

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Identificación de etapas a optimizar en la gasificación
de biomasa para producción de energía sostenible
mediante la aplicación del análisis exergético de ciclo
de vida (ELCA)**

Cristian Giovanni Sucerquia Serna

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo
Medellín, Colombia

2022

**Identificación de etapas a optimizar en la gasificación
de biomasa para producción de energía sostenible
mediante la aplicación del análisis exergético de ciclo
de vida (ELCA)**

Cristian Giovanni Sucerquia Serna

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

PhD., Víctor Hugo Grisales Díaz

Codirector (a):

PhD., Jaime Ignacio Vélez Upegui

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo

Medellín, Colombia

2022

A mi familia.

Agradecimientos

A mis padres Lindelia y Germán, por todos los valores inculcados a lo largo de mi vida, por el amor brindado y por siempre estar allí.

A Víctor porque más que un director, uno de mis mejores amigos, siempre escuchando, debatiendo o sencillamente riendo...obvio por la paciencia también.

Al profesor Jaime porque a pesar de la distancia, estuvo allí dispuesto en cada momento.

A Liseth por su apoyo incondicional, la motivación brindada, su maravillosa compañía y todo el cariño demostrado en cada paso del camino recorrido.

A los profesores Héctor I. Velásquez y Natalia A. Cano de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por facilitarme la licencia educativa del software Umberto® LCA+.

Resumen

Identificación de etapas a optimizar en la gasificación de biomasa para producción de energía sostenible mediante la aplicación del análisis exergético de ciclo de vida (ELCA)

El método de Análisis Exergético de Ciclo de Vida (ELCA) es implementado, de la cuna a la puerta, para evaluar el aprovechamiento de tallos de café proveniente del departamento de Caldas - Colombia, como combustible en un proceso de gasificación que utiliza tecnología de lecho fijo. Esta biomasa ha sido utilizada por generaciones como combustible en fogones de leña artesanales en distintas fincas cafeteras, práctica que se ha ido reemplazando paulatinamente debido a la naturaleza contaminante de los gases generados y los efectos nocivos evidenciados en la salud.

El proceso de gasificación de la biomasa fue simulado en Aspen Plus® y en el cual, se obtuvo una composición del gas de síntesis acorde con resultados experimentales y teóricos hallados en la literatura y que incluye H₂ (17,07%), CO (18,62%), CO₂ (15,66%), CH₄ (5,37%) y N₂ (43,28%) con un poder calorífico de 6.119 kJ/Nm³. Por otra parte, el Análisis de Ciclo de Vida se llevó a cabo en el software Umberto® LCA cuyos resultados, junto al Análisis Exergético permitieron determinar, para una distancia de transporte de biomasa de 30 km, la etapa con menor eficiencia exergética, la generación de energía en el motor de combustión interna (21,404%), y una Demanda Acumulada de Exergía (CExD) para la etapa con mayor consumo de recursos de 196,3714 MJ_{eq}, correspondiente a la Generación eléctrica (gasificador y motor); una vez se alcanzan los 100 km, la etapa con mayor consumo recursos pasa a ser el transporte.

Palabras clave: exergía, gasificación de biomasa, tallos de café, ciclo de vida, análisis exergético, demanda de exergía acumulada, energía renovable.

Abstract

Identification of stages to be optimized in biomass gasification for sustainable energy production through the application of exergetic life cycle assessment (ELCA)

The Exergetic Life Cycle Analysis (ELCA) method is implemented, from cradle to gate, to evaluate the use of coffee stems from the department of Caldas - Colombia, as fuel in a gasification process using fixed bed technology. This biomass has been used for generations as fuel in artisanal wood stoves in different coffee farms, a practice that has been gradually replaced due to the polluting nature of the gases generated and the harmful effects on health.

The biomass gasification process was simulated in Aspen Plus® and the synthesis gas composition obtained was in accordance with experimental and theoretical results found in the literature, including H₂ (17,07%), CO (18,62%), CO₂ (15,66%), CH₄ (5,37%) and N₂ (43,28%) with a calorific value of 6.119 kJ/Nm³. In addition, the Life Cycle Analysis was carried out in Umberto® LCA software, whose results, combined with the Exergetic Analysis, allowed establishing, for a biomass transport distance of 30 km, the stage with the lowest exergy efficiency, the generation of energy in the internal combustion engine (21,404%), and a Cumulative Exergy Demand (CExD) for the stage with the highest resource consumption of 196,3714 MJ_{eq}, corresponding to electricity generation (gasifier and engine); once 100 km is reached, the stage with the highest resource consumption becomes transportation.

Keywords: exergy, biomass gasification, coffee stems, life cycle, Exergetic analysis, cumulative exergy demand, renewable energy.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Lista de símbolos y abreviaturas	XIII
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	5
1.1 Energía y sostenibilidad	5
1.2 Impactos ambientales de energías renovables.....	6
1.3 LCA como método de evaluación ambiental.....	8
1.4 Pregunta de investigación	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
2. Marco teórico	11
2.1 La biomasa como fuente de energía	11
2.2 Proceso de gasificación.....	13
2.2.1 Tecnologías de gasificación.....	14
2.3 Potencial de biomasa residual en Colombia	15
2.3.1 Biomasa residual del cultivo de café en Colombia	17
2.3.2 Biomasa residual del cultivo de café en Caldas	19
2.4 Análisis de ciclo de vida	20
2.4.1 Definición.....	20
2.4.2 Estructura del LCA.....	21
2.5 Exergía.....	23
2.6 Análisis exergético	24
2.7 ELCA.....	25
2.7.1 Demanda de exergía acumulada (CExD).....	25
2.8 Estado del arte	27
2.8.1 Gasificación de biomasa en Colombia	27
2.8.2 ELCA	30
3. Metodología	39
3.1 Área de estudio	40

X Identificación de etapas a optimizar en la gasificación de biomasa para producción de energía sostenible mediante la aplicación del análisis exergético de ciclo de vida (ELCA)

3.2	Definición del objetivo y alcance	40
3.3	Asignación Física (Physical Allocation)	42
3.4	Análisis de inventario	42
3.4.1	Gasificación.....	42
3.4.2	Germinación.....	51
3.4.3	Cultivo y cosecha	52
3.4.4	Zoqueo y transporte	54
3.4.5	Astillada de tallos	55
3.4.6	Generación de energía.....	55
3.5	Análisis exergético	57
3.6	Evaluación de Impacto.....	59
3.6.1	Eficiencia exergética	59
4.	Resultados	61
4.1	Composición del syngas	61
4.2	Huella de carbono.....	63
4.3	ELCA	64
4.4	Demanda de Exergía Acumulada (CExD).....	66
4.5	Evaluación de distintos escenarios en transporte.....	73
5.	Conclusiones y recomendaciones	75
5.1	Conclusiones y recomendaciones.....	75
5.2	Limitaciones y discusiones.....	77
A.	Anexo: Potencial de residuos de tallos de café en Caldas 2020	79
B.	Anexo: Simulación de la gasificación de tallos de café en Umberto	83
C.	Anexo: Balances de materia, energía y exergía.....	85
	Referencias consultadas	89

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1 Procesos y productos en la conversión termoquímica de la biomasa	12
Figura 2-2 Tecnologías de gasificación en función de los procesos de transporte	14
Figura 2-3 Biomasa residual del sector agrícola en Colombia	16
Figura 2-4 Sistemas de renovación de cafetales	18
Figura 2-5 Potencial de tallos de café en Caldas 2020	20
Figura 2-6 Estructura del análisis de ciclo de vida	22
Figura 3-1 Límites del sistema en estudio.....	41
Figura 3-2 Simulación del proceso de gasificación en Aspen Plus V11®.....	43
Figura 3-3 Simulación de la etapa de secado	45
Figura 3-4 Simulación de la etapa de pirólisis.....	46
Figura 3-5 Simulación de separación de volátiles y descomposición del char.....	47
Figura 3-6 Simulación de precalentadores.....	48
Figura 3-7 Simulación de mezcladores de aire y de calor	48
Figura 3-8 Simulación de las etapas de combustión y reducción.....	50
Figura 4-1 Comparación de la composición de syngas de tallos de café simulado con la literatura	61
Figura 4-2 Variación porcentual de la composición del gas entre el presente trabajo y otros hallados en la literatura	62
Figura 4-3 Huella de carbono para tres escenarios de desplazamiento.....	63
Figura 4-4 CExD total de cada proceso (MJ-eq)	69
Figura 4-5 Aporte de las categorías CExD a los mayores contribuyentes.....	70
Figura 4-6 Categorías de CExD con mayor agotamiento de recursos	71
Figura 4-7 CExD total para cada Fase.....	72
Figura 4-8 Porcentajes de contribución CExD por etapa para 30km, 60km y 100km	74
Figura 5-1 Diagrama de simulación de la gasificación de tallos de café en Umberto	84

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1 Clasificación de la biomasa y ejemplos.....	11
Tabla 2-2 Producción anual y poder calorífico de algunos residuos de café	17
Tabla 2-3 Categorías de evaluación de impacto	26
Tabla 3-1 Principales datos demográficos de Manizales y Chinchiná	40
Tabla 3-2 Composición fisicoquímica de los tallos de café	44
Tabla 3-3 Composición molar del gas de síntesis a la salida del gasificador	50
Tabla 3-4 Inventario de ciclo de la vida de la germinación (1,075 plántulas/h).....	52
Tabla 3-5 Inventario de ciclo de la vida entrada a la etapa de cultivo y la cosecha.....	53
Tabla 3-6 Inventario de ciclo de la vida salida etapa de cosecha.....	54
Tabla 3-7 Composición molar del gas de síntesis a la entrada del motor.....	56
Tabla 3-8 Exergías químicas estándar y entalpías de formación	59
Tabla 4-1 Balances exergéticos del ciclo de vida del proceso	64
Tabla 4-2 Consolidado del inventario de CExD.....	68
Tabla 4-3 Variación de CExD para diferentes distancias de transporte de tallos	73
Tabla 5-1 Potencial de residuos de tallos de café en Caldas 2020	80
Tabla 5-2 Balances de exergía	86

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidades
b	Consumo acumulado de exergía primaria por unidad de energía	kJ/kg
ELX	Electricidad Generada	
Ex	Exergía	kJ
ex	Exergía específica	kJ/kg
H	Entalpía	kJ
h	Entalpía específica	kJ/kg
I	Irreversibilidad	kJ
M	Masa	kg
Pe_{ff}	Eficiencia energética del motor	
S	Entropía	kJ/K
s	Entropía específica	kJ/kg K
V	Volumen	m^3
X_i	Fracción Molar de i	
Y_i	Fracción Molar en el gas de i	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
β	Consumo neto inmediato de exergía primaria
η	Eficiencia exergética
ΔG^0	Energía libre estándar de formación a temperatura normal

Subíndices

Subíndice	Término
-----------	---------

<i>ph</i>	Física
<i>ch</i>	Química
<i>el</i>	Elemento
<i>in</i>	Entrada
<i>out</i>	Salida
<i>i</i>	Componente i
<i>biom</i>	Biomasa
<i>fa</i>	Flujo de aire
<i>gas</i>	Gas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

<i>CExD</i>	Cumulative Exergy Demand
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
<i>EA</i>	Exergetic Analysis
<i>ELCA</i>	Análisis Exergético de Ciclo de Vida
<i>EPM</i>	Empresas Públicas de Medellín
<i>FNC</i>	Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
<i>FNCER</i>	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
<i>ICO</i>	International Coffee Association
<i>IGCC</i>	Integrated gasification combined cycle
<i>INDEPAZ</i>	Instituto de Estudios para el Desarrollo de la Paz
<i>IPCC</i>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<i>IRENA</i>	Agencia Internacional de Energías Renovables
<i>LCA</i>	Análisis de Ciclo de Vida
<i>LCIA</i>	Life cycle inventory analysis
<i>LHV</i>	Low Heating Value
<i>NAMA</i>	Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible

Abreviatura Término

<i>PCH</i>	Pequeñas Centrales Hidroeléctricas
<i>PND</i>	Plan Nacional de Desarrollo
<i>SCGT</i>	Semi-Closed Gas Turbine
<i>SIN</i>	Sistema Interconectado Nacional
<i>UE</i>	Unión Europea
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero-Energética

Introducción

La rápida recuperación de los mercados energéticos luego de la pandemia por COVID-19, las consecuencias de la reciente invasión de Rusia a Ucrania y diversos factores económicos y geopolíticos ocurridos en los últimos años, han desencadenado en una crisis energética mundial sin precedentes, comparada incluso con la Crisis del Petróleo de 1970. A diferencia de la Crisis del Petróleo en donde las mayores afectaciones se relacionaron con un solo combustible, en 2022 los impactos se han observado en todos los combustibles fósiles, lo que ha llevado a la Agencia Internacional de Energía (EIA por sus siglas en inglés) a catalogar este evento histórico como la verdadera “primera crisis energética global” [1].

En consecuencia, los precios del petróleo, el gas natural y las tarifas de energía eléctrica han aumentado y superado registros históricos, situación ante la cual gran parte de las naciones han respondido desplegando políticas para acelerar la transición energética hacia tecnologías con fuentes de energías renovables. La motivación principal de este despliegue es el gran potencial que poseen estas fuentes limpias en la disminución de los precios y la dependencia de los combustibles fósiles a mediano y largo plazo, incluso bajo escenarios de incertidumbre sobre la velocidad de expansión y cumplimiento de las metas de generación de energía establecidas [2].

Informes recientes muestran como a finales de 2021, la participación de las energías renovables en la generación de electricidad mundial fue del 28,7%, un aumento de aproximadamente 7% con respecto al periodo anterior, liderado por las energías eólica y fotovoltaica con una participación de 90% de este crecimiento [3]. Por su parte, para el mismo año Colombia contaba con una participación del 71,82% (19,37GW) en energías renovables, además de poseer reservas probadas de petróleo y gas natural para al menos 6,3 y 7,7 años respectivamente [4], para intentar garantizar su seguridad energética.

A pesar de lo mencionado el país no es ajeno a la realidad global y las fluctuaciones en los precios de los combustibles fósiles se traducen en afectaciones a la economía nacional

que influyen en los costos de los alimentos, los combustibles y el transporte. En este sentido, en Colombia, el gobierno nacional ha incentivado el desarrollo y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER), así como el uso eficiente de los recursos energéticos a través de promulgación de la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021 y su posterior reglamentación, principalmente, a cargo de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

De acuerdo con la Ley 1715 de 2014 las FNCER de interés para el país incluyen las fuentes eólicas, la solares, la geotérmicas, centrales minihidráulicas, los mares y la energía a partir de la biomasa. En el caso de esta última, se identifica un potencial energético considerable proveniente de residuos agroindustriales como el bagazo, la cascarilla de arroz, los tallos de café y otros tipos de biomasa obtenidos de diferentes procesos productivos en la agroindustria colombiana, este potencial ha sido estimado por la UPME y publicado en el documento Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia [5].

El interés en el aprovechamiento energético de la biomasa no ha sido constante a través de los años, en gran parte debido a la disponibilidad de recursos origen fósil. Sin embargo, la inestabilidad de los mercados energéticos y la situación ambiental mundial han renovado el interés por procesos que usen este tipo de recurso, el cual es considerado un combustible neutro en carbono [6]. Para una mayor adopción de estas tecnologías [8], se requieren de estudios que disminuyan la incertidumbre o los impactos ambientales generados en su proceso de implementación. Para ello, las ineficiencias exergéticas de algunos de procesos a lo largo de su cadena productiva deben ser evaluadas correctamente para que no se conviertan en eslabones débiles que eviten su posicionamiento en el mercado.

Por lo tanto, estos estudios requieren de la identificación de las etapas susceptibles a ser mejoradas y resulta pertinente evaluar la implementación de este tipo de tecnologías teniendo en cuenta tanto el proceso de generación de energía, como las etapas previas desde el cultivo, transporte y preparación de la biomasa para identificar impactos ambientales asociados y etapas con potenciales de mejora. Una de las metodologías que nos permite evaluar las diferentes etapas de una cadena productiva es el análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés), pero si además de identificar los impactos ambientales, se desea determinar posibles ineficiencias, es necesario complementarla con

algún tipo de análisis energético que sea compatible con el agotamiento de los recursos y la eficiencia energéticas de los procesos.

El caso de estudio seleccionado para el desarrollo de este trabajo de investigación es el aprovechamiento de residuos del proceso de producción de café, específicamente los tallos resultantes de la renovación de cafetales en el departamento de Caldas. Este departamento colombiano, reconocido en el año 2019 como la zona con la más alta productividad de café en el país [7] con 55.322 t/año de producto y 60.524 ha/año cultivadas [8] de las cuales se ha estimado un potencial de residuos de 158.324 t/año con una participación de 83% originada en tallos. Este potencial de tallos en masa representa un potencial energético de 782,74 GWh/año, es decir, el 97,515% del consumo de energía los usuarios en Caldas para 2020 para el mercado regulado y no regulado [9].

Los tallos actualmente son quemados principalmente para la preparación de alimentos, pero esta actividad ha sido catalogada por la OMS como una posible causante de enfermedades como accidentes cerebrovasculares, cardiopatía isquémica, Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) y cáncer de pulmón, principalmente en niños y mujeres. Adicionalmente, de acuerdo con el NAMA de Café en Colombia [10], la quema de tallos es una de las prácticas con mayor potencial de generación de gases de efecto invernadero con un estimado de 6,5 t_{CO₂}/ha quemada, valor superior al estimado para la producción de carbón vegetal 3,2 t_{CO₂}/ha e inclusive al emitido a través de equipos con motores de combustión interna que emiten 0,1 t_{CO₂}/ha[11]. Por lo que se han creado programas gubernamentales para su sustitución [10].

Con el fin de identificar e estimar los impactos ambientales generados e identificar las etapas que permitan reducirlos, la presente investigación busca identificar las etapas susceptibles de optimización del proceso de gasificación de los tallos café [11], a partir de la combinación de un análisis de ciclo de vida y un análisis exergético.

Como etapa inicial se procede a simular los procesos químicos ocurridos durante la gasificación de biomasa usando la herramienta Aspen Plus® V11. La selección de los datos del proceso se hará a partir de la literatura existente, con el fin de que los resultados obtenidos en esta investigación puedan ser comparados con resultados experimentales y sean consistentes con el tipo de tecnología y biomasa seleccionada. A continuación, se realizará el análisis de ciclo de vida “de la cuna a la puerta” en el software Umberto® LCA+,

en el que se incluye las etapas de germinación de la plántula, cultivo, cosecha, renovación (zoqueo), transporte, astillado, gasificación, limpieza del gas de síntesis y la generación de energía eléctrica. Finalmente se complementan los balances exergéticos y el cálculo de eficiencias exergéticas, con el fin de identificar cuáles son las etapas con mayor exergía destruida o en las cuales haya un mayor desperdicio o no aprovechamiento de los recursos.

1. Planteamiento del problema

1.1 Energía y sostenibilidad

La energía es uno de los factores estratégicos más importantes para el desarrollo de cualquier nación; actividades como la producción de alimentos, el comercio, la educación, la seguridad y el transporte, además de la atención de necesidades básicas de la población (agua potable, salud y servicios en general) están ligados a su disponibilidad. Desde la Primera Revolución Industrial, el acceso a la energía se ha convertido en el pilar fundamental de la prosperidad y el crecimiento económico en el mundo [12], consolidándose como uno de los principales intereses de las políticas nacionales e internacionales de los gobiernos.

La demanda mundial ha sido atendida principalmente a partir de tecnologías que utilizan combustibles de origen fósil como el petróleo, carbón o gas natural. En 1971 este tipo de generación representaba el 74% de la matriz eléctrica mundial, es tal la dependencia de estos combustibles que, en los siguientes 48 años, solo se ha reducido en 10%, y ha llegado al 64% de participación [13]. Esta reducción tiene origen, entre otros aspectos, en los compromisos adquiridos por los gobiernos en las Conferencias sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas que iniciaron en 1972, derivando en la Declaración de Estocolmo, y evolucionando a los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) incluidos en la Agenda 2030 del año 2015.

La reducción de la generación de energía eléctrica y calor a partir de combustibles fósiles sigue siendo un reto importante en la consecución de los ODS para las naciones. De acuerdo con Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2019, el sector energético aportaba un 34% de las emisiones de gases de efecto invernadero (20 GtCO₂eq), de las cuales 14 GtCO₂eq correspondían a generación de energía eléctrica y calor [14]. En este sentido, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) establece que, para alcanzar el objetivo de un máximo incremento

permisible de 1,5°C en la temperatura global, es necesario, entre otras acciones, que la cuota de participación de energías renovables en la matriz energética pase de un 14% (2019) a un 40% para el 2030 [15].

1.2 Impactos ambientales de energías renovables

En Colombia existen compromisos para el cumplimiento de los ODS a través del Plan Nacional de Desarrollo (PND) promulgado a partir de la Ley 1955 de 2019. En relación con el ODS 7 el país ha establecido como metas a 2030: garantizar que el 100% de los colombianos cuenten con acceso a energía eléctrica, aumentar la participación de energías renovables en la matriz de generación, duplicar la tasa de mejora en la eficiencia energética, invertir y facilitar el acceso a la investigación y tecnologías en energías limpias y finalmente ampliar y mejorar la infraestructura energética existente [16].

Los avances en la inclusión de energías renovables en el país son destacables, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) [17] informa que en 2020 el 71,82% de la capacidad instalada en Colombia (19,37GW) correspondía a energías renovables a través del aprovechamiento de agua (67,42%), viento (2,64%), radiación solar (0,59%), bagazo (0,73%) y biogás (0,02%). Sumado a esto se prevé un crecimiento drástico en los próximos años en la participación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) que alcanzaría entre 12 – 20 % para 2050 [18].

En el caso del aprovechamiento del material orgánico para la generación energética, existen diferentes técnicas como: gasificación, pirólisis, combustión, producción de bioalcoholes o biogases. Sin embargo, estas tecnologías tienen poca implementación a gran escala en el país [8]. Por lo tanto, se requieren estudios que permitan reducir los riesgos en la inversión o minimizar los impactos ambientales generados. Para esto, es necesario identificar las etapas que conlleven a ineficiencias y contrarrestarlos, previo a su etapa de ejecución. Las ineficiencias de algunos de estos procesos a lo largo de su cadena productiva deben ser evaluadas correctamente para que no se conviertan en eslabones débiles que eviten su posicionamiento en el mercado.

A continuación, se mencionan algunos impactos generados en métodos de producción de energía con fuentes renovables, así como en sus etapas previas y posteriores a la operación:

- Con respecto a las centrales hidroeléctricas, se observan con frecuencia en las zonas con construcción de embalses afectaciones a la fauna, deforestación, vertimiento de residuos, pérdida de caudales, escasez hídrica y pérdidas hidráulicas. Por ejemplo, los autores [19] mencionan el caso de la Pequeña Central Hidroeléctrica PCH El Edén (Caldas) en el que CORPOCALDAS informa la disminución de caudal de la quebrada La Balastrea de 5 a 1,5 l/s, el secamiento de 19 quebradas y afectaciones a otras 34 en el área de influencia. Así mismo, la deforestación para la construcción de zonas de depósitos, vías de acceso y otras instalaciones.
- A nivel global en áreas de construcción y operación de parques eólicos, se ha identificado erosión, altos niveles de ruido, pérdida de cobertura vegetal, migración de fauna, y mortalidad de fauna debido electrocución o colisiones con las aspas de los aerogeneradores, así como el aumento de la temperatura local [20]. Esta situación es de especial interés para Colombia que de acuerdo la UPME [21] al primer trimestre de 2022 cuenta con 20 proyectos eólicos vigentes con una potencia de 3699,6 MW.
- Los efectos sociales causados por proyectos eólicos incluyen desplazamientos de poblaciones y afectación directa a su cultura. Según el estudio presentado en 2019 por INDEPAZ, el grupo empresarial Empresas Públicas de Medellín (EPM) con el Parque Eólico Jepirachi generó evidentes afectaciones en las comunidades Wayúu. Entre las afectaciones, destacan una operación del parque sin establecer ninguna relación con las comunidades Wayúu, la decisión de entregar solo beneficios en especie alegando incapacidad en la comunidad de manejar dinero y finalmente una cláusula irregular en la cual se estableció cesión del territorio Wayúu al proyecto de forma indefinida, lo que implicaría un desplazamiento indefinido de las comunidades del territorio [22].
- Otros impactos incluyen: pasivos ambientales en los materiales de construcción utilizados, reemplazo de cultivos de primera necesidad alimentaria por cultivos energéticos, generación de gases de efecto invernadero en implementación de estas tecnologías y el no uso de territorios con potencial agrícola por cuenta de grandes campos de paneles solares o eólicos.

1.3 LCA como método de evaluación ambiental

Para evaluar estos impactos existen diferentes herramientas, entre las más utilizadas en la actualidad se encuentra el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) que permite cuantificar el uso de la energía y los impactos ambientales asociados a todas las etapas del sistema a lo largo de su vida útil; el LCA ha sido utilizado por la comunidad científica para evaluar entre otros, sistemas de generación con fuentes de energía renovable tal como la hidráulica [23]–[26], eólica [27]–[32], fotovoltaica [33]–[36] y de biomasa [37]–[41]. Pero aparte del LCA existe otra herramienta que nos permite, a partir de flujos y pérdidas de exergía, identificar los elementos o etapas del sistema con las mayores ineficiencias termodinámicas; y asimismo ubicar, cuantificar y conocer las causas de estas ineficiencias [42], esta es el análisis exergético.,

Ahora bien, una metodología que posibilite el uso de ambas herramientas de análisis (LCA y análisis exergético) en simultaneo, permitiría ampliar la visión global de cualquier proceso buscando evitar el agotamiento de las reservas y pérdidas de exergía al ambiente, los cuales son indicadores de ineficiencias de los procesos o productos. Es allí donde la unión de los dos tipos de análisis mencionados anteriormente termina decantando a un método llamada Análisis Exergético del Ciclo de Vida (ELCA), eficaz en la identificación de irreversibilidades a lo largo de la vida del sistema y aunando esfuerzos para reducción de estas ineficiencias [43]. No es fácil obtener esta información con otro tipo de análisis energético o LCA individualmente, pero su unión ayuda a evaluarla de forma global e inclusive posibilita comparar su eficiencia energética con otros procesos [43], [44].

1.4 Pregunta de investigación

Con lo mencionado se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿se pueden identificar etapas optimizables, haciendo uso de herramientas combinadas de análisis de ciclo de vida y análisis exergético para algunos tipos de generación de energía eléctrica, y de ser así, este tipo de herramientas puede ser aplicable a escenarios locales como la gasificación de biomasa en el departamento de Caldas?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Identificar las etapas con mayor potencial de mejora, en los procesos de producción de energías renovables a partir de biomasa, haciendo uso del análisis exergético del ciclo de vida.

