

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS EXERGÉTICO DE CICLO DE VIDA
BASADOS EN LA METODOLOGÍA DE LAS NORMAS ISO 14040-44 PARA LA
BIO-PLANTA PILOTO DE ACEITES ESENCIALES Y EXTRACTO VEGETAL
PROYECTADA EN EL MARCO DEL PROGRAMA BIO-RETO XXI 15:50**

NICOLÁS ANDRÉS MANTILLA ÁLVAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

BUCARAMANGA

2023

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS EXERGÉTICO DE CICLO DE VIDA
BASADOS EN LA METODOLOGÍA DE LAS NORMAS ISO 14040-44 PARA LA
BIO-PLANTA PILOTO DE ACEITES ESENCIALES Y EXTRACTO VEGETAL
PROYECTADA EN EL MARCO DEL PROGRAMA BIO-RETO XXI 15:50**

NICOLÁS ANDRÉS MANTILLA ÁLVAREZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR

JULIAN E. JARAMILLO IBARRA

Ph.D en Ingeniería Térmica

CO-DIRECTOR

JUAN DAVID VILLEGAS

Ph.D en Ciencias Ambientales

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios, primero. A mi familia y a Lina Marcela por todo el soporte y ayuda que me han brindado y, sin lo cual, ninguno de todos los hechos que finalmente desenlazaron en este trabajo y en la consecución de este título sería posible.

Y, finalmente, agradecimientos a Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Ministerio de Educación Nacional, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo e ICETEX. Convocatoria Ecosistema Científico - Colombia Científica. Fondo Francisco José de Caldas, Contrato RC-FP44842-212-2018. Programa Bio-Reto XXI-15:50, por la confianza y por el apoyo.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO DE REFERENCIA.....	19
1.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEITES ESENCIALES	19
1.2 MÉTODOS PRINCIPALES DE OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES .	21
1.3 METODOLOGÍA ACV: GENERALIDADES Y DEFINICIONES.	23
1.4 METODOLOGÍA ACV: ETAPAS.....	25
1.4.1 Propósito.	26
1.4.2 Alcance.....	26
1.4.3 Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).	27
1.4.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).	29
1.4.5 Interpretación del ciclo de vida.	30
1.5 EXERGÍA.....	30
1.5.1 Definición.....	30
1.5.2 Ambiente.	31
1.5.3 Estado muerto.	31

1.5.4 Componentes de la exergía.	32
1.5.5 Exergía termomecánica.....	32
1.5.6 Exergía química.	32
1.6 BALANCES EXERGÉTICOS.....	35
1.7 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO	35
1.8 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	37
1.8.1 Revisión del estado del arte ACV.....	37
1.8.2 Revisión del estado del arte AExCV.....	41
1.9 INFORMACIÓN GENERAL PLANTA PILOTO	44
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	45
3. OBJETIVOS	47
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	47
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
4. METODOLOGÍA.....	48
4.1 DEFINICIÓN DEL PROPÓSITO.....	48
4.1.1Aplicación prevista.	48
4.1.2Razones para realizar el estudio.	48

4.1.3	Público previsto.	
.....		48
4.2 ALCANCE.....		48
4.2.1 Sistemas del producto.....		48
4.2.2 Función del sistema del producto.....		52
4.2.3 Unidad funcional.....		52
4.2.4 Límites del sistema.....		52
4.2.5 Procedimientos de asignación.....		52
4.2.6 Suposiciones.....		53
4.2.7 Limitaciones.....		54
4.2.8 Requisitos de calidad de los datos.....		54
4.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....		55
4.3.1 Bioplanta		56
4.3.1.1 Destilación.....		56
4.3.1.2 Etapa agrícola.....		61
4.3.1.3 Sistema de picado de MV.....		66
4.3.1.4 Sistema de secado.....		67
4.3.1.5 Sistema de generación de vapor (cámara de combustión de biomasa).		
.....		70

4.3.1.6 Economizador.....	78
4.3.1.8 Condensador.....	79
4.3.2 Escenario de referencia.....	80
4.3.2.1 Sistema de generación de vapor (caldera a gas natural).....	81
4.3.2.2 Condensador.....	86
4.3.2.3 Torre de enfriamiento.....	87
4.4 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA	88
4.5 INTERPRETACIÓN DE CICLO DE VIDA.....	89
4.6 ANÁLISIS EXERGÉTICO	90
4.6.1 Destilación.....	91
4.6.2. Sistema de picado.....	94
4.6.3 Cámara de combustión.....	95
4.6.4 Economizador.....	98
4.6.5 Secador.....	100
4.6.6 Condensador.....	101
4.6.6 Torre de enfriamiento.....	103
4.6.7 Caldera a gas natural	105
4.7 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO	106

4.7.1 Bioplanta	110
4.7.2 Escenario de referencia.....	112
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	114
5.1 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA	114
5.2 INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA.....	120
5.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO	121
5.4 TERMOECONÓMICO	125
6. CONCLUSIONES.....	130
BIBLIOGRAFÍA.....	132

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Algunas plantas tropicales de interés económico en complejo agroindustrial piloto, CENIVAM. A. Árbol de canelo. B. Limonaria. C. Geranio. D. Patchouli.....	20
Figura 2. Principales técnicas de obtención de aceites esenciales.....	22
Figura 3. Esquema general de un proceso unitario.	27
Figura 4. Representación esquemática de flujos másicos en la bioplanta.....	50
Figura 5. Representación esquemática de flujos másicos escenario de referencia.	51
Figura 6. Esquema de proceso de destilación.	56
Figura 7. Esquema de etapa agrícola.....	61
Figura 8. Esquema de sistema de picado.....	66
Figura 9. Esquema de sistema de secado.....	68
Figura 10. Esquema de condensador.....	79
Figura 11. Esquema de caldera a gas natural.	82
Figura 12. Esquema de torre de enfriamiento.....	87
Figura 13. Medición de presión de destilación.....	92
Figura 14. Medición de temperatura a la entrada del destilador.....	92

Figura 15. Medición de temperatura a la salida del destilador.....	93
Figura 16. Placa de modelo picadora.	94
Figura 17. Placa de motor picadora.....	95
Figura 18. Placa de motor ventilador.	97
Figura 19. Placa de motor alimentador de combustible.....	98
Figura 20. Placa de bomba de alimentación.....	100
Figura 21. Placa de motor secador.....	101
Figura 22. Selección de torre de enfriamiento.	104
Figura 23. Placa caldera a gas natural.	106
Figura 24. Resultados comparativos para las categorías GWP, AD-fósil y CExD.	114
Figura 25. Comparación porcentual para las categorías GWP, AD-fósil y CExD.	115
Figura 26. Resultados comparativos para las categorías GWP, AD-fósil y CExD con <i>Electricity medium voltaje (GLO)</i>	117
Figura 27. Comparación porcentual para las categorías GWP, AD-fósil y CExD con <i>Electricity medium voltaje (GLO)</i>	117
Figura 28. Resultados comparativos para las categorías GWP 100 años y GWP 20 años.....	119

