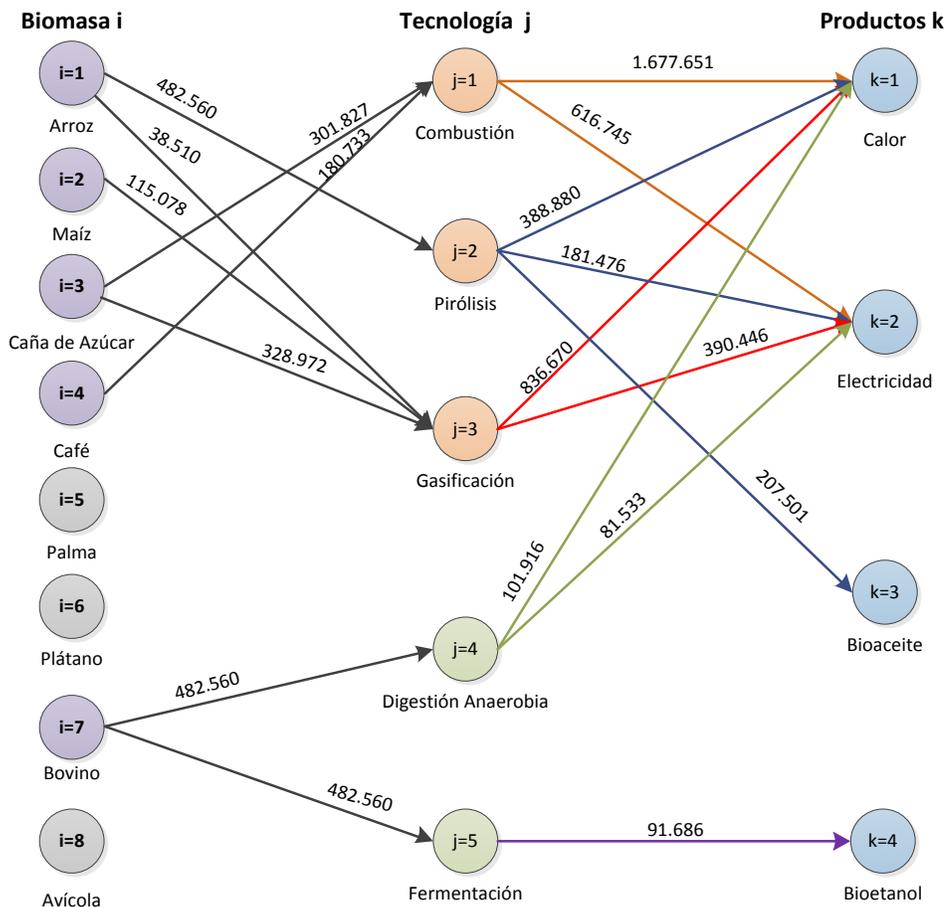
Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

A pesar de contar con producción de bioaceite y bioetanol, que son los productos de mayor valor, las limitaciones en cantidades disponibles (no exceso) sumado a la baja generación de productos hace de este escenario el menos atractivo para el aprovechamiento energético, según las condiciones dadas.

5.6 Caso 6: Biomosas con mayores eficiencias únicamente

Finalmente, este último caso de estudio buscó hacer lo opuesto al caso anterior, seleccionando solo las biomosas que presentaron mejores rendimientos en el escenario 1 y que fueron las únicas seleccionadas cuando se encontraba un exceso de material. Esta configuración se presenta en la Figura 5-7, mostrando al igual que en el caso anterior la generación de todos los productos a través de los diferentes procesos.

Figura 5-7. Resultados de la herramienta bajo condiciones del caso de estudio 6



Fuente: elaboración propia. Valores en [t], excepto calor y electricidad [MWh].

En estas condiciones se puede destacar que el residuo de café que antes iba al proceso de digestión, a pesar de estar esta opción, fue procesado en la combustión debiéndose principalmente al uso de estiércol bovino para este proceso.

Se logra evidenciar el mismo valor de 482.560 para la biomasa de arroz y bovina en sus respectivas tecnologías, y se puede concluir que este es el máximo valor que en estas condiciones pueden ir a un determinado proceso, dado que por la falta de las otras biomásas no se podría cumplir la restricción del modelo de completar el total de la capacidad de las plantas fijadas (700 mil toneladas).

Tabla 5-8. Cantidad de biomasa por proceso y productos para el caso 6

Biomasa	Cantidad (t)	Proceso	Producto	Cantidad
Arroz	482.560	Pirólisis	Calor	3.005.118 MWh
	38.510	Gasificación		
Maíz	115.078	Gasificación	Electricidad	1.270.202 MWh
Caña	301.827	Combustión	Bioaceite	207.501 t
	328.972	Gasificación		
Café	180.733	Combustión	Bioetanol	91.686 t
Bovino	482.560	Digestión A.		
	482.560	Fermentación		

Fuente: elaboración propia.

Los productos aumentaron considerablemente comparado con el caso 5, como se muestra en la Tabla, así como la función objetivo que pasó a USD\$ 110 millones, que se atribuyen a la mayor cantidad de biomásas disponibles, así como los mejores rendimientos que estas han mostrado a lo largo del estudio.

No obstante, cabe anotar que este resultado sigue siendo casi la mitad del valor obtenido en el escenario donde se encontraban disponibles todas las biomásas y las tecnologías (caso 2), lo que demuestra que una combinación adecuada de estos residuos con las tecnologías, desemboca en mejores resultados que biomásas o procesos aislados.

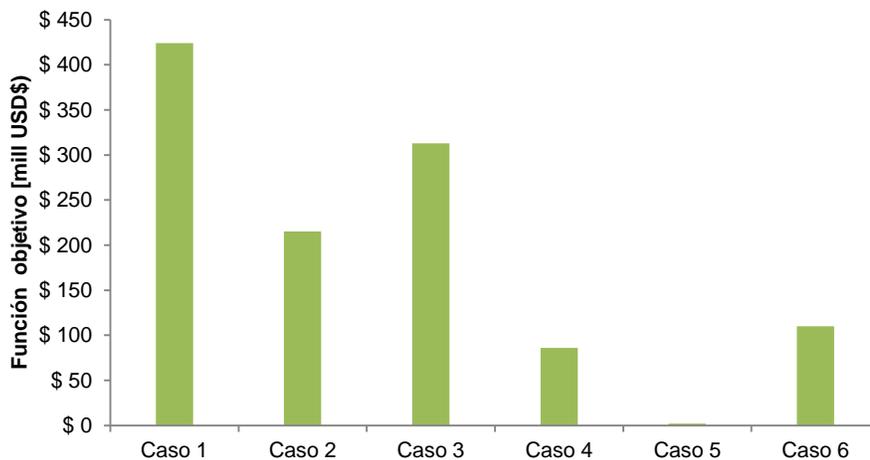
5.7 Análisis comparativo de los casos de estudio

Por otra parte, la Figura 5-8 presenta gráficamente el resultado de los valores máximos de la función objetivo del modelo, para los diferentes casos de estudio. Como primera

medida se puede apreciar que los casos 1 y 3 presentaron el mejor resultado, esto equivale a los casos de exceso de biomasa y uso exclusivo de las tecnologías termoquímicas, respectivamente.