1.5.2 Objetivos específicos

- Simular las cadenas y los procesos de producción de energía eléctrica a partir de la gasificación de la biomasa, mediante software de simulación
- Describir los procesos productivos e impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de la energía eléctrica producida a partir de biomasa
- Aplicar un modelo de análisis exergético del ciclo de vida (ELCA) a la producción sostenible de energía eléctrica a partir de biomasa para la selección de las etapas óptimas de mejora

2. Marco teórico

2.1 La biomasa como fuente de energía

El término biomasa se utiliza para referirse a todo tipo de material orgánico derivado de las plantas e incluye vegetación terrestre, vegetal y desechos orgánicos. La biomasa puede provenir de gran cantidad de fuentes y según su origen puede clasificarse en 4 categorías: biomasa leñosa, biomasa herbácea, biomasa frutal y mezclas y combinaciones. Adicionalmente, pueden ser clasificadas en biomásas primarias y residuos derivados de la biomasa (ver **Tabla 2-1**):

Tabla 2-1 Clasificación de la biomasa y ejemplos

Clasificación	Subclasificación	Ejemplos
Biomasa Primaria	Biomasa terrestre	Biomasa Forestal Pastos Cultivos energéticos Cultivos Herbáceos
	Biomasa acuática	Algas Plantas de agua
Residuos de Biomasa	Residuos municipales	Desechos sólidos municipales Desechos de alcantarillado Gas de relleno sanitarios
	Residuos agrícolas	Estiércol Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos forestales	Corteza, hojas y residuos del suelo
	Residuos industriales	Madera de demolición y aserrín Aceites y grasas usadas

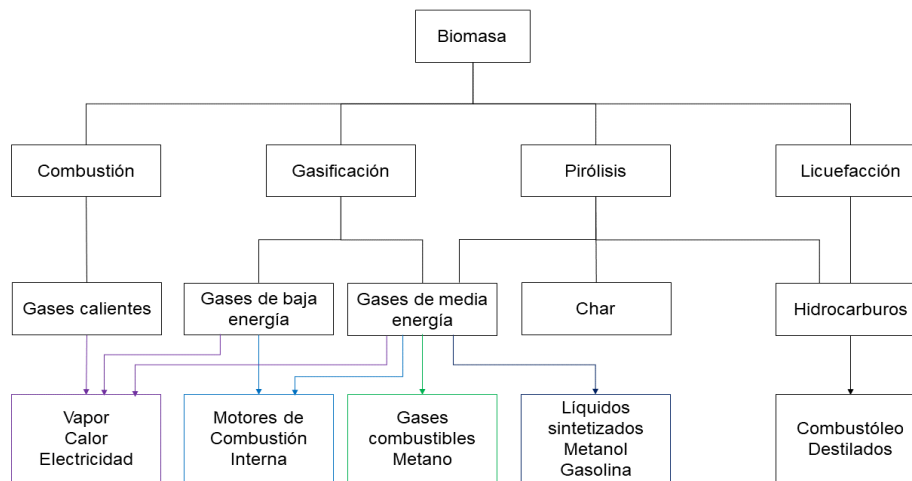
Fuente: Elaboración propia a partir de [6]

La producción de la biomasa se deriva de la reacción entre el CO₂ presente el aire, el agua y la luz solar en la fotosíntesis, proceso que permite el almacenamiento de energía en enlaces químicos. Cuando estos enlaces de carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen ya sea por digestión, combustión o descomposición, se libera la energía química almacenada [45]. La conversión de la biomasa en energía se conoce como bioenergía y abarca una gama amplia de tipos de biomasa, tecnologías de procesamiento, usos finales y requisitos de infraestructura.

Cualquiera que sea el caso la biomasa pasa por diferentes etapas incluyendo cosecha, recolección, transporte y almacenamiento antes de ser procesada con fines energéticos [46]. La bioenergía puede obtenerse de la biomasa a partir dos tipos de procesos principales: los procesos biológicos y los procesos termoquímicos; las rutas de conversión termoquímica generalmente tienen eficiencias termodinámicas más altas que las rutas biológicas en términos del menor tiempo de reacción requerido y mayor capacidad para la destrucción de la mayoría de los compuestos orgánicos [47].

Las principales rutas de conversión termoquímica de la biomasa (ver **Figura 2-1**) son la combustión, la gasificación, la pirólisis y la licuefacción, y sus productos intermedios incluyen gases calientes, gases de bajo y medio contenido energético, así como el char e hidrocarburos que permiten la obtención de productos finales como vapor, calor, electricidad, gasolina entre otros, según el enfoque correspondiente.

Figura 2-1 Procesos y productos en la conversión termoquímica de la biomasa



Fuente: Elaboración propia a partir de [46]

En el caso de la gasificación el objetivo es concentrar el contenido energético de la biomasa y convertirla en sustancias mucho más aprovechables como el gas de síntesis (en adelante syngas), cuya composición depende de muchos factores como la composición de la biomasa, el contenido de agua y la temperatura a la cual se llevan a cabo las reacciones [48]. Con un adecuado tratamiento de limpieza y dependiendo de sus características, el syngas puede ser útil en la creación de otros compuestos químicos o en la producción de energía eléctrica y calor [46].

2.2 Proceso de gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico que utiliza calor, presión y vapor para convertir distintos materiales carbonosos en gases compuestos principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno, los cuales pueden ser utilizados como combustibles o compuestos base para la síntesis de otros productos. El proceso de la gasificación inicia con la preparación y alimentación de la materia prima (seca o en forma de lodo) en un reactor conocido como gasificador. En el reactor se generan dos tipos de atmósferas, una oxidante y otra reductora, en las cuales la materia prima es sometida a distintas condiciones de temperatura y presión con la finalidad de promover reacciones químicas, romper los enlaces químicos existentes y generar combustibles más ricos energéticamente [49].

Los productos de la gasificación incluyen el syngas, los alquitranes y el char (mezcla de carbón y cenizas) [50]. Entre estos productos el syngas posee mayor potencial y se define como una mezcla de gases, en mayor medida el monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), puede ser obtenido mediante el rompimiento de los enlaces carbono-carbono de cualquier material carbonoso, seguido de otra serie de reacciones químicas con ciertas condiciones de operación como la temperatura y la presión en el proceso de gasificación o pirólisis. Entre las utilidades de este producto, se destacan principalmente la producción de energía eléctrica con la mezcla previa con aire en un motor de combustión interna y la elaboración de cualquier tipo de compuesto químico orgánico, como alcoholes, gasolinas, polímeros u otros componentes orgánicos [49].

Las materias primas más utilizadas para la producción de syngas provienen de combustibles fósiles, aunque otros combustibles no fósiles, como la biomasa, también es ampliamente utilizada. En ambos casos se busca incrementar el poder calorífico del gas

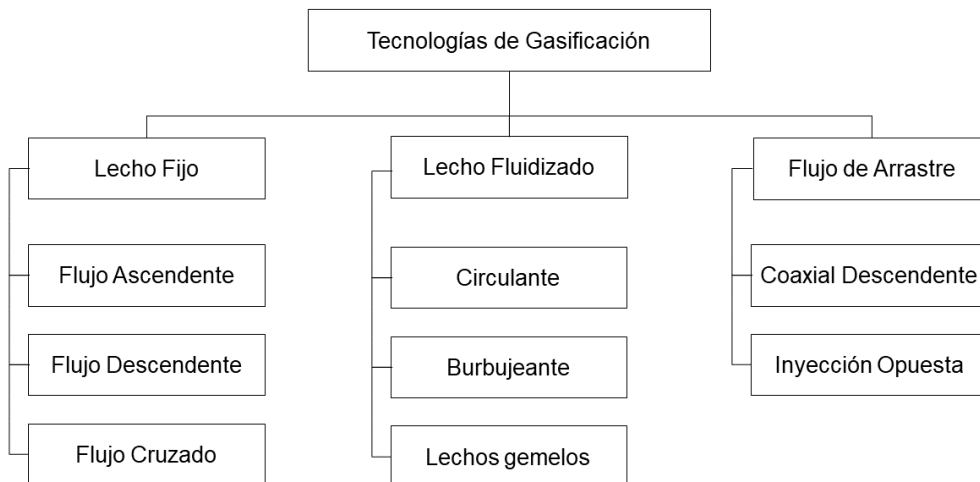
obtenido, retirar componentes como el nitrógeno o el azufre que pueden generar productos indeseables y aumentar la relación másica C/H en el combustible [50].

2.2.1 Tecnologías de gasificación

Las tecnologías para el aprovechamiento del syngas se han desarrollado a través de los años con el objetivo de alcanzar procesos más eficientes, menores consumos energéticos y pérdidas de materias primas, disminución en los tamaños de los equipos y en los costos de construcción, menor contaminación en las corrientes residuales generadas, además de una mayor variedad en el tipo de materia prima utilizada (carbón, petróleo, gasolina, madera, desechos orgánicos, plásticos) [49]. Existen diversas formas de clasificar las tecnologías de gasificación, las principales se realizan de acuerdo con el método de calentamiento, es decir, la forma en la cual se suministran la energía al proceso y de acuerdo con los fenómenos de transporte.

La clasificación en función de los fenómenos de transporte hace referencia al tipo de contacto que la materia prima tiene con el agente gasificante, lo cual puede ocurrir de diferentes formas. Los principales diseños (ver **Figura 2-2**) incluyen los gasificadores de lecho empacado o móvil, lecho fluidizado y de flujo arrastrado, que a su vez puede subdividirse teniendo en cuenta las formas de operación o la alimentación de los reactores.

Figura 2-2 Tecnologías de gasificación en función de los procesos de transporte



Fuente: Elaboración propia a partir de [49]

La selección de una u otra tecnología depende de varios factores entre los que se encuentran: las características de la materia prima, las disponibilidades de espacio, la cantidad de materia prima a procesar, la disponibilidad de recursos energéticos, los materiales de construcción, entre otros.

2.3 Potencial de biomasa residual en Colombia

La matriz eléctrica en Colombia se ha caracterizado por ser, tradicionalmente, de fuentes renovables. La matriz energética cuenta con un 69,7% de energías limpias (12,55 GW, 2021), de este total el 95,2% corresponde a energía hidroeléctrica, seguido de la bioenergía (3,2%), energía solar fotovoltaica (1,5%) y energía eólica (0,1%) [51]. Aunque en estas estadísticas se observa un bajo aporte de generación a partir de bioenergía, la posición geográfica del país favorece el potencial de fuentes de origen biomásico susceptible de aprovechamiento.

En este sentido la UPME a través del *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia* ha estimado una cantidad de 71'943.162 t/año de residuos provenientes del sector agrícola con un potencial energético de 331.368 TJ/año. Estas cifras incluyen cultivos transitorios (arroz y maíz) y permanentes (banano, café, caña de azúcar, palma de aceite y plátano) y su distribución puede observarse en la **Figura 2-3** para cada departamento, con excepción de San Andrés y Providencia.

La mayor cantidad de residuos proviene del Región Andina con una participación del 49,9%, seguido de la Región Pacífico con 30,8%, la Región Caribe con 11,4% y por último las Regiones Orinoquía y Amazónica con 6,3% y 1,6%, respectivamente. A nivel departamental, Valle del Cauca y Antioquia suman el 39% del potencial nacional, de estos el 85% de los residuos en Valle del Cauca provienen de cultivos de caña de azúcar mientras el 82% de los residuos en Antioquía provienen de los cultivos de banano y plátano.

Entre los residuos de la caña de azúcar se encuentra el bagazo, que gracias a sus características fisicoquímicas y su potencial energético es una buena opción para la gasificación. Sin embargo, este recurso es ampliamente aprovechado en el país y su acceso para otros usos es limitado. Solo en 2020 se utilizaron 6,4 millones de toneladas en la producción de papel y energía eléctrica, térmica y mecánica. Parte de estos residuos

el área cosechada nacional se estimó en 730.760 ha con una producción de 863.317 t de café y una participación del 62% por parte de los departamentos de Huila, Antioquia, Cauca, Tolima y Caldas respecto del total nacional [8].

2.3.1 Biomasa residual del cultivo de café en Colombia

De acuerdo con el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) se estima que en el proceso de elaboración de la bebida menos del 5% de la biomasa es aprovechada, el resto está conformado por hojas, ramas y tallos procedentes de la actividad de renovación de cafetales, así como frutos verdes, pulpa y borra [54]. En la **Tabla 2-2** puede observarse que la cantidad de residuos es significativa y existe una amplia disponibilidad de borra y tallos con un poder calorífico alto con respecto a los demás residuos. La borra se genera en las fábricas de café luego del proceso de prensado y secado y suele utilizarse como combustible directo en calderas para generar vapor de agua, así mismo se ha investigado su uso en la producción de bioetanol y biodiesel [54].

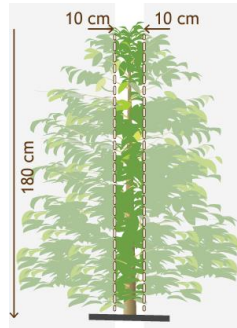
Tabla 2-2 Producción anual y poder calorífico de algunos residuos de café

Residuo	Poder calorífico [MJ/kg] ^(a)	Producción anual
Pulpa	15,88	2.258 kg/ha-año
Cisco	17,90	227 kg/ha-año
Borra	29,01	22.300 t/año
Tallos	19,75	3.200 kg/ha-año

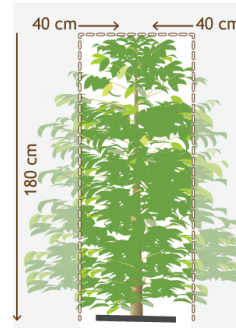
^(a) Poder calorífico del combustible sólido

Fuente: Elaboración propia a partir de [54]

Una actividad necesaria para mantener la productividad del cultivo y que produce grandes cantidades de residuo es la renovación de cafetales; el proceso se realiza teniendo en cuenta que, a medida que los árboles crecen la producción se desplaza a la parte superior de los tallos y a las ramas del árbol dificultando la recolección del fruto, a lo cual se suma el envejecimiento del cultivo que puede derivar en problemas fitosanitarios [55]. Existen diferentes sistemas de poda para renovar cafetales (ver **Figura 2-4**) que incluyen: la poda calavera sin descope o con descope, la poda de esqueletamiento o despunte de ramas, la poda pulmón y la zoca común y total; todos estos sistemas generan grandes cantidades de hojas y tallos de café en el proceso.

Figura 2-4 Sistemas de renovación de cafetales

(a) Poda calavera



(b) Poda esqueletamiento



(c) Poda pulmón



(d) Zoca

Fuente: Tomado de [55]

De acuerdo con el Informe de Gestión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) en 2021 se renovaron 81.304 ha de cultivos de café ubicadas en 132.740 fincas del país, durante la actividad se estima un total 452'726.569 árboles renovados a partir de siembra o zoca [56]. En las renovaciones ocurridas entre 2019 y 2021 no se logró establecer el porcentaje de poda realizado por zoca y por siembra. No obstante, a partir de los datos publicados en el documento *Comportamiento de la Industria Cafetera en 2018* de la FNC se ha calculado que en el periodo comprendido entre 2010 y 2018, el 49% de las renovaciones se ha hecho a través de siembras, el 37% a través de zoca y el 14% restantes por nuevas siembras. Por tanto, las renovaciones por zoca en este periodo se aproximan a las 303.163 ha [57].

El proceso de zoqueo produce una amplia cantidad de tallos y este residuo cuenta con un alto potencial para ser utilizado en el proceso de gasificación. En primer lugar, presenta mayor densidad respecto a otros residuos de la planta o sus procesos, lo cual es considerado una ventaja económica. Es decir, una biomasa de densidad energética menor

requiere mayores volúmenes de biomasa para generar la misma cantidad de calor que si se utilizara una biomasa con una densidad mayor [58]. La densidad también influye en los gastos de transporte y almacenamiento, una biomasa menos densa requiere mayor espacio de almacenamiento y gastos más altos de transporte para producir la misma cantidad de energía que una biomasa más densa.

En segundo lugar, los tallos de café se caracterizan por un porcentaje relativamente bajo de humedad lo que implica menor gasto de energía en la etapa de secado de gasificador y una mayor disponibilidad de energía para la ocurrencia de reacciones en la pirólisis y la reducción. Finalmente, su bajo contenido de azufre y cenizas en comparación con otros tipos de biomasa permite reducción de costos de pretratamiento del syngas generado, menor tiempo de mantenimiento (especialmente actividades de limpieza) de los equipos de gasificación y una menor cantidad de material carbonizado al final del proceso.

2.3.2 Biomasa residual del cultivo de café en Caldas

El departamento de Caldas cuenta con una población de aproximadamente 998.255 habitantes, el 74,2% se encuentra ubicado en cabeceras municipales y el 25,8% en centros poblados y rurales dispersos. La actividad económica más frecuente llevada a cabo por micronegocios en Caldas es el cultivo de café [59], y cuenta con el reconocimiento de 8 de sus municipios¹ en el ranking de los 20 mejores del país en productividad [7]. Solo en enero de 2022 esta actividad representó el 82,7% de las exportaciones del departamento, con una suma cercana a los 101,9 millones de dólares FOB² en café sin tostar (73,9%) y extractos y concentrados de café (8,8%) [59].

En 2020, Caldas fue el departamento con la productividad más alta de café en Colombia con 55.322 t/año de producto provenientes de 60.524 ha/año cultivadas, así mismo los residuos sumaron 258.819 t/año con un origen en tallos del 83%, seguido de la pulpa con 12% y cisco con 5%. Se estima³ que estos residuos cuentan con un potencial energético

¹ Palestina, Chinchiná, Risaralda, Manizales, Pácora, San José, Anserma y Viterbo.

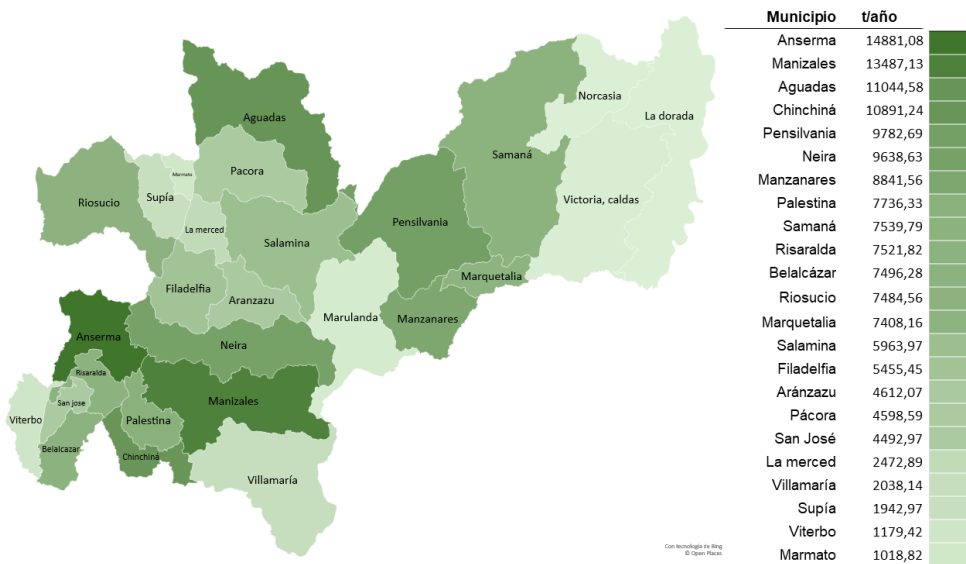
² De acuerdo con el DANE el valor **FOB** (Free Onboard) corresponde al precio de venta de los bienes embarcados a otros países, puestos en el medio de transporte, sin incluir valor de seguro y fletes.

³ El potencial energético y la cantidad de residuos de café en Caldas y sus municipios se estimó por el autor de esta tesis a partir del modelo matemático utilizado por la UPME en el Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Los datos se presentan en el Anexo A.

de 1.315 GWh/año, lo que representa el 82% de consumo de energía de usuarios regulados y no regulados registrados en Caldas para 2020, que de acuerdo con la UPME alcanzó los 1.077,5 GWh/año [9].

De la **Figura 2-5** se destaca que el 44,5% de la producción del café departamental se concentra en los municipios de Anserma, Neira, Manizales, Aguadas, Pensilvania y Chinchiná en los cuales habitan cerca de 11.101 familias cafeteras a cargo de 24.724 ha de cultivo. El potencial de masa de residuo de tallo en esta zona para 2020 se estimó en 69.725,4 t/año, los cuales suelen ser utilizados por los productores como leña para preparar alimentos y secar los granos de café [54]. Aunque esta práctica contribuye a la conservación de los bosques regionales, la combustión directa de madera genera emisiones dañinas que generan afectaciones a la salud y emisiones al medio ambiente.

Figura 2-5 Potencial de tallos de café en Caldas 2020



Fuente: Elaboración propia a partir de [8]

2.4 Análisis de ciclo de vida

2.4.1 Definición

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es una herramienta con base científica para el análisis y la evaluación comparativa de los impactos ambientales de “productos”, teniendo en cuenta que la palabra producto no se limita únicamente a bienes tangibles, e incluye en su

definición normativa tanto bienes como servicios. El LCA se diferencia de otros métodos por comparar productos que cumplen con un mismo o similar propósito a partir de dos características únicas: el análisis “de la cuna a la tumba” y la “unidad funcional”. La característica “de la cuna a la tumba” hace referencia a que se evalúan todas las etapas importantes en el ciclo de vida, por ejemplo: extracción y pretratamiento de materias primas, transporte, producción de materiales y productos, distribución, y finalmente su uso y posterior disposición como residuo final [60].

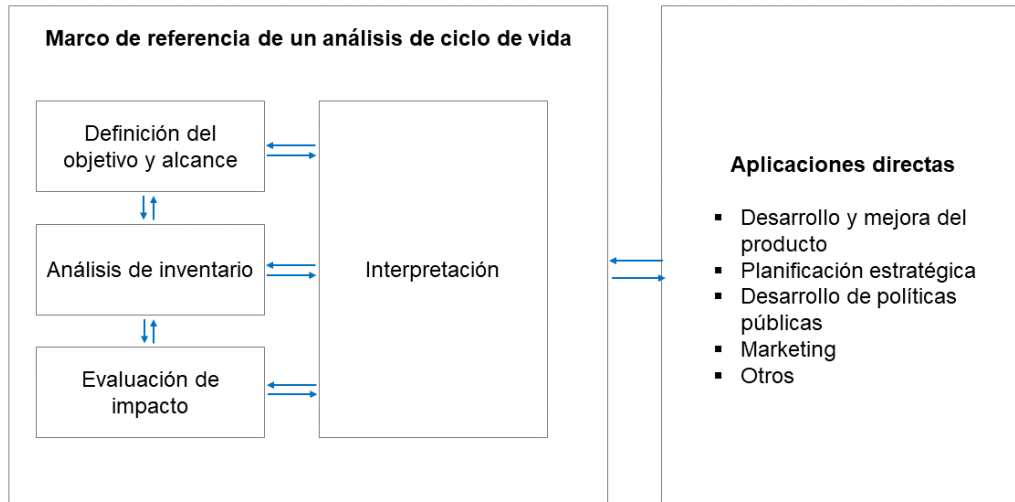
Por otro lado, la “unidad funcional” es la base comparativa de los productos y describe cuantitativamente su función. En los LCA aplicados a la generación de energía eléctrica es común utilizar el kW como unidad funcional, proporcionando una referencia para relacionar los flujos de entrada y salida [61].

2.4.2 Estructura del LCA

La norma internacional ISO 14040 fue adoptada en Colombia por la NTC – ISO 14040 y define la estructura de un LCA en cuatro fases, en las cuales se trabaja de forma iterativa hasta lograr el objetivo que se ha propuesto para el análisis (ver **Figura 2-6**). Estas fases son: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario de ciclo de vida, evaluación de impacto ambiental e interpretación.

De acuerdo con la norma [61], en la primera fase el objetivo debe establecer la aplicación y el público previsto, las razones para realizar el estudio y si los resultados se utilizarán en comparaciones que serán divulgadas. Por su parte, el alcance debe definirse de tal forma que su amplitud, profundidad y nivel de detalle sean suficientes para cumplir dicho objetivo y debe incluir entre otros aspectos: los límites del sistema, la unidad funcional, las categorías y la metodología de impacto seleccionada, así como requisitos, limitaciones y suposiciones.

La segunda fase es un proceso iterativo en el que se recopilan los datos, se efectúan procedimientos de cálculo frente a esos datos y se establecen los flujos de entrada y salida correspondientes al caso de estudio. Al terminar el análisis de inventario de ciclo de vida el resultado principal serán todas las entradas y salidas de cada uno de los procesos unitarios entre los que se incluyen: energía, exergía, materia prima, productos, emisiones, vertimientos u otros aspectos ambientales.

Figura 2-6 Estructura del análisis de ciclo de vida

Fuente: Adaptado de [61]

La tercera fase es la evaluación de impacto, en ella se clasifican los resultados hallados en el inventario de acuerdo con su daño potencial en diferentes categorías entre las que se puede destacar: potencial de calentamiento global, ecotoxicidad, uso de combustibles fósiles, carcinogenicidad, entre otras [62]. Finalmente, en la última fase se tienen en cuenta los resultados de los dos pasos anteriores, y se toman decisiones con respecto a los parámetros definidos en la primera fase, respecto al objetivo y los límites establecidos.

Por consiguiente, el LCA es una herramienta que ayuda que la toma de decisiones tenga en cuenta escenarios y estrategias que mejoren los rendimientos energéticos y minimicen los impactos ambientales. A pesar de esto, el LCA no logra realizar este proceso de forma exhaustiva y surgen entonces herramientas adicionales y acoplables al LCA que permiten alcanzar los objetivos seleccionados de forma más detallada.

Las materias primas y recursos energéticos no pueden expresarse tan fácilmente en el LCA ambiental, por tanto, herramientas adicionales como la exergía integrada al mismo LCA permiten determinar la cantidad máxima de energía que pueden convertirse completamente en otras formas de energía. El análisis exergético expresa las entradas y salidas de material o energía en las mismas unidades (exergía), así como sus eficiencias termodinámicas, lo que permite evaluar e identificando las pérdidas o formas de minimizar las irreversibilidades [28].

El ELCA introduce el concepto de consumo acumulativo de exergía para medir el agotamiento de los recursos naturales y así como el consumo de las materias primas no energéticas. Sin embargo, la reducción de la exergía no puede reflejar impactos ambientales complicados. Por lo tanto, LCA y ELCA se aplican juntos. El agotamiento de los recursos naturales es calculado por la ELCA, mientras que la LCA cuantifica las otras cargas ambientales.

2.5 Exergía

La exergía de una porción de materia, un sistema o recurso, es la cantidad máxima de trabajo útil que se puede obtener de este, cuando se lleva desde un estado dado al equilibrio termodinámico con el entorno mediante procesos reversibles en los que el sistema solo puede interactuar con el ambiente de referencia [63], [64]. Según el concepto de exergía se caracteriza por los siguientes aspectos:

- La exergía mide el alejamiento del sistema del entorno de referencia, por lo tanto, sus valores siempre son positivos.
- En los procesos reales, la exergía no se conserva, a diferencia de la masa y la energía, se consume debido a la degradación de la calidad de la energía y los materiales.

La exergía puede ser dividida en cuatro componentes mayores: potencial, cinética, física y química, siendo más común el uso de estas dos últimas [65]. Por un lado, la exergía física se define como la cantidad de trabajo que puede obtenerse cuando la temperatura y la presión de un flujo se encuentran en equilibrio con el entorno [62].

Para calcular la exergía física ex_{ph} , se puede utilizar la Ecuación (1) propuesta por Szargut y en la cual h_{ph} es la entalpía, T_0 la temperatura de referencia y s_{ph} la entropía.

$$ex_{ph} = h_{ph} - T_0 s_{ph} \quad (1)$$

Por otra parte, la exergía química se define como el trabajo que se puede obtener a través de la explotación de los gradientes de concentración entre el flujo del material y el entorno. Así mismo, para su cálculo Szargut propone la Ecuación (2) en la cual $\Delta_f G^o$ a la energía libre de Gibbs para el compuesto que pueden hallarse en la literatura y libros de

termodinámica, n_{el} al número de moles por unidad del compuesto y b_{ch-el}^0 a la exergía química estándar del elemento.

$$ex_{ch} = \Delta_f G^0 + \sum n_{el} \cdot b_{ch-el}^0 \quad (2)$$

Existe el caso especial de exergía química de un combustible, en el cual se utiliza un multiplicador para los valores de calentamiento del combustible, lo que permite encontrar su exergía, de acuerdo con Grubb y Bakshi [62] el valor de este multiplicador es cercano a uno y puede hallarse en el trabajo presentado por Szargut [66] en 1988 para diferentes combustibles.