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Comparación de aspectos metodológicos en ACV sobre aceites esenciales.	37
Tabla 2. Comparación de procesos en los sistemas del producto de estudio.	49
Tabla 3. Entradas para la destilación.....	59
Tabla 4. Salidas de la destilación.....	60
Tabla 5. Cantidades de insumos requeridos para cultivo de <i>Lippia origanoides</i> . ..	63
Tabla 6. Entradas para la etapa agrícola.	64
Tabla 7. Salidas de la etapa agrícola.....	66
Tabla 8. Entradas para el sistema de picado.....	67
Tabla 9. Salidas del sistema de picado.....	67
Tabla 10. Entradas de material del secador.	69
Tabla 11. Salidas del secador.....	70
Tabla 12. Composición <i>Lippia Origanoides</i>	71
Tabla 13. Entradas de material a la caldera de biomasa.	76
Tabla 14. Salidas de la caldera de biomasa.	77
Tabla 15. Diagrama economizador.	78

Tabla 16. Entradas al economizador.	78
Tabla 17. Salidas del economizador.	79
Tabla 18. Entradas de material al condensador.....	80
Tabla 19. Salidas del condensador.....	80
Tabla 20. Entradas a la caldera a gas natural.....	85
Tabla 21. Salidas de la caldera a gas natural.	86
Tabla 22. Entradas al condensador.	86
Tabla 23. Salidas del condensador.....	86
Tabla 24. Entradas a la torre de enfriamiento.	87
Tabla 25. Salidas de la torre de enfriamiento.....	88
Tabla 26. Resumen costos de producción del MV.....	108
Tabla 27. Resumen costos equipos para bioplanta.	111
Tabla 28. Resumen costos de equipos para escenario de referencia.	112
Tabla 29. Flujos másicos y sus propiedades - Biofábrica.	122
Tabla 30. Flujos energéticos - Biofábrica.....	122
Tabla 31. Resultados análisis exergético – Biofábrica.....	123
Tabla 32. Flujos másicos y sus propiedades – Escenario de referencia.....	123
Tabla 33. Flujos energéticos – Escenario de referencia.	124

Tabla 34. Resultados análisis exergético – Escenario de referencia.....	124
Tabla 35. Resultados de costos por destrucción exergética.....	125
Tabla 36. Resultados costos termoeconómicos de producción por kg de producto de proceso.....	128
Tabla 37. Resultados costos termoeconómicos de producción por kg de AE.	129

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS EXERGÉTICO DE CICLO DE VIDA BASADOS EN LA METODOLOGÍA DE LAS NORMAS ISO 14040-44 PARA LA BIO-PLANTA PILOTO DE ACEITES ESENCIALES Y EXTRACTO VEGETAL PROYECTADA EN EL MARCO DEL PROGRAMA BIO-RETO XXI 15:50.*

AUTOR: NICOLÁS ANDRÉS MANTILLA ÁLVAREZ**

PALABRAS CLAVE: Análisis de Ciclo de Vida, Exergía, Aceite esencial, ISO 14040-44.

Partiendo de que la extracción de aceites esenciales ha tomado repercusión considerable en industrias trascendentales para la economía, resulta indispensable la investigación en este tema, apuntando a tener ciclos de producción sostenibles ambiental y energéticamente. Específicamente, como respuesta a esta necesidad, en el programa Bio-Reto XXI 15:50 se proyectó e instaló una planta piloto de producción de aceites esenciales, denominada Biofábrica.

En concreto, este trabajo se dedicó a la aplicación de un ACV, utilizando los métodos sugeridos por ILCD para las categorías de calentamiento global, agotamiento abiótico fósil y demanda de exergía acumulada, complementados por balances exergéticos, mediante lo cual fue posible comparar el desempeño ambiental y energético de la línea de producción de Biofábrica frente a una línea de referencia basada en tecnologías convencionales.

Los resultados mostraron que en Biofábrica se consigue una reducción del impacto en las categorías de calentamiento global y agotamiento abiótico de 34% y 54% respectivamente; mientras tanto, para la demanda exergética acumulada se halló un aumento del 11%, debido a mayor consumo eléctrico por la adición de más equipos. Empero, la realización del análisis exergético de los procesos de planta mostró que, a pesar de lo anterior, la pérdida de exergía en Biofábrica es un 31% menor a la del escenario de referencia, cosa que se traduce también en una reducción en costos de producción desde un punto de vista termoeconómico. Lo anterior, se logra mediante los principios de aprovechamiento integral de recursos, que se manifiestan al utilizar material vegetal como combustible y aprovechar el potencial térmico de los gases de combustión que, de otro modo, serían desechados.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

ABSTRACT

TITLE: LIFE CYCLE ASSESSMENT AND EXERGETIC LIFE CYCLE ASSESSMENT BASED ON THE METHODOLOGY OF THE ISO 14040-44 STANDARDS FOR THE BIO-PILOT PLANT OF ESSENTIAL OILS AND VEGETABLE EXTRACT IN THE FRAMEWORK OF THE PROGRAM “BIO-RETO XXI 15:50”.

AUTHOR: NICOLÁS ANDRÉS MANTILLA ÁLVAREZ**

KEY WORDS: Life Cycle Assessment, Exergy, Essential oil, ISO 14040-44.

Since the extraction of essential oils has considerable repercussions in industries that are important for the economy, research on this subject is indispensable, aiming at developing environmentally and energetically sustainable production cycles. Specifically, in response to this need, the Bio-Reto XXI 15:50 program designed and installed a pilot plant for the production of essential oils, called Biofábrica.

Specifically, this work focused on the application of an LCA, using the methods suggested by ILCD for the categories of global warming, fossil abiotic depletion and cumulative exergy demand, complemented by exergy balances, through which it was possible to compare the environmental and energy performance of the Biofábrica production line versus a reference line based on conventional technologies.

The results showed that the Biofábrica achieved a reduction of the impact in the categories of global warming and abiotic depletion of 34% and 54%, respectively; meanwhile, for the accumulated exergy demand, an increase of 11% was found, due to higher electricity consumption due to the addition of more equipment. However, the exergetic analysis of the plant processes showed that, despite the above, the exergy loss in the Biofábrica is 31% lower than in the reference scenario, which also translates into a reduction in production costs from a thermoeconomic point of view. This is achieved through the principles of integral use of resources, which are manifested by using plant material as fuel and taking advantage of the thermal potential of the combustion gases that would otherwise be discarded.