La completa disponibilidad de los tipos de biomasa en el primer caso, hizo que se pudieran cumplir los requerimientos de todas las plantas con las que presentaban los mejores rendimientos alcanzando así los mayores valores de utilidad para el caso estudiado.

Figura 5-8. Valor de la función objetivo para los diferentes casos de estudio



Fuente: elaboración propia

Por su parte el caso 3 al involucrar solo tecnologías térmicas y a pesar de la limitación másica de algunos residuos, pudo tener un alto valor de la función objetivo, por la reconfiguración planteada. Por ejemplo, para el caso de la combustión se seleccionó el residuo de caña y café, que tenían de los mayores valores de poder calorífico inferior 4456 y 4259 kcal/kg respectivamente, mientras que para el caso de la gasificación se establecieron los residuos de maíz, el cual tiene la tasa de conversión a *syngas* más alta (2,06), y de palma que era el tercero en orden de conversión (1,76).

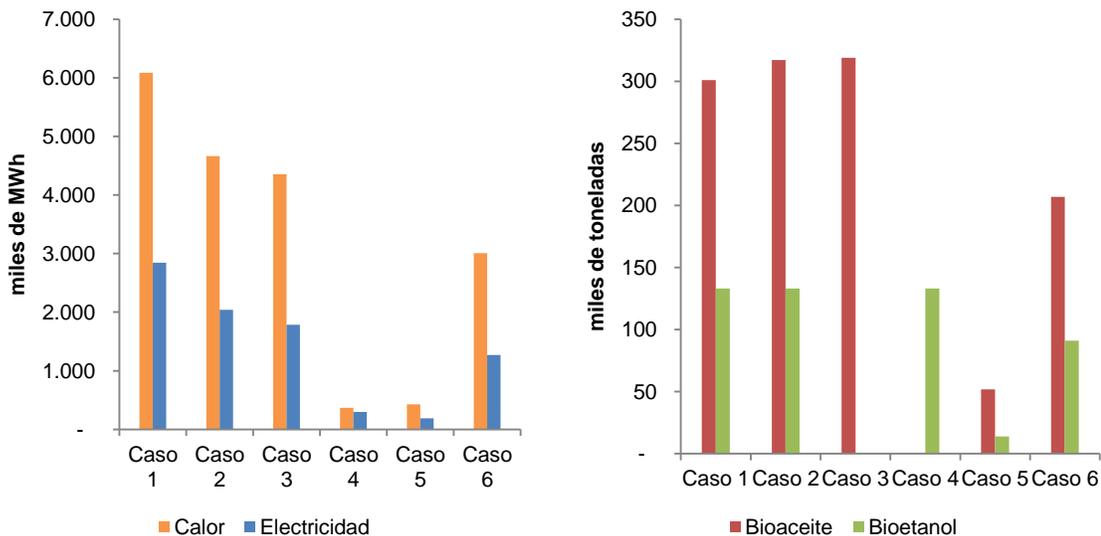
Intuitivamente se podría pensar que siempre es mejor enviar las biomásas de mejores rendimientos de una tecnología a esa misma, sin embargo, cuando existe un conjunto de posibilidades tanto en las materias primas como en los procesos, no siempre funciona de esta manera debido a los factores económicos, en este caso, y las restricciones que se

especifican; haciendo de este tipo de herramientas instrumentos útiles para toma de decisiones y análisis de diversos casos.

En contraste con los casos anteriores, los escenarios 5 y 4 obtuvieron los valores más bajos de la función objetivo, correspondientes al uso exclusivo de materiales con menores eficiencias y el solo tecnologías bioquímicas, respectivamente. Esto se puede explicar por los bajos rendimientos en productos como calor y electricidad del biogás producido en el proceso de digestión anaeróbica de la biomasa lignocelulósica (que es la mayoría en este estudio) respecto a otros procesos como la combustión y gasificación.

También se suma el hecho de que las tecnologías como la fermentación tienen mayores costos que los otros procesos estudiados, de acuerdo con los datos usados en el modelo, por lo que cuando se limitó el aprovechamiento energético a solo las bioquímicas la producción de bioetanol y su posterior venta no fueron comparativamente mayores que sus costos asociados. En todo caso, el uso simultaneo de varias tecnologías y las diferentes biomasa estudiadas lograron conjugar un mejor desempeño de la utilidad.

Figura 5-9. Valor de los productos para los diferentes casos de estudio



Fuente: elaboración propia

En cuanto a los productos energéticos considerados en este estudio, el panorama es similar que los resultados por casos de la función objetivo, como se presenta en la Figura

5-9. El producto de mayor generación fue el calor, teniendo en cuenta que cuatro de las cinco tecnologías lo producían, así como los mejores rendimientos que mostraron las tecnologías térmicas en todos los casos.

Debido al uso de la tecnología de calor y electricidad combinada (CHP) se muestra una proporcionalidad de la electricidad respecto al calor generado en todos los casos, siguiendo el comportamiento de la energía térmica en cada uno de los casos estudiados.

La generación de bioaceite fue alta y similar en los primeros tres casos de estudio mostrando su mayor valor en el caso 3 donde solo se usaron procesos termoquímicos, lo cual hizo que mayores cantidades de biomasa fueran a este proceso, y que en otros casos también pudieron ser distribuidos en las bioquímicas. La producción de bioetanol casi no se vio alterada en los casos donde se podría generar, salvo en el caso 6 donde se restringió una de las biomasa pecuarias, haciendo que disminuyera su producción.

Finalmente se puede concluir que los diferentes escenarios presentaron variaciones consecuentes con las condiciones, parámetros y restricciones dados, arrojando en cada caso soluciones factibles al problema de optimización. Además, se apreció que en ningún caso el valor de la función objetivo obtuvo valores negativos, lo que indica que económicamente bajo estas condiciones y parámetros no se generaron pérdidas en ningún caso, aunque el rango de valores de utilidad fue bastante amplio.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La herramienta de modelación desarrollada a través de la resolución de un problema de programación lineal, permitió identificar rutas óptimas de aprovechamiento energético de las biomásas estudiadas, teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos, técnicos y económicos.

Bajo los escenarios estudiados y de acuerdo con los parámetros ingresados al modelo según la revisión bibliográfica, se logró identificar como la mejor configuración en términos de maximización de la utilidad (USD\$ 400 millones), que las biomásas de arroz, maíz, caña, café y bovino; fueran procesadas en las tecnologías de pirólisis, gasificación, combustión, digestión y fermentación, respectivamente.

Se encontró también la alta sensibilidad del modelo respecto de las cantidades iniciales disponibles para cada tipo de biomasa, dado que ante la ausencia o falta de las más eficientes, se deben utilizar materias primas con menores rendimientos con el fin de lograr completar las capacidades de los procesos y lograr obtener un nuevo valor óptimo.