2.6 Análisis exergético

El análisis de exergía es una técnica de análisis termodinámico que se basa en la segunda Ley de la Termodinámica y que proporciona una alternativa para evaluar y comparar procesos y sistemas de forma significativa. A partir de los rendimientos proporcionados por el análisis exergético pueden identificarse con mayor claridad las causas y la localización de las pérdidas termodinámicas, lo que permite mejorar y optimizar diferentes diseños [67]. La segunda ley de la termodinámica conduce a la Ecuación (3):

$$\sum_{in} Ex_{in} - \sum_{out} Ex_{out} = I \quad (3)$$

Donde Ex_{in} y Ex_{out} representan las exergías de entrada y salida respectivamente e I es la irreversibilidad. Ahora, la exergía total Ex se define como la suma de las exergías química y física (ver Ecuación (4)), la exergía química viene dada por la Ecuación (5) y depende de la composición de la materia.

$$Ex = Ex_{ch} + Ex_{ph} + Ex_Q \quad (4)$$

$$Ex_{ch} = \sum_i X_i \cdot Ex_{0,i} + RT_0 \sum_i X_i \cdot \ln X_i \quad (5)$$

Donde X_i representa la fracción molar de cada componente y $Ex_{0,i}$ la exergía estándar. En contraparte, la exergía física depende de la temperatura y la presión de la materia y está dada por la Ecuación (6):

$$Ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

Donde h y s corresponden a la entalpía y la entropía respectivamente.

En la Ecuación (7) se calcula la exergía asociada a la transferencia de calor, donde Q es la energía de la fuente de calor, la cual se encuentra a una temperatura T , con respecto a la tomada como temperatura de referencia (T_0).

$$Ex_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (7)$$

2.7 ELCA

El desarrollo de ELCA para gasificación de biomasa pretende identificar como estas ineficiencias energéticas pueden estar asociadas a oportunidades de mejora en algunas etapas críticas, y puntualmente en el contexto actual de la producción de desechos del zocado de café en el departamento de Caldas, el cual pertenece a la región cafetera de Colombia, una investigación podría elevar el potencial de implementación de otro tipo de energía renovable que se convierta en un aporte a la matriz energética de la región.

Los resultados de esta investigación serían claves para el desarrollo de proyectos de generación energética renovable no convencional en una zona con bajo potencial eólico y solar. Disminuyendo la pérdida de exergía en los procesos y aprovechando correctamente la exergía desperdiciada en los residuos arrojados al ambiente, se pueden mejorar los procesos y aumentar la sostenibilidad, impactando positivamente sobre la población, las industrias y las naciones.

2.7.1 Demanda de exergía acumulada (CExD)

El uso de recursos tanto materiales como en forma de energía ocasiona, tal como lo menciona la segunda ley de la termodinámica, la destrucción de la exergía. Los materiales pueden ser transformados y ser devueltos a su forma original, siempre y cuando exista un consumo exergético proveniente desde otro material. La destrucción de la exergía

proporciona un enfoque relacionado con la demanda de recursos en la ocurrencia de un proceso. Es allí cuando la CExD se propone como indicador de calidad energética, en el que se tiene en cuenta eliminación de los recursos desde la naturaleza, y el origen de estos [68].

En 2007 Bösch [69] se refiere al CExD de un producto como la suma de exergías de las materias primas, insumos, energías y demás elementos necesarios para su elaboración. El valor de CExD es presentada en forma de unidades equivalentes (MJ_{eq}) con el fin de que se acople a los modelos de análisis de ciclo de vida existentes.

Este método, cuantifica los requerimientos exergéticos de un producto. Gracias a el surgimiento de bases de datos más complejas para los análisis de ciclo de vida, este tipo de herramientas ha permitido evaluar productos específicos en procesos productivos y ubicarlos en otros [69], de tal forma que permitan una mejor comparación de uso eficiente de recursos tanto energéticos como materiales. Con la Ecuación (8) se puede determinar la contribución de recursos necesarios para la producción de un material o un servicio, a través de la demanda de exergía acumulada de cada uno de ellos, donde n_j es cantidad de energía del portador de energía j [MJ], $r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$ es relación exergía a energía del portador j [MJ_{eq}/MJ] y $E_{x(ch),i}$ es la exergía por kilogramo de sustancia i [MJ_{eq}/kg].

$$CExD = \sum_i m_i \cdot E_{x(ch),i} + \sum_j n_j \cdot r_{ex-e(k,p,n,r,t),j} \quad (8)$$

En la **Tabla 2-3** se enuncian las categorías de evaluación de impacto seleccionadas través el software Umberto® LCA+, de la base de datos de Ecoinvent 3.0, las cuales están divididas entre renovables y no renovables.

Tabla 2-3 Categorías de evaluación de impacto

Demanda de Exergía Acumulada (CExD)		
Nombre	Subcategoría	Categoría
CExD – biomasa, recursos energéticos renovables, biomasa	Renovable	Biomasa
CExD - fósil, recursos energéticos no renovables, fósil	No-renovable	Fósil
CExD - metales, recurso material no renovable, metales	No-renovable	Metales

Demanda de Exergía Acumulada (CExD)		
Nombre	Subcategoría	Categoría
CExD - minerales, recursos materiales no renovables, minerales	No-renovable	Minerales
CExD - nuclear, recursos energéticos no renovables, nuclear	No-renovable	Nuclear
CExD – bosque primario, recursos energéticos no renovables, Bosque primario	No-renovable	Bosque Primario
CExD - solar, recursos energéticos renovables, solar, convertida	Renovable	Solar
CExD – recursos hídricos, recurso material renovable, agua	Renovable	Agua
CExD - agua, recursos energéticos renovables, potencial (agua en represa), convertida	Renovable	Potencial (agua en represa) Convertida
CExD - viento, recursos energéticos renovables, cinética (viento), convertida	Renovable	Cinética (en viento), convertida

Fuente: Elaboración propia a partir de [70]

Las categorías incorporan también materiales no energéticos, así como los minerales o metales e indican cual es el gasto de exergía requerido por cada uno de los recursos necesarios para la ejecución de un proceso o la generación de un producto.

2.8 Estado del arte

2.8.1 Gasificación de biomasa en Colombia

De acuerdo con Chejne et al. [71] en las últimas dos décadas se ha desarrollado en Colombia la investigación de la gasificación, la cual inició con estudios sobre carbones colombianos y más recientemente sobre las biomásas existentes en el país. Entre los años 1999 y 2000, se presentaron diferentes estudios [72]–[75] sobre la gasificación en lecho fluidizado con carbones provenientes de Venecia y Titiribí (Antioquia), encontrando mayores velocidades de gasificación a mayores temperaturas así mismo, mayores conversiones de con H_2O en comparación con CO_2 en las mismas condiciones.

En el año 2000 Moreno et al. [76] estudiaron la gasificación de carbón proveniente del Cerrejón en la Guajira y posteriormente Arenas [77] en 2002 estudió la gasificación de carbones provenientes de La Capotera, La Grande y Borrego, utilizando al igual que en [72]–[75], CO_2 y H_2O como agentes gasificantes para observar la conversión de estos carbones y su porosidad, así mismo aplicaron diferentes modelos cinéticos para calcular la energía de activación.

En cuanto a la gasificación de biomasa:

- En 2007 Osorio et al. [78] realizaron experimentos y aplicaron un modelo cinético a la co-gasificación de cisco de café con carbón y cascarilla de arroz con carbón encontrando ajustes adecuados entre el modelo núcleo decreciente sin reaccionar y los experimentos a temperaturas de 750, 800 y 850°C.
- En 2011 Espinosa [79] evaluó el potencial de implementación y fabricación de sistemas de gasificación de carbón en Colombia teniendo en cuenta la cadena a escala industrial y determinando que, de acuerdo con los costos analizados, fabricar gasificadores en Colombia sería competitivo al comparar los costos con proveedores internacionales.
- En 2014 Emery Genes [80] trabajó con un gasificador de lecho fijo utilizando cuesco de palma como biomasa y una mezcla de agua y nitrógeno como agente gasificante para investigar el efecto la temperatura en un lecho de gasificación y en un lecho catalítico encontrando que existe un mejoramiento notable en la relación H₂/CO en el syngas y la disminución de la cantidad de alquitranes como parte de la contribución del lecho catalítico.
- En 2015 Barco Burgos [81] realizó la puesta en marcha de un gasificador de lecho fijo a escala de laboratorio en la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y posteriormente realizó experimentos utilizando cuesco de palma como biomasa logrando alcanzar condiciones estables de funcionamiento para la generación de gas de síntesis con un poder calorífico que osciló entre 10,65 MJ/m³ y 14,47 MJ/m³.
- En 2017 Oliveros et al. [82] realizaron un estudio en un gasificador de lecho fijo de flujo descendente para biomasa obtenida de residuos de la producción de café, realizado en el Centro Nacional de Investigaciones del Café – Cenicafé. El gas de síntesis producido es utilizado en la generación de energía eléctrica, obteniéndose un consumo específico de biomasa de 1,27 kg de biomasa/kWh, y con gas producido con poder calorífico de 5669,9 kJ/m³.
- En 2017 García et al. [83] evalúan, desde una perspectiva energética y medioambiental, la producción de energía a partir de residuos del sector agrícola colombiano. Se comparan procesos de gasificación y fermentación alcohólica para tallos de cafeto, dando como resultado una mayor eficiencia y un menor impacto ambiental para el primero de estos.

- En 2018 Vallejo Cifuentes [84] estudió la gasificación de cascarilla de arroz en lecho fluidizado teniendo en cuenta los efectos de peletizar la biomasa, concluyendo entre otras cosas, que en la peletización los tamaños de partículas grandes beneficiaban la calidad de los pellets en relación con la densidad de bulto, la durabilidad y el contenido de humedad, sin embargo, afectaban el rendimiento y el consumo energético.

Con la promulgación de la Ley 1715 de 2014 se inicia la regulación de la integración de las energías renovables en el sistema energético de Colombia, se definen las Fuentes de No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como recursos energéticos ambientalmente sostenibles, de baja comercialización en el país y se incluye en este tipo de fuentes a las pequeñas centrales hidroeléctricas, eólica, solar y geotérmica, así como los mares y la biomasa. Para el aprovechamiento de las FNCER, y con ella la biomasa, en Colombia se dispone de las figuras de autogeneración y generación distribuida en el Sistema Nacional Interconectado (SIN) y en las Zonas No Interconectadas (ZNI) cuya operación fue reglamentada en 2018 por las Resoluciones CREG 030 y 038 respectivamente.

De acuerdo con las estadísticas presentadas por la UPME en el último reporte de solicitudes de conexión de generadores distribuidos y autogeneradores, a diciembre de 2021, se realizan 8 solicitudes para generación eléctrica a partir de la biomasa que suman una capacidad nominal de 1813,53 kW, a instalar en los departamentos de Meta, Tolima y Valle de Cauca; adicionalmente existen otros 29 proyectos, en diferentes etapas de ejecución, con una capacidad de generación de electricidad de 381,6 MW, los cuales no hacen parte de las figuras de generación distribuida y autogeneración [85], [86].

Aunque las cifras son conservadoras, el número de solicitudes podría incrementarse en los siguientes años, gracias a los incentivos existentes aplicables a la adquisición de equipos y accesorios como gasificadores, sopladores, sistemas de purificación de gas, generadores, válvulas, tuberías y teas, al contar con una certificación emitida por la UPME de acuerdo con el procedimiento estipulado en la Resolución UPME 319 de 2022.

Actualmente en el país, existen iniciativas científicas y gubernamentales en materia de transición energética que incluyen el uso de la biomasa como una fuente de energía de interés para el país. Se destaca que en el marco del Plan Nacional de Desarrollo y la

Estrategia Nacional de Economía Circular, se instauró en 2022 la Mesa Nacional para el Aprovechamiento de la Biomasa con un plan de trabajo que incluyen actividades en desarrollo como el análisis de la implementación de nuevas tecnologías de aprovechamiento de diferentes tipos de biomasa, el desarrollo de proyectos piloto donde se apliquen dichas tecnologías y la capacitación de los productores en el manejo de residuos de orgánicos [87].

Por otro lado, la alianza interinstitucional Energética 2030 en el cual participan universidades y empresas nacionales e internacionales que trabajan en definir estrategias para la transformación del sector energético de Colombia hacia el año 2030. De esta alianza hacen parte once proyectos, uno de los cuales se enfoca completamente en el aprovechamiento de la biomasa como recurso energético e incluye como objetivos, la identificación de variables que afectan los rendimientos y la calidad de los productos obtenidos a partir de la biomasa, implementación de prototipos con tecnología de gasificación, estimación de la huella de carbono (CO_{2-eq}) de procesos de conversión termoquímica de la biomasa y el análisis de ciclo de vida de los prototipos desarrollados incluyendo la producción, implementación, operación y disposición final [88].

2.8.2 ELCA

Para el estado del arte del análisis exergético de ciclo de vida (ELCA), se implementa una ecuación de búsqueda en la base de datos Scopus, los resultados muestran 1087 artículos, de los cuales, 119 presenta una relación inicial con el ELCA, pero solo en 54 de ellos aplicaba algún método asociado. En 7 de estos artículos se realizan estudios sobre análisis exergéticos en procesos de gasificación.

Los primeros intentos de integración de análisis de exergía y LCA inician en 1987 con el método para calcular el Consumo de Exergía Acumulada (CExC) presentado por Szargut y Morris, en este método se tiene en cuenta la exergía acumulada de todos los recursos naturales y materias primas obtenidas del entorno antes de entrar al proceso productivo [89]. Los autores postulan como estado de referencia del entorno una temperatura de 298 K y presión de 1 atm [66], condiciones que han sido ampliamente utilizadas para cálculos exergéticos e implementación de ELCA [90], [91].

En 1997 Finnveden y Östlund [92] dan los primeros pasos en el uso de la exergía y el LCA en el análisis de procesos y en la medición de los recursos a partir de la contabilización de los distintos flujos y materiales asociados, también se hace mención sobre la implementación de exergía como una herramienta de medida de la calidad de la energía y su uso potencial real. En este mismo año Cornelissen [93] desarrolla en su tesis de doctorado el método de Análisis Exergético de Ciclo de Vida (ELCA), basándose en el enfoque del LCA y el análisis exergético. Así mismo, afirma que las pérdidas exergéticas pueden ser llamadas irreversibilidades o exergía destruida y deben ser minimizadas como objetivo del desarrollo sostenible.

A partir del establecimiento del método ELCA, otros autores empiezan a aplicarlo a diferentes procesos, cuyo objetivo se centra en comparar tecnologías, identificar etapas optimizables o impactos ambientales asociados en los casos a analizar. En el año 2001, Lombardi [90] aplica métodos LCA y ELCA a procesos de generación de energía eléctrica (SCGT), al tiempo que implementa etapas de reducción de CO₂ mediante absorción química, con el fin de evaluar si las etapas de construcción y desmantelamiento del proceso adicional, no tiene un incremento significativo en termino de emisiones de CO₂, en comparación a las potenciales emisiones reducidas.

Azimian et al. [91] en el año 2002 y Cornelissen y Hirs [94] en el mismo año, realizan un análisis comparativo entre dos tecnologías para identificar para cada caso, cual genera un menor impacto ambiental; el trabajo en el área de la generación eléctrica y el segundo en el tratamiento de residuos de la madera. Fiaschi y Lombardi [95] en el año 2002 analizan las etapas de construcción, mantenimiento, operación y desmantelamiento en un gasificador integrado con ciclo combinado (IGCC) en el cual evidencian la poca influencia de las etapas de construcción y desmantelamiento, con respecto a los ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el 2003 Beccali et al. [96] plantean la implementación de un ELCA en un proceso de producción de materiales de yeso, y cómo mediante este se identifica cual etapa del proceso posee un mayor el potencial de mejora en términos de pérdidas exergética. En este mismo año Lombardi [97] realiza una comparación de tres diferentes tecnologías de generación eléctrica con reducción de emisiones de CO₂, IGCC+DeCO₂, SCGT/CC + DeCO₂ y E-MATIANT, mediante la aplicación de un ELCA logra clasificarlas tanto para sus emisiones de CO₂, como para la cantidad de exergía destruida.

Granovskii et al. [98] en el año 2007 analiza mediante este tipo de análisis exergético de ciclo de vida, como cambia la producción de hidrogeno respecto a costos y gases de efecto invernadero, en términos de tipo de fuente de generación eléctrica, ya sea combustibles fósiles o energías renovables como solar o eólica. Acompañado de un análisis económico logra identificar como a pesar de que la producción mediante fuentes renovales tiene una reducción de GEI de hasta 25 veces en comparación a fuentes fósiles, mientras su implementación puede llegar a significar un aumento 5 veces mayor.

En el 2008, se aplica un Análisis de Ciclo de Vida Exergético (ELCA) a una planta de tratamiento de aguas residuales con el fin de demostrar los efectos ambientales y exergéticos en la recuperación de biogás [99].

Velásquez Arredondo et al. en el año 2009 [100] presenta ecuaciones para el cálculo del análisis exergético en un proceso de producción de etanol a partir de residuos orgánicos. Hiraki y Akiyama presentan un estudio en el que se analiza el tratamiento en de residuos de aluminio, para generar hidróxido de aluminio e hidrogeno. El análisis implementado identifica dos ventajas del sistema propuesto: la coproducción y la auto compresión de hidrogeno, la destrucción exergética es hasta el 55% menor que el proceso convencional [101].

Mester et al. [102] aplican un análisis en la construcción de viviendas para la evaluación de alternativas en los materiales, que permitan identificar cuáles son los elementos con menores requerimientos energéticos en el uso y en la construcción.

Para el año 2010, Zhang menciona en su trabajo algunos ejemplos de análisis ELCA, junto con otros métodos como el de emergía, CExC, CExD, EEA, CEENE, identifica ventajas y desventajas entre ellos y lista algunos retos de la implementación de estos con el LCA [103].

El análisis de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de cocina, en el cual se aplican los métodos LCA y ELCA, identificando a la transesterificación como la etapa con mayor a los impactos ambientales del proceso [104].

Para el año 2011, ELCA es implementado para evaluar la carga medioambiental, las materias primas y las energías consumidas de una central eléctrica de carbón; evaluando al mismo tiempo de calidad y cantidad, las posibles etapas vulnerables del proceso. Una

mayor influencia de la etapa operativa, en función de las de construcción y desmantelamiento [105]. Casas et al. [106] evalúan dos alternativas en una fábrica de producción de azúcar, etanol y electricidad; cogeneración con bagazo e integración con una Pila de Combustible de Oxido Sólido (SOFC). Para esto se emplean dos métodos de evaluación de productos: con el LCA para los impactos ambientales y EA para los aportes exergéticos de las corrientes.

Identificación de las mayores pérdidas exergéticas en un proceso de producción de nanopartículas de dióxido de titanio a partir de ilmenita a partir de análisis exergéticos y de ciclo de vida [62].

Yang et al. [107] selecciona tres procesos basados en gasificación con el fin de obtener las condiciones óptimas en términos de eficiencias exergéticas y costos de inversión.

En el año 2012, Rosen et al. [108] analiza un proceso de obtención de hidrogeno a partir de ciclos de separación termoquímica y procesos nucleares mediante herramientas de análisis de ciclo de vida y ELCA, identificando el proceso con la mayor irreversibilidad el procesamiento del uranio. Mencionan, así como otros autores, cual puede ser la relación de la exergía con el uso y acumulación de los recursos con los residuos generados y los potenciales impactos sobre el medio. Muestra al ELCA como una herramienta para alcanzar el desarrollo sostenible a partir de la disminución de la liberación de la exergía al medio y del agotamiento de la exergía almacenada.

Moya et al. [109] realiza un LCA es aplicado a la valoración de subproductos en la industria de producción de azúcar, al mismo tiempo complementa con un análisis exergético, e identifica cuál de las cuatro propuestas presentadas, conlleva menores impactos ambientales.

Para el año 2013, Huysveld et al. [110] identifican, a partir de análisis exergéticos, el consumo de recursos en un proceso de producción de un pez específico en el delta del Mekong, siendo la cadena de producción y entradas de alimento como los factores clave a ser mejorados. Mientras, Hoque et al. [111] aplica ELCA en materiales de construcción polipropileno y PVC para identificar rutas eficientes en el consumo de recursos en este sector.

El método ELCA es aplicada por Koroneos y Stykis en el año 2014, a un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica, proyecto a gran escala. Los resultados obtenidos muestran ineficiencias termodinámicas en el uso de los recursos y grandes pérdidas de exergía en la operación e instalación, pero que terminan siendo contrarrestados en por la disminución en los impactos y costos de producción de electricidad [112].

ELCA aplicado a la producción de hidrogeno a partir de la gasificación de madera en un gasificador convencional de carbón, en la cual, se modifican sus condiciones de operación. Las etapas con mayores contribuciones exergéticas para este caso de estudio se identifican en el cultivo y cosecha de la biomasa, pretratamientos de la biomasa y posterior tratamiento del syngas generado [113]. Sui et al. [114] aplican la misma metodología en la producción de cemento para analizar la implementación de un proceso de generación de energía a partir del calor residual, para aumentar tanto las eficiencias energéticas como exergéticas.

Una evaluación del rendimiento en la valoración de residuos alimenticios en dos distintos escenarios de aprovechamiento es presentada por [115], identificando los mejores rendimientos y los menores impactos ambientales. Ofori-Boateng et al. en el año 2014, evalúan la sostenibilidad termo ambiental de una biorrefinería a base de aceite de palma a partir de un ELCA [116]. Por otro lado, el análisis exergético de ciclo de vida es implementado para seleccionar el óptimo espesor en el aislamiento de tuberías en el sector construcción y los impactos ambientales generados del consumo de recursos [117].

Taelman et al. [118] presentan en el año 2015, un análisis de sostenibilidad ambiental comparativo de la producción de microalgas contra la importación de grano de soya, para el mercado de alimentación de animales en Holanda.

Huysveld et al. [119] muestran un enfoque en el consumo total de recursos y la eficiencia de uso de estos en sistemas agrícolas, a través de análisis exergético de ciclo de vida. Se aplica específicamente al manejo de rebaños en granjas en Bélgica, se identifica la alimentación como el suministro con mayor aporte a la huella ambiental.

En el año 2016, Finnveden et al. [120] realiza un análisis comparativo de distintos análisis de exergía aplicados a análisis de ciclo de vida, en estos se identifica al CExD como el método con la base de datos más extensa, en el que se tienen en cuenta recursos abióticos y se muestra a la exergía como un elemento relevante en el análisis del agotamiento de

los recursos. Para el mismo año, Ehtiwesh et al. [121] aplica un ELCA a un concentrador solar para identificar los costos exergéticos de los impactos ambientales en el proceso de generación eléctrica, las debilidades en el proceso y verificar la disminución en polución y costos de producción de energía.

Una planta de energía a partir de residuos es evaluada por Rocco y Colombo [122], mediante un análisis exergético de ciclo de vida, en el cual, se evidencia que los requerimientos de recursos no renovables no son despreciables, pero la generación neta de electricidad alcanza a compensar hasta en 100 veces el consumo de recursos requerido para la construcción y operación de la planta. En el año 2017, Rocco et al. [123] efectúan sobre la misma planta, una evaluación del consumo de recursos en sus etapas de construcción y operación, al tiempo que se identifican formas para optimizar la operación incrementando sus eficiencias exergéticas.

Así mismo en el año 2017, Sedpho et al. implementan LCA y ELCA a una planta de generación energía a partir de residuos sólidos para identificar y cuantificar los impactos a través del LCA y el consumo de recursos mediante herramientas exergéticas.

Risse et al. [124] realizan un análisis exergético de ciclo de vida en la producción de madera aserrada contrarrestándola con el consumo de recursos con madera primaria, evidenciando que este tipo de madera tiene una mayor eficiencia energética; debido en gran parte a que se evita la extracción de recursos en primarios y permite un uso altamente eficiente.

La investigación desarrollada por Whiting et al. [125] expone nuevos desarrollos y debilidades identificadas en procesos de análisis de exergía sobre el proceso de extracción sostenible de recursos minerales y combustibles fósiles. Para el año 2018, Mehmeti et al. [126] implementan distintos tipos de análisis, entre los que se incluye el ELCA, sobre la extracción de recursos para la producción de celdas de combustible de carbonato fundido.

Wang et al. [127] aplican un análisis exergético de ciclo de vida a un proceso de producción de petróleo de esquisto, con el fin de evaluar la eficiente en el uso de los recursos y su sostenibilidad ambiental. Los procesos de autoclave y gasificación fueron los que presentaron las eficiencias exergéticas más bajas.

Zhou et al. [128] se enfocan distintos tipos de análisis en la aplicación en un sistema de generación de energía a partir de residuos. ELCA es propuesto para reducir el agotamiento de los recursos naturales y las irreversibilidades para cada sección del proceso.

Para el año 2019, Guven [129] utiliza el ELCA para el estudio de espesores de aislamiento óptimos en paredes de edificaciones en Turquía para cuatro regiones climáticas distintas. Los resultados indican los niveles de ahorros exergéticos para la lana de vidrio y lana de roca en cada región, lo que permitió al autor establecer el material y espesor con el menor impacto ambiental.

Alanya-Risenbaum et al. [130] utilizan el análisis exergético de ciclo de vida para la evaluación de la sostenibilidad medio ambiental de la conversión de biomasa con tecnologías semimóviles comparando el uso de la biomasa para la calefacción y la generación de energía eléctrica versus el uso de otros combustibles fósiles en el software SIMA Pro-8.5. Los resultados indican reducciones de hasta el 50% al usar biomasa en comparación con el propano para la calefacción y en el caso de la energía eléctrica de hasta el 8%.

Rentería Gamiz et al. [131] en el año 2019, evalúan la sostenibilidad ambiental de un proceso de manufactura de ingredientes activos para la industria farmacéutica, mediante la aplicación de análisis exergéticos y LCA. Por otro lado, Un análisis de exergía es aplicado en conjunto al LCA sobre un proceso de producción de cemento para evaluar el costo real ecológico de una de las industrias más energéticamente intensivas y con altas emisiones de CO₂ [132].

Ehyaie et al. [133] implementa análisis exergéticos, energéticos y económicos en un aerogenerador, para dos ciudades con distinto potencial eólico. Se evidencia como la disminución de la exergía destruida está asociada al aumento de velocidad en el viento. Mientras, Dassisti et al. [134] realizan un análisis híbrido de análisis exergético y LCA sobre un proceso de manufactura con el fin de estructurar las estrategias de monitoreo para industrias 4.0.

En el año 2020, Liu et al. [135] se realiza un análisis exergético de la producción de hidrogeno a partir de gasificación de carbón subterráneo y compara con la gasificación de carbón de forma superficial, con el fin de evaluar el consumo de recursos y su competitividad con respecto a la generación de hidrogeno convencional en China.

Cano et al. [70] presentan un análisis exergético de ciclo de vida aplicado al sector minero colombiano, en específico en la extracción de oro, con el fin analizar la implementación de estrategias que permitan disminuir el impacto ambiental del proceso productivo.

Tang et al. [136] analizan, a través de LCA y ELCA, cuatro alternativas para el manejo de residuos sólidos en la producción de electricidad: incineración y tres arreglos de gasificación. El tercer escenario, gasificación con ciclo combinado, presenta los mejores resultados en perspectivas ambientales y exergéticas debido a las bajas emisiones atmosféricas y la alta eficiencia energética, mientras que el peor rendimiento es presentado por la gasificación con motor generador.

Mediante un análisis exergético de ciclo de vida, se analizan dos procesos de obtención de hidrogeno; gasificación de biomasa y reformado de gas natural. El proceso realizado con biomasa presenta mayores beneficios en lo que respecta a sostenibilidad ambiental y renovabilidad. Aunque con mayor consumo de recursos y menores eficiencias en la combustión debido a su elevada generación de alquitranes [137].

En el año 2021, Nwobo y Anumba implementan un análisis exergético de ciclo de vida en el sector construcción lograr edificaciones con evaluaciones de sostenibilidad que aumenten su competitividad en el mercado y además que realicen valoración de las problemáticas presentadas en su vida útil [138].