** Faculty of Physicomechanical Engineering. Department of Mechanical Engineering. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

INTRODUCCIÓN

La industria de producción de aceites esenciales (AE) y sus derivados se ha consolidado con firmeza en la macroeconomía, debido a su aplicabilidad en diferentes sectores, como lo son las industrias alimenticia, farmacéutica, cosmética y de productos de aseo; de hecho, para 2021 el valor de mercado de los AE alcanzó los 17 mil millones de dólares¹. Particularmente, en Colombia, el construir una cadena productiva y de valor de las plantas medicinales, aromáticas y condimentarias implicaría la generación de un nuevo bien agrícola con valor añadido que es susceptible de ser agregado a los productos exportables del biocomercio. No obstante, el desarrollo de este proceso, si se desea que suceda de forma sostenible, requiere imprescindiblemente no solamente del estudio previo de especies aromáticas promisorias, obtención de la información de sus metabolitos, propiedades, etc..., sino también del estudio sobre las factibilidades agrológicas, económicas y ambientales de su producción y mercado.

En términos concretos, en Colombia se ha fomentado la formación de proyectos, grupos y centros de investigación e instituciones similares que dedican partes considerables de sus esfuerzos en la temática de los AE, como respuesta a las necesidades identificadas y siguiendo el ejemplo de países productores como India, Indonesia, Marruecos o Brasil, en los que la consolidación de esta industria se dio gracias al acompañamiento simultáneo de la creación y funcionamiento sostenible de una estructura científica y técnica. Es el caso del Bio-reto XXI 15:50, proyecto cuyo objetivo es estudiar los procesos integrados de destilación, fraccionamiento, extracción y obtención de subproductos de especies vegetales promisorias a escala

¹ PETRUZZI, Dominique. Essential Oils Market Worldwide – Statistics & Facts. Disponible en [Essential Oils Market Worldwide - Statistics & Facts | Statista](#).

piloto. Como parte de este estudio, se pretendió inspeccionar los impactos potenciales ambientales asociados a la producción de los aceites, a la vez que las características energéticas de su obtención en la bioplanta/biofábrica piloto que fue instalada. Con este fin en mente se implementan las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Análisis Exergético de Ciclo de Vida (AExCV), las cuales han demostrado resultar útiles a la hora de evaluar aspectos de este tipo.

Así lo muestran múltiples trabajos que han sido realizados previamente en los que se aplican estas metodologías en sistemas del producto que guardan características similares a las del caso de estudio. Por ejemplo, Maham, Rahimi y Smith realizaron un ACV para el proceso de producción de aceite esencial a base de la planta medicinal *Dracocephalum Moldavica* en Irán, a través del que determinaron la mejor configuración desde el punto de vista ambiental teniendo en cuenta múltiples alternativas de métodos de irrigación y uso de biofertilizantes². Un caso similar fue el trabajado por Khanali *et al.*, en el que se realizó el mismo análisis, pero para el proceso de producción de aceite comestible de canola³.

Así mismo, existen estudios que han abordado la metodología de AExCV, aunque no sobre sistemas del producto estrechamente relacionados con la obtención de aceites esenciales sino de elementos que hacen parte de la industria energética. Es

² MAHAM, Soheila, RAHIMI, Asghar y SMITH, Donald. Environmental assessment of the essential oils produced from dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in conventional and organic farms with different irrigation rates. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 204, p. 1070-1086.

³ KHANALI, Majid *et al.* Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 196, p. 714-725.

el caso de lo presentado por Ofori-Boateng y Lee⁴ y por Restrepo y Bazzo⁵, pues los primeros aplicaron esta metodología para la evaluación de la sostenibilidad termo-ambiental de una biorefinería basada en aceite de palma para la producción de etanol, en tanto que los segundos pretendían verificar el potencial de la biomasa residual como combustible en el proceso de generación termoeléctrica en Brasil.

De manera similar, en el presente estudio se implementan las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y Análisis Exergético de Ciclo de Vida, a partir de lo cual se evaluó el perfil ambiental y exergético de la bioplanta. Con este fin, se parte del marco de referencia asociado a los AE, los ACV y lo análisis exergéticos; con la información presentada, se hace posible luego presentar el problema de investigación y los objetivos perseguidos; seguidamente, se expone la metodología propuesta para la consecución de estos objetivos; y, finalmente, se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones que pueden extraerse de ellos.

⁴ OFORI-BOATENG, Cynthia y LEE, Keat. An oil palm-based biorefinery concept for cellulosic ethanol and phytochemicals production: Sustainability evaluation using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 62, p. 90-104.

⁵ RESTREPO, Álvaro y BAZZO, Edson. Biomass: Technical and Environmental Alternative in the Thermoelectric Generation Process. *Ing. Univ. Bogotá*. 2014, vol. 19, no.1, p. 67-86.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEITES ESENCIALES

En las plantas, los metabolitos primarios constituyen elementos vitales para que éstas crezcan, se multipliquen y vivan, en tanto que los metabolitos secundarios son necesarios para que sobrevivan. Entre los muchos metabolitos secundarios que pueden aislarse de las plantas, se destacan algunos de carácter especial y que son ampliamente usados en la industria, en la medicina y en muchos productos cotidianos. Esta clase de sustancias son usualmente denominadas *aceites esenciales*, *aceites volátiles*, *aceites etéreos* o *esencias*, y se destacan por su olor, generalmente agradable e intenso. Su nombre de “*aceite*” está dado por su contextura aceitosa, pero se distancian de los aceites vegetales o de cocina (de palma, soya, girasol, oliva) en muchos aspectos, como que, por ejemplo, no dejan ninguna huella ni mancha al evaporarse y, en vez de ser fácilmente oxidables, son frecuentemente usados como mezclas antioxidantes en diferentes productos terminados.

Los aceites esenciales se producen en cantidades entre el 0,5% y el 6% (masa de aceite esencial entre masa de material vegetal) en las llamadas plantas aromáticas, que suelen ser hierbas o arbustos y presentar un olor o fragancia característicos y fuertes. Entre los ejemplos más destacados de plantas aromáticas pueden hallarse la canela, la limonaria, el geranio, el orégano y el patchouli.

Figura 1. Algunas plantas tropicales de interés económico en complejo agroindustrial piloto, CENIVAM. A. Árbol de canelo. B. Limonaria. C. Geranio. D. Patchoulí.



Fuente: Aceites esenciales, Elena E. Stashenko⁶.