Los procesos térmicos resultaron en mayor medida mejores que los bioquímicos, desde el punto de vista de la función objetivo, principalmente debido a que la mayoría de materias primas en el modelo eran biomásas lignocelulósicas con baja humedad, comparado con la fermentación y digestión anaeróbica, que contaban con criterios de relación C/N necesarios para cumplir las funciones biológicas de los microorganismos en estas tecnologías y menor cantidad de biomasa disponible.

Los procesos de fermentación y pirólisis resultaron los más costosos de las tecnologías estudiadas, no obstante, son los dos procesos que generan otros productos de alto valor,

aparte de la energía térmica y eléctrica, lo que bajo consideraciones conjuntas con otras tecnologías hizo que fueran seleccionadas para procesar algún tipo de biomasa, y contribuir a una maximización de la utilidad, bajo las condiciones dadas.

De acuerdo con las publicaciones científicas realizadas el proceso de pirólisis, en el caso de las tecnologías termoquímicas, y el de fermentación de biomasa, para las biológicas, muestra una particular atención a procesos que cada vez generen mayores productos de valor agregado y con múltiples aplicaciones, no solo energéticas sino también para diversas industrias.

6.2 Recomendaciones

Se plantea para futuros estudios ampliar los tipos de residuos biomásicos y tecnologías, siguiendo la metodología y modelo planteado para analizar nuevos escenarios de aprovechamiento energético de los residuos en el país. De igual manera, se podrían incluir parámetros ambientales e incluso sociales para tener un panorama más completo de las rutas a seleccionar, al igual que variación en la capacidad de las plantas, de acuerdo con una visión más integral de cara a estos procesos.

Como se ha visto en otros estudios, se recomienda incluir nuevas funciones objetivos, lo que convertiría el problema en uno de tipo multiobjetivo, que busque por ejemplo la maximización de productos de interés y, si se ya cuenta con las restricciones ambientales, otra de disminución de emisiones.

Finalmente, desde otras disciplinas se podría aportar a la concepción de políticas energéticas y económicas para el país, que permitan mejorar los costos asociados al aprovechamiento de biomasa para ser más competitivos en el mercado energético, y a su vez plantear los escenarios que mejoren los resultados encontrados en este estudio, como por ejemplo la aplicación de subsidios a la energía generada con este tipo de fuentes o hacer más atractivo la inversión de capital en este tipo de plantas.

A. Anexo: Memoria del ejercicio de vigilancia tecnológica

En este anexo se presenta la definición de necesidades del ejercicio de vigilancia tecnológica planteado en el capítulo 2, así como la bitácora de búsqueda.

VIGILANCIA TECNOLÓGICA: APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA

Definición de necesidades de vigilancia tecnológica				
POR QUÉ	<p>Las fuentes de energía y sus usos finales, son en la actualidad, un factor fundamental y desafío para la comprensión de los retos en materia energética y ambiental de un país. El creciente auge de buscar alternativas energéticas con mejor eficiencia y que utilicen fuentes renovables de energía, impactan significativamente al mejoramiento del abastecimiento energético y al ambiente, aspectos claves en el presente.</p> <p>Dentro de esas fuentes de energía renovables se destacan para Colombia los diversos tipos de biomasa y sus usos energéticos, de acuerdo con las necesidades energéticas finales, convirtiéndola en materia de especial atención debido a sus potenciales y alternativa a fuentes convencionales de energía.</p>			
PARA QUÉ	<p>Evaluar el estado actual de las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa residual, para la verificación de implicaciones técnicas en el contexto colombiano</p>			
Factores críticos	Cuestión crítica a vigilar (pregunta de vigilancia)	Descriptor	Restrictores	Prioridad

Tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa residual colombiana	CCV1.1 ¿Cuáles son las principales características técnicas de las tecnologías de aprovechamiento energético termoquímico de biomasa residual?	Thermochemical technologies, biomass, pyrolysis, gasification, liquefaction, thermochemical process, combustion	Últimos años	20	Alta
	CCV1.1 ¿Cuáles son las principales características técnicas de las tecnologías de aprovechamiento energético bioquímico de biomasa residual?	Biochemical technologies, biomass, fermentation, biogas, anaerobic digestion.	Últimos años	20	Alta

BITÁCORA

Ecuación de búsqueda	Publicaciones	Patentes
TITLE-ABS-KEY (solar AND energy) AND PUBYEAR > 1999	219,442	406,767
TITLE-ABS-KEY ((solar OR sun) AND (energ* OR power)) AND PUBYEAR > 1999	288,891	882,180
TITLE-ABS-KEY ((wind OR eolic) AND energy)	133,181	408,099
TITLE-ABS-KEY ((wind OR eolic) AND (energ*	171,591	584,829

OR power)) AND PUBYEAR > 1999		
TITLE-ABS-KEY (thermochemical AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	3,814 document results	
TITLE-ABS-KEY (biochemical AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	12,486 document results	
TITLE-ABS-KEY (pyrolysis AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	15,954 document results	16,768 patent results
TITLE-ABS-KEY (combustion AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	18,606 document results	38,916 patent results
TITLE-ABS-KEY (gasification AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	12,808 document results	18,722 patent results
TITLE-ABS-KEY (liquefaction AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	2,196 document results	6,748 patent results
TITLE-ABS-KEY (anaerobic AND digestion AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	5,835 document results	11,592 patent results
TITLE-ABS-KEY (fermentation AND biomass) AND PUBYEAR > 1999	20,030 document results	50,513 patent results

OTROS RESULTADOS

9,715 document results

TITLE-ABS-KEY (biomass AND combustion) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Combustion"))

11,231 document results

TITLE-ABS-

KEY (biomass AND pyrolysis) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Pyrolysis") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass"))

15,915 patent results

TITLE-ABS-KEY (biomass AND pyrolysis) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND ((PATENTBODY (pyrolysis) OR PATENTBODY (biomass)))

7,076 document results

TITLE-ABS-KEY (biomass AND gasification) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Gasification") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass Gasification"))

1,568 document results

TITLE-ABS-KEY (biomass AND liquefaction) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Liquefaction") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrothermal Liquefactions") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Hydrothermal Liquefaction"))

12,247 document results

TITLE-ABS-KEY (biomass AND fermentation) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2023 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Fermentation") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomass"))

B. Anexo: Memoria de cálculos

Se utilizaron los siguientes cálculos para obtener los valores de eficiencias para cada tecnología de acuerdo con el tipo de biomasa y producto energético final.