La producción de energía a partir de residuos sólidos municipales es realizada en un lecho fluidizado circulante acoplado a un sistema incinerador. Para este proceso Li et al. [139] aplican ELCA para identificar el consumo de recursos a lo largo del ciclo de vida.

Hosseinzadeh-Bandbafha et al. [140] analiza el funcionamiento de un tractor diésel, utilizando diferentes mezclas de combustibles, se busca identificar los menores impactos y mejores eficiencias económicas, implementando indicadores económicos, exergéticos y ambientales.

Una revisión de distintas tecnologías de análisis acopladas al LCA entre las que se incluye el ELCA es presentada por [141], en esta se mencionan algunos trabajos en los que se ha implementado las distintas metodologías y se muestran algunos de los beneficios aportados como complemento al LCA.

Khounani et al. [142] presenta un proceso de producción de bio alcoholes, para el cual, a partir de análisis exergético, logra identificar las opciones de mejora al proceso y las etapas con mayor consumo de recursos.

3. Metodología

El método de Análisis de Ciclo de Vida Exergético (ELCA) se implementa para evaluar un proceso de aprovechamiento de biomasa residual del cultivo de café, en este caso: tallos de café. Este aprovechamiento tiene como fin la generación de energía eléctrica mediante la combustión de un gas de síntesis producido mediante gasificación. Se tiene en cuenta que por generaciones los tallos de café han sido utilizados como combustible en fogones de leña artesanales en distintas fincas cafeteras, práctica que se ha ido reemplazando paulatinamente debido a la naturaleza contaminante de los gases generados y los efectos nocivos evidenciados en la salud.

Tanto entidades gubernamentales [143], [144] como privadas [145] han propuesto la sustitución de la combustión de leña por otras tecnologías menos contaminantes y más eficientes. Las familias campesinas eventualmente se enfrentarán al reto de buscar otro tipo de aprovechamiento para este residuo lignocelulósico que proviene principalmente de la renovación de cafetales, actividad que para 2020 en Caldas sumó 12'382.522 de árboles renovados a través del Programa Nacional de Apoyo a la Renovación [146].

El método ELCA obedece el orden lógico de ejecución orientado por método LCA y presentado en la ISO 14040:2006. Las dos primeras fases de ambos métodos se enfocan en la contextualización del análisis específico, en la cual se establecen los objetivos, alcance e inventarios tanto de materiales como de actividades, sin embargo, en el ELCA se extiende un poco más en la construcción de inventarios, con el fin de obtener información necesaria que permita satisfacer los balances energéticos y exergéticos. Para la tercera fase el ELCA enfoca su evaluación de impacto en categorías que permitan estudiar la eficiencia energética y las irreversibilidades en los procesos, complementando categorías existentes de LCA Demanda de Exergía Acumulada (CExD). Así el ELCA, más que un método alternativo, debe sugerirse como un método complementario.

3.1 Área de estudio

Los municipios de Manizales y Chinchiná en el departamento de Caldas son seleccionados para el área de estudio de la presente investigación, históricamente han sido reconocidos como zona cafetera, con 8.861 ha de café sembradas y un potencial de generación de tallos de café de 24.378,4 t/año para el año 2020 [146]. En la **Tabla 3-1** se presentan algunos datos relevantes sobre la población, geografía, acceso a servicios y temperatura en estos municipios.

Tabla 3-1 Principales datos demográficos de Manizales y Chinchiná

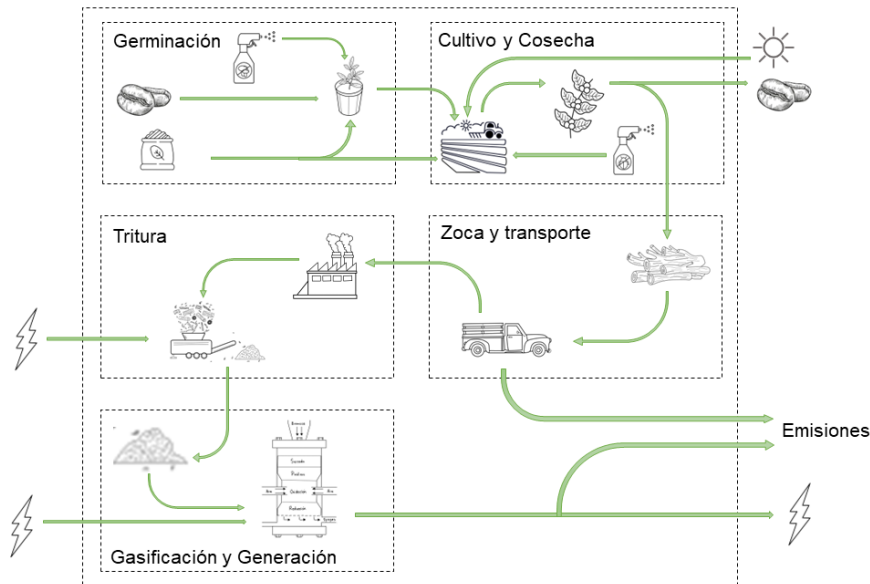
Datos	Manizales	Chinchiná
Extensión territorial	508 km ²	112,5 km ²
Población	400.436 habitantes	48.484 habitantes
Temperatura promedio	18°C	21°C
Viviendas sin acceso a electricidad	1.314 viviendas	58 viviendas
Viviendas sin acceso a gas	25.862 viviendas	3.216 viviendas

Fuente: Elaboración propia a partir de [147], [148]

Manizales y Chinchiná son municipios limítrofes y se encuentran ubicados en la Cordillera Central de Colombia respectivamente a 2.150 y 1.378 metros de altura sobre el nivel de mar [147], presentan una alta cobertura en servicios públicos, sin embargo, el DANE aún contabiliza 1.372 viviendas sin acceso a electricidad y 29.078 sin acceso a gas. Así mismo cuentan con la presencia de centros de investigación que han publicado información de interés en el uso de residuos de café en distintos procesos de aprovechamiento.

3.2 Definición del objetivo y alcance

En la definición del objetivo y alcance, tanto en el método de LCA como ELCA, se establece la unidad funcional teniendo en cuenta el objetivo del análisis, en el caso particular de la presente investigación la unidad funcional seleccionada es un kilovatio-hora (kWh) teniendo en consideración que la finalidad del proceso es generar energía eléctrica. En la **Figura 3-1** pueden visualizarse los límites del sistema, las etapas y las salidas y entradas principales.

Figura 3-1 Límites del sistema en estudio

Fuente: Elaboración propia

El análisis inicia con la germinación de la plántula de café y los insumos y servicios asociados a la misma. Una vez producida la plántula, es trasladada y replantada en un área que ha sido adecuada a las condiciones específicas para este tipo de cultivo. Con el área de cultivo establecida se tienen en cuenta los servicios necesarios para el cuidado regular de las plantas y los tiempos para sus distintas cosechas. Luego de completar el cuarto o quinto año los cafetales son renovados ya sea por resiembra o por proceso de zoca, estos tiempos se determinan debido a los ciclos productivos de este cultivo, con el fin que los niveles de productividad del cafetal no disminuyan drásticamente.

En el proceso de renovación se genera como residuo el tallo del cafeto, el cual es utilizado normalmente como combustible en fogones de leña tradicionales, pero que para el presente estudio se pretende utilizar como la materia prima del proceso de generación. Se supone que una vez los tallos han sido recolectados, son trasladados al sitio de generación ubicado cerca de los mismos puntos de acopio normal del café, lo que permite que los mismos mecanismos de transporte utilizados en el proceso convencional puedan ser implementados para esta materia prima. Ya en el punto de almacenamiento los tallos son astillados a un tamaño de partícula con la medida requerida para el tipo de gasificador seleccionado.

El proceso de gasificación es realizado alimentando la biomasa astillada a temperatura ambiente, al mismo tiempo que se alimenta al equipo aire mediante un soplador. Los gases que producidos del proceso de gasificación son limpiados de materiales carbonizados y elementos condensables como el agua, para posteriormente ser mezclados con aire y alimentados al motor generador de energía eléctrica.

3.3 Asignación Física (Physical Allocation)

Para el caso de la cadena productiva de los tallos de café como materia prima para el proceso de gasificación, es necesario que se identifique el grano de café verde como un coproducto, y por tanto se realice una distribución de impactos ambientales en el cultivo de café para los dos productos, a saber, tallos de café y grano de café verde. Para esto se dispone de una producción de 18,6 sacos de café verde/ha-año para el 2018 [149], al tiempo que se producen 16 t de tallos/ha – 5 años, lo que equivaldría a una asignación másica de 74,14% para los tallos y de 25,86% para los granos del café verde.

3.4 Análisis de inventario

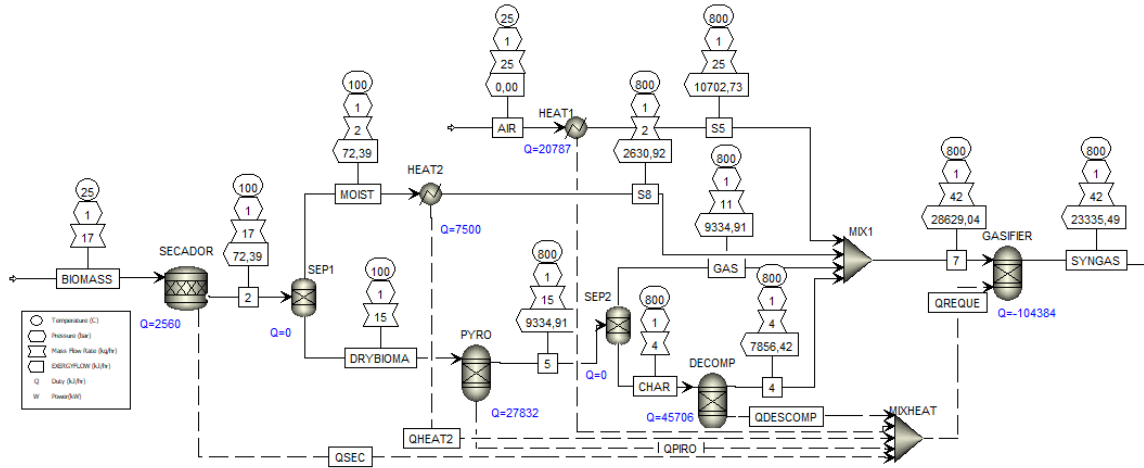
A continuación, se describen las entradas a cada una de las fases, teniendo en cuenta los balances realizados tanto de materia como de energía.

3.4.1 Gasificación

La tecnología seleccionada para el proceso de gasificación es la de lecho fijo con flujo descendente, con aire como agente gasificante, principalmente debido a las facilidades de implementación y operación. En la **Figura 3-2** se observa el diagrama de la simulación del proceso de gasificación realizada en el software Aspen Plus V11®.

En los siguientes apartados se detallan los parámetros fisicoquímicos que identifican la biomasa y el cálculo del aire requerido para la gasificación, así como cada una de las etapas simuladas, que incluyen el secado, la pirólisis, la combustión y reducción y finalmente las especificaciones para la separación de volátiles y descomposición de char, los mezcladores de aire y de calor y los precalentadores.

Figura 3-2 Simulación del proceso de gasificación en Aspen Plus V11®



Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11®

Propiedades de la biomasa

Las características físicas y químicas de la biomasa a gasificar desempeñan un papel importante en el proceso. De acuerdo con [150], se ha observado que la calidad de los productos depende en gran parte del tipo de biomasa que se utiliza. Dichas características son medidas a través de los análisis último y próximo, en los que se incluyen los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, así como el porcentaje de cenizas, carbono fijo y humedad.

El Poder Calorífico Inferior (PCI) es una de las propiedades más importantes en el uso de la biomasa como combustible y hace referencia a la cantidad de energía liberada por la biomasa al quemarse completamente con la cantidad de oxígeno adecuado, su valor suele ser menor que la mayoría de los combustibles fósiles y esto se relaciona principalmente con la densidad, ya que es más baja y con un alto contenido de oxígeno [6]. En este caso el PCI se calcula a partir de la Ecuación (9) tomada de [151]:

$$LHV_{biom} = 0,0041868(1 + 0,15[O]) \left(7837,667[C] + 33888,889[H] - \frac{[O]}{8} \right) \quad (9)$$

En la **Tabla 3-2** se presentan la composición fisicoquímica de los tallos de café de acuerdo con diferentes autores, para este caso se trabaja con los análisis próximo y último

realizados por [152] debido a que corresponden a tallos originados en el departamento de Caldas.

Tabla 3-2 Composición fisicoquímica de los tallos de café

	[153]	[154]	[152]
Humedad	8,64 ± 1,13	8,7	11,44
Análisis próximo (% w/w dry)			
Volátiles	79,12 ± 0,61	82,15	83,14
Cenizas	1,99 ± 0,01	1,07	2,29
Carbono Fijo	18,89 ± 0,064	16,78	14,57
Análisis último (% w/w dry)			
Carbono	48,55	48,35	49,49
Hidrógeno	5,88	5,93	5,41
Oxígeno	43,57	44,21	41,78
HHV (MJ/kg)	19,67 ± 0,78	19,22	17,37

Fuente: Tomado [152]–[154]

Aire requerido para la gasificación

La cantidad de aire teórico requerido para la combustión de 1 kg de tallos de café se calcula a partir de la Ecuación (10) propuesta por [6] y en donde C, H, O y S corresponden a los porcentajes máxicos de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre en base seca respectivamente. El resultado obtenido tiene unidades de kg de aire /kg de biomasa y se conoce como aire estequiométrico.

$$M_{da} = \left[0,1153 C + 0,3434 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,043 S \right] \quad (10)$$

Luego de realizar el cálculo estequiométrico puede determinarse la cantidad de aire necesaria para la gasificación a partir de la Ecuación (11) en donde ER corresponde a la relación de equivalencia y \dot{m}_{bio} flujo de entrada de biomasa al gasificador, los cuales se establecen en 0,25 y 17,2 kg/h respectivamente, la relación de equivalencia fue establecida mediante recomendaciones identificadas en la literatura con respecto a este tipo de tecnología [6] y material a gasificar [155].

El flujo de tallos seleccionado se establece de tal forma que sea compatible con información experimental existente para este tipo de procesos [82], de tal forma que pueda existir una comparación y posterior discusión.

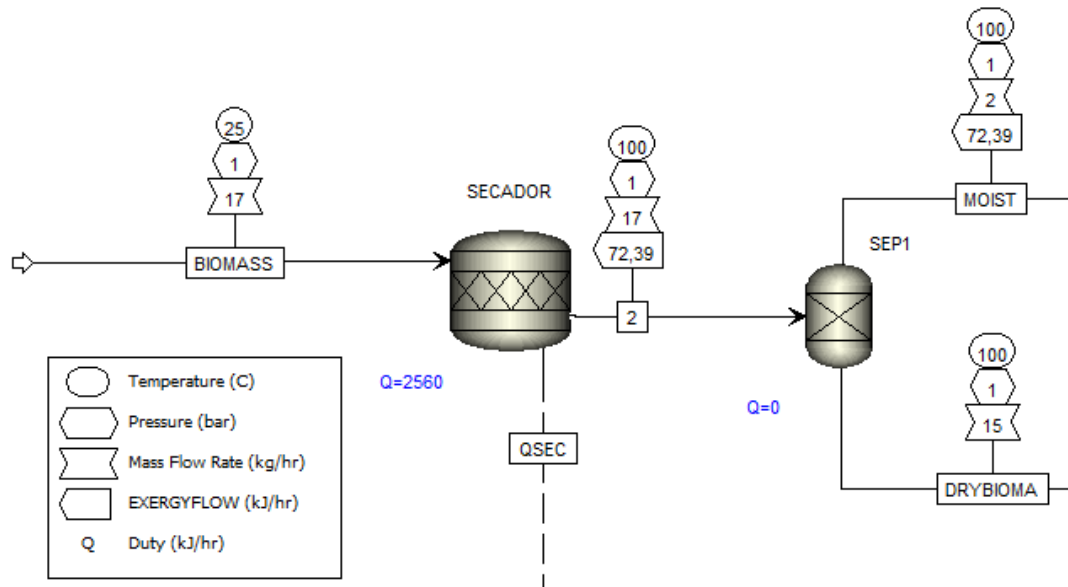
$$M_{fa} = M_{da} \cdot ER \cdot \dot{m}_{biom} \tag{11}$$

El valor calculado para la masa de aire requerida fue de 24,81 kg/h , este valor es ingresado al modelo en las etapas de reducción y combustión, cuya alimentación se realiza a condiciones de 1 atmósfera de presión y 25°C.

Etapa de secado

La primera etapa que ocurre en el proceso de gasificación es la etapa de secado, en esta se remueve la humedad existente en la biomasa, que no haya sido retirada en la preparación inicial. La humedad se retira por relación estequiométrica con el agua, elevando a una temperatura de 100°C en un secador efectuada en un reactor RYield identificado como “SECADOR” y posteriormente se realiza una separación de la corriente de agua en el SEP1 (ver **Figura 3-3**).

Figura 3-3 Simulación de la etapa de secado

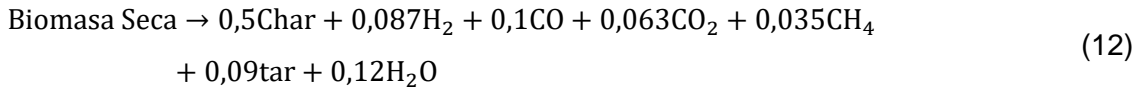


Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11

A pesar de que la corriente de agua es separada en este proceso, es incluida nuevamente cuando las reacciones de combustión posteriores tienen lugar. El calor utilizado para este secado "QSEC" es el obtenido desde las reacciones de combustión posteriores.

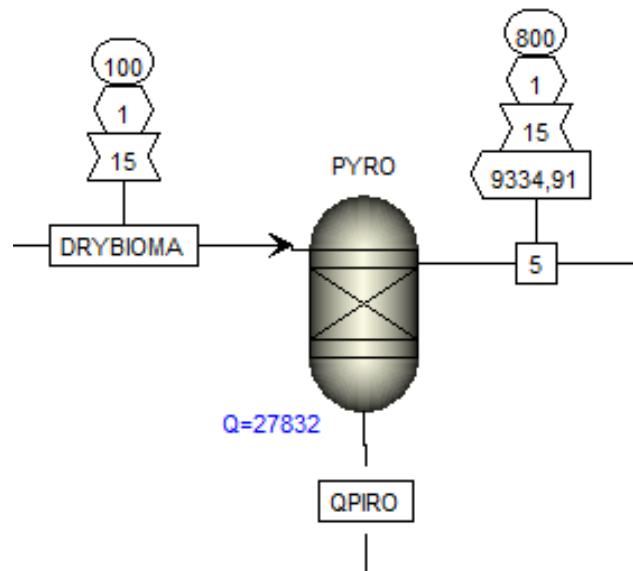
Etapa de pirólisis

Para esta etapa se procede a realizar una descomposición inicial de la biomasa en ausencia de O_2 , este proceso termoquímico permite separar una parte de los componentes volátiles y disponerlos de tal forma que posibilite otras reacciones posteriores, como reacciones de combustión y reacciones de reducción. La descomposición en la etapa de pirólisis se hace de acuerdo con la reacción presentada en la Ecuación (12) y extraída de [156], [157]:



El char generado será un componente a base de C, H, O y cenizas, mientras que el tar es una mezcla de hidrocarburos aromáticos entre los que se encuentran el benceno, fenol, naftaleno y otros, cuyo punto de ebullición se encuentran entre los 100°C y 500°C , para propósitos de simplificación están representados por el C_6H_6O .

Figura 3-4 Simulación de la etapa de pirólisis



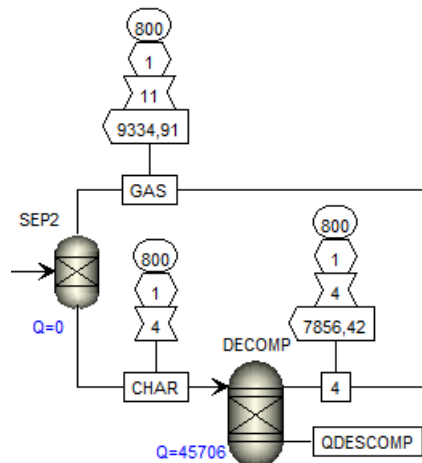
Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11®

Cómo se observa en la **Figura 3-4** la pirólisis es simulada mediante un reactor RYield a 800°C y el calor necesario “QPIRO” para esta operación es obtenido también de las reacciones de combustión de etapas posteriores.

Separación de volátiles y descomposición del char

Posterior al proceso de pirólisis se dispone un proceso para separar los volátiles y demás gases hacia la corriente “GAS” del material carbonizado en el separador “SEP2”, una vez separada la corriente de “CHAR” es dirigida a un reactor RYield, nombrado como “DECOMP”, en el que se descompone en N_2 , O_2 , H_2 , C y Cenizas, composición obtenida a partir de los balances de materia (ver **Figura 3-5**).

Figura 3-5 Simulación de separación de volátiles y descomposición del char



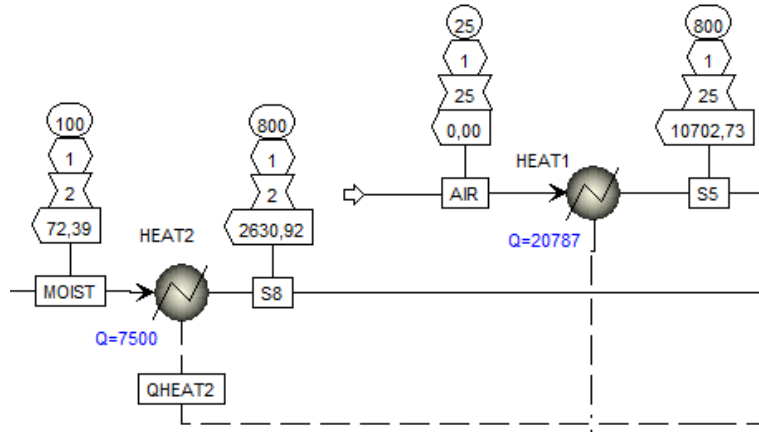
Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11®

El calor necesario “QDESCOMP” para esta operación es obtenido también de las reacciones de combustión de etapas posteriores.

Pre calentadores

La corriente de humedad proveniente del proceso de secado inicial “MOIST” es precalentada antes de llegar a la etapa de combustión y reducción, así mismo el aire a la entrada del equipo “AIR”, a pesar de que estos intercambiadores no existen como etapas reales, se simula de esta forma para mostrar su comportamiento dentro del equipo (ver **Figura 3-6**).

Figura 3-6 Simulación de precalentadores



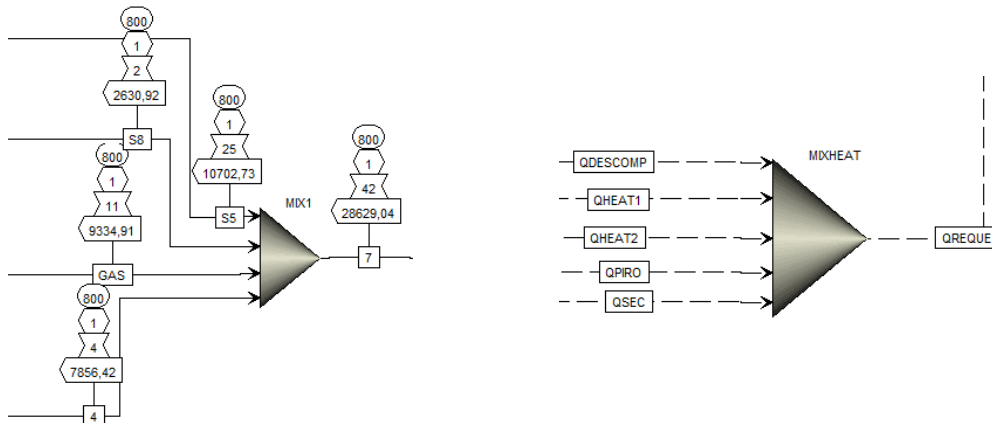
Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11

La energía utilizada para efectuar estos precalentamientos QHEAT1 y QHEAT2, son obtenidos de igual manera de las reacciones de combustión posteriores.

Mezcladores de aire y de calor

Las corrientes provenientes del calentamiento aire y humedad (ver **Figura 3-7**), además de los gases de las descomposiciones de la pirólisis y los materiales carbonizados, son mezcladas previo al ingreso a la etapa de combustión y reducción.

Figura 3-7 Simulación de mezcladores de aire y de calor



(a) Mezclador de aire

(b) Mezclador de calor

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11

Así mismo todos los requerimientos energéticos del secador, la pirólisis, la descomposición del char y los precalentadores son mezclados e ingresados al reactor en el que ocurre la combustión y la reducción, como calor requerido "QREQUE".

Etapas de combustión y reducción

Las etapas de combustión y reducción se llevan a cabo en la parte media inferior del gasificador, cerca al punto en el que se alimenta el aire como agente gasificante, en estas zonas ocurre una serie de reacciones químicas tanto homogéneas como heterogéneas que son listadas a continuación:

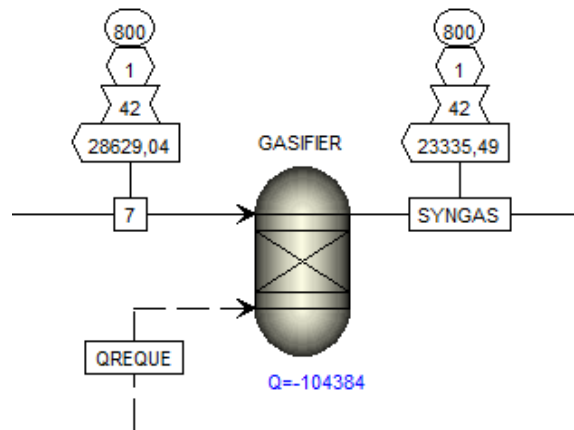
Reacciones heterogéneas

R1: Oxidación I	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$
R2: Oxidación II	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
R3: Reacción Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
R4: Reacción Vapor – Char	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
R5: Oxidación parcial	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
R6: Metanación	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$

Reacciones Homogéneas

R7: Combustión III (Oxidación de CO)	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$
R8: Combustión de H ₂	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$
R9: Combustión de metano	$CH_4 + 1,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$
R10: Reacción de desplazamiento de gas de agua	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
R11: Reformado de Metano	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$
R12: Craqueo de Alquitranes	$tar \rightarrow 0,3CO_2 + 2,43CO + H_2 + 0,67CH_4$

El proceso es simulado mediante el uso de un reactor RGibbs en Aspen Plus (ver **Figura 3-8**), a una temperatura de 800 °C y presión de 1 atmósfera.

Figura 3-8 Simulación de las etapas de combustión y reducción

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus V11®

El gas de síntesis obtenido tiene la composición molar mostrada en la **Tabla 3-3**

Tabla 3-3 Composición molar del gas de síntesis a la salida del gasificador

Componente	%
H ₂	16,27
H ₂ O	4,68
N ₂	41,26
CO	17,75
CO ₂	14,93
CH ₄	5,12

Fuente: Elaboración propia

Los gases producto de esta etapa son un gas de síntesis con contenido de agua y cenizas, por lo que es necesario etapas posteriores de condensación de agua con posterior retiro de cenizas en un ciclón, un filtro y un condensador. Inicialmente se enfría a 200 °C antes de entrar al proceso del ciclón y el lavador, para posteriormente salir a una temperatura de 40°C en la que la mayor parte del agua ha sido condensada, así como muchos de los TAR que aun continúen en la corriente del gas.

3.4.2 Germinación

La germinación inicia con la semilla de café certificada, obtenida de frutos de árboles seleccionados y procesos en los que no se vean afectados ni su pergamino (endocarpio), o su embrión; el secado no supere los 37 °C y la humedad final aproximada sea de 11% o 12%. Esta germinación es efectuada en un germinador de arena por un tiempo aproximado de 50 a 70 días, tras lo que se genera una chapola, dispuesta a ser trasplantada al almácigo [158]. Para el crecimiento de la chapola hasta ser una plántula es necesaria la preparación de un medio, el uso de agua, suelo, fertilizantes orgánicos, fungicidas y una bolsa plástica, como flujo de salida de esta fase se presenta la producción de la plántula lista para continuar con el proceso de plantación en el terreno asignado [149].