En específico, este trabajo se enfocó en el AE de la especie *lippia origanoides*, que ha sido clasificado previamente en tres quimiotipos dependiendo de sus componentes mayoritarios: A) α – y β – felandrenos, p-cimeno y limoneno; B) carvacrol; y C) timol⁷. Asimismo, dependiendo de su composición, este AE destaca

⁶ STASHENKO, Elena. Aceites esenciales. Bucaramanga: División de Publicaciones UIS, 2009. 180 p. ISBN: 978-958-44-5944-2.

⁷ STASHENKO, Elena *et al.* Lippia origanoides chemotype differentiation based on essential oil GC-MS and principal component analysis. *Journal of Separation Science*, 2010, vol. 33, p. 93-103.

por su aplicabilidad en las industrias de perfumería, farmacéutica y alimenticia, gracias a sus facultades insecticidas contra larvas de *Aedes aegypti*, antimicrobianas contra *Staphylococcus aureus*, antiparasitarias contra leishmania (*in vitro*) y *Escherichia coli*, y antigenotóxicas, y, además, por su alto rendimiento en la extracción (mayor al 1% en términos de masa de AE por masa de material vegetal)⁸.

1.2 MÉTODOS PRINCIPALES DE OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

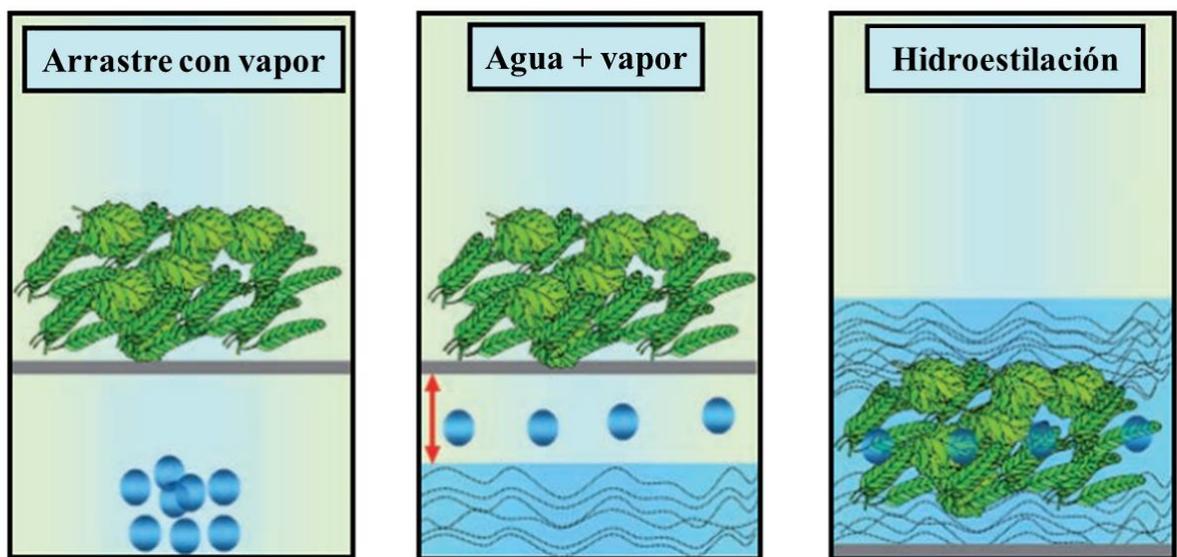
Concretamente, para la obtención de los aceites esenciales se tienen tres métodos principales:

- *Arrastre con vapor*: se basa en el suministro de vapor de agua sobrecalentado, generalmente proveniente de una caldera o calderín, que penetra el material vegetal (MV) a una presión más alta que la atmosférica, de forma que la corriente rompe las células o canales oleíferos en la planta y arrastra la mezcla volátil. La mezcla luego es condensada en un intercambiador de calor, para después, aprovechando que los aceites son más livianos que el agua y poco solubles en ella, separarlos por decantación. Esta parte final del proceso se repite en las otras dos técnicas que serán descritas.
- *Destilación con agua-vapor*: este sistema de extracción consiste en el empleo de vapor húmedo proveniente de agua en ebullición que traspasa el MV mientras éste se halla suspendido encima y apoyado sobre una malla.

⁸ RAMÍREZ, Karen. Evaluación del efecto de la distribución del material vegetal de *Lippia origanoides* (orégano de monte) sobre el rendimiento y la composición del aceite esencial obtenido por destilación por arrastre de vapor. Trabajo de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. 2021. 120 p.

- *Hidrodestilación:* el MV se sumerge directamente en agua. Todo el conjunto se calienta y los vapores resultantes son condensados y posteriormente separados. Se resalta que el contacto directo con el agua de ebullición puede generar cambios en la calidad y composición del aceite esencial que se obtiene con esta técnica.

Figura 2. Principales técnicas de obtención de aceites esenciales.



Fuente: Aceites esenciales, Elena E. Stashenko⁹.

Si se hace una revisión general de la literatura disponible sobre procesos de extracción de AE que están siendo desarrollados en Colombia se encontrará una tendencia marcada al uso del método de destilación por arrastre de vapor que se genera a partir de una caldera que funciona, usualmente, a gas natural. De hecho, existe un consenso sobre que este método es en gran medida el más aceptado para

⁹ STASHENKO, Elena. Op. Cit.

producción de aceites esenciales a escala comercial¹⁰. Ejemplo de lo anterior es lo abordado por González, Solarte y Cardona, que ejecutaron la metodología de ACV para la cadena de producción de aceite esencial de caléndula con arrastre de vapor proveniente una caldera de gas natural¹¹. Casos similares se hallan en lo desarrollado por Cerón y Cardona y Arango *et al.* quienes estudiaron diversas condiciones de los procesos de obtención de aceite esencial por arrastre de vapor para especies como la cáscara de naranja y el orégano silvestre, respectivamente^{12 13}.

1.3 METODOLOGÍA ACV: GENERALIDADES Y DEFINICIONES.

Este estudio procuró profundizar la investigación realizada sobre el tema de los aceites esenciales, pero aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida y Análisis Exergético de Ciclo de Vida en una bioplanta (proyecto Biofábrica) dedicada a su producción. Esta metodología se desarrolló como respuesta a la creciente conciencia de la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos y tiene como propósito ayudar al diagnóstico y la

¹⁰ MONTOYA, Gildardo. ACEITES ESENCIALES: Una alternativa de diversificación para el eje cafetero. 1er ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2010, p. 64-72.

¹¹ GONZÁLEZ, José, SOLARTE, Juan y CARDONA, Carlos. Supply chain and environmental assessment of the essential oil production using Calendula (*Calendula Officinalis*) as raw material. *Heliyon*. Manizales.2020, vol. 6.