Combustión:

Se parte de la base de cálculo de una (1) tonelada de biomasa. De acuerdo con el poder calorífico inferior para cada uno de los tipos de biomosas, y considerando la eficiencia combinada de calor y electricidad, que se estimaron en 25 % para electricidad y 60 % para calor, se tiene:

Raquis de palma:

Electricidad:

$$1 \text{ t raquis} \times \frac{1000 \text{ kg raquis}}{1 \text{ t raquis}} \times \frac{16,88 \text{ MJ}}{1 \text{ kg raquis}} \times 0,25 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 1172,79 \text{ kWh/t}$$

Calor:

$$1 \text{ t raquis} \times \frac{1000 \text{ kg raquis}}{1 \text{ t raquis}} \times \frac{16,88 \text{ MJ}}{1 \text{ kg raquis}} \times 0,60 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 3190,00 \text{ kWh/t}$$

Pirólisis:

Se partió de los valores dados en rendimiento de gases no condensables por kilogramo de biomasa procesada del proceso de pirólisis. Partiendo de la base de cálculo de una (1) tonelada se sigue:

Raquis de palma:

$$1 \text{ t} \times \frac{1000 \text{ kg raquis}}{1 \text{ t}} \times \frac{0,21 \text{ kg gases}}{1 \text{ kg gases}} = 210 \text{ kg gases}$$

De acuerdo con el poder calorífico inferior para el gas no condensable producido a partir de este residuos, y considerando la eficiencia combinada de calor y electricidad para gas de síntesis a partir de biomasa, que se estiman en 28 % para electricidad y 60 % para calor, se tiene:

Electricidad:

$$210 \text{ kg gases} \times \frac{10,54 \text{ MJ}}{1 \text{ kg gases}} \times 0,28 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 172,15 \text{ kWh/t}$$

Calor:

$$210 \text{ kg gases} \times \frac{10,54 \text{ MJ}}{1 \text{ kg gases}} \times 0,6 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 368,90 \text{ kWh/t}$$

Gasificación:

Se partió de los valores dados en rendimiento de gas de síntesis por kilogramo de biomasa procesada. Partiendo de la base de cálculo de una (1) tonelada se sigue:

Raquis de palma:

$$1 \text{ t} \times \frac{1000 \text{ kg raquis}}{1 \text{ t}} \times \frac{1,76 \text{ m}^3 \text{ Syngas}}{1 \text{ kg raquis}} = 1760 \text{ m}^3 \text{ syngas}$$

De acuerdo con el poder calorífico inferior para el gas de síntesis producido a partir de este residuos, y considerando la eficiencia combinada de calor y electricidad para gas de síntesis a partir de biomasa, que se estiman en 28 % para electricidad y 60 % para calor, se tiene:

Electricidad:

$$1760 \text{ m}^3 \text{ syngas} \times \frac{4,53 \text{ MJ}}{\text{m}^3 \text{ syngas}} \times 0,28 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 620,11 \text{ kWh/t}$$

Calor:

$$1760 \text{ m}^3 \text{ syngas} \times \frac{4,53 \text{ MJ}}{\text{m}^3 \text{ syngas}} \times 0,6 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 1328,80 \text{ kWh/t}$$

Digestión Anaeróbica:

Se partió de los valores dados en rendimiento de metano por kilogramo de sólidos volátiles en la biomasa. Partiendo de la base de cálculo de una (1) tonelada se sigue:

Estiércol de vaca:

$$1 t \times \frac{11,48 \text{ kg VS}}{1 t} \times \frac{0,37 \text{ m}^3 \text{CH}_4}{1 \text{ kg VS}} = 42,48 \text{ m}^3 \text{CH}_4$$

Tomando un valor de 35,8 MJ/m³ como el poder calorífico inferior para el metano, y considerando la eficiencia total de generación combinada de calor y electricidad para biogás en alrededor del 90 %, que se estiman en 40 % para electricidad y 50 % para calor [75] [127], se tiene:

Electricidad:

$$42,48 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \times \frac{35,8 \text{ MJ}}{\text{m}^3 \text{CH}_4} \times 0,4 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 168,97 \text{ kWh/t}$$

Calor:

$$42,48 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \times \frac{35,8 \text{ MJ}}{\text{m}^3 \text{CH}_4} \times 0,5 \times \frac{0,277778 \text{ kWh}}{1 \text{ MJ}} = 211,22 \text{ kWh/t}$$

Los valores para sólidos volátiles de las biomásas lignocelulósicas se tomaron de [100].

C. Anexo: Programa de modelación

A continuación se presenta el código base utilizado para establecer la herramienta de modelación en el software MATLAB:

```
%% Herramienta de modelación para evaluación de alternativas para aprovechamiento
energético de biomasas
clc
clearvars

%% Definición de biomasas
% 1 = Arroz % 2 = Maiz % 3 = Caña % 4 = Café
% 5 = Palma % 6 = Plátano % 7 = Vaca % 8 = Pollo

%% Definición de tecnologías
% 1 = Combustión % 2 = Pirólisis % 3 = Gasificación
% 4 = Digestión Anaeróbica % 5 = Fermentación

%% Definición de productos
% 1 = Calor %2 = Electricidad %3 = Bioaceite %4 = Bioetanol

%% Parámetros
b = 8; %número de tipos de biomasa
t = 5; %número de tipos de tecnologías
p = 4; %número de tipos de productos

%% Variables de Decisión, cantidad total de biomasa que ingresa a la tecnología [ton]
% wij = cantidad total de biomasa i que ingresa a tecnología j

%% Declaración de eficiencias, cantidad de producto generado a partir de tecnología j en
producto p
% Fila 1 Calor [kWh/t], Fila 2 Electricidad [kWh/t], Fila 3 Bioaceite [t/t], Fila 4
Bioetanol [t/t]
% Arroz
BA = [2469.65, 805.87, 1182.40, 936.10, 0; 907.96, 376.07, 551.79, 748.88, 0; 0,
0.43, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.30];
% Maiz
BM = [2720.34, 199.83, 3285.70, 587.89, 0; 1000.13, 93.26, 1533.33, 470.31, 0; 0, 0.54,
0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.16];
% Caña
BC = [3535.10, 334.60, 1255.50, 1096.44, 0; 1299.67, 156.15, 585.90, 877.15, 0; 0,
0.53, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.49];
% Café
BF = [3378.81, 109.25, 878.43, 1071.04, 0; 1242.21, 50.98, 409.94, 856.83, 0; 0, 0.55,
0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.15];
% Palma
```

```

BP = [3190.00, 368.90, 1328.80, 1147.54, 0; 1172.79, 172.15, 620.11, 918.03, 0; 0,
0.55, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.14];
% Plátano
BL = [1612.05, 282.33, 1772.05, 654.10, 0; 592.67, 131.76, 826.96, 523.28, 0; 0,
0.52, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.46];
% Vaca
BV = [2222.13, 378.00, 1305.88, 211.20, 0; 816.96, 176.40, 609.41, 168.96, 0; 0,
0.34, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.19];
% Pollo
BB = [1783.41 169.56, 566.67, 385.47, 0; 655.67, 79.13, 264.44, 308.38, 0; 0, 0.33,
0, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 0.14];

%% Matriz con todos los valores de eficiencias por proceso
ME = [2469.65 907.960 0; 805.87376.070.43 0; 1182.4551.790 0; 936.1 748.880 0;
0 0 0.3; 2720.341000.13 0 0; 199.8393.26 0.54 0; 3285.71533.33 0 0; 587.89
470.310 0; 0 0 0.16; 3535.11299.67 0 0; 334.6 156.150.53 0; 1255.5585.9 0 0;
1096.44 877.150 0; 0 0 0.49; 3378.81 1242 0 0; 109.2550.98 0.55 0; 878.43409.94
0 0; 1071.04 856.830 0; 0 0 0.15; 3190 1172.79 0 0; 368.9 172.150.55 0; 1328.8
620.110 0; 1147.54 918.030 0; 0 0 0.14; 1612.05 529.670 0; 282.33131.760.52 0;
1772.05 826.960 0; 654.1 523.280 0; 0 0 0.46; 2222.13 816.960 0; 378176.4 0.34
0; 1305.88 609.410 0; 211.2 168.960 0; 0 0 0.19; 1783.41 655.670 0; 169.56
79.13 0.33 0; 566.67264.440 0; 385.47308.380 0; 0 0 0.14];

%% Parámetros fisicoquímicos de los tipos de biomasa

% Humedad de los tipos de biomasa [%]
H = [10.0 11.75 7.6 8.1 11.54 10.20 50.0 30.0];
% Relación C/N de los tipos de biomasa [w/w]
CN = [65.2 22.0 332.9 22.7 36.27 91.46 25.97 29.0];

%% Parámetros económicos
% Precio de productos [$/kWh] [$/t]
P = [0.056; 0.166; 288.3; 1029];
% Costos operativos unitarios de la tecnología t [$/t]
CO = [23.4 147.57 61.38 39.16 198.29];
% Costos de capital de inversión
CF = [54.6 82.86 89.21 73.3 108.55];
C = CO + CF;

% Cantidad total por tipo de biomasa [t/año]
%W = [5789669; 1278642; 7008873; 2008192; 924618; 16596783; 99168607; 1534512];
% Cantidad total por una región [t/año]
W = [578992; 127893; 700891; 200891; 924619; 165969; 991689; 153490];

% Capacidad plantas [t/año]
CP0 = ones(5,1);
CP = 70000*CP0;

%% Matriz de eficiencias x precio de venta de productos
K1 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
        K1(i,j)= BA(i,j)*P(i);
    end
end

K2 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5