El consumo constante de 17,2 kg/h tallos de café para la gasificación indica que a lo largo de su cadena productiva se debe calcular el área constante cultivada y los demás recursos materiales y energéticos. Para producción de (16/5) 3,2 t/ha-año de tallos de café, el área sembrada para cada año debe permanecer en 47,085 ha. Para una tasa de densidad de siembra de 5.000 cafetos/ha, más baja que el promedio en el año 2018 de 5.196 [149], por lo que para cada año se cuenta con una cantidad total sembrada de 235.425 cafetos. Teniendo en cuenta que esta planta es un cultivo perenne cuyo ciclo de vida puede durar hasta los 25 años [159], se espera una resiembra completa de 9.417 plántulas/año (1,035 plantas/h).

En la **Tabla 3-4** se lista la cantidad y unidades requeridas de cada uno de estos ítems a la entrada de la germinación y se presenta una visualización de la etapa en el Software Umberto® LCA+, que puede observarse de forma general en el **Anexo B**. Para configurar algunas entradas del proceso de germinación se utiliza la base de datos **Ecoinvent 3.0** en el software **Umberto® LCA+**, la cual incorpora la descripción y características de los fertilizantes utilizados para un kilogramo de café de la variedad Arábica entre las que se incluyen características organolépticas de su variedad como los tonos de su sabor o acidez y contenido de cafeína en comparación con otras variedades, estos datos están disponibles para el caso de Colombia, sin embargo, no ocurre lo mismo para el mercado de compostaje y fungicidas por lo que en estos casos se utilizan datos globales. Debido a limitaciones en la información incluida en bases de datos del software, la alimentación de semillas seleccionada es el grano de café verde.

Tabla 3-4 Inventario de ciclo de la vida de la germinación (1,075 plántulas/h)

Material	Valor	Unidad	Modelado en Umberto® LCA+
Agua	62,8875	ml/h	
Tierra	1,6125	kg/h	
Compost	0,5375	kg/h	
Semillas	0,29025	g/h	
Fungicidas	0,0018275	g/h	
Bolsa	2,15	g/h	

Fuente: Elaboración propia a partir de [149]

3.4.3 Cultivo y cosecha

Para la etapa de cultivo se realiza el cálculo de insumo y demás materiales necesarios para la preparación de terreno, teniendo en cuenta las 47,085 hectáreas, en la cual se realiza el proceso de siembra una vez establecidos correctamente los muestreos y diseños necesarios. Para el uso del suelo para el cultivo de café del suelo se designa “Cultivos permanentes, no irrigados, intensivos” tal como se menciona en [149], la cual se encuentra incluida en la base de datos **Ecoinvent 3.0**, con esto inicia el proceso de crecimiento del cafeto, un arbusto perenne, que tarda hasta un año en producir frutos a partir del proceso de germinación y que alcanza picos de producción entre los 6 y 8 años, aunque continúa su producción por más de 25 años.

De acuerdo con los autores del documento Huella Ambiental de Café en Colombia [149], la fertilización es un proceso importante que limita en gran medida la producción, algunos de estos fertilizantes utilizados inclusive pueden llegar a conducir a disminuciones en los rendimientos de hasta un 80% en el caso del nitrógeno (30% para el potasio), si se llega a eliminar completamente del este proceso; para la simulación de esta fase se utilizaron tres tipos de fertilizantes basados en nitrógeno (Urea), potasio (K₂O) y fósforo (P₂O₅).

El manejo integrado de arvenses puede ser realizado de forma química, mecánica o manual. En esta investigación, para el cuidado de la planta se aplican algunos tipos de pesticidas con el objetivo de prevenir plagas y ayudar a controlar arvenses de forma química [145][132]. La simulación de esta fase utiliza clorpirifós, glufosinato de amonio y propargita, teniendo en cuenta el mayor aporte en masa por unidad de área incluidos por los autores mencionados anteriormente y que resulta del estudio realizado en siete fincas cafeteras de la región, en la **Tabla 3-5** se lista el inventario de ciclo de vida para la fase de cultivo y cosecha.

Tabla 3-5 Inventario de ciclo de la vida entrada a la etapa de cultivo y la cosecha

Material	Valor	Unidad	Modelado en Umberto® LCA+
Área de Cultivo	47,085	ha	
Plántula	235.425	cafetos	
Fertilizante 1 (Urea)	0,435	kg/h	
Fertilizante 2 (P ₂ O ₅)	0,091	kg/h	
Fertilizante 3 (K ₂ O)	0,554	kg/h	
Pesticida 1 (Clorpirifós)	1,305	g/h	
Pesticida 2 (Glufosinato de amonio)	0,729	g/h	
Pesticida 3 (Propargita)	4,988	g/h	

Fuente: Elaboración propia a partir de [149]

La salida de esta fase es el cultivo con 235.425 plantas de cafeto en 47,085 ha cultivadas, las cuales, representan una producción de grano de café verde de 5,9985 kg/h, considerando que el promedio de producción de este producto es de 18,6 $\frac{\text{sacos de cafe verde}}{\text{ha.año}}$ [149], para sacos de 60 kg. Como se menciona previamente es necesario realizar una designación física (masa) entre la producción de tallos de café (74,14 %) y el grano de café verde (25,86 %). Fracciones de los pesticidas, aproximadamente el 10% son emitidos al medio circundante, aéreo o acuoso; respecto al uso de los fertilizantes, se reportan en la **Tabla 3-6** factores de emisión para N₂O, NH₃, CO₂ y NO₃⁻ en base a las cantidades aplicadas de las sustancias a base de N [149].

Tabla 3-6 Inventario de ciclo de la vida salida etapa de cosecha

Material	Valor	Unidad	Factor de emisión
Área de Cultivo	47,085	ha	-
Plántula	235.425	Plantas de cafeto	-
Amoníaco (NH ₃)	0,07837	kg/h	0,18 NH ₃ /kg de fertilizante de N aplicado
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,68354	kg/h	1,57 kg CO ₂ /kg Urea N
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0,553625	kg/h	0,44 kg NO ₃ ⁻ / kg de N aplicado
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,00958	kg/h	0,022 kg N ₂ O/ kg de fertilizante de N aplicado
Pesticida 1 (Clorpirifós)	1,30505	g/h	90% emitido al compartimento del suelo agrícola, un 9% al aire y un 1% al agua
Pesticida 2 (Glufosinato de amonio)	0,72885	g/h	
Pesticida 3 (Propargita)	4,9874625	g/h	
Grano de café verde	5,9985	Kg/h	18,6 sacos de café verde por ha - año

Fuente: Elaboración propia a partir de [149]

3.4.4 Zoqueo y transporte

Una vez que el cultivo cumple con las cosechas del quinto año, se inicia el proceso de renovación, para este, los árboles preferiblemente no deben contar con flores o frutos. Se implementa la poda y corte en el tallo a 30 cm de suelo [146], el área a renovar para tener una producción constante de 17,2 kg/h de tallos de madera seca, es de 1/5 del área sembrada (9,417 ha). El material es almacenado y posteriormente transportado hacia el punto de acopio asignado, en la presente investigación se seleccionan 3 distancias que sean representativas a longitudes cercana (30km), media (60km) y lejana (100km), respecto a los desplazamientos entre los dos municipios seleccionados (Manizales y Chinchiná) hacia un punto de acopio.

El punto de acopio se selecciona en la ciudad de Manizales en el escenario 1 y el transporte de material es realizado a una distancia promedio de 30 km, determinada de tal manera que sea representativa de las fincas de la región con respecto a puntos específicos en los que podrían efectuarse estos procesos de gasificación. Para el transporte, se selecciona de la base de datos Ecoinvent 3.0, la actividad “Transporte, carga, camión 3,5-7,5 toneladas métricas, EURO3”. A pesar de que Colombia implementó el requerimiento Euro IV desde el año 2015, el escenario real muestra como muchos de los vehículos utilizados para el desplazamiento entre veredas no logren cumplir con este tipo de reglamentación. Para el cálculo de exergía representada en el transporte, Ptasinski et al. sugiere que, para transporte de biomasa en países en desarrollo, se tome un valor de $1,67 - 2,45 \frac{\text{MJ}}{\text{t.km}}$ [160].

3.4.5 Astillada de tallos

Una vez almacenados los tallos de madera se realiza un tratamiento previo al proceso de gasificación, para que los 17,2 kg/h puedan ser alimentados al proceso, se requiere de una reducción de tamaño de partícula de la biomasa. Las dimensiones aproximadas de los tallos son 1,69 m de altura y un diámetro promedio de 4,93 cm [159], mientras que las condiciones especificadas por el fabricante requieren de entre 0,04 y 0,01 m, este proceso es realizado con astilladora de madera.

Finalmente, se aplica de la base de datos de **Ecoinvent 3.0** la actividad “*astillado de madera, madera residual industrial, astilladora eléctrica estacionaria*”. Para la energía requerida para la operación de astillada [161] sugieren un consumo de entre 1 – 3 % de la energía contenida en la biomasa, para un 2% del poder calorífico inferior de la biomasa, la energía requerida para este proceso es de 5.977,51 kJ/h.

3.4.6 Generación de energía

Una vez los procesos de limpieza de los gases han sido efectuados, el gas de síntesis es conducido a un motor de combustión interna adecuado para tal fin, el volumen de gas a condiciones normales (V_{gas}), es decir 25°C y 1 atmósfera de presión, es obtenido mediante los balances realizados en el software Aspen Plus® V11, obteniéndose un valor de 38,69 Nm³/h, con la composición presentada en la **Tabla 3-7**.

Tabla 3-7 Composición molar del gas de síntesis a la entrada del motor

Componente	%
H ₂	17,07
N ₂	43,28
CO	18,62
CO ₂	15,66
CH ₄	5,37

Fuente: Elaboración propia

En la selección del motor se tiene en cuenta, como se había mencionado anteriormente, otros trabajos realizados en gasificación para este tipo de biomasa, para esta investigación se utiliza el motor GM VORTEC 3.0L tomando en consideración un radio de compresión de 10.25:1 de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Por otro lado, para el cálculo de poder calorífico inferior del gas (LHV_{gas}) se utiliza la Ecuación (13) extraída de [162]:

$$LHV_{gas} = 10,77Y_{H_2} + 12,655Y_{CO} + 35,825Y_{CH_4} \quad (13)$$

Donde Y_i corresponde a la fracción molar de los componentes H₂, CO y CH₄. Para las fracciones presentadas en la **Tabla 3-7**, el $LHV_{gas} = 6119,05 \text{ kJ/Nm}^3$. Posteriormente para el cálculo de la potencia del motor y la salida de los gases de combustión, se utiliza la Ecuación (14) implementada por [163] y donde ELX es la electricidad generada y la P_{eff} es la eficiencia para este tipo de motores.

$$ELX = V_{gas} * LHV_{gas} * P_{eff} \quad (14)$$

De acuerdo con Maya [163], los motores de combustión interna modificados para este tipo de combustible tienen unas eficiencias eléctricas que oscilan entre 14 y 26%, para la presente investigación se asume un valor de 20%. El aire necesario para la combustión en el motor (77,67 kg/h), es obtenido designando un exceso de 25% para garantizar la combustión completa; teniendo en cuenta que los componentes de referencia para este cálculo son el H₂, CO y CH₄, este aire es alimentado a través de un compresor a una relación de 1,701:1 por mol de gas alimentado, teniendo en cuenta las relaciones

estequiométricas de las reacciones de combustión Ecuación (15), Ecuación (16) y Ecuación (17).



La potencia eléctrica generada en el motor de combustión interna es de 13,154 kWh, con un consumo específico de biomasa de 1,3076 kg/ kWh.

3.5 Análisis exergético

El análisis exergético es un método capaz de combinar los conocimientos proporcionados por la primera y la segunda ley de la termodinámica, aplicando los balances energéticos y exergéticos, para dar una idea de los sitios en los que en un proceso pueden estar ocurriendo pérdidas energéticas o posibles impactos ambientales [70]. Los procesos pueden ser mejorados si al calcular la energía y la exergía de sus procesos, y así mismo sus eficiencias exergéticas, se identifica la existencia de etapas con proceso en las que se presenten grandes consumos de exergías tan alejados están estos de ser procesos ideales en los que sus irreversibilidades sean mínimas.

Específicamente para esta investigación, se busca identificar si en los procesos simulados existen etapas, en las que se puedan identificar ineficiencias exergéticas, las etapas con mayores destrucciones de exergía o con un mayor agotamiento de recursos, implicando la existencia de etapas con potenciales de mejora.

Para el cálculo de cada una de las corrientes asociadas a los distintos procesos, es necesario que inicialmente se establezca un estado de referencia del ambiente el cual es tomado de [66], definido como una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 25°C.

La exergía de una corriente cuenta con varios aportes, la exergía física, la exergía química, la exergía potencial, la exergía nuclear y los términos de trabajo y energía. La contribución de la exergía física y química además del calor y el trabajo es mucho mayor que el aporte de las exergías potencial y cinética, esto debido a que las velocidades y cambios en la altura de los procesos es despreciable en comparación, resultando finalmente la Ecuación (4) presentada en el capítulo anterior.

Para el caso de la exergía física se observa como su cálculo depende de la entalpía y de la entropía de las corrientes, y su variación respecto al estado de referencia. Teniendo en cuenta que estas dos variables son dependientes de los cambios de temperatura y presión respectivamente [164], el cambio entre la exergía física entre la entrada y la salida para los procesos que se efectúen a las mismas condiciones de temperatura y presión del estado de referencia será despreciable en función del aporte de su exergía química.

Para el cálculo de la exergía química asumimos para la mezcla de gases una mezcla ideal, por tanto, la actividad es igual a la fracción molar. Por lo que, se puede aplicar la ecuación 5 mencionada en el capítulo anterior. En el caso de la biomasa Szargut [66] presenta la siguiente relación en la Ecuación (18):

$$E_{x,biomasa} = \beta LHV_{biomasa} \quad (18)$$

Donde $LHV_{biomasa}$ se calcula a partir de la Ecuación (19):

$$LHV_{biomasa} = 0,0041868(1 + 0,15[O]) \left(7837,667[C] + 33888,889[H] - \frac{[O]}{8} \right) \quad (19)$$

Y β se calcula a partir de la Ecuación (20):

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160 \frac{[H]}{[C]} - 0,2499 \frac{[O]}{[C]} \left(1 + 0,7884 \frac{[H]}{[C]} \right) + 0,0450 \frac{[N]}{[C]}}{1 - 0,3035 \frac{[O]}{[C]}} \quad (20)$$

En las Ecuaciones (18), (19) y (20), $LHV_{biomasa}$ es el poder calorífico inferior de la biomasa [KJ/Kg], mientras que $[C]$, $[O]$, $[H]$ y $[N]$ representan las fracciones básicas en composición base seca en el análisis último de la biomasa.

Los datos presentados en la **Tabla 3-8** son utilizados para realizar los cálculos requeridos en la Ecuación (5), se tiene que las exergías químicas estándar y las entalpías de formación para cada componente son:

Tabla 3-8 Exergías químicas estándar y entalpías de formación

Componente	Exergía química estándar (kJ/kmol)	Entalpía de formación (kJ/kmol)
H ₂	238.490	0
N ₂	690	0
O ₂	3.970	0
H ₂ O	11.710	241,82
CH ₄	836.510	74,85
CO	275.430	110,53
CO ₂	20.140	-393,5
C	410.820	0

Fuente: Tomado de [164]

Finalmente, para el cálculo de las corrientes de exergía del proceso de gasificación, se toman los datos suministrados por el software Aspen Plus V11® para las distintas corrientes. Se aclara que este cálculo que presenta el software solo corresponde a exergía física y no realiza el cálculo para sustancias No Convencionales como la biomasa o las cenizas.

3.6 Evaluación de Impacto

En la evaluación de los impactos generados se tienen en cuenta las categorías de impacto de demanda de exergía acumulada mencionadas en el marco teórico y las eficiencias exergéticas de las distintas etapas del proceso.

3.6.1 Eficiencia exergética

La eficiencia exergética (η_{ex}) de un proceso nos permite identificar, donde se presentan las mayores pérdidas exergéticas por irreversibilidades o exergía destruida, respecto a la ingresada al sistema; en eficiencias bajas se pueden presentar agotamientos innecesarios de recursos materiales o energéticos, o inclusive emisión de contaminantes hacia los alrededores y, por tanto, una potencial generación de impactos ambientales [70].

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x,in}}{E_{x,out}} \quad (21)$$

Una vez los balances de materia fueron establecidos, se procede a calcular la exergía de las corrientes, las primeras cuatro fases del proceso (Germinación, Cultivo y Cosecha, Transporte y Astillado de tallos), son efectuadas a las mismas condiciones de temperatura y presión establecidos en el estado de referencia. Por tanto, la mayor cantidad de exergía asociada a su flujo es derivada de su contenido de exergía química y la energía en forma de trabajo para el transporte o el astillado. Posteriormente en la fase de etapa de gasificación, limpieza y generación de electricidad, las condiciones de operación tienen cambios significativos sobre el estado de referencia, por lo que la exergía física conlleva valores relevantes en los balances.

Mediante el uso del software de simulación de procesos, Aspen Plus@ V11 se realizan los cálculos energéticos para para cada una de las corrientes en esta fase. Cabe resaltar que el software únicamente realiza el cálculo de la exergía en su forma física Ex_{ph} , por lo que el balance general, en el que se incluyen las otras formas presentadas en el capítulo 2, relacionado a la parte química de los constituyentes Ex_{ch} , a la transferencia de calor Ex_Q y al trabajo.

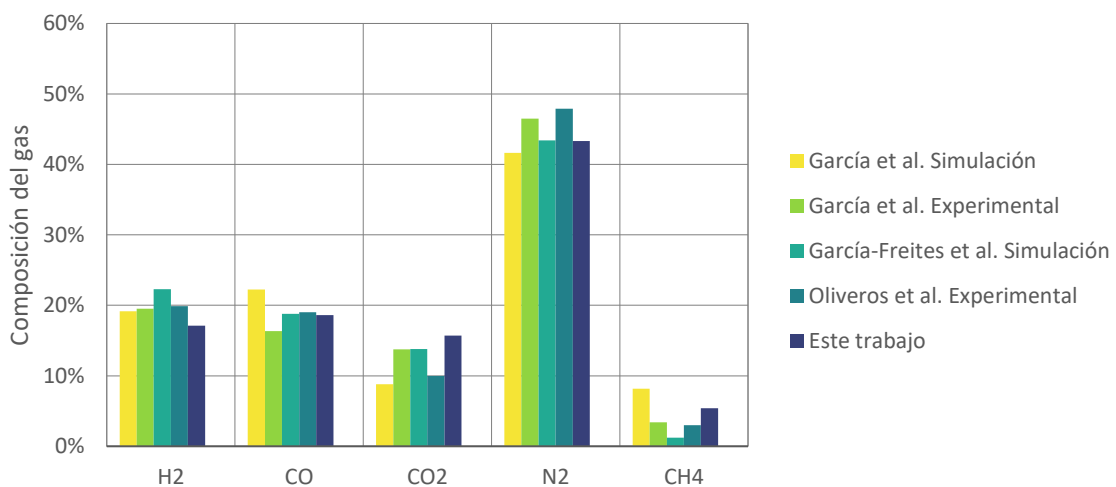
4. Resultados

4.1 Composición del syngas

A partir de la simulación de la gasificación en Aspen Plus® V11 se obtuvo un syngas con una composición que incluye 17,10% de H₂, 18,60% de CO, 15,70% de CO₂, 5,40% de CH₄ y 43,30% de N₂ y cuyo poder calorífico corresponde a 6,119 MJ/Nm³. Así mismo, a partir de una alimentación de biomasa de 17,2 kg/ h se estimó una generación de 13,15 kWh, un consumo específico de biomasa de 1,3076 kg/ kWh, el cual se encuentra en los rangos reportados en la literatura (1,14 – 1,47 kg/ kWh) [82].

Para realizar la validación de estos resultados se realiza la comparación de la composición del syngas como los estudios que se observan en la **Figura 4-1** hallados de forma experimental y a partir de simulaciones utilizando tallos de café de origen colombiano.

Figura 4-1 Comparación de la composición de syngas de tallos de café simulado con la literatura

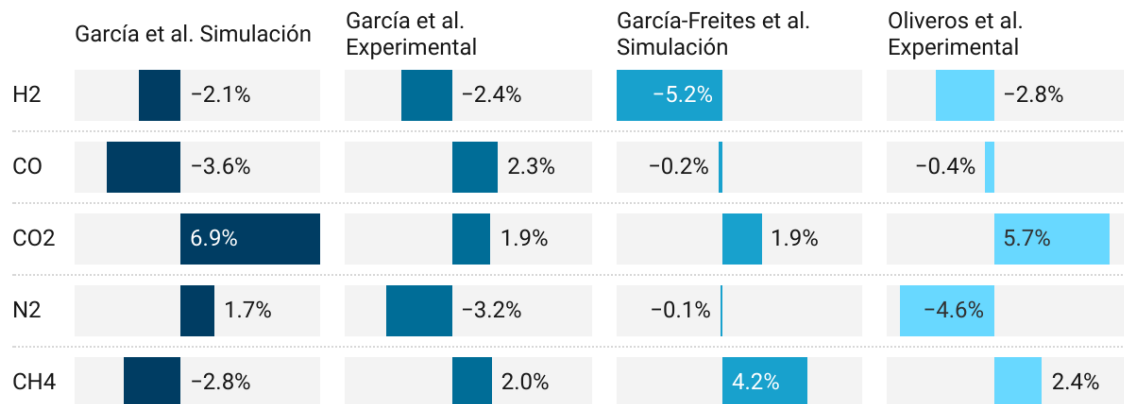


Fuente: Elaboración propia a partir de [82], [83], [155]

Los datos publicados por García et al. [83] corresponden a un gasificador de lecho fijo de la línea Power Pallet de 10 kW comercializada por la empresa estadounidense All Power Labs. El gasificador se alimentó con 12 kg/h de tallos de café con un contenido de humedad de 8,5%; bajo estas condiciones los resultados de la simulación arrojaron un poder calorífico de 6,119 MJ/m³ frente a un valor experimental de 4 MJ/Nm³, la diferencia radica en una mayor predicción de la participación del monóxido de carbono y metano en la simulación en comparación con el procedimiento experimental.

Al comparar los datos obtenidos con los reportados por [83] se observa (ver **Figura 4-2**) que en la simulación la participación del hidrógeno, monóxido y metano es ligeramente menor en el presente trabajo, mientras que los valores de dióxido de carbono y nitrógeno son mayores. En cuanto a las mediciones experimentales, en este trabajo se obtuvo menor concentración de hidrógeno y nitrógeno.

Figura 4-2 Variación porcentual de la composición del gas entre el presente trabajo y otros hallados en la literatura



Created with Datawrapper

Fuente: Elaboración propia a partir de [82], [83], [155]

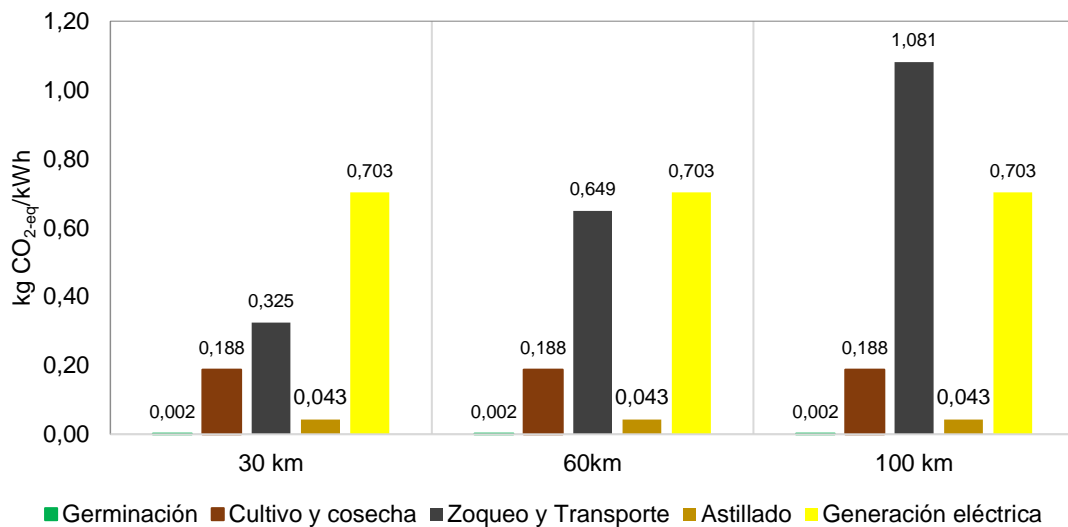
En la simulación en Aspen Plus realizada por García-Freites et al. [155] los autores utilizan un gasificador de lecho fijo y tiro descendente de 100 kW_{th} alimentado con 27,2 kg/h de café obteniendo un poder calorífico inferior de 4 MJ/Nm³ con el cual se podría generar entre 20,4 – 40,4 kW_{el}. Al comparar los resultados se observa una diferencia mínima en la estimación de monóxido de carbono, dióxido de carbono y nitrógeno, por otro lado, en este trabajo se estimó un 5,2% menos de hidrógeno y un 4,2% más de metano (ver **Figura 4-2**).

Finalmente, en los datos experimentales publicados por [82] se utilizó un gasificador de lecho fijo de 20 kW_{el}, de la empresa estadounidense All Power Labs, con una alimentación de tallos de madera entre 8,16 – 17,2 kg/h. Al comparar el promedio de los resultados hallados por los autores se observa que en el presente trabajo se obtuvo un 2,8% menos de hidrógeno, 0,4% menos de monóxido y 4,6% menos de nitrógeno, por otro lado, los valores para el dióxido de carbono y el metano fueron en un 5,7% y 2,4% mayores.

4.2 Huella de carbono

Inicialmente se presenta en la **Figura 4-3** la huella de carbono calculada a mediante la simulación en el software Umberto LCA+ para el proceso estudiado. Se analizan los tres escenarios propuestos, para 30 km, la huella de carbono total fue de 1,260 kg CO_{2-eq}/kWh, mientras que para 60 km y 100km, fue de 1,584 kg CO_{2-eq}/kWh y 2,017 kg CO_{2-eq}/kWh respectivamente, lo que se traduce en aumentos de aproximadamente un 20%.

Figura 4-3 Huella de carbono para tres escenarios de desplazamiento



Fuente: Elaboración propia

Fauzi et al. [165] en el año 2020, reporta una huella de carbono de 1,69 kg CO_{2-eq}/kWh, superior a la obtenida en esta investigación (1,260 kg CO_{2-eq}/kWh), para un proceso de gasificación de biomasa (palma Kernell), para una planta de 5 kW, aunque cabe aclarar que su análisis fue llevado a cabo desde la entrada de la planta a la salida de ella (puerta a puerta), por lo que la captura de CO₂ en el cultivo no fue tomada en consideración. Otras

investigaciones presentan reportes de huella de carbono de un valor inferiores (40-100 g CO_{2-eq}/kWh) para gasificación de biomasa (residuos de la industria de la madera), en una planta de mayor capacidad de generación (2MW) [166].

Los tallos son actualmente usados para la cocción de alimentos en las fincas cafeteras. Por lo cual, es necesario comparar con las emisiones inicialmente presentadas por los tallos en está quema. Para ello, a partir de los valores obtenidos de huella de carbono de este trabajo de 1,260 kg CO_{2-eq}/kWh y el consumo específico de biomasa calculado en el capítulo anterior (1,3076 kg/ kWh), se puede estimar una relación en función de la biomasa (0,964 kg CO_{2-eq}/ kg de biomasa).