¹² CERÓN, Ivonne y CARDONA, Carlos. Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja. *Ingeniería y ciencia*. Manizales. 2011, vol. 7, p.65-86.

¹³ ARANGO, Óscar *et al.* Optimización del rendimiento y contenido de timol de aceite esencial de orégano silvestre obtenido por arrastre con vapor. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Pasto. 2012, vol. 10, p. 217-226.

identificación de oportunidades de mejora en desempeño ambiental y energético de los productos a lo largo de sus ciclos de vida.

Por lo anterior, resulta oportuno presentar la definición de algunos conceptos que serán utilizados en el desarrollo del trabajo y que hacen parte del marco de referencia de las metodologías mencionadas y que están establecidos en las normas ISO 14040¹⁴ e ISO 14044¹⁵.

- *Ciclo de vida.* Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.
- *Producto.* Cualquier bien o servicio.
- *Coproducto.* Cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto.
- *Proceso.* Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.
- *Proceso unitario.* Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.
- *Flujo elemental.* Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraída del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es

¹⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC-ISO 14040: Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Bogotá, D.C., 2007.

¹⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC-ISO 14044: Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida. Bogotá, D.C., 2007.

liberada al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.

- *Flujo intermedio.* Flujo de producto, de materia o de energía que ocurre entre procesos unitarios del sistema del producto bajo estudio.
- *Flujo de producto.* Productos que entran o salen de un sistema del producto hacia otro.
- *Asignación.* Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.
- *Unidad funcional.* Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su utilización como unidad de referencia.
- *Categoría de impacto.* Clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.
- *Indicador de categoría de impacto.* Representación cuantificable de una categoría de impacto.

1.4 METODOLOGÍA ACV: ETAPAS

La normativa de referencia para los Análisis de Ciclo de Vida indica que se tienen 4 fases principales: 1) Definición del propósito y alcance; 2) Análisis del Inventario de Ciclo de Vida; 3) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida; y 4) Interpretación del Ciclo de Vida¹⁶. Estas etapas serán descritas a continuación, separando las dos

¹⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Op. Cit.

partes de la primera fase, esto es, definición del propósito por un lado y definición del alcance por el otro.

1.4.1 Propósito. También denominado ‘objetivo’ usualmente, pero que será descrito como ‘propósito’ para los fines de este trabajo. De acuerdo con los lineamientos de la normativa de referencia, la definición del objetivo del ACV requiere la especificación sin ambigüedad de los siguientes puntos¹⁷:

- *La aplicación prevista.*
- *Las razones para realizar el estudio.*
- *El público previsto.*

Esta fase se presenta de manera relativamente simple y sencilla, y constituye la guía del analista para establecer el enfoque y los límites del estudio.

1.4.2 Alcance. De manera similar, para establecer de forma adecuada el alcance del ACV y que, de esta forma, se asegure que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean consecuentes con el objetivo establecido, se consideran los siguientes puntos¹⁸:

- *Sistema del producto a estudiar.*
- *Funciones del sistema del producto.*
- *Unidad funcional.*
- *Límites del sistema.*
- *Procedimientos de asignación.*

¹⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Op. Cit.

¹⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Op. Cit.

- *Categorías de impacto seleccionadas.*
- *Metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida.*
- *Interpretación para utilizar.*
- *Requisitos relativos a datos.*
- *Suposiciones.*
- *Juicios de valor.*
- *Limitaciones.*

1.4.3 Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV). Consiste en la compilación y cuantificación de entradas y salidas para un producto a lo largo de su ciclo de vida y se construye sobre la base de los procesos unitarios. Un proceso unitario se trata como una caja negra que convierte un conjunto de entradas en un conjunto de salidas, como muestra la figura siguiente.

Figura 3. Esquema general de un proceso unitario.



Como se puede apreciar en la figura, las entradas y salidas pueden tener distintas naturalezas (componentes, materiales, recursos naturales) y distintas fuentes y destinos, respectivamente (diferentes procesos unitarios pueden relacionarse entre sí y con el ambiente). De esta forma, los procesos unitarios edifican el análisis de

ciclo de vida, puesto que los productos no son perjudiciales para el ambiente por sí mismos, sino por los procesos implicados en su producción.

Partiendo de lo anterior, la ejecución de esta fase se puede dar a través de la consideración de 3 subfases que serán descritas a continuación.

- *Recopilación de datos.* Los datos por incluir en el inventario son recopilados para cada proceso unitario que esté dentro de los límites del sistema. Estos datos pueden ser medidos, calculados o estimados y deben ser suficientes para cuantificar las entradas y salidas del proceso unitario.
Los datos para considerar deberían incluir entradas de energía, entradas de materia prima, entradas auxiliares, otras entradas físicas, productos, coproductos, residuos, emisiones al aire, vertidos al agua, vertidos al suelo y exergías (para este caso en particular que se desea considerar esta propiedad).
- *Cálculo de datos.* Los procedimientos de cálculo serán documentados explícitamente, incluyendo las suposiciones o juicios de valor realizados. También se debería ser coherente a lo largo de todo el estudio, implementando los mismos procedimientos de cálculo.
Por último, todos los datos cuantitativos de entradas y salidas deben estar relacionados con la unidad funcional establecida, cosa que debe mantenerse para todos los procesos unitarios del sistema.
- *Asignación.* Las entradas y salidas deben asignarse a los productos con procedimientos claramente especificados y documentados.
Teniendo en cuenta que pocos procesos industriales producen una salida única o están basados en una relación estrictamente lineal entre entradas y salidas y que, por el contrario, la mayoría generan más de un producto y reciclan productos intermedios o residuos de productos, es necesario tener presente la necesidad de procedimientos de asignación.

1.4.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV). Esta fase se dedica al entendimiento y evaluación de la magnitud y significancia de los impactos ambientales potenciales del producto a lo largo de su ciclo de vida.

Esta etapa incluye las subfases que se presentarán seguidamente.

- *Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización.* Si bien en el establecimiento del alcance puede tocarse la selección de las categorías de impacto que serán tenidas en cuenta, en este punto se referencia y justifica la selección, además de que se muestra con alto nivel de detalle también qué indicadores serán usados para presentar los resultados y con qué procedimientos se calcularán. Se describen también los mecanismos ambientales y el modelo de caracterización que enlaza los resultados del ICV con el indicador de categoría.
- *Clasificación o asignación de los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas.* Se consideran los siguientes puntos: 1) asignación de resultados del ICV exclusivos a una categoría de impacto; 2) identificación de resultados de ICV que se refieren a más de una categoría.
- *Caracterización o cálculo de los resultados de indicadores de categoría.* Se convierten los resultados del ICV a unidades comunes y se suman éstos dentro de una misma categoría de impacto, utilizando los factores de caracterización para obtener como salida del cálculo el resultado numérico de un indicador.
- *Presentación de datos resultantes después de la caracterización.* Abarca una compilación discreta de los resultados de indicadores de categoría de la EICV para las distintas categorías de impacto y un conjunto de resultados de inventario que son flujos elementales pero que no han sido asignados a categorías de impacto, si es el caso, con la justificación de este hecho.