```

```
K2(i,j)= BM(i,j)*P(i);
    end
end

K3 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K3(i,j)= BC(i,j)*P(i);
        end
    end

K4 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K4(i,j)= BF(i,j)*P(i);
        end
    end

K5 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K5(i,j)= BP(i,j)*P(i);
        end
    end

K6 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K6(i,j)= BL(i,j)*P(i);
        end
    end

K7 = zeros (4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K7(i,j)= BV(i,j)*P(i);
        end
    end

K8 = zeros(4,5);
for i=1:4
    for j=1:5
K8(i,j)= BB(i,j)*P(i);
        end
    end

k1 = sum (K1);
k2 = sum (K2);
k3 = sum (K3);
k4 = sum (K4);
k5 = sum (K5);
k6 = sum (K6);
k7 = sum (K7);
k8 = sum (K8);

% Producto de eficiencias y precio de productos
MC = [k1; k2; k3; k4; k5; k6; k7; k8];

%% Coeficientes de la función objetivo
L = MC - C;
```



```

end
% Restricción Fermentación C/N
for i=1:1:8
    for j=1:1:5
        if CN(i)>60
            u(i,5)=0;
        end
    end
end

ub = 70000*[u(1,1) u(1,2) u(1,3) u(1,4) u(1,5) u(2,1) u(2,2) u(2,3) u(2,4)
u(2,5) u(3,1) u(3,2) u(3,3) u(3,4) u(3,5) u(4,1) u(4,2) u(4,3) u(4,4) u(4,5)
u(5,1) u(5,2) u(5,3) u(5,4) u(5,5) u(6,1) u(6,2) u(6,3) u(6,4) u(6,5) u(7,1)
u(7,2) u(7,3) u(7,4) u(7,5) u(8,1) u(8,2) u(8,3) u(8,4) u(8,5)];

%% Función objetivo
f = -[L(1,1) L(1,2) L(1,3) L(1,4) L(1,5) L(2,1) L(2,2) L(2,3) L(2,4) L(2,5)
L(3,1) L(3,2) L(3,3) L(3,4) L(3,5) L(4,1) L(4,2) L(4,3) L(4,4) L(4,5) L(5,1)
L(5,2) L(5,3) L(5,4) L(5,5) L(6,1) L(6,2) L(6,3) L(6,4) L(6,5) L(7,1) L(7,2)
L(7,3) L(7,4) L(7,5) L(8,1) L(8,2) L(8,3) L(8,4) L(8,5)];

%% Solución
[sol, fval] = linprog (f,A,b,Aeq,beq,lb,ub)

%% Cantidad de Productos Obtenidos
T = ME.*sol;
J = zeros (5,4);
for i = 1:5
    for j = 1:4
        J(i,j) = T(i,j)+ T(i+5,j)+ T(i+10,j) + T(i+15,j) + T(i+20,j) +
T(i+25,j) + T(i+30,j) + T(i+35,j);
    end
end
end

```


Bibliografía

- [1] M. A. Destek and A. Aslan, "Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth in emerging economies: Evidence from bootstrap panel causality," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 757–763, 2017.
- [2] A. Demirbas, "Importance of biomass energy sources for Turkey," *Energy Policy*, vol. 36, no. 2, pp. 834–842, 2008.
- [3] REN21, *Renewables 2022 Global Status. 2022*.
- [4] A. Kumar, N. Kumar, P. Baredar, and A. Shukla, "A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 530–539, 2015.
- [5] J. Cai *et al.*, "Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. October 2016, pp. 309–322, 2017.
- [6] M. Hupa, O. Karlström, and E. Vainio, "Biomass combustion technology development - It is all about chemical details," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 1, pp. 113–134, 2017.
- [7] S. K. Sansaniwal, M. A. Rosen, and S. K. Tyagi, "Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. March, pp. 23–43, 2017.
- [8] M. Puig-Arnavat, J. C. Bruno, and A. Coronas, "Review and analysis of biomass gasification models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2841–2851, 2010.
- [9] A. Kumar, D. D. Jones, and M. A. Hanna, "Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology," *Energies*, vol. 2, no. 3, pp. 556–581, 2009.
- [10] A. Sharma, V. Pareek, and D. Zhang, "Biomass pyrolysis - A review of modelling,

- process parameters and catalytic studies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1081–1096, 2015.
- [11] F. X. Collard and J. Blin, “A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 594–608, 2014.
- [12] C. Sawatdeenarunat, K. C. Surendra, D. Takara, H. Oechsner, and S. K. Khanal, “Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities,” *Bioresour. Technol.*, vol. 178, pp. 178–186, 2015.
- [13] R. Lal, “World crop residues production and implications of its use as a biofuel,” vol. 31, no. 2005, pp. 575–584, 2012.
- [14] M. C. Heller, G. A. Keoleian, M. K. Mann, and T. A. Volk, “Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass,” vol. 29, pp. 1023–1042, 2004.
- [15] Departamento administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, *PLAN ESTRATÉGICO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN ENERGÍA Y MINERÍA 2013-2022*. 2013, p. 168.
- [16] Colombia, “Ley 1715 de 2014 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.” Bogotá D.C., p. 16, 2014.
- [17] R. C. Saxena, D. K. Adhikari, and H. B. Goyal, “Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 167–178, 2009.
- [18] H. B. Goyal, D. Seal, and R. C. Saxena, “Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 2, pp. 504–517, 2008.
- [19] R. Warnecke, “Gasification of biomass: Comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 6, pp. 489–497, 2000.
- [20] S. Al Arni, “Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel,” *Renew. Energy*, pp. 1–5, 2017.
- [21] S. Zhang *et al.*, “Liquefaction of biomass and upgrading of bio-oil: A review,” *Molecules*, vol. 24, no. 12, pp. 1–30, 2019.