De tal manera que pueda compararse con los factores de emisiones de tallos de café reportada en la literatura (1,958 kg_{CO₂eq}/kg producto) [11]. Adicionalmente, los resultados obtenidos en este trabajo son inferiores a otras materias primas usadas en la combustión de alimentos, tales como, cisco (1,871 kg_{CO₂eq}/kg producto), gas propano (4,692 kg_{CO₂eq}/m³ producto) y carbón mineral (2,534 kg_{CO₂eq}/kg producto) [11].

4.3 ELCA

Los resultados obtenidos en los balances exergéticos son relacionados en la **Tabla 4-1**, y detallados posteriormente en el Anexo B.

Tabla 4-1 Balances exergéticos del ciclo de vida del proceso

Componentes		Entrada	Productos	Ex_destruida	Eficiencia Exergética
Fase	Etapas	Ex, in [KJ/h]	Ex, out [KJ/h]	Ex, D I [KJ/h]	η (%)
Germinación	Germinación	1.427,839	665,432,2071	762,407	46,604
Cultivo y Cosecha	Cultivo	342.787,754	338.176,817	4.610,937	98,655
	Cosecha	338.333,370	336.173,334	2.160,036	99,362
Zoca y transporte	Zoca y Transporte	337.437,534	336.173,334	1.264,200	99,625
Astillado	Astillado	342.150,846	336.173,334	5.977,512	98,253

Componentes		Entrada	Productos	Ex_destruida	Eficiencia Exergética
Fase	Etapas	Ex, in [KJ/h]	Ex, out [KJ/h]	Ex, D I [KJ/h]	η (%)
Gasificación y Generación	Gasificación	337.615,805	240.065,446	97.550,358	71,106
	Limpieza de gases	240.065,446	234.090,743	5.974,703	97,511
	Motor	252.740,601	69.948,371	182.792,230	27,676

Fuente: Elaboración propia

Se presenta el escenario para cada una de las cinco fases con sus respectivas etapas de proceso. Las primeras cuatro fases los balances exergéticos están ligadas específicamente a la exergía química de cada una de las corrientes, esto debido a, que los procesos se llevan a cabo en las mismas condiciones de temperatura y presión del estado de referencia [66], [167], lo que impide que el cambio en la exergía física pueda considerarse representativo. De igual forma, la alimentación de la biomasa al proceso de gasificación es realizada a las mismas condiciones del estado de referencia, 25 °C y 1 atmósfera, por lo que para los balances exergéticos para esta corriente de entrada, tienen en cuenta únicamente la contribución de la exergía química de la biomasa.

Las eficiencias exergéticas más bajas se presentan en los procesos de Generación de energía eléctrica (27,676%), Germinación (46,604%) y la Gasificación (71,106%). En el caso de la baja eficiencia exergética en la generación eléctrica, puede Identificarse dos posibles justificaciones, la primera en la que los procesos asociados, combustión y compresión, son considerados como altamente irreversibles; la segunda, relaciona la baja eficiencia energética de los motores de combustión interna (14-26%) [163], la energía contenida en los gases al momento de la compresión, expresada a través de su exergía química y física, no logra ser liberada rápidamente para ser transformada posteriormente, en forma de aumento en la presión y generación de trabajo. Como menciona Agudelo et al. [168] en el año 2008, las fuentes de irreversibilidades en un motor de combustión interna son la transferencia de calor, la combustión, la mezcla, la turbulencia y la disipación viscosa.

Las bajas eficiencias exergéticas en procesos biológicos, tal como mencionan Bararzadeh et al. [169] en el año 2020, están relacionados a procesos que van desde la mineralización hasta la absorción de nutrientes por la planta. En su investigación muestran cómo hasta un 62,5% de la exergía destruida es debido a reacciones de disolución en el suelo, humus, protonación y fotosíntesis, esta última siendo la más determinante con una baja eficiencia energética (cerca del 15%). Otros autores sugieren que, al examinar los insumos consumidos en el proceso de cultivo, la adición de fertilizantes y el uso de combustibles representan las mayores cantidades de exergía destruida [170].

Las bajas eficiencias exergéticas pueden ser causadas por pérdidas de energía o reacciones irreversibles, lo que puede identificar la energía utilizada para el proceso como de baja calidad, es decir, energía con bajas tasas de conversión a trabajo útil [171]. La destrucción de exergía más alta ocurre en los procesos de generación de energía eléctrica (182.792,230 kJ/h) y gasificación (97.550,358 kJ/h). Mientras que el proceso en el que ocurren las menores es en la germinación (762,407 kJ/h).

A pesar de que el proceso de germinación presenta una eficiencia exergética baja (46,604%), al mismo tiempo, cuenta con la menor cantidad de exergía destruida, por lo que un proceso de mejora no significaría un cambio drástico en rendimiento global. Las etapas más susceptibles a mejoras desde el punto de vista del análisis exergético, son la generación de energía eléctrica y la gasificación. Ambas se ven afectadas por la alimentación de aire mediante el sistema de compresión, por lo que la optimización en este equipo puede significar una mejora considerable en el rendimiento global del proceso.

4.4 Demanda de Exergía Acumulada (CExD)

Los cálculos de este método de análisis son realizados mediante la simulación del ciclo de vida en el software Umberto® LCA+, este modelo cuenta con diez categorías entre las que se incluyen materiales energéticos y no energéticos, además de renovables y no renovables, lo que permite identificar como está dividida la contribución de exergía, tanto para las corrientes asociadas a los procesos, como a las distintas fases. A partir de sus resultados presentados en la **Tabla 4-2** se puede identificar cual es el origen de los recursos para la fabricación del producto o la prestación del servicio determinado.

Las fases con mayor CExD son la Generación eléctrica (196,3714 MJ_{eq}) y el transporte (72,3728 MJ_{eq}) que, a su vez, tienen como principales contribuyentes, los procesos de “T14: mercado de aire comprimido, manométrica de 600 kPa [GLO]” y “transporte de tallos” respectivamente.

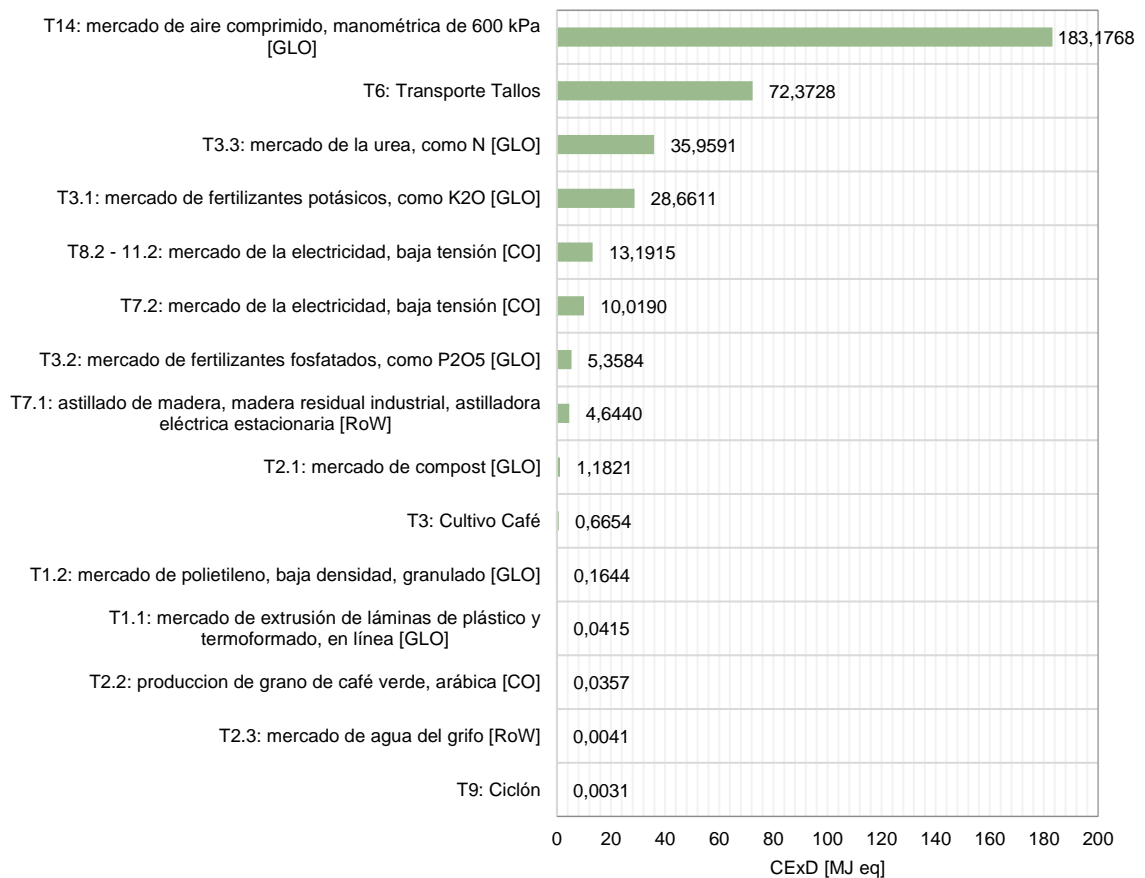
Al igual que en el análisis exergético, la etapa de generación se presenta con el mayor potencial de mejora, al complementar con los resultados suministrados en el método CExD, se ratifica que el compresor es la sección del proceso con mayor consumo de recursos. Así mismo, en la se puede observar cómo la demanda acumulada de exergía relacionada al compresor está compuesta, en gran medida, por recursos no renovables de naturaleza fósil (104,3543 MJ_{eq}).

Tabla 4-2 Consolidado del inventario de CExD

	CExD - biomasa, Recursos energéticos renovables, biomasa	CExD - fósil, Recursos energéticos no renovables, fósil	CExD - metales, Recursos materiales no renovables, metales	CExD - minerales, Recursos materiales no renovables, minerales	CExD - nuclear, Recursos energéticos no renovables, nuclear	CExD - bosque primario, Recursos energéticos no renovables, bosque primario	CExD - solar, Recursos energéticos renovables, solar, convertida	CExD - recursos hídricos, Recursos materiales renovables, agua	CExD - agua, Recursos energéticos renovables, potencial (agua en represa), convertida	CExD - viento, Recursos energéticos renovables, cinética (en viento), convertida	Total, general
Germinación	0,2747	0,4744	0,0062	0,0037	0,2358	0,0185	0,0001	0,3989	0,0138	0,0016	1,4278
T1.1: mercado de extrusión de láminas de plástico y termoformado, en línea [GLO]	0,0004	0,0249	0,0001	0,0001	0,0054	0,0000	0,0000	0,0082	0,0021	0,0004	0,0415
T1.2: mercado de polietileno, baja densidad, granulado [GLO]	0,0008	0,1416	0,0000	0,0000	0,0152	0,0000	0,0000	0,0049	0,0019	0,0000	0,1644
T2.1: mercado de compost [GLO]	0,2613	0,2916	0,0056	0,0034	0,2137	0,0184	0,0001	0,3775	0,0094	0,0011	1,1821
T2.2: producción de grano de café verde, arábica [CO]	0,0122	0,0158	0,0005	0,0002	0,0015	0,0001	0,0000	0,0049	0,0004	0,0001	0,0357
T2.3: mercado de agua del grifo [RoW]	0,0000	0,0005	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0036	0,0000	0,0000	0,0041
Cultivo y Cosecha	11,1284	33,8711	0,5103	0,7143	3,5675	1,0015	0,0046	19,1402	0,6065	0,0997	70,6441
T3.1: mercado de fertilizantes potásicos, como K ₂ O [GLO]	10,6164	6,8427	0,1228	0,1060	2,6027	0,9821	0,0042	7,1243	0,2253	0,0345	28,6611
T3.2: mercado de fertilizantes fosfatados, como P ₂ O ₅ [GLO]	0,3359	2,7019	0,0879	0,5684	0,3123	0,0191	0,0002	1,1985	0,1158	0,0187	5,3584
T3.3: mercado de la urea, como N [GLO]	0,1707	23,8963	0,2962	0,0388	0,5997	0,0003	0,0002	10,6665	0,2481	0,0424	35,9591
T3: Cultivo Café	0,0054	0,4303	0,0034	0,0012	0,0528	0,0000	0,0000	0,1509	0,0173	0,0041	0,6654
Zoqueo y Transporte	0,2961	67,0525	0,7093	0,2193	1,0199	0,0041	0,0033	2,5484	0,4480	0,0718	72,3728
T6: Transporte Tallos	0,2961	67,0525	0,7093	0,2193	1,0199	0,0041	0,0033	2,5484	0,4480	0,0718	72,3728
Astillado	0,0473	7,1537	0,0532	0,0364	0,4247	0,0001	0,0000	1,9019	5,0050	0,0406	14,6630
T7.1: astillado de madera, madera residual industrial, astilladora eléctrica estacionaria [RoW]	0,0273	3,0648	0,0138	0,0144	0,3936	0,0000	0,0000	0,8661	0,2301	0,0339	4,6440
T7.2: mercado de la electricidad, baja tensión [CO]	0,0200	4,0888	0,0394	0,0221	0,0312	0,0001	0,0000	1,0358	4,7749	0,0067	10,0190
Generación Eléctrica	2,1862	109,7405	0,9003	0,5075	26,4030	0,0040	0,6308	38,3837	15,5651	2,0502	196,3714
T14: mercado de aire comprimido, manométrica de 600 kPa [GLO]	2,1598	104,3543	0,8484	0,4784	26,3619	0,0040	0,6308	37,0196	9,2782	2,0413	183,1768
T8.2 - 11.2: mercado de la electricidad, baja tensión [CO]	0,0263	5,3836	0,0519	0,0291	0,0410	0,0001	0,0000	1,3639	6,2869	0,0088	13,1915
T9: Ciclón	0,0000	0,0026	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0031
Total, general	13,9327	218,2922	2,1793	1,4813	31,6510	1,0282	0,6389	62,3731	21,6384	2,2639	355,4791

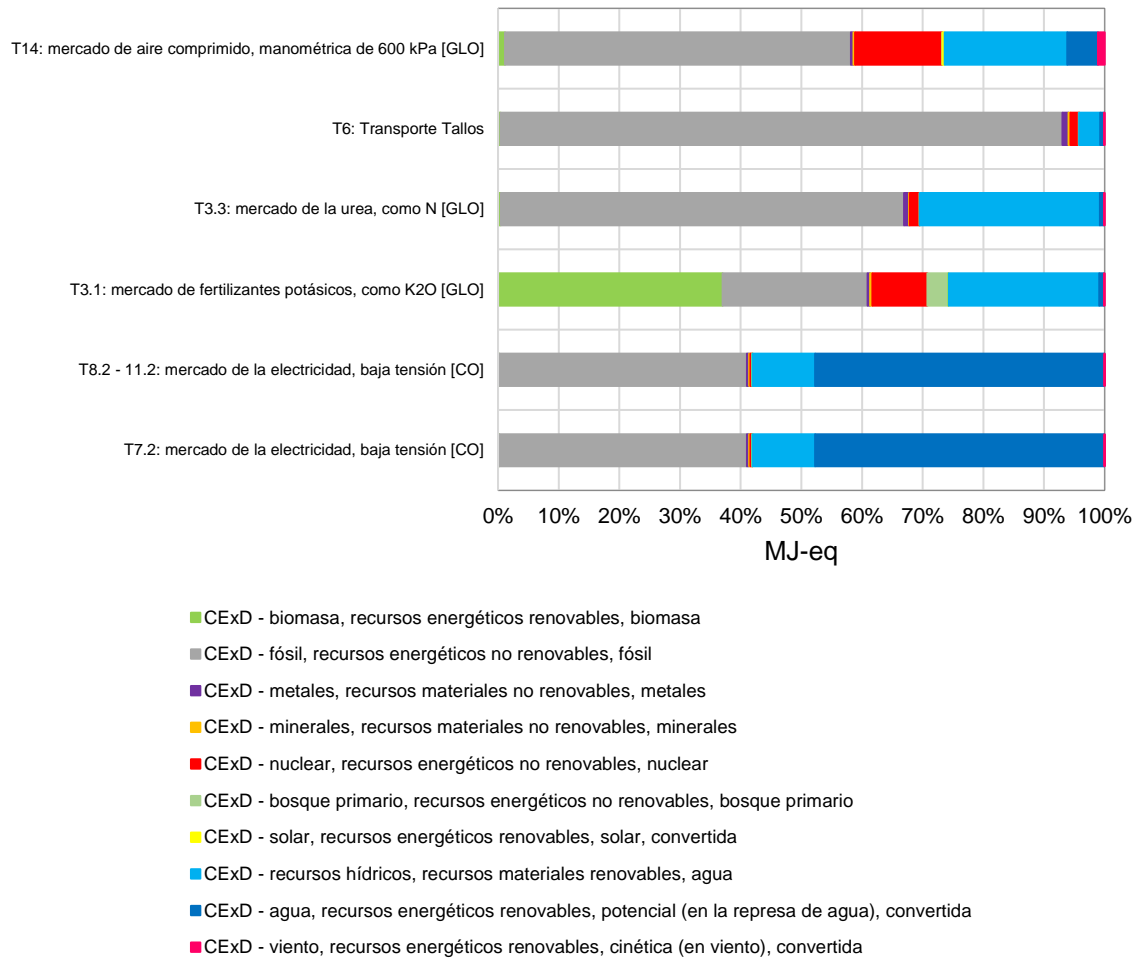
En la **Figura 4-4** se comparan los distintos procesos, considerando todas las fases del ciclo de vida. Se puede evidenciar como los cuatro procesos de mayor magnitud, poseen diferencias significativas sobre el resto, e inclusive la mayor de ellas, el “T14: mercado de aire comprimido, manométrica de 600 kPa [GLO]”, alcanza a suponer hasta un 51,53% de la demanda acumulada de exergía total.

Figura 4-4 CExD total de cada proceso (MJ-eq)



Fuente: Elaboración propia

El hecho de que esto ocurra, indica que más de la mitad de todos los recursos que el sistema está tomando de los alrededores está siendo consumido por un solo proceso, alimentar aire al gasificador y al motor. La **Figura 4-5** permite identificar cual es la participación de los distintos métodos de CExD en las seis corrientes más influyentes identificadas en la **Figura 4-4**.

Figura 4-5 Aporte de las categorías CExD a los mayores contribuyentes

Fuente: Elaboración propia

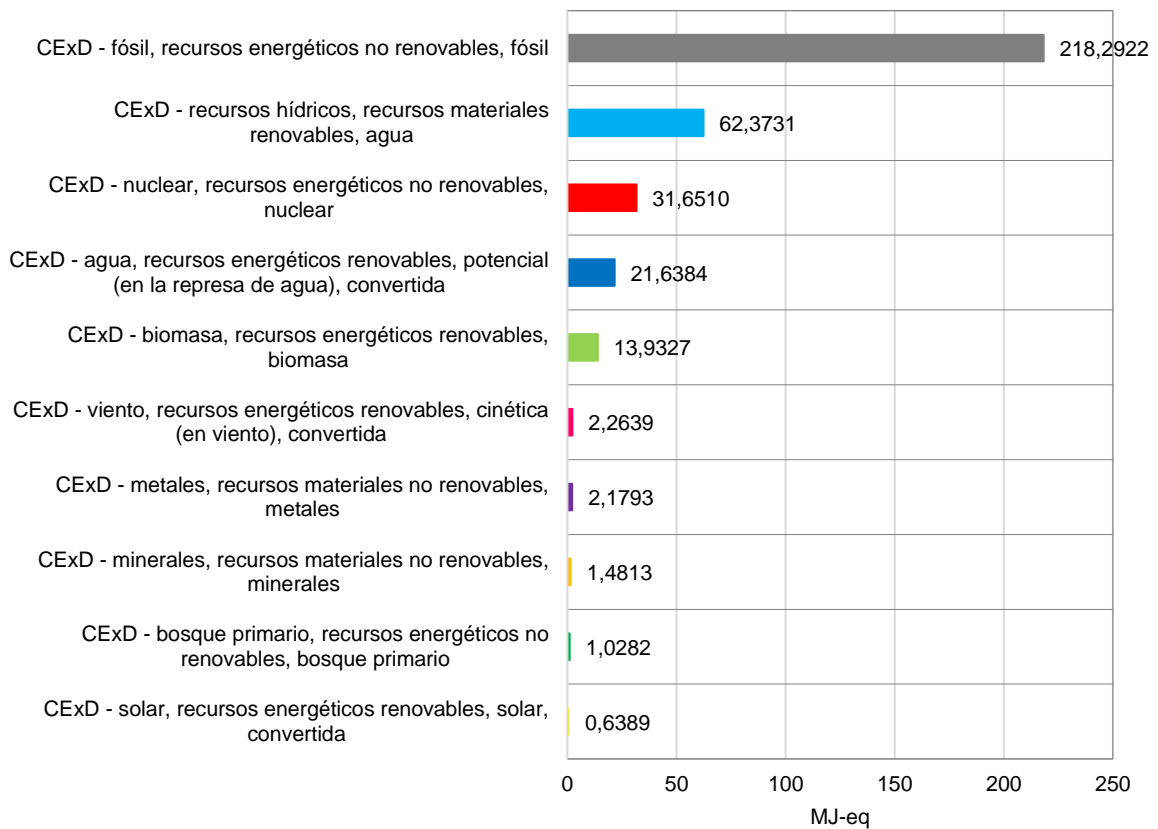
El mercado de los fertilizantes es un mercado dependiente de los combustibles fósiles, tanto al ser estos su principal materia prima, como por los costos energéticos requeridos para su fabricación. En la **Figura 4-5**, se evidencia como la contribución de la CExD fósil en la corriente en T3.3 mercado de la urea como N [GLO], representa más de un 65% de los recursos necesarios para su elaboración.

Se puede observar cómo categoría de impacto de CExD, con una mayor contribución exergética para las corrientes T4, T6 y T3.3, es la “CExD - fósil, recursos energéticos no renovables, fósil”, y la segunda para T8, T11.2, T7.2. El alto consumo de recursos fósiles para muchos de los procesos muestra la dependencia actual de este tipo de tecnologías con recursos energéticos no renovables.

A pesar de Colombia cuenta con una matriz energética de más del 66% en energía hidroeléctrica [51], se observa como el consumo de recursos para el mercado de la electricidad de baja tensión (T8.2, T11.2 y T7.2), está constituido, casi partes iguales por recursos energéticos fósiles no renovables e hídricos energéticos renovables.

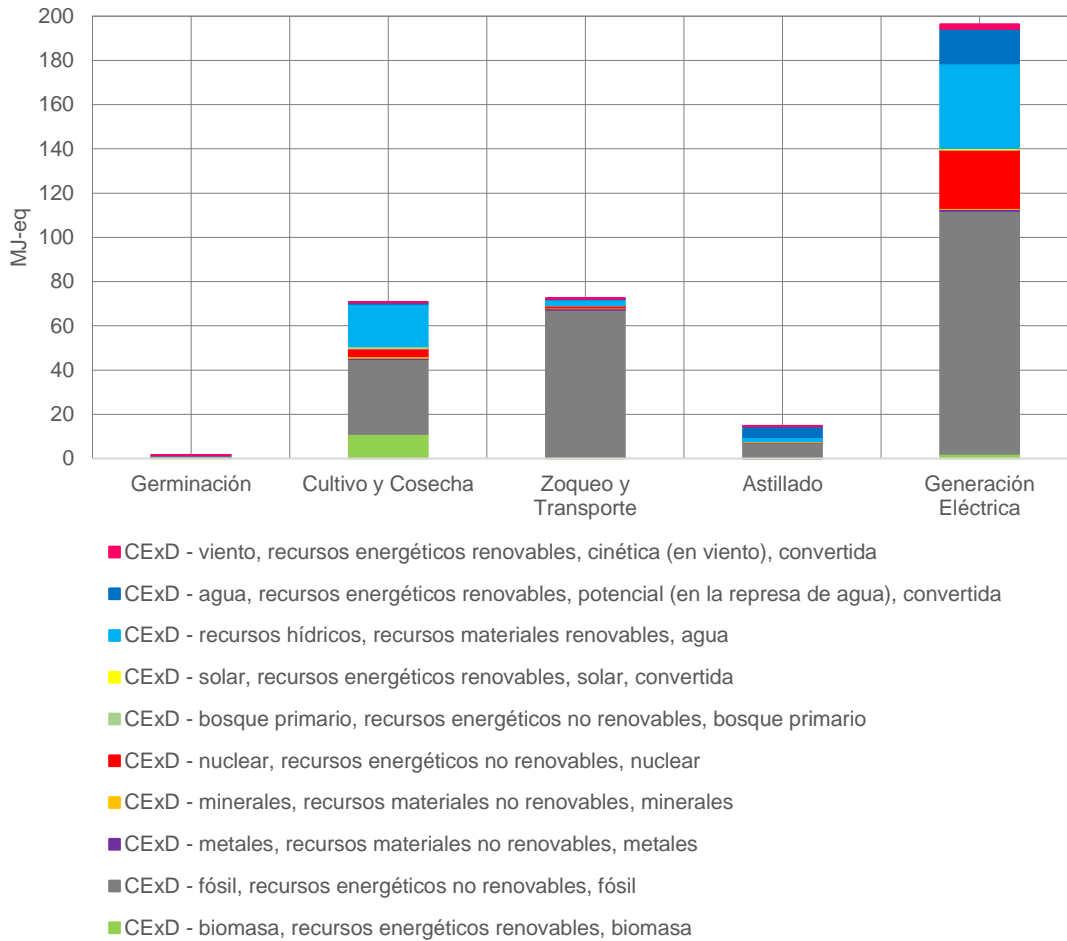
En la **Figura 4-6** se observa como para la totalidad del ciclo de vida del proceso en caso de estudio, la categoría CExD - fósil, recursos no renovables es la categoría contribución más significativa (61,41%), seguida por el CExD – recurso hídrico, recurso material renovable (17,55%), con una magnitud hasta 3,5 veces inferior

Figura 4-6 Categorías de CExD con mayor agotamiento de recursos



Fuente: Elaboración propia

A pesar de ser una forma de generación energética a partir de fuentes renovables, se puede evidenciar como la gasificación de biomasa, cuenta con muchos procesos al interior de su cadena productiva, con un consumo elevado de recursos no renovables materiales y energéticos.

Figura 4-7 CExD total para cada Fase

Fuente: Elaboración propia

La demanda acumulada de exergía para la fase de zoqueo y transporte está constituido, en su mayor parte, por recursos energéticos no renovables fósiles, lo cual está asociado al tipo de transporte seleccionado y a los insumos necesarios para el proceso de renovación.

El consumo de recursos energéticos de origen nuclear, en las fases de generación eléctrica y cultivo, está asociado específicamente a los procesos de compresión de aire (gasificador y motor) y el uso de fertilizantes potásicos respectivamente. Las bases de datos para estos procesos son seleccionados de Ecoinvent mediante una perspectiva global; por lo que países desde los que importen este tipo de productos o servicios, pueden ver involucradas sus respectivas matrices energéticas, influyendo indirectamente en el producto en estudio.

En el caso de que la tecnología y los fertilizantes utilizados en el proceso, procedan del mercado local, se deben reevaluar estos e implementar los cambios respectivos en los procesos asociados.

4.5 Evaluación de distintos escenarios en transporte

Los cálculos del presente estudio fijan una distancia media de transporte en 30 km, la cual abarca las distancias entre el punto de carga de la biomasa en las fincas, hasta la llegada al punto de acopio seleccionado. En algunos de los casos esta distancia puede variar debido a que las rutas de transporte actuales no se destinan exclusivamente al transporte de carga entre las veredas, y deben limitar, tanto el tamaño de su carga, como la frecuencia en el cual lo realizan, según la disponibilidad.