1.4.5 Interpretación del ciclo de vida. Se desea evaluar los resultados alcanzados en las fases de análisis de inventario y análisis de impacto en relación con lo definido en la fase de establecimiento del propósito y del alcance, con el fin de generar conclusiones y recomendaciones. Esta fase final del análisis comprende los siguientes elementos:

- *Identificación de los asuntos significativos basados en los resultados.* Se estructuran los resultados de las fases anteriores para determinar cuáles resultan significativos en función del propósito y del alcance establecidos y su relación con los métodos utilizados, las suposiciones hechas, etc...
- *Evaluación.* Se busca fortalecer la confianza y fiabilidad de los resultados entregados para aportar una visión clara y comprensible a cualquier lector interesado en el estudio. Se consideran las técnicas de verificación de análisis de integridad, análisis de sensibilidad y análisis de coherencia.
- *Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.* Se extraen conclusiones preliminares y, con base en el enfoque iterativo de la metodología, se verifica que sean coherentes con los requerimientos del propósito y el alcance, abarcando temas como los requisitos de la calidad de datos, las suposiciones, las limitaciones metodológicas, etc...

1.5 EXERGÍA

1.5.1 Definición. El concepto de exergía surge debido a que la idea de conservación de la energía por sí sola resulta inadecuada a la hora de aclarar algunos aspectos relevantes de la utilización de los recursos energéticos. La definición de exergía parte del hecho de que existe una oportunidad para producir trabajo útil siempre que dos sistemas en estados diferentes estén en contacto al permitir que estos alcancen el equilibrio.

Concretamente, cuando uno de estos dos sistemas es un sistema ideal llamado *ambiente de referencia* o simplemente *ambiente*, mientras que el otro es algún sistema de interés, se define exergía como el máximo trabajo teórico que puede obtenerse de su interacción mutua hasta alcanzar el equilibrio¹⁹. Alternativamente, también puede definirse la exergía como el mínimo trabajo teórico útil requerido para formar una cantidad de materia a partir de sustancias presentes en el ambiente y para llevar esa materia a un estado específico²⁰.

1.5.2 Ambiente. Todo sistema que se pretenda estudiar opera interactuando con alrededores de alguna clase. Es importante distinguir entre los conceptos de *ambiente* y el *entorno* del sistema. El término *entorno* se suele utilizar para todo aquello que no esté incluido en el sistema. El entorno se compone de *entorno inmediato* y de *ambiente*. El entorno inmediato se refiere a una porción del entorno en que las propiedades intensivas pueden variar durante sus interacciones con el sistema, en tanto que *ambiente* se aplica a aquella porción en que las propiedades intensivas de cada una de sus fases son homogéneas y no presentan cambios significativos como resultado de cualquier proceso considerado y que se define con las siguientes simplificaciones: se trata de un sistema simple compresible de dimensiones muy grandes y que se mantiene a presión p_0 y temperatura T_0 .

1.5.3 Estado muerto. Se denomina *estado muerto* a aquel estado que se tiene cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio con el ambiente, de manera que ya no existe la posibilidad de producir trabajo.

¹⁹ MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard. Fundamentos de termodinámica técnica, 2da ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 309-372.

²⁰ BEJAN, Adrian, TSATSARONIS, George y MORAN, Michael. Thermal Design & Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1996, p. 113-166.

1.5.4 Componentes de la exergía. Si se ignoran los efectos nucleares, magnéticos, eléctricos y de tensión superficial, como se hará para los propósitos de este trabajo de grado, la exergía de un sistema Ex se puede dividir en sus componentes: físico (Ex_{fis}), cinético (Ex_k), potencial (Ex_p) y químico ($Ex_{quí}$). Esto es:

$$Ex = Ex_{fis} + Ex_k + Ex_p + Ex_{quí}$$

Que también puede expresarse de forma específica (por unidad de masa) como:

$$ex = ex_{fis} + ex_k + ex_p + ex_{quí}$$

1.5.5 Exergía termomecánica. Por simplicidad, la porción de la exergía que incluye sus partes física, cinética y potencial suele denominarse como exergía termomecánica (Ex_{tm}), por lo que se define:

$$ex_{tm} = ex_{fis} + ex_k + ex_p$$

Esta exergía, para el caso de un sistema cerrado a un estado específico se puede calcular como:

$$ex_{tm} = (u - u_0) + p_0 * (v - v_0) - T_0 * (s - s_0) + \frac{c^2}{2} + gz$$

En donde u , v y s representan la energía interna, el volumen y la entropía específicos para el sistema en el estado dado cuando no tiene subíndice y en el estado muerto cuando está acompañado por el subíndice 0. Mientras que c es la velocidad, g la aceleración de la gravedad y z la altura con respecto a un nivel de referencia.

1.5.6 Exergía química. Por otra parte, cuando se considera un sistema compuesto por un ambiente y una cantidad específica de combustible a T_0 y p_0 , la exergía química se define como el máximo trabajo teórico que puede desarrollar este

sistema combinado cuando se permite que el combustible reaccione con el oxígeno del ambiente²¹. Este componente de exergía es particularmente útil en aplicaciones que impliquen procesos de combustión, como es el caso de lo que se abarcará en este estudio.

Primero, para combustibles hidrocarburos la determinación de esta propiedad se puede hacer a partir del análisis de la reacción de oxidación de éste al interactuar en una célula de combustible con oxígeno del ambiente y del desarrollo de los balances de primera y segunda ley para esta reacción. Otro método aplicable para este tipo de sustancias y que puede generalizarse para sustancias puras es el de la exergía química estándar que se sirve de las funciones de Gibbs, de la composición de la sustancia y de las exergías químicas estándar de sus componentes para el cálculo total.

Por ejemplo, a la hora de analizar gases de combustión que pueden ser considerados como una mezcla de gases ideales compuesta sólo de sustancias presentes como gases en el ambiente a unas condiciones T_0 y p_0 , la exergía química molar puede calcularse según²²:

$$\bar{e}x_q = R_u * T_0 * \sum_i y_i * \ln\left(\frac{y_i}{y_i^a}\right)$$

En donde R_u es la constante universal de los gases y y_i e y_i^a son, respectivamente, las fracciones molares del componente i -ésimo en la mezcla a T_0 y p_0 y en el

²¹ MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard. Op. cit. 701-764.

²² MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard. Ibid.

ambiente. En este trabajo, esta expresión fue usada para analizar la exergía química de los gases de combustión.

Sin embargo, para el contexto en que se sitúa este trabajo de grado, también es de especial interés el establecimiento de la exergía química para el MV, que no es una sustancia pura. Para este caso, la literatura propone diversos métodos de estimación basados en la composición de la biomasa, obtenida a partir de su análisis próximo o último.

Como ejemplo de esto, se considera lo mostrado por Qian et al., quienes recogieron múltiples correlaciones usadas para estimar la exergía química en biomasa como²³:

$$\text{Método 1: } ex_{quí} = 1,047 * PCS$$

$$\text{Método 2: } ex_{quí} = 1812,5 + 295,606C + 587,354H + 17,506O + 17,735N + 95,615S - 31,8A$$

En donde $es_{quí}$ se obtiene en kJ/kg, PCS es el poder calorífico superior del material en kJ/kg y C, H, O, N, S y A son, respectivamente, las composiciones máxicas de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza.

También se puede destacar la aplicación de Matlab desarrollada por Aghabashlo et al., en la que a partir de los datos de análisis próximo o último se puede obtener el valor de la exergía química para una biomasa dada²⁴.

²³ QIAN, Hongliang *et al.* Prediction models for chemical exergy of biomass on dry basis from ultimate analysis using available electron concept. *Energy*. Nanjing, 2017, vol. 131, p. 251-258.

²⁴ AGHABASHLO, Mortaza *et al.* Determining biomass chemical exergy using a novel hybrid intelligent approach to promote biomass-based biorefineries. *Cleaner Production*. 2020, vol. 277.

1.6 BALANCES EXERGÉTICOS

El objetivo de los balances exergéticos es localizar e identificar las causas o fuentes de la destrucción de exergía e, incluso, calcular su magnitud, todo con el propósito de enfocar la atención en los aspectos de la operación del sistema estudiado que ofrecen mayores oportunidades de mejora.

Cuando una masa fluye a través de la frontera de un volumen de control, se presenta una transferencia de exergía que acompaña a ese flujo de masa. Además, existe una transferencia de exergía que acompaña al trabajo de flujo. A partir de esto, y teniendo en cuenta que, a la hora de analizar un sistema no cerrado, también se presenta transferencia de exergía asociada a un flujo de calor o a una transferencia de trabajo, el balance de exergía para el volumen de control respectivo es:

$$\frac{dEx}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) * \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{VC} - p_0 * \frac{dV_{VC}}{dt} \right) + \sum \dot{m}_{i,in} * ex_{in} - \sum \dot{m}_{i,out} * ex_{out} - \dot{E}x_{dest}$$

Siendo T_j la temperatura desde la que ocurre la transferencia de calor \dot{Q}_j , \dot{W}_{VC} la potencia desarrollada en el volumen de control, $\dot{m}_{i,in}$ el flujo másico de entrada de la sustancia i , $\dot{m}_{i,out}$ el flujo másico de salida de la sustancia i y $\dot{E}x_{dest}$ la tasa de destrucción de exergía. Para el caso de sistema en estado estable, la derivada de la izquierda se hace igual a cero.

1.7 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

De forma adicional, el análisis exergético puede ser llevado a términos económicos si se le hace un tratamiento adecuado, con el objetivo de entregar información adicional que puede contribuir a un diseño y operación costo-efectivas del sistema.

Para ello, el balance de costes por unidad de tiempo para un equipo o subsistema se construye como²⁵:

$$\sum \dot{C}_{entradas} + \dot{Z}_c + \dot{C}_{pérdidas} = \sum \dot{C}_{salidas}$$

En donde \dot{C} representa los costos de los flujos que intervienen en el análisis a la entrada, la salida o en forma de pérdidas (incluyendo ingresos o egresos de masa, potencia o calor) y \dot{Z}_c el costo asociado con inversión inicial, operación y mantenimiento. Específicamente, si el análisis se hace por hora de operación:

$$\dot{Z}_c = \dot{C}_{operación\ y\ mtto} + \frac{C_{inversión\ inicial}}{Años_{operación} * horas_{operación\ anuales}}$$

Para el caso de las pérdidas:

$$\dot{C}_{pérdidas} = c_{u,pérdidas} * Ex_{destruida}$$

Siendo $c_{u,pérdidas}$ el costo por unidad de exergía destruida, que coincide con el costo unitario de la fuente primaria de energía del proceso.

A través de estas expresiones, mediante el conocimiento de los costos de las entradas y de las pérdidas, se pretende determinar el coste por unidad de exergía de las salidas; de esta forma se llega hasta el producto final calculando el costo total de su producción, a la vez que se examinan los costos asociados a pérdidas exergéticas.

²⁵ BEJAN, Adrian, TSATSARONIS, George y MORAN, Michael. Op. Cit.

1.8 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

1.8.1 Revisión del estado del arte ACV. Ahora bien, tras revisar la literatura sobre Análisis de Ciclo de Vida ejecutados sobre la producción de aceites esenciales, considerando sólo estudios posteriores al año 2010, se encontraron algunas tendencias comunes respecto a la metodología y el enfoque adoptado. El resumen de lo hallado se expone en la Tabla 1. Allí se puede inferir un reciente interés en la temática de los aceites esenciales que va en crecimiento, al punto que hay múltiples estudios publicados en 2022. En lo que se refiere a los ejemplos particulares de aceites esenciales estudiados, se confirma la variedad de productos de esta naturaleza en los que existe interés desde la industria y la academia, pues se encuentran aceites provenientes de cítricos, plantas aromáticas e incluso algas.

Tabla 1. Comparación de aspectos metodológicos en ACV sobre aceites esenciales.

Autores	Producto	Enfoque	Unidad funcional	Asignación	Software	Base datos
Beccali y otros ²⁶	AE de naranja	Cuna a la puerta	1 kg producto	Másica Económica	SimaPro	Pre-Product Ecology Consultants Oko-Institute Ecoinvent
Peña, y otros ²⁷	AE de limón	Cuna a la puerta	100 tons limones	Másica Económica	SimaPro	N.E

²⁶ BECCALI, Marco, et al. Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *Journal of environmental management*, 2010, vol. 91, no 7, p. 1415-1428.

²⁷ PEÑA, Ignacio et al. Preliminary environmental study of the citrus industry of Tucuman (Argentina) based on the Life Cycle Assessment. *Sixth International Conference on Life Cycle Assessment - CILCA*, 2015.