- [22] A. R. K. Gollakota, N. Kishore, and S. Gu, "A review on hydrothermal liquefaction of biomass," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. August 2016, pp. 1378–1392, 2018.
- [23] K. F. Adekunle and J. A. Okolie, "A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion," *Adv. Biosci. Biotechnol.*, vol. 06, no. 03, pp. 205–212, 2015.
- [24] Y. Lin and S. Tanaka, "Ethanol fermentation from biomass resources: Current state and prospects," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 69, no. 6, pp. 627–642, 2006.
- [25] M. Lübken, T. Gehring, and M. Wichern, "Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass: Current state and prospects of mathematical modeling," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 85, no. 6, pp. 1643–1652, 2010.
- [26] L. Kong, S. M. Sen, C. A. Henao, J. A. Dumesic, and C. T. Maravelias, "A superstructure-based framework for simultaneous process synthesis, heat integration, and utility plant design," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 91, pp. 68–84, 2016.
- [27] Z. Yuan and M. R. Eden, "Superstructure optimization of integrated fast pyrolysis-gasification for production of liquid fuels and propylene," *AIChE J.*, vol. 62, no. 9, pp. 3155–3176, Sep. 2016.
- [28] J. E. White, W. J. Catallo, and B. L. Legendre, "Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, no. 1, pp. 1–33, 2011.
- [29] S. Wang, G. Dai, H. Yang, and Z. Luo, "Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 62, pp. 33–86, 2017.
- [30] M. A. Hernández, J. Romero, C. Jaime, and J. León-pulido, "Lignocellulosic Biomass from Fast-Growing Species in Colombia and their Use as Bioresources for Biofuel Production," vol. 58, pp. 541–546, 2017.
- [31] S. R. Rubio, F. E. Sierra, and A. Guerrero, "Gasificación de materiales orgánicos residuales Gasification from waste organic materials," *Ing. e Investig.*, vol. 31, no. 3, pp. 17–25, 2011.
- [32] G. Marrugo, C. F. Valdés, and F. Chejne, "Biochar Gasification: An Experimental Study on Colombian Agroindustrial Biomass Residues in a Fluidized Bed," *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 9, pp. 9408–9421, 2017.
- [33] A. Blanco and F. Chejne, "Modeling and simulation of biomass fast pyrolysis in a

- fluidized bed reactor,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 118, pp. 105–114, 2016.
- [34] UPME Unidad de Planeación Minero Energética, “Balance Energético Colombiano BECO,” *upme.gov.co*, 2022. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO.aspx>.
- [35] UPME Unidad de Planeación Minero Energética, “Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.” bo, p. 180, 2008.
- [36] UPME Unidad de Planeación Minero Energética, “Informe de Gestión 2017- 2018,” Bogotá D.C., 2018.
- [37] Patiño Martínez PE, “PE Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales.” *Innovaciencia*, vol. 2, no. 1, pp. 45–52, 2014.
- [38] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, 2002.
- [39] S. V Vassilev, C. G. Vassileva, and V. S. Vassilev, “Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal : An overview,” *FUEL*, vol. 158, pp. 330–350, 2015.
- [40] J. Sadhukhan, K. Siew, and E. Martinez, *Biorefineries and Chemical Processes*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [41] A. Valverde G., B. Sarria L., and J. P. Monteagudo Y., “Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz.” *Sci. Tech.*, no. 37, p. 6, 2007.
- [42] R. J. Macías Naranjo, F. Chejne Janna, J. I. Montoya Arbeláez, and A. Blanco Leal, “Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto,” *Rev. Mutis*, vol. 4, no. 1, pp. 24–32, 2014.
- [43] D. V Vidal, J. Torres, and L. O. González, “Ceniza De Bagazo De Caña Para Elaboración De Materiales De Construcción: Estudio Preliminar,” *MOMENTO - Rev. Física*, vol. 0, no. 48E, pp. 14–23, 2014.
- [44] P. Lahijani and Z. A. Zainal, “Bioresource Technology Gasification of palm empty fruit bunch in a bubbling fluidized bed : A performance and agglomeration study,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 2068–2076, 2011.
- [45] E. Del, E. Del, D. Andrés, and R. Ramírez, “LAS TÉCNICAS DE CO-FIRING Y REBURN,” pp. 1–58, 2018.

- [46] X. Li, V. Strezov, and T. Kan, "Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 110, pp. 79–87, 2014.
- [47] E. Arenas, Z. Zapata, A. Jos, and D. A. Camargo-trillos, "Biomass and Bioenergy CaCO₃ and air / steam effect on the gasification and biohydrogen performance of corn cob as received : Application in the Colombian Caribbean region," vol. 153, no. July, 2021.
- [48] N. Abdullah, F. Sulaiman, R. M. Taib, and M. A. Miskam, "Pyrolytic oil of banana (*Musa spp.*) pseudo-stem via fast process," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1657, 2015.
- [49] Universidad Nacional de Colombia, TEC SOL, and UPME Unidad de Planeación Minero Energética, "Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en colombia y su aprovechamiento," Bogotá D.C., 2018.
- [50] G. Su *et al.*, "Valorization of animal manure via pyrolysis for bioenergy: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 343, no. February, p. 130965, 2022.
- [51] A. Kuila and V. Sharma, *Principles and Applications of Fermentation Technology*, 1st ed. Beverly, USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2018.
- [52] A. P. C. Faaij, "Bio-energy in Europe: Changing technology choices," *Energy Policy*, vol. 34, no. 3, pp. 322–342, 2006.
- [53] M. Mandø, "4 - Direct combustion of biomass," in *Biomass combustion science, technology and engineering*, Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 61–83.
- [54] M. Won *et al.*, "Recent advances of thermochemical conversion processes for biorefinery," *Bioresour. Technol.*, vol. 343, no. August 2021, p. 126109, 2022.
- [55] A. M. Elgarahy, A. Hammad, D. M. El-sherif, M. Abouzid, M. S. Gaballah, and K. Z. Elwakeel, "Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis : A conceptual review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 6, p. 106503, 2021.
- [56] S. Van Loo and J. Koppeja, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan, 2008.
- [57] M. Kaltschmitt, N. J. Themelis, L. Y. Bronicki, S. Lennart, and L. A. Vega, *Renewable Energy Systems*. Nueva York: Springer, 2013.
- [58] P. Roy and G. Dias, "Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. May 2016, pp. 59–69, 2017.
- [59] E. Thorin *et al.*, *STATE OF THE ART IN THE WASTE TO ENERGY AREA Technology and Systems*, no. May. 2011, pp. 1–79.