Al mismo tiempo es necesario considerar que el aumento en la contaminación o el consumo de recursos, relacionados al transporte, pueden afectar el desempeño global del proceso. Con el fin de evaluar la influencia del transporte en resultados obtenidos, se procede a comparar las 3 distancias propuestas (30km, 60km y 100km).

Como puede observarse en la **Tabla 4-3**, a medida que aumenta la distancia de desplazamiento requerida para el transporte de los tallos, así mismo lo hace la contribución al proceso global de la demanda acumulada de exergía por transporte. En el punto en que la distancia ha llegado a los 100 km, la fase de zoqueo y transporte (46,01%), ha superado en contribución total de CExD respecto a la que para las otras distancias representaba la mayor contribución, generación de energía eléctrica (37,45%).

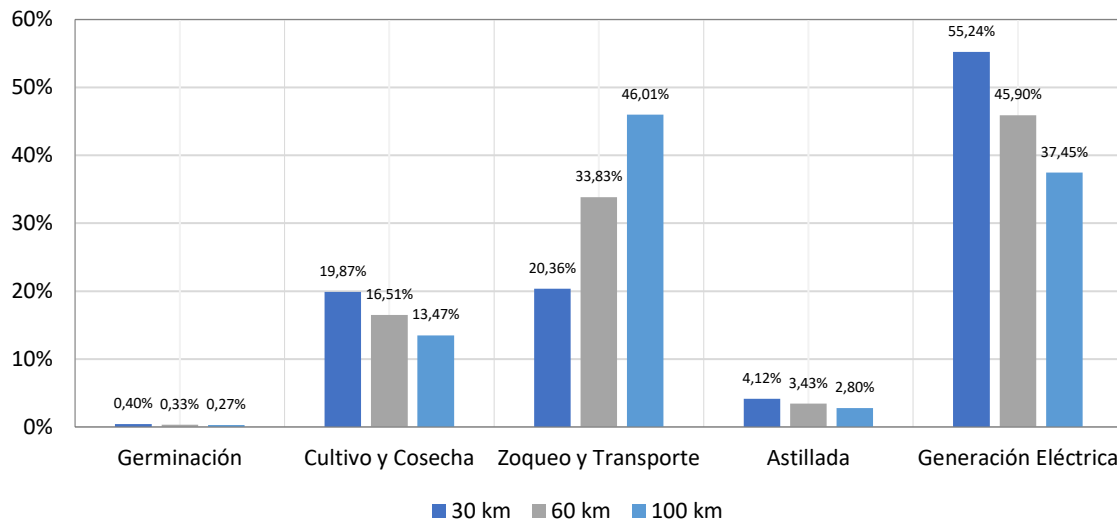
Tabla 4-3 Variación de CExD para diferentes distancias de transporte de tallos

Distancia (km)	CExD Total	CExD Fósil	% CExD Fósil	CExD Transporte	% CExD de transporte
30	355,479	218,292	61,4	72,373	20,359
60	427,852	285,345	66,7	144,746	33,831
100	524,349	374,748	71,5	241,243	46,008

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, el CExD asociado a la exergía provenientes de recursos no renovables fósiles, pasa de contribuir en un 61,4% del total para 30 km, a hacerlo en un 71,5% para un desplazamiento de 100 km. La comparación a partir de la **Figura 4-8** en la permite identificar el aumento en el aporte de CExD proveniente de la fase de transporte, cuyo principal recurso asociado es la energía a partir de fuentes fósiles 61,4 % (30 km), 66,7% (60 km) y 71,5% (100 km).

Figura 4-8 Porcentajes de contribución CExD por etapa para 30km, 60km y 100km



Fuente: Elaboración propia

Para 30km y 60 km el principal al consumo de recursos esta influido por la generación eléctrica, mientras que para 100 km aumenta significativamente por el transporte.

La contribución de la fase de transporte en el CExD de todo el proceso representa un 20,359% (30km), mientras que una vez es requerido un desplazamiento de 100km desde el punto de recolección en la planta de gasificación representa el 46,01%. Esto significa que, una vez alcanzados los 100 km, el mayor consumo de recursos del proceso completo de gasificación de tallos, estará representado en el transporte de estos hacia el punto de acopio.

El análisis de distancias es significativo, ya que como sugieren algunos autores, es necesario evaluar el desplazamiento de la biomasa desde perspectivas energéticas, económicas y medioambientales, con el fin de identificar los puntos de equilibrio para el proyecto en estudio [172].

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones y recomendaciones

El proceso de gasificación simulado mediante el software Aspen Plus® V11, teniendo como variables de entrada, el flujo de alimentación (17,2 kg/h), la relación de equivalencia para la alimentación de aire (0,25), composición de la biomasa y la temperatura de gasificación, todas estas extraídas de la literatura existente, con el propósito que los resultados obtenidos puedan ser comparados con datos experimentales reales. Una vez realizada esta etapa se procede con los balances de masa para el resto del proceso.

El ciclo de vida del producto fue ser simulado en el software Umberto® LCA+, teniendo como referencia los balances establecidos previamente, evaluado de la cuna a la puerta, da inicio en la etapa de germinación de la plántula de café, a partir de la semilla y demás insumos necesarios, continuando con las etapas crecimiento del cultivo, cosecha, renovación (zoqueo), transporte de tallos, astillada de la madera, gasificación y generación de energía eléctrica.

A partir de los balances de materia y energía, junto a información recopilada de la literatura, se procede a realizar los balances exergéticos. Con los cuales es posible realizar el análisis exergético para cada una de las etapas. A partir del análisis exergético de ciclo vida fue posible identificar las etapas con mayor potencial de optimización termodinámica del sistema. Mejoras en la eficiencia exergética presentadas de los procesos de generación de energía eléctrica (27,676%) y la gasificación (71,106%), pueden ser traducidas en disminución de consumos de recursos y reducción en las emisiones al medio ambiente.

Las magnitudes de exergía destruida o irreversibilidad de 182.792,230 kJ/h y 97.550,358 kJ/h, asociadas al motor y gasificador respectivamente, indican que existe subprocesos con grandes irreversibilidades o pérdidas de energía hacia el entorno. El más representativo de estos, identificado mediante el CExD, es la alimentación de aire al motor

y al gasificador, a través del proceso: "T14: mercado de aire comprimido, manométrica de 600 kPa [GLO]", con una magnitud de 183,1768 MJ-eq, representando el 51,53% del consumo de recursos asociado a todo el ciclo de vida del proceso.

El transporte implica alternativas, que requieren un enfoque más global, ya que para la disminución de recursos deben mejorarse: las logísticas de recolección, la eficiencia energéticas y exergéticas de los vehículos, propiedades de los combustibles y distancias de desplazamiento de la biomasa a los puntos de acopio. En el aspecto de las distancias de desplazamiento podrían implementarse metodologías de localización de plantas que optimicen en base a disponibilidad de materia prima, las rutas de abastecimiento, tecnología a implementar, capacidad de producción y costos asociados.

La gasificación de biomasa, a pesar de ser una generación de energía a partir de fuentes renovables, tiene a lo largo de su ciclo de vida procesos asociados al consumo elevado de recursos fósiles no renovables. Fabricación de pesticidas e insecticidas, uso de maquinaria para cultivo y preparación de la biomasa, transporte asociado a sus materiales, energía requerida para su operación, y muchos otros relacionados con el consumo de este tipo de recurso, representando un 61,4% de los recursos consumidos totales para el proceso; los impactos asociados a este recurso no renovable pueden observarse a lo largo de toda su cadena productiva.

El potencial de generación de energía eléctrica de este tipo de biomasa representa una oportunidad para el sector agrícola de los departamentos cafeteros, es aún mayor si se considera como las políticas públicas de los gobiernos, centran su atención en identificar actividades que puedan tener repercusiones negativas a corto, mediano o largo plazo sobre la salud de la población, como ocurre con la quema de tallos para la cocción de alimentos. Pero antes de una implementación a gran escala, es necesario que se evalúen los distintos escenarios.

Una alternativa que permita disminuir este alto consumo de recursos en la etapa de alimentación de aire debe centrarse en la naturaleza de la energía alimentada al compresor o soplador. Implementar sistemas híbridos con energía solar y acoplar los procesos para que la energía generada por el motor pueda satisfacer las necesidades del proceso de alimentación.

Así mismo, la eficiencia energética y exergética en la producción de la energía a partir de biomasa puede ser mejorada mediante el aprovechamiento de los calores residual del proceso, la implementación de tecnologías más eficiencias termodinámicamente como la gasificación integrada con ciclo combinado, optimización de procesos de parada y arranque a través de remoción continua de alquitranes y char, mejora en los procesos de limpieza del syngas, selección adecuada de tecnología de gasificación según la capacidad de producción de biomasa, modificación en las condiciones de operación y cambio del agente gasificante a oxígeno o vapor de agua.

Los análisis exergéticos acompañados de la demanda acumulada de exergía, además de ser una herramienta que permite identificar posibles ineficiencias termodinámicas en los procesos, permite conocer la procedencia de los recursos energéticos necesarios para un proceso o material, en la presente investigación se identifica que la mayor cantidad de exergía destruida procede recursos energéticos no renovables de origen fósil (61,4%), lo que requeriría un esfuerzo adicional por parte del entorno, para poder equilibrar impactos generados por combustibles fósiles.

5.2 Limitaciones y discusiones

A partir de la revisión del estado del arte del método ELCA, se pudo constatar que no existe un gran número de investigaciones para el caso de estudio llevado en esta investigación. Las existentes se centran en procesos de construcción civil, procesos de obtención de hidrogeno a partir de combustibles fósiles, gasificación integrada con captura de CO₂ y algunos pocos en procesos mineros.

La información para el cálculo de exergía para cultivos es un poco limitada, ya que requiere de cálculos avanzados en el área de la biología y análisis del comportamiento energético en el interior de la célula [173]. Además de esto el acceso a la información correspondiente a la composición de las plantas en cada etapa de su crecimiento es limitado o nula, por lo que se vuelve imprescindible realizar suposiciones en algunas de las etapas para el cálculo de la exergía química de las corrientes.

En futuras investigaciones se puede realizar estudios de la composición en las distintas etapas de crecimiento de los cultivos, con el fin de que se evalué correctamente el uso eficiente de recursos a lo largo de estas etapas. Esto puede realizarse a partir de la

determinación composición química en las fases de crecimiento. En estudios como los presentados por Bararzadeh et al. [169] en el 2008, y Rasoolizadeh et al. [170] en el 2020, se observa cómo obtener la exergía asociada a las fases de crecimiento en el cultivo, e identificar las reacciones o principales insumos sobre los cuales puede presentarse las mayores destrucciones de exergía.

Los escenarios de transporte analizados en la presente investigación tienen en cuenta un único tipo de transporte en tres distancias que pueden ser consideraras representativas para la región en términos de posibles desplazamientos a puntos de acopio. Las cadenas de transporte de biomasa deben ser investigadas de forma más detallada desde perspectivas económicas, energéticas y medioambientales, acompañadas con metodologías de localización de plantas., algunos autores identifican puntos de equilibrio máximo para transporte de biomasa con fines energéticos, evaluándolas desde estas tres perspectivas, Schnorf et al. [172] logran identificar, para cadenas de suministro específicas, las distancias máximas de transporte para no superar su punto de equilibrio.

La eficiencia exergética puede ser aplicada a evaluaciones de impacto ambiental, desde una perspectiva en la cual, la exergía destruida de un proceso debe ser intervenida por el medio ambiente, a través del consumo de recursos, de tal forma que las corrientes asociadas puedan alcanzar un equilibrio, lo que termina desencadenando un impacto ambiental generados por contaminación o por consumo de recursos. De esta forma, es posible generar investigaciones en las que se identifique inicialmente la forma que esta exergía destruida está produciendo un impacto y posteriormente las formas de mitigarlo o contrarrestarlo.

La información extraída de la base de datos Ecoinvent 3.0, mediante el uso de la herramienta Umberto® LCA+, pueden presentar inconsistencias en la implementación a nivel local, debido a la naturaleza globalizada de la información. En esta investigación se muestran procesos que cuentan con contribuciones significativas en consumo de recursos no renovables de tipo nuclear, situación que puede estar alejada de la realidad del país, si los equipos o fertilizantes implementados en el proceso no han sido importados de países con estas características nucleares en sus matrices energéticas o si proceden directamente de la fabricación local. Es necesario entonces, que futuros trabajos evalúen la aplicabilidad de la información, cuando esta se presenta de forma global o sencillamente no está especificada para el país sobre el que se realiza el estudio.

A. Anexo: Potencial de residuos de tallos de café en Caldas 2020

Tabla 5-1 Potencial de residuos de tallos de café en Caldas 2020

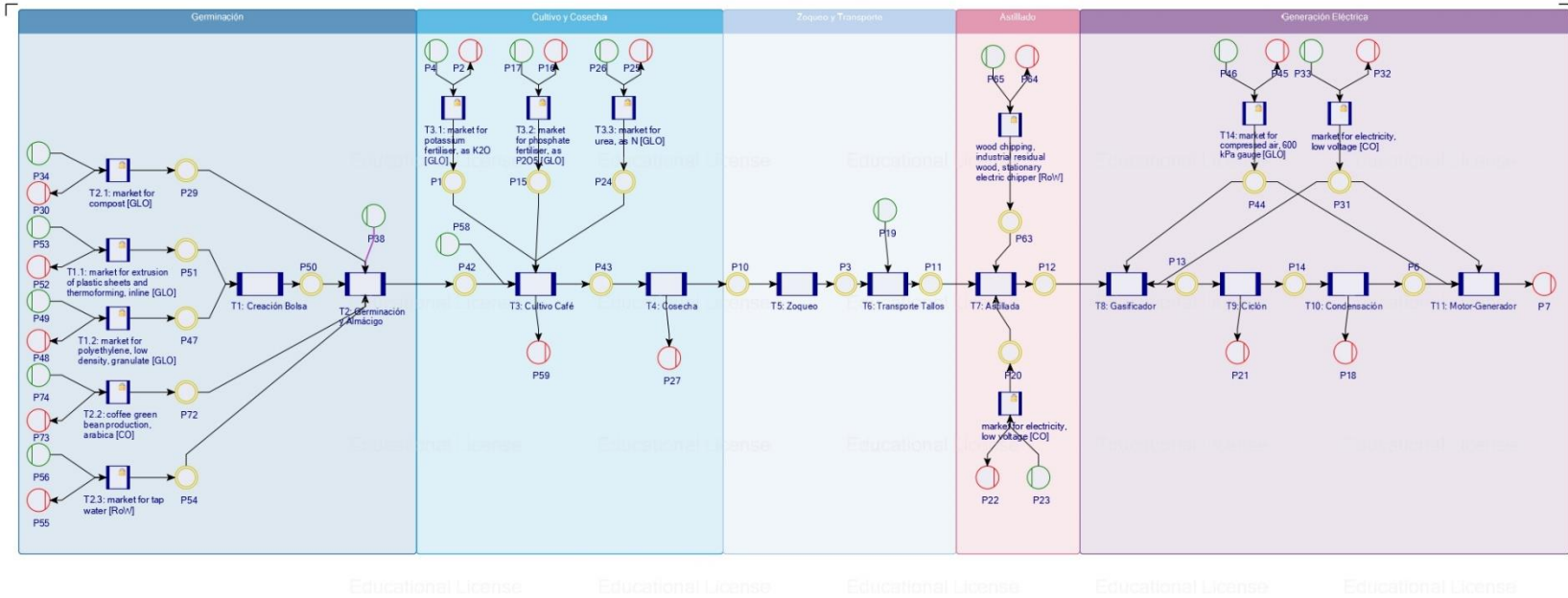
Municipio	Área Sembrada (ha)	Área Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Masa residuo seco [t/año]	Potencial Energético (TJ/año)
Anserma	5473	3952	4837	1,22	14881,08	264,86
Manizales	4920	3362	4149	1,23	13487,13	240,05
Aguadas	4062	3167	3869	1,22	11044,58	196,57
Chinchiná	3941	2899	3605	1,24	10891,24	193,84
Pensilvania	3784	3300	3825	1,16	9782,69	174,11
Neira	2544	2544	4324,8	1,7	9638,63	171,55
Manzanares	3362	2751	3235	1,18	8841,56	157,36
Palestina	2777	1878	2354	1,25	7736,33	137,69
Samaná	2867	2430	2858	1,18	7539,79	134,19
Risaralda	2700	1907	2375	1,25	7521,82	133,87
Belalcázar	2757	2034	2482	1,22	7496,28	133,42
Riosucio	2846	2315	2740	1,18	7484,56	133,21
Marquetalia	2770	2327	2791	1,2	7408,16	131,85
Salamina	2230	1721	2066	1,2	5963,97	106,15
Filadelfia	2023	1549	1874	1,21	5455,45	97,10
Aránzazu	1739	1404	1668	1,19	4612,07	82,09
Pacora	3328	2382	1477,5	0,62	4598,59	81,85
San José	1639	1214	1496	1,23	4492,97	79,97
La Merced	917	671	812	1,21	2472,89	44,01
Villamaría	1550	1182	700	0,59	2038,14	36,27

Municipio	Área Sembrada (ha)	Área Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Masa residuo seco [t/año]	Potencial Energético (TJ/año)
Supia	1453	1173	702	0,6	1942,97	34,58
Viterbo	441	353	424	1,2	1179,42	20,99
Marmato	401	332	379	1,14	1018,82	18,13
Marulanda	201	154	180	1,17	524,12	9,33
Victoria	98	80	99	1,24	270,83	4,82
La Dorada	0	0	0	0	0,00	0,00
Norcasia	0	0	0	0	0,00	0,00
Total	60823	47081	55322,3	1,068	158324,08	2817,87

Fuente: Elaboración propia a partir de [5]

**B. Anexo: Simulación de la
gasificación de tallos de café en
Umberto**

Figura 5-1 Diagrama de simulación de la gasificación de tallos de café en Umberto



C. Anexo: Balances de materia, energía y exergía

Tabla 5-2 Balances de exergía

Componente	Flujo	Unidad	Exergía química estándar	Unidad	Exergía química [kJ/h]	Exergía Física	Unidades	Exergía por Q [kJ/h]	W [kJ/h]	Total [kJ/h]	Eficiencia exergética (%)
Germinación entrada										1427,839059 ^(a)	46,6041465
Germinación Salida										665,4322071 ^(a)	
Cultivo Entrada					342805,1639					342805,1639	98,650828
Tallos	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Fertilizante 1 (N) Urea ^(b)	0,435375	kg/h	544	kJ/mol	3943,732329						
Fertilizante 2 (P ₂ O ₅)	0,091375	kg/h	377,155	kJ/mol	242,7041856						
Fertilizante 3 (K ₂ O) ^(b)	0,553625	kg/h	416,1	kJ/mol	2445,393061						
Pesticida 1 (Clorpirifós)	0,00130505	g/h									
Pesticida 2 (Glufosinato de amonio)	0,00072885	g/h									
Pesticida 3 (Propargita)	0,00498746	g/h									
Cultivo Salida					338180,1327						
Tallos	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Emisión 1 (NH ₃) ^(b)	0,07837	kg/h	337,9	kJ/mol	1557,669309						
Emisión 2 (CO ₂) ^(b)	0,68354	kg/h	19,48	kJ/mol	302,6212466						
Emisión 3 (NO _x) ^(b)	0,19157	kg/h	43,5	kJ/mol	134,4044758						
Emisión 4 (N ₂ O) ^(b)	0,00958	kg/h	55,6	kJ/mol	12,103425						
Pesticida 1 (Clorpirifós)	0,13051	g/h									
Pesticida 2 (Glufosinato de amonio)	0,07289	g/h									
Pesticida 3 (Propargita)	0,49875	g/h									
Cosecha entrada					338333,3705					338333,3705	99,361566
Tallos	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Área a cosechar	9,417	ha									
Gasolina (Vegetación, Fumigación y Renovación)	53	L/ha-año	47390	kJ/kg	2160,0362						
Cosecha salida					336173,3343					336173,3343	
Tallos	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Transporte entrada	17,2				337437,5343					337437,5343	99,6253529
Tallos de madera	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Transporte	30	km	2,45	MJ/t-km	1264,2						
Transporte salida					336173,3343					336173,3343	
Tallos de madera	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Astillada entrada					336173,3343			5977,512052		342150,8463	98,25296
Tallos de madera	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Electricidad	5977,5121	kJ/h						5977,51205			
Astillada salida					336173,3343					336173,3343	
Tallos triturados	17,2	kg/h	19544,9613 ^(a)	kJ/kg	336173,3343						
Gasificación (entrada)					337615,8047					337615,8047	71,106104
Biomasa	17,200	kg/h	19623,58616 ^(a)	kJ/kg	337525,6819					337525,6819	
Aire ^(d)	0,860	kmol/h	104,7943883	kJ/kmol	90,12279498					90,12279498	
Gasificador (salida)	42,011	kg/h			216729,9526	23335,494	kJ/h			240065,4463	
Syngas (H ₂) ^(d)	0,545	kg/h	118,3056531	MJ/kg							
Syngas (H ₂ O) ^(d)	1,400	kg/h	0,650003775	MJ/kg							

Componente	Flujo	Unidad	Exergía química estándar	Unidad	Exergía química [kJ/h]	Exergía Física	Unidades	Exergía por Q [kJ/h]	W [kJ/h]	Total [kJ/h]	Eficiencia exergética (%)
Syngas (N ₂) ^(d)	19,190	kg/h	0,024633707	MJ/kg							
Syngas (CO) ^(d)	8,254	kg/h	9,833133408	MJ/kg							
Syngas (CO ₂) ^(d)	10,909	kg/h	0,457625347	MJ/kg							
Syngas (ASH) ^(d)	0,349	kg/h	34,20364666	MJ/kg							
Syngas (CH ₄) ^(d)	1,364	kg/h	52,1425241	MJ/kg							
Limpieza Gases (Entrada)	42,011	kg/h			216729,9526	23335,494	kJ/h			240065,4463	97,511219
Syngas (H ₂) ^(d)	0,545	kg/h	118,3056531	MJ/kg							
Syngas (H ₂ O) ^(d)	1,400	kg/h	0,650003775	MJ/kg							
Syngas (N ₂) ^(d)	19,190	kg/h	0,024633707	MJ/kg							
Syngas (CO) ^(d)	8,254	kg/h	9,833133408	MJ/kg							
Syngas (CO ₂) ^(d)	10,909	kg/h	0,457625347	MJ/kg							
Syngas (ASH) ^(d)	0,349	kg/h	34,20364666	MJ/kg							
Syngas (CH ₄) ^(d)	1,364	kg/h	52,1425241	MJ/kg							
Limpieza de Gases (Salida)	40,262	kg/h			229450,4246	14640,12	kJ/h	-9999,8014		234090,7432	
Syngas (H ₂) ^(d)	0,545	kg/h	118,3056531	MJ/kg							
Syngas (N ₂) ^(d)	19,190	kg/h	0,024633707	MJ/kg							
Syngas (CO) ^(d)	8,254	kg/h	9,833133408	MJ/kg							
Syngas (CO ₂) ^(d)	10,909	kg/h	0,457625347	MJ/kg							
Syngas (CH ₄) ^(d)	1,364	kg/h	52,1425241	MJ/kg							
Condensado H ₂ O ^(d)	1,400	kg/h	0,173186317	MJ/kg	0,24248508						
ASH ciclón ^(d)	0,349	kg/h	34,20364666	MJ/kg	11942,54522						
Generación de energía (Entrada)	117,939	kg/h			240881,6309	11858,97	kJ/h			252740,6009	27,675954
Syngas (H ₂) ^(d)	0,545	kg/h	118,3056531	MJ/kg							
Syngas (N ₂) ^(d)	19,190	kg/h	0,024633707	MJ/kg							
Syngas (CO) ^(d)	8,254	kg/h	9,833133408	MJ/kg							
Syngas (CO ₂) ^(d)	10,909	kg/h	0,457625347	MJ/kg							
Syngas (CH ₄) ^(d)	1,364	kg/h	52,1425241	MJ/kg							
Aire ^ε	77,677	kg/h									
Generación de energía (Salida)	117,939	kg/h			11456,78028	11138,33	kJ/h		47353,261	69948,37124	
Gas de Combustión (H ₂ O) ^(d)	7,931	kg/h	0,650003775	MJ/kg							
Gas de Combustión (CO ₂) ^(d)	27,620	kg/h	0,457625347	MJ/kg							
Gas de Combustión (CO) ^(d)	0,000	kg/h		MJ/kg							
Gas de Combustión (O ₂) ^(d)	3,613	kg/h	0,124067153	MJ/kg							
Gas de Combustión (N ₂) ^(d)	78,775	kg/h	0,024633707	MJ/kg							
Electricidad producida	13,153684	kW							47353,261		

- (a) La exergía total de la germinación de entrada y germinación de salida corresponde a los resultados de CExD de la simulación realizada en Umberto
- (b) Exergía química estándar extraída de [164]
- (c) Exergía química estándar extraída de [174]
- (d) Exergía química estándar extraída de [175]
- (e) La exergía química de mezcla de sustancias es obtenida con la ecuación (5).
- (f) La exergía por intercambio de calor es obtenida con la ecuación (7).
- (g) Cálculo de exergía para biomasa, ecuaciones (18)(19)(20).

Referencias consultadas

- [1] IEA, "Global Energy Crisis," 2022. <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis> (accessed Oct. 19, 2022).
- [2] IEA, "Renewable Energy Market Update - May 2022," 2022. Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022>
- [3] IEA, "Renewable Electricity," 2022. Accessed: Oct. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity>
- [4] Agencia Nacional de Hidrocarburos, "Reservas de crudo y gas del país - Corte a 31 de diciembre de 2020," Bogotá D.C., 2021.
- [5] UPME, "Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia," 2010.
- [6] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press, 2018.
- [7] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, "El corazón de Caldas es el café," <https://caldas.federaciondecafeteros.org/cafe-de-caldas/>, 2021.
- [8] Ministerio de Agricultura, "Reporte: área, producción y rendimiento nacional por cultivo," <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>, 2021.
- [9] UPME, "Boletín Estadístico de Minas y Energía 2018 - 2021 1S," 2021.
- [10] IEA, IRENA, United Nations Statistics Division, The World Bank, and World Health Organization, "Tracking SDG7 The energy progress report 2022," 2022.
- [11] Federación Nacional de Cafeteros, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo

- Sostenible, and A. Lavola, “Nama café de Colombia: Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada (NAMA) en el Sector Cafetero de Colombia,” 2017.
- [12] S. Chu and A. Majumdar, “Opportunities and challenges for a sustainable energy future,” *Nature*, vol. 488, no. 7411, pp. 294–303, 2012, doi: 10.1038/nature11475.
- [13] IEA, “World electricity generation mix by fuel, 1971-2019,” <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-generation-mix-by-fuel-1971-2019>, 2021.
- [14] IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change,” 2022.
- [15] IRENA, “World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway,” Abu Dhabi, 2022.
- [16] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1955*. Congreso de la República de Colombia, 2019.
- [17] UPME, “Boletín Estadístico de Minas y Energía 2016-2020,” 2021.
- [18] UPME, “Plan Energético Nacional 2020-2050,” 2020.
- [19] A. M. Osorio and L. Cifuentes, “Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el Oriente del departamento de Caldas. Impactos ambientales y resistencias sociales en el posconflicto,” *Jurídicas*, vol. 17, no. 2, pp. 180–198, 2020.
- [20] L. Garavito Téllez, “Impactos ambientales de los parques eólicos y líneas de transmisión de energía sobre la biodiversidad de áreas protegidas del departamento de La Guajira, Colombia,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2020.
- [21] UPME, “Informe de avance de proyectos de generación - marzo de 2022,” <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/SeguimientoaproyectosdeGeneraci%C3%B3n/tabid/112/Default.aspx>, 2022.
- [22] C. González Posso and J. Barney, *El viento del Este llega con revoluciones. Multinacionales y transición con energía eólica en territorio Wayúu*, 2nd ed. Bogotá D.C., 2019.
- [23] H. L. Raadal, L. Gagnon, I. S. Modahl, and O. J. Hanssen, “Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power,” *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 7, pp. 3417–3422, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.001>.
- [24] A. Pascale, T. Urmee, and A. Moore, “Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand,” *Renew Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2799–2808, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.023>.
- [25] F. de Miranda Ribeiro and G. A. da Silva, “Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study,” *J Clean Prod*, vol. 18, no. 1, pp. 44–54, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.006>.
- [26] Varun, R. Prakash, and I. K. Bhat, “Life cycle greenhouse gas emissions estimation for small hydropower schemes in India,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 498–508, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.052>.
- [27] A. Garcia-Teruel, G. Rinaldi, P. R. Thies, L. Johanning, and H. Jeffrey, “Life cycle assessment of floating offshore wind farms: An evaluation of operation and maintenance,” *Appl Energy*, vol. 307, p. 118067, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118067>.
- [28] A. J. Nagle, G. Mullally, P. G. Leahy, and N. P. Dunphy, “Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications,” *J Environ Manage*, vol. 302, p. 113994, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113994>.
- [29] Q. Li *et al.*, “Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110499, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110499>.
- [30] R. Bhandari, B. Kumar, and F. Mayer, “Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors,” *J Clean Prod*, vol. 277, p. 123385, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123385>.
- [31] R. May, H. Middel, B. G. Stokke, C. Jackson, and F. Verones, “Global life-cycle impacts of onshore wind-power plants on bird richness,” *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 8, p. 100080, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100080>.