- [60] P. A. Brownsort, "Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability," *Biomass*, p. 38, 2009.
- [61] A. Nosakhare, P. U. Okoye, B. Gunes, and H. T. L. Al, "Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: A comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 159, pp. 323–344, 2022.
- [62] A. Krishna, S. Sree, V. Vuppaladadiyam, and A. Awasthi, "Biomass pyrolysis : A review on recent advancements and green hydrogen production," *Bioresour. Technol.*, vol. 364, no. August, p. 128087, 2022.
- [63] J. A. Garcia-Nunez *et al.*, "Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review," *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 6, pp. 5751–5775, 2017.
- [64] J. De Wilde, "Gas-solid fluidized beds in vortex chambers," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 85, pp. 256–290, 2014.
- [65] J. O. Ighalo *et al.*, "Flash pyrolysis of biomass: a review of recent advances," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 24, no. 8, pp. 2349–2363, 2022.
- [66] H. Shahbeik *et al.*, "Synthesis of liquid biofuels from biomass by hydrothermal gasification : A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, no. June, p. 112833, 2022.
- [67] A. Kushwah, T. R. Reina, and M. Short, "Modelling approaches for biomass gasifiers : A comprehensive overview," *Sci. Total Environ.*, vol. 834, no. March, p. 155243, 2022.
- [68] F. B. C. Mandl, I. Obrenberger, "Updraft- Fixed Bed gasification of Softwood Bellets: Mathematical Modelling and Comparison with experimental data," *Eur. biomass Conf. Exhib.*, no. July, pp. 1–9, 2009.
- [69] N. S. Barman, S. Ghosh, and S. De, "Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier - A realistic model including tar," *Bioresour. Technol.*, vol. 107, pp. 505–511, 2012.
- [70] K. Qin, P. A. Jensen, W. Lin, and A. D. Jensen, "Biomass gasification behavior in an entrained flow reactor: Gas product distribution and soot formation," *Energy and Fuels*, vol. 26, no. 9, pp. 5992–6002, 2012.
- [71] P. Mckendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," vol. 83, no. July 2001, pp. 47–54, 2002.

- [72] M. M. Uddin and M. M. Wright, "Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances," *Phys. Sci. Rev.*, 2022.
- [73] C. A. Sevillano, A. A. Pesantes, E. Peña Carpio, E. J. Martínez, and X. Gómez, "Anaerobic digestion for producing renewable energy-the evolution of this technology in a new uncertain scenario," *Entropy*, vol. 23, no. 2, pp. 1–23, 2021.
- [74] G. Náthia-Neves, M. Berni, G. Dragone, S. I. Mussatto, and T. Forster-Carneiro, "Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 2033–2046, 2018.
- [75] A. Tiwary, I. D. Williams, D. C. Pant, and V. V. N. Kishore, "Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorisation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 883–901, 2015.
- [76] Preethi, M. Gunasekaran, G. Kumar, O. P. Karthikeyan, S. Varjani, and J. Rajesh Banu, "Lignocellulosic biomass as an optimistic feedstock for the production of biofuels as valuable energy source: Techno-economic analysis, Environmental Impact Analysis, Breakthrough and Perspectives," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 24, p. 102080, 2021.
- [77] S. Manikandan, S. Vickram, R. Sirohi, and R. Subbaiya, "Critical review of biochemical pathways to transformation of waste and biomass into bioenergy," *Bioresour. Technol.*, vol. 372, no. December 2022, p. 128679, 2023.
- [78] K. Kucharska, P. Rybarczyk, I. Hołowacz, R. Łukajtis, M. Glinka, and M. Kamiński, "Pretreatment of lignocellulosic materials as substrates for fermentation processes," *Molecules*, vol. 23, no. 11, pp. 1–32, 2018.
- [79] B. Volynets, F. Ein-Mozaffari, and Y. Dahman, "Biomass processing into ethanol: Pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing," *Green Process. Synth.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–22, 2017.
- [80] H. Jørgensen, J. Vibe-Pedersen, J. Larsen, and C. Felby, "Liquefaction of lignocellulose at high-solids concentrations," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 96, no. 5, pp. 862–870, 2007.
- [81] A. Wiese, "Biomass Combustion for Electricity Generation," in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Nueva York: Springer, 2012, pp. 1231–1268.
- [82] M. Tahmid Islam, J. L. Klinger, and M. Toufiq Reza, "Evaluating combustion

- characteristics and combustion kinetics of corn stover-derived hydrochars by cone calorimeter,” *Chem. Eng. J.*, vol. 452, no. P2, p. 139419, 2023.
- [83] A. M. Shoaib, R. A. El-Adly, M. H. M. Hassanean, A. Youssry, and A. A. Bhran, “Developing a free-fall reactor for rice straw fast pyrolysis to produce bio-products,” *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 4, pp. 1305–1311, 2018.
- [84] C. A. Mullen, A. A. Boateng, N. M. Goldberg, I. M. Lima, D. A. Laird, and K. B. Hicks, “Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 1, pp. 67–74, 2010.
- [85] E. V. Gonçalves, F. L. Seixas, L. R. de Souza Scandiuzzi Santana, M. H. N. O. Scaliante, and M. L. Gimenes, “Economic trends for temperature of sugarcane bagasse pyrolysis,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 95, no. 7, pp. 1269–1279, 2017.
- [86] A. E. Atabani *et al.*, “A state-of-the-art review on spent coffee ground (SCG) pyrolysis for future biorefinery,” *Chemosphere*, vol. 286, no. April 2021, 2022.
- [87] S. Fukuda, “Pyrolysis investigation for bio-oil production from various biomass feedstocks in Thailand,” *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 215–224, 2015.
- [88] A. L. Maglinao, S. C. Capareda, and H. Nam, “Fluidized bed gasification of high tonnage sorghum, cotton gin trash and beef cattle manure: Evaluation of synthesis gas production,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 578–587, 2015.
- [89] M. Tańczuk, R. Junga, S. Werle, M. Chabiński, and Ziółkowski, “Experimental analysis of the fixed bed gasification process of the mixtures of the chicken manure with biomass,” *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 1055–1063, 2019.
- [90] D. Perondi *et al.*, “Steam gasification of poultry litter biochar for bio-syngas production,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 109, pp. 478–488, 2017.
- [91] M. A. Hamad, A. M. Radwan, D. A. Heggo, and T. Moustafa, “Hydrogen rich gas production from catalytic gasification of biomass,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1290–1300, 2016.
- [92] Y. Pang, S. Shen, and Y. Chen, “High Temperature Steam Gasification of Corn Straw Pellets in Downdraft Gasifier: Preparation of Hydrogen-Rich Gas,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 5, pp. 1333–1341, 2019.
- [93] G. Venkatesh, P. R. Reddy, and S. Kotari, “Generation of producer gas using coconut shells and sugar cane bagasse in updraft gasifier,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 9203–9209, 2017.

- [94] 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.*, vol. 92, no. 6, pp. 1977–1986, 2019.
- [95] W. A. Solís, J. A. Vel, S. Cardona, L. M. Orozco, L. G. Claudia, and L. A. Rios, "Valorization of banana residues via gasification coupled with electricity generation," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 44, no. January 2020, 2021.
- [96] G. G. Jankes, M. R. Trninić, M. S. Stamenić, T. S. Simonović, N. D. Tanasić, and J. M. Labus, "Biomass gasification with CHP production: A review of the state-of-the-art technology and near future perspectives," *Therm. Sci.*, vol. 16, no. SUPPL. 1, pp. 115–130, 2012.
- [97] J. Ahrenfeldt, T. P. Thomsen, U. Henriksen, and L. R. Clausen, "Biomass gasification cogeneration - A review of state of the art technology and near future perspectives," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, no. 2, pp. 1407–1417, 2013.
- [98] S. Jain, S. Jain, I. T. Wolf, J. Lee, and Y. W. Tong, "A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 142–154, 2015.
- [99] I. Rocamora, S. T. Wagland, R. Villa, E. W. Simpson, O. Fernández, and Y. Bajón-Fernández, "Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance," *Bioresour. Technol.*, vol. 299, no. September 2019, 2020.
- [100] P. S. Bandgar, S. Jain, and N. L. Panwar, "Biomass and Bioenergy A comprehensive review on optimization of anaerobic digestion technologies for lignocellulosic biomass available in India," *Biomass and Bioenergy*, vol. 161, no. May, p. 106479, 2022.
- [101] I. M. Nasir, T. I. Mohd Ghazi, and R. Omar, "Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review," *Eng. Life Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 258–269, 2012.
- [102] R. Boopathy and M. Mariappan, "Anaerobic digestion of coffee pulp," *Asian Environ.*, vol. 8, no. 4, pp. 21–23, 1986.
- [103] S. Suhartini *et al.*, "Sustainable strategies for anaerobic digestion of oil palm empty fruit bunches in Indonesia: a review," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 41, no. 11, pp.

- 2044–2096, 2022.
- [104] V. C. Kalia, V. Sonakya, and N. Raizada, “Anaerobic digestion of banana stem waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 73, no. 2, pp. 191–193, 2000.
- [105] Q. Yan *et al.*, “Cow manure as a lignocellulosic substrate for fungal cellulase expression and bioethanol production,” *AMB Express*, vol. 8, no. 1, 2018.
- [106] G. W. Asrat, S. Gizachew, S. C. Bhagwan, and ravanshi, “Bio-ethanol production from poultry manure at Bonga Poultry Farm in Ethiopia,” *African J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 435–440, 2013.
- [107] X. Jin, J. Ma, J. Song, and G. Q. Liu, “Promoted bioethanol production through fed-batch semisimultaneous saccharification and fermentation at a high biomass load of sodium carbonate-pretreated rice straw,” *Energy*, vol. 226, p. 120353, 2021.
- [108] D. He *et al.*, “High-solids saccharification and fermentation of ball-milled corn stover enabling high titer bioethanol production,” *Renew. Energy*, vol. 202, no. November 2022, pp. 336–346, 2023.
- [109] Y. Jugwanth, Y. Sewsynker-Sukai, and E. B. Gueguim Kana, “Valorization of sugarcane bagasse for bioethanol production through simultaneous saccharification and fermentation: Optimization and kinetic studies,” *Fuel*, vol. 262, no. August 2019, p. 116552, 2020.
- [110] I. S. Choi, S. G. Wi, S. B. Kim, and H. J. Bae, “Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 125, pp. 132–137, 2012.
- [111] M. Han, Y. Kim, S. W. Kim, and G. W. Choi, “High efficiency bioethanol production from OPEFB using pilot pretreatment reactor,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 86, no. 12, pp. 1527–1534, 2011.
- [112] E. L. de Souza, N. Sellin, C. Marangoni, and O. Souza, “The Influence of Different Strategies for the Saccharification of the Banana Plant Pseudostem and the Detoxification of Concentrated Broth on Bioethanol Production,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 183, no. 3, pp. 943–965, 2017.
- [113] F. Kabir *et al.*, “Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover q,” *Fuel*, vol. 89, pp. S20–S28, 2010.
- [114] S. Satchatippavarn, E. Martinez-Hernandez, M. Y. Leung Pah Hang, M. Leach, and

- A. Yang, "Urban biorefinery for waste processing," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 107, pp. 81–90, 2016.
- [115] R. L. Bain *et al.*, "Biopower Technical Assessment: State of the Industry and Technology," *Renew. Energy*, no. March, 2003.
- [116] M. M. Wright, D. E. Daugaard, J. A. Satrio, and R. C. Brown, "Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels," *Fuel*, vol. 89, no. SUPPL. 1, pp. S2–S10, 2010.
- [117] M. A. Najm and G. Ayoub, "An optimisation model for regional integrated solid waste management I . Model formulation," *Waste Manag. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 37–45, 2002.
- [118] J. D. Murphy and N. M. Power, "A technical, economic and environmental comparison of composting and anaerobic digestion of biodegradable municipal waste," *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 41, no. 5, pp. 865–879, 2006.
- [119] M. Patel, X. Zhang, and A. Kumar, "Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1486–1499, 2016.
- [120] J. Aburto, E. Martínez-Hernández, and M. A. Amezcua-Allieri, "Techno-Economic Feasibility of Steam and Electric Power Generation from the Gasification of Several Biomass in a Sugarcane Mill," *Bioenergy Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 1777–1786, 2022.
- [121] U.S. Bureau of Labor Statistics, "Average energy prices for the United States," *Midwest Information Office*, 2023. [Online]. Available: https://www.bls.gov/regions/midwest/data/averageenergyprices_selectedareas_table.htm.
- [122] M. Talmadge *et al.*, "Techno-economic analysis for co-processing fast pyrolysis liquid with vacuum gasoil in FCC units for second-generation biofuel production," *Fuel*, vol. 293, p. 119960, 2021.
- [123] Global Petrol Prices, "Ethanol prices," *Global Petrol Prices*, 2023. [Online]. Available: https://www.globalpetrolprices.com/ethanol_prices/.
- [124] J. Moncada B, V. Aristizábal M, and C. A. Cardona A, "Design strategies for sustainable biorefineries," *Biochem. Eng. J.*, vol. 116, pp. 122–134, 2016.
- [125] M. A. Najm, M. El-fadel, G. Ayoub, and M. El-taha, "An optimisation model for

- regional integrated solid waste management II . Model application and sensitivity analyses,” *Waste Manag. Res. ISWA.*, vol. 20, no. May 2014, pp. 46–50, 2002.
- [126] J. P. Eason and S. Cremaschi, “A multi-objective superstructure optimization approach to biofeedstocks-to-biofuels systems design,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 63, pp. 64–75, 2014.
- [127] R. Hakawati, B. M. Smyth, G. McCullough, F. De Rosa, and D. Rooney, “What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?,” *Appl. Energy*, vol. 206, no. May, pp. 1076–1087, 2017.