- [32] G. Mello, M. Ferreira Dias, and M. Robaina, "Wind farms life cycle assessment review: CO₂ emissions and climate change," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 214–219, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.104>.
- [33] J. Gong, S. B. Darling, and F. You, "Perovskite photovoltaics: life-cycle assessment of energy and environmental impacts," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 7, pp. 1953–1968, 2015, doi: 10.1039/C5EE00615E.
- [34] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1609–1628, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>.
- [35] A. Stoppato, "Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation," *Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 224–232, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.11.012>.
- [36] R. Kannan, K. C. Leong, R. Osman, H. K. Ho, and C. P. Tso, "Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7kWp distributed solar PV system in Singapore," *Solar Energy*, vol. 80, no. 5, pp. 555–563, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.008>.
- [37] M. Carpentieri, A. Corti, and L. Lombardi, "Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal," *Energy Convers Manag*, vol. 46, no. 11, pp. 1790–1808, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.010>.
- [38] S. Farzad, M. A. Mandegari, and J. F. Görgens, "A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments," *Biofuel Research Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 483–495, 2016, doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
- [39] J. Dong, Y. Tang, A. Nzihou, Y. Chi, E. Weiss-Hortala, and M. Ni, "Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants," *Science of The Total Environment*, vol. 626, pp. 744–753, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>.

-
- [40] M. Kimming *et al.*, "Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants – A comparative life cycle assessment," *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 4, pp. 1572–1581, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.027>.
- [41] F. Murphy, A. Sosa, K. McDonnell, and G. Devlin, "Life cycle assessment of biomass-to-energy systems in Ireland modelled with biomass supply chain optimisation based on greenhouse gas emission reduction," *Energy*, vol. 109, pp. 1040–1055, 2016.
- [42] C. A. Henao Henao, "Análisis energético, exergético y ambiental del uso de aceite crudo de *Jatropha curcas* en motores diésel," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [43] A. Ozbilen, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 7, pp. 5665–5675, 2012, doi: [10.1016/j.ijhydene.2012.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.003).
- [44] M. A. Curran, *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. John Wiley & Sons, 2012.
- [45] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresour Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- [46] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresour Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5).
- [47] L. Zhang, C. (Charles) Xu, and P. Champagne, "Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass," *Energy Convers Manag*, vol. 51, no. 5, pp. 969–982, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>.
- [48] A. D. Rijnsdorp and B. van Vingerhoed, "Feeding of plaice *Pleuronectes platessa* L. and sole *Solea solea* (L.) in relation to the effects of bottom trawling," *J Sea Res*, vol. 45, no. 3–4, pp. 219–229, 2001.
- [49] J. Rezaian and N. P. Cheremisinoff, *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*. CRC press, 2005.

- [50] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press, 2010.
- [51] IRENA, “Estadísticas de Capacidad Renovable 2020,” 2022.
- [52] ASOCAÑA, “Informe anual 2020-2021 Sector Agroindustrial de la Caña,” 2021.
- [53] ICO, “ICO - World coffee production,” 2021.
- [54] N. Rodríguez and D. Zambrano, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” 2010.
- [55] Cenicafé, “Sistemas de renovación de cafetales para recuperar y estabilizar la producción,” Jan. 2016.
- [56] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, “Informe de gestión 2021,” 2021. Accessed: Jul. 23, 2022. [Online]. Available: <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2022/05/IG-2021-FNC-Web.pdf>
- [57] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, “Comportamiento de la industria cafetera colombiana 2018,” 2018.
- [58] C. M. Galanakis, *Handbook of coffee processing by-products: sustainable applications*. Academic Press, 2017.
- [59] DANE, “La información del DANE en la toma de decisiones regionales, Manizales - Caldas,” 2022.
- [60] W. Klöpffer, *Background and future prospects in life cycle assessment*. Springer Science & Business Media, 2014.
- [61] ICONTEC, “NTC-ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del Ciclo de Vida; Principios y marco de referencia.” Bogota, Colombia, 2007.
- [62] G. F. Grubb and B. R. Bakshi, “Life Cycle of Titanium Dioxide Nanoparticle Production: Impact of Emissions and Use of Resources,” *J Ind Ecol*, vol. 15, no. 1, pp. 81–95, 2011, doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00292.x.

- [63] J. Dewulf *et al.*, "Exergy: Its potential and limitations in environmental science and technology," *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 7, pp. 2221–2232, 2008, doi: 10.1021/es071719a.
- [64] E. Querol, B. Gonzalez-Regueral, and J. L. Perez-Benedito, *Practical approach to exergy and thermoeconomic analyses of industrial processes*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [65] B. de Meester, J. Dewulf, A. Janssens, and H. van Langenhove, "An improved calculation of the exergy of natural resources for Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA)," *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 21, pp. 6844–6851, 2006, doi: 10.1021/es060167d.
- [66] J. Szargut, D. R. Morris, and F. R. Steward, "Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes," 1987.
- [67] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy*. 2013. doi: 10.1016/C2010-0-68369-6.
- [68] J. Niembro and M. González, "Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva," 2008.
- [69] M. E. Bösch, S. Hellweg, M. A. J. Huijbregts, and R. Frischknecht, "Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) indicators to the ecoinvent database," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, no. 3, pp. 181–190, 2007, doi: 10.1065/lca2006.11.282.
- [70] N. A. Cano, C. Hasenstab, and H. I. Velásquez, "Exergy life cycle assessment indicators in colombian gold mining sector," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 19, 2020.
- [71] F. Chejne, C. Valdés, and G. Marrugo, *La gasificación, alternativa de generación de energía y productos con alto valor agregado para la industria*.
- [72] J. Fernández, E. Flórez, and F. Mondragón, "Aproximación de la distribución de porosidad de un semicoque gasificado con CO₂ y H₂O," 2000.
- [73] W. Ruiz, A. Montoya, and F. Mondragón, "Efecto de inhibición del CO Y H₂ durante la gasificación del semicoque de Titiribí con CO₂ Y H₂O," 2000.

- [74] W. Ruiz, O. Pérez, E. Flórez, and F. Mondragón, "Cinética de la gasificación de semicoque del carbón de Tititibí CO₂, H₂O Y CO₂-H₂O," 2000.
- [75] A. Ocampo, F. Chejne, and F. Mondragón, "Gasificación de carbones colombianos en lecho fluidizado," 1999.
- [76] G. Moreno, S. Cruz, and L. Pacheco, "Efectos del hinchamiento con solventes en la gasificación del carbón de Cerrejón," 2000.
- [77] E. Arenas, "Evolución del área superficial durante la gasificación de carbón," 2002.
- [78] G. Osorio Cano, Z. Zapata Benabithé, and E. Arenas Castiblanco, "Parámetros cinéticos de la gasificación de mezclas de residuos agrícolas y carbón ripio con vapor de agua," *Revista Energética Universidad Nacional de Colombia*, 2007.
- [79] J. Espinosa, "Evaluación de la cadena de productiva para la potencial implementación y fabricación de sistemas de gasificación de carbón a escala industrial en Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [80] E. J. Emery Genes, "Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma africana," Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [81] J. Barco Burgos, "Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2015.
- [82] C. E. Oliveros, J. R. Sanz, and N. Rodríguez, "Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café," 2017.
- [83] C. A. García, Á. Peña, R. Betancourt, and C. A. Cardona, "Energetic and environmental assessment of thermochemical and biochemical ways for producing energy from agricultural solid residues: Coffee Cut-Stems case," *J Environ Manage*, vol. 216, pp. 160–168, 2018.
- [84] D. F. Vallejo Cifuentes, "Efecto de la peletización de biomasa sobre el desempeño del proceso gasificación en un reactor de lecho fluidizado - Caso de estudio: cascarilla de arroz," Universidad Nacional de Colombia, 2018.

- [85] UPME, “Informe de registro de proyectos de generación de electricidad,” 2021. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiMmMyZmM1MGMtNzExZC00NzJILTk5ODAtNWUyMzYxMGMwMGYzliwidCI6IjMzZWYwNmM5LTBiNjMtNDg3MC1hNTY1LWl3Yzc5NWlxNmE1MyIsImMiOjR9> (accessed Nov. 18, 2022).
- [86] UPME, “Solicitudes de autogeneración y generación distribuida,” 2022. <https://public.tableau.com/app/profile/upme/viz/AutogeneracinYGeneracinDistribuida2022/Historia1> (accessed Nov. 18, 2022).
- [87] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible and Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Plan de acción para la gestión sostenible de la biomasa residual,” 2022.
- [88] Energética 2030, “P4: Poligeneración la biomasa,” 2022. <https://www.energetica2030.co/p4-poligeneracion-biomasa/> (accessed Nov. 18, 2022).
- [89] H. R. Becerra-Lopez and P. Golding, “Dynamic exergy analysis for capacity expansion of regional power-generation systems: Case study of far West Texas,” *Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 2167–2186, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2007.04.009.
- [90] L. Lombardi, “Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of a semi-closed gas turbine cycle with CO₂ chemical absorption,” *Energy Convers Manag*, vol. 42, no. 1, pp. 101–114, 2001, doi: 10.1016/S0196-8904(00)00033-9.
- [91] A. R. Azimian, P. L. Olausson, and M. Assadi, “Pre-design studies of cycles with energy, exergy, thermoeconomy and ELCA analysis,” in *American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI*, 2002, vol. 4 A, pp. 313–318. doi: 10.1115/GT2002-30418.
- [92] G. Finnveden and P. Östlund, “Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications,” *Energy*, vol. 22, no. 9, pp. 923–931, 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(97)00022-4.

- [93] R. L. Cornelissen, "Thermodynamics and sustainable development The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility," Universiteit Twente, Enschede, 1997.
- [94] R. L. Cornelissen and G. G. Hirs, "The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA," *Energy Convers Manag*, vol. 43, no. 9–12, pp. 1417–1424, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00025-0.
- [95] D. Fiaschi and L. Lombardi, "Integrated gasifier combined cycle plant with integrated Co₂ - H₂S removal: Performance analysis, life cycle assessment and exergetic life cycle assessment," *International Journal of Applied Thermodynamics*, vol. 5, no. 1, pp. 13–24, 2002, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036493408&partnerID=40&md5=52f54fc19743d6c7461ec36cf35ae76d>
- [96] G. Beccali, M. Cellura, and M. Mistretta, "New exergy criterion in the 'multi-criteria' context: A life cycle assessment of two plaster products," *Energy Convers Manag*, vol. 44, no. 17, pp. 2821–2838, 2003, doi: 10.1016/S0196-8904(03)00043-8.
- [97] L. Lombardi, "Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO₂ emissions reduction in power generation," *Energy Convers Manag*, vol. 44, no. 1, pp. 93–108, 2003, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00049-3.
- [98] M. Granovskii, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from renewables," *J Power Sources*, vol. 167, no. 2, pp. 461–471, 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.02.031.
- [99] M. Belhani, M.-N. Pons, and D. Alonso, "SFGP 2007 - The effects of sludge digester biogas recovery on WWTP ecological impacts and exergetic balance," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 6, 2008, doi: 10.2202/1542-6580.1666.
- [100] H. I. Velásquez Arredondo, A. A. Ruiz Colorado, and S. Oliveira Junior, "Ethanol production from banana fruit and its lignocellulosic residues: Exergy and renewability analysis," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 12, no. 3, pp. 155–162, 2009, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77953012534&partnerID=40&md5=05d1915e01556e95e679378bebf24cb4>

-
- [101] T. Hiraki and T. Akiyama, "Exergetic life cycle assessment of new waste aluminium treatment system with co-production of pressurized hydrogen and aluminium hydroxide," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 153–161, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.09.073.
- [102] B. de Meester, J. Dewulf, S. Verbeke, A. Janssens, and H. van Langenhove, "Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment," *Build Environ*, vol. 44, no. 1, pp. 11–17, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.01.004.
- [103] Y. I. Zhang, S. Singh, and B. R. Bakshi, "Accounting for ecosystem services in life cycle assessment part I: A critical review," *Environ Sci Technol*, vol. 44, no. 7, pp. 2232–2242, 2010, doi: 10.1021/es9021156.
- [104] L. Talens Peiró, L. Lombardi, G. Villalba Méndez, and X. i Durany, "Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO)," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 889–893, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.07.013.
- [105] Y. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, Z. Li, and C. Zheng, "Exergy life cycle assessment model of 'CO₂ zero-emission' energy system and application," *Sci China Technol Sci*, vol. 54, no. 12, pp. 3296–3303, 2011, doi: 10.1007/s11431-011-4567-x.
- [106] Y. Casas, J. Dewulf, L. E. Arteaga-Pérez, M. Morales, H. van Langenhove, and E. Rosa, "Integration of Solid Oxide Fuel Cell in a sugar-ethanol factory: Analysis of the efficiency and the environmental profile of the products," *J Clean Prod*, vol. 19, no. 13, pp. 1395–1404, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.04.018.
- [107] S. Yang, Q. Yang, H. Li, X. Jin, X. Li, and Y. Qian, "An integrated framework for modeling, synthesis, analysis, and optimization of coal gasification-based energy and chemical processes," *Ind Eng Chem Res*, vol. 51, no. 48, pp. 15763–15777, 2012, doi: 10.1021/ie3015654.
- [108] M. A. Rosen, I. Dincer, and A. Ozbilien, *Exergy Analysis and its Connection to Life Cycle Assessment*. 2012. doi: 10.1002/9781118528372.ch8.

- [109] C. Moya *et al.*, “Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment,” *J Clean Prod*, vol. 59, pp. 43–50, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.028.
- [110] S. Huysveld *et al.*, “Resource use analysis of Pangasius aquaculture in the Mekong Delta in Vietnam using Exergetic Life Cycle Assessment,” *J Clean Prod*, vol. 51, pp. 225–233, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.024.
- [111] M. R. Hoque, X. G. Durany, G. v Méndez, and C. S. Sala, “Exergetic life cycle assessment: An improved option to analyze resource use efficiency of the construction sector,” *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 22, pp. 313–321, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-36645-1_29.
- [112] C. Koroneos and N. Stylos, “Exergetic life cycle assessment of a grid-connected, polycrystalline silicon photovoltaic system,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 19, no. 10, pp. 1716–1732, 2014, doi: 10.1007/s11367-014-0752-z.
- [113] D. Iribarren, A. Susmozas, F. Petrakopoulou, and J. Dufour, “Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification,” *J Clean Prod*, vol. 69, pp. 165–175, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.068.
- [114] X. Sui, Y. Zhang, S. Shao, and S. Zhang, “Exergetic life cycle assessment of cement production process with waste heat power generation,” *Energy Convers Manag*, vol. 88, pp. 684–692, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.035.
- [115] T. Vandermeersch, R. A. F. Alvarenga, P. Ragaert, and J. Dewulf, “Environmental sustainability assessment of food waste valorization options,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 87, pp. 57–64, 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.03.008.
- [116] C. Ofori-Boateng and K. T. Lee, “An oil palm-based biorefinery concept for cellulosic ethanol and phytochemicals production: Sustainability evaluation using exergetic life cycle assessment,” *Appl Therm Eng*, vol. 62, no. 1, pp. 90–104, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.022.

- [117] A. Keçebaş, “Determination of optimum insulation thickness in pipe for exergetic life cycle assessment,” *Energy Convers Manag*, vol. 105, pp. 826–835, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.017.
- [118] S. E. Taelman, S. de Meester, L. Roef, M. Michiels, and J. Dewulf, “The environmental sustainability of microalgae as feed for aquaculture: A life cycle perspective,” *Bioresour Technol*, vol. 150, pp. 513–522, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.044.
- [119] S. Huysveld *et al.*, “Resource use assessment of an agricultural system from a life cycle perspective - a dairy farm as case study,” *Agric Syst*, vol. 135, pp. 77–89, 2015, doi: 10.1016/j.agsy.2014.12.008.
- [120] G. Finnveden, Y. Arushanyan, and M. Brandão, “Exergy as a measure of resource use in life cycle assessment and other sustainability assessment tools,” *Resources*, vol. 5, no. 3, 2016, doi: 10.3390/resources5030023.
- [121] I. A. S. Ehtiwesh, M. C. Coelho, and A. C. M. Sousa, “Exergetic and environmental life cycle assessment analysis of concentrated solar power plants,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 145–155, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.066.
- [122] M. v Rocco and E. Colombo, “Exergy Life Cycle Assessment of a Waste-to-Energy Plant,” in *Energy Procedia*, 2016, vol. 104, pp. 562–567. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.095.
- [123] M. v Rocco, A. di Lucchio, and E. Colombo, “Exergy Life Cycle Assessment of electricity production from Waste-to-Energy technology: A Hybrid Input-Output approach,” *Appl Energy*, vol. 194, pp. 832–844, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.059.
- [124] M. Risse, G. Weber-Blaschke, and K. Richter, “Resource efficiency of multifunctional wood cascade chains using LCA and exergy analysis, exemplified by a case study for Germany,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 126, pp. 141–152, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.045.

- [125] K. Whiting, L. G. Carmona, and T. Sousa, "A review of the use of exergy to evaluate the sustainability of fossil fuels and non-fuel mineral depletion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 202–211, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.059.
- [126] A. Mehmeti, J. Pedro Pérez-Trujillo, F. Elizalde-Blancas, A. Angelis-Dimakis, and S. J. McPhail, "Exergetic, environmental and economic sustainability assessment of stationary Molten Carbonate Fuel Cells," *Energy Convers Manag*, vol. 168, pp. 276–287, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.095.
- [127] Q. Wang, Y. Ma, S. Li, J. Hou, and J. Shi, "Exergetic life cycle assessment of Fushun-type shale oil production process," *Energy Convers Manag*, vol. 164, pp. 508–517, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.013.
- [128] Z. Zhou, Y. Tang, Y. Chi, M. Ni, and A. Buekens, "Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods," *Waste Management and Research*, vol. 36, no. 1, pp. 3–16, 2018, doi: 10.1177/0734242X17730137.
- [129] S. Guven, "Calculation of optimum insulation thickness of external walls in residential buildings by using exergetic life cycle cost assessment method: Case study for Turkey," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 38, no. 6, 2019, doi: 10.1002/ep.13232.
- [130] S. Alanya-Rosenbaum and R. D. Bergman, "Life-cycle impact and exergy based resource use assessment of torrefied and non-torrefied briquette use for heat and electricity generation," *J Clean Prod*, vol. 233, pp. 918–931, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.298.
- [131] A. G. Renteria Gamiz, W. de Soete, B. Heirman, P. Dahlin, S. de Meester, and J. Dewulf, "Environmental sustainability assessment of the manufacturing process of a biological active pharmaceutical ingredient," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 94, no. 6, pp. 1937–1944, 2019, doi: 10.1002/jctb.5975.
- [132] D. Song, L. Lin, and Y. Wu, "Extended exergy accounting for a typical cement industry in China," *Energy*, vol. 174, pp. 678–686, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.006.

-
- [133] M. A. Ehyaei, A. Ahmadi, and M. A. Rosen, "Energy, exergy, economic and advanced and extended exergy analyses of a wind turbine," *Energy Convers Manag*, vol. 183, pp. 369–381, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.008.
- [134] M. Dassisti, C. Semeraro, and M. Chimenti, "Hybrid exergetic Analysis-LCA approach and the industry 4.0 paradigm: Assessing manufacturing sustainability in an Italian SME," in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 33, pp. 655–662. doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.082.
- [135] H. Liu and S. Liu, "Exergy analysis in the assessment of hydrogen production from UCG," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 51, pp. 26890–26904, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.112.
- [136] Y. Tang *et al.*, "Environmental and exergetic life cycle assessment of incineration- and gasification-based waste to energy systems in China," *Energy*, vol. 205, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118002.
- [137] Q. Li, G. Song, J. Xiao, J. Hao, H. Li, and Y. Yuan, "Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from biomass staged-gasification," *Energy*, vol. 190, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116416.
- [138] M. Nwodo and C. Anumba, "Exergy-based life cycle assessment of buildings: Case studies," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 21, 2021, doi: 10.3390/su132111682.
- [139] J. Li, L. Wang, Y. Chi, Z. Zhou, Y. Tang, and H. Zhang, "Life cycle assessment of advanced circulating fluidized bed municipal solid waste incineration system from an environmental and exergetic perspective," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 18, no. 19, 2021, doi: 10.3390/ijerph181910432.
- [140] H. Hosseinzadeh-Bandbafha *et al.*, "Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends," *Energy Convers Manag*, vol. 241, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114300.

- [141] V. Selicati, N. Cardinale, and M. Dassisti, "The interoperability of exergy and Life Cycle Thinking in assessing manufacturing sustainability: A review of hybrid approaches," *J Clean Prod*, vol. 286, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124932.
- [142] Z. Khounani *et al.*, "Exergy analysis of a whole-crop safflower biorefinery: A step towards reducing agricultural wastes in a sustainable manner," *J Environ Manage*, vol. 279, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111822.
- [143] UPME, "Informe Final Contrato UPME C-031-2019 Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución ," 2019.
- [144] Corporación Autónoma Regional de Caldas, "Plan de Acción Institucional 2016 - 2019," 2016.
- [145] GASNOVA, "Bases para el proyecto: Reemplazar el consumo de leña, mediante la ampliación de la cobertura de gas licuado de petróleo (GLP)," 2018.
- [146] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, "Informe de gestión 2020 - Comité de Cafeteros de Caldas," 2020.
- [147] Gobierno de Caldas, "Información de municipios de Caldas," <https://site.caldas.gov.co/informacion-de-municipios>, 2022.
- [148] DANE, "Geovisor CNPV 2018 Caldas," <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv-2018/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=6>, 2018.
- [149] S. Gmünder, C. Toro, J. M. Rojas Acosta, and N. Rodríguez-Valencia, "Huella Ambiental del Café en Colombia." Quantis; Cenicafé, 2020.
- [150] S. K. Sansaniwal, K. Pal, M. A. Rosen, and S. K. Tyagi, "Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 72, pp. 363–384, 2017.

- [151] A. Abuadala, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 4981–4990, 2010.
- [152] N. Romo Ortega, A. Toro, L. M. Florez Pardo, and A. Cañas Velazco, "Evaluation of physicochemical properties and thermal in stems coffee and its economic analysis for the production of solid pellets as biofuel," 2011.
- [153] V. Aristizábal-Marulanda, "Experimental production of ethanol, electricity, and furfural under the biorefinery concept," *Chem Eng Sci*, vol. 229, p. 116047, 2021.
- [154] C. A. García, J. Moncada, V. Aristizábal, and C. A. Cardona, "Techno-economic and energetic assessment of hydrogen production through gasification in the Colombian context: Coffee Cut-Stems case," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 9, pp. 5849–5864, 2017.
- [155] S. Garcia-Freites, A. Welfle, A. Lea-Langton, P. Gilbert, and P. Thornley, "The potential of coffee stems gasification to provide bioenergy for coffee farms: a case study in the Colombian coffee sector," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 10, no. 4, pp. 1137–1152, 2020.
- [156] K. Rabea, S. Michailos, M. Akram, K. J. Hughes, D. Ingham, and M. Pourkashanian, "An improved kinetic modelling of woody biomass gasification in a downdraft reactor based on the pyrolysis gas evolution," *Energy Convers Manag*, vol. 258, p. 115495, 2022.
- [157] W.-C. Yan *et al.*, "Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production," *J Clean Prod*, vol. 178, pp. 476–493, 2018.
- [158] C. A. Rivillas and Á. Gaitán, "Germinadores de café," Cenicafé, 2013. doi: https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_14.
- [159] J. Arcila, F. Farfán, A. Moreno, L. F. Salazar, and E. Hincapié, "Sistemas de producción de café en Colombia," Chinchiná, Caldas, 2007.
- [160] K. J. Ptasinski, *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. 2016. doi: 10.1002/9781119118169.

- [161] J. Koppejan and S. van Loo, *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge, 2012.
- [162] R. L. Reaño, V. A. N. de Padua, and A. B. Halog, “Energy Efficiency and Life Cycle Assessment with System Dynamics of Electricity Production from Rice Straw Using a Combined Gasification and Internal Combustion Engine,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 16, p. 4942, 2021.
- [163] D. M. Y. Maya, A. L. E. Sarmiento, C. Oliveira, E. E. S. Lora, and R. Andrade, “Gasification of municipal solid waste for power generation in Brazil, a review of available technologies and their environmental benefits,” *J Chem Chem Eng*, vol. 10, no. 6, pp. 249–255, 2016.
- [164] J. Szargut, *Exergy method: technical and ecological applications*, vol. 18. WIT press, 2005.
- [165] M. A. Fauzi, P. Setyono, and S. H. Pranolo, “Environmental assessment of a small power plant based on palm kernel shell gasification,” in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2296, no. 1, p. 020038.
- [166] C. Bauer, “Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains,” Oct. 2008.
- [167] J. Szargut and D. R. Morris, “Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes,” *Int J Energy Res*, vol. 11, no. 2, pp. 245–261, 1987.
- [168] A. Agudelo, J. Agudelo, and P. Benjumea, “Diagnóstico exergético del proceso de combustión en un motor Diesel,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 45, pp. 41–53, 2008.
- [169] M. Bararzadeh Ledari, Y. Saboohi, A. Valero, and S. Azamian, “Exergy analysis of a bio-system: Soil–plant interaction,” *Entropy*, vol. 23, no. 1, p. 3, 2020.
- [170] M. Rasoolizadeh, M. Salarpour, M. A. Borazjani, A. Nikkhah, H. Mohamadi, and V. Sarani, “Modeling and optimizing the exergy flow of tropical crop production in Iran,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, p. 101683, 2022.

-
- [171] I. Dincer and A. Abu-Rayash, "Chapter 5-Community energy systems," *Energy Sustainability*, pp. 101–118, 2020.
- [172] V. Schnorf, E. Trutnevyte, G. Bowman, and V. Burg, "Biomass transport for energy: Cost, energy and CO2 performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland," *J Clean Prod*, vol. 293, p. 125971, 2021.
- [173] A. G. Renteria Gamiz, W. de Soete, B. Heirman, P. Dahlin, S. de Meester, and J. Dewulf, "Environmental sustainability assessment of the manufacturing process of a biological active pharmaceutical ingredient," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 94, no. 6, pp. 1937–1944, 2019.
- [174] F. C. Eboh, P. Ahlström, and T. Richards, "Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste," *Energy Sci Eng*, vol. 4, no. 3, pp. 217–231, 2016.
- [175] M. Mehrpooya, M. Khalili, and M. M. M. Sharifzadeh, "Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, no. 2, pp. 869–887, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.076.