Autores	Producto	Enfoque	Unidad funcional	Asignación	Software	Base datos
Moncada y otros ²⁸	AE de orégano y romero	Puerta a la puerta	1 kg AE	N.A.	Waste Reduction Algorithm	Aspen Plus database NIST
Pérez. , y otros ²⁹	AE de macroalga <i>Ochtodes secundiramea</i>	Cuna a la puerta	700 mg AE	Másica	SimaPro	Ecoinvent
Maham y otros ³⁰	AE de <i>dragonead</i>	Cuna a la puerta	1 kg AE	N.A.	SimaPro	Ecoinvent
Lambert ³¹	AE de ylang-ylang	Cuna a la puerta	1 lt AE	Expansión de sistema	SimaPro	Ecoinvent
Martínez, y otros ³²	AE de naranja	Cuna a la puerta	1 MJ de energía de vapor	Económica	N.E	N.E
González y otros ³³	AE de caléndula	Cuna a la puerta	1 de AE	N.A	SimaPro	Ecoinvent
	Aceite volátil de <i>Aquilaria Sinensis</i>	Cuna a la puerta	1 kg AE	N.A.	GaBi	Gabi Professional Database

²⁸ MONCADA, Jonathan; TAMAYO, Jhonny A.; CARDONA, Carlos A. Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Oregano (*Origanum vulgare*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, p. 172-181.

²⁹ PÉREZ-LÓPEZ, Paula, et al. Environmental life cycle optimization of essential terpene oils produced by the macroalga *Ochtodes secundiramea*. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 542, p. 292-305.

³⁰ MAHAM, Soheila Ghasemi; RAHIMI, Asghar; SMITH, Donald L. Op. Cit.

³¹ LAMBERT, Maxime. Cradle-to-gate Life Cycle Analysis (LCA) of *Ylang-Ylang* complete essential oil destined for cosmetic use from central region, Ghana using the software SimaPro. Trabajo de grado para optar por el título de *Master en Sciences et Gestion de l'Environnement*. Bruselas: *Université Libre de Bruxelles. Faculté de Sciences*. 2018. 120 p.

³² MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias, et al. Energy-water nexus strategies for the energetic valorization of orange peels based on techno-economic and environmental impact assessment. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, vol. 117, p. 380-387.

³³ GONZÁLEZ, José; SOLARTE, Juan y CARDONA, Carlos. Op. Cit.

Autores	Producto	Enfoque	Unidad funcional	Asignación	Software	Base datos
Gwee y otros ³⁴						
González ³⁵	Aceite de <i>Sacha Inchi</i>	Cuna a la puerta	1 lt aceite	N.A.	SimaPro	Ecoinvent
Ferrero y otros ³⁶	AE de limón	Cuna a la puerta	1 ton producto	Másica Económica	SimaPro	Ecoinvent
Pelaracci y otros ³⁷	AE de cártamo	Cuna a la puerta	1 ton AE	Expansión de sistema	SimaPro	Ecoinvent
Moura y otros ³⁸	AE de romero	Puerta a la puerta	1 g AE	N.A	SimaPro	Ecoinvent

Nota: N.A.: no aplica; N.E.: no especificado.

Algunas conclusiones al respecto que pueden extraerse de la información resumida en la tabla anterior se presentan a continuación.

Primero, que la trascendencia del impacto ambiental ejercido por las prácticas agrícolas necesarias durante el proceso de generación de productos de diferentes campos es notoria, debido esencialmente a la utilización de pesticidas y fertilizantes

³⁴ GWEЕ, Yong Ling, et al. Techno-economic and life-cycle assessment of volatile oil extracted from *Aquilaria sinensis* using supercritical carbon dioxide. *Journal of CO2 Utilization*, 2020, vol. 38, p. 158-167.

³⁵ GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Nancy Consuelo. Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis*) en Santander Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias y Tecnologías ambientales. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás. División de Ingenierías y Arquitectura. Facultad de Química Ambiental. 2021. 149 p.

³⁶ FERRERO, Lucas M. Machin; WHEELER, Jonathan; MELE, Fernando D. Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, vol. 29, p. 672-684.

³⁷ PELARACCI, Simone, et al. Agricultural Co-Product Management: An LCA Perspective on the Use of Safflower Oilcake from Bio-Oil Production in Umbria Region, Italy. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, vol. 26, no 1, p. 25-35.

³⁸ MOURA, Bruna, et al. Life cycle energy and carbon emissions of essential oil extraction from Rosemary. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, p. 291-297.

químicos, cuyos usos generan emisiones perjudiciales al suelo y a los acuíferos que contribuyen a la eutrofización, pero que también tienen procesos de fabricación que se traducen en impactos considerables en categorías como cambio climático y agotamiento de recursos fósiles. De acuerdo con esto, y teniendo en cuenta que las aplicaciones de los AE son muy diversas, es usual y recomendable (en tanto no se requieran estudios de caso particular) adoptar modalidades de la cuna a la puerta para los análisis de ciclo de vida a desarrollar sobre esta clase de productos; de esta forma no son omitidos los efectos significativos de la etapa agrícola a la vez que se consigue que los resultados obtenidos sean aplicados a una mayor cantidad de casos.

Se encontró también que los autores tenidos en cuenta suelen situar la unidad funcional en el producto y en términos másicos, puesto que ello facilita la realización de análisis comparativos con diferentes líneas de producción posibles para la obtención de un mismo producto.

Por otra parte, se vio que en sistemas asociados con la producción de AE se suele recurrir a los métodos de asignación másico y económico para verificar la sensibilidad de los resultados ante esta decisión, dado que una característica de los AE es su baja masa en comparación con su alto valor en el mercado. De acuerdo con esto, se concluye que, al estudiar sistemas con AE y más productos, es recomendable la implementación de los métodos de asignación másico y económico y un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante cada método, con el fin de que las conclusiones obtenidas no se vean permeadas por la elección de un solo método.

Finalmente, se halló así mismo que el tándem formado por el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent se impone ante las demás posibilidades disponibles en el mercado a la hora de realizar ACV en productos como los de las investigaciones

revisadas. Esto, probablemente, se deba a que SimaPro es uno de los softwares que integra dentro de sus licencias implícitamente a Ecoinvent y a que Ecoinvent es una *database* con información bastante completa aplicable a casos geográficos particulares, con lo que se contribuye a la representatividad y fiabilidad de los resultados que se obtienen mediante su uso.

1.8.2 Revisión del estado del arte AExCV. De manera similar, se revisaron investigaciones previas dedicadas a Análisis Exergéticos de Ciclo de Vida y análisis exergéticos en general ejecutados para productos similares. Se destaca lo realizado por y Ofori-Boateng y Lee, que extendieron a la parte exergética el análisis del ciclo de vida de bioetanol generado a partir de aceite de palma³⁹; caso similar al de Palacio *et al.*, quienes lo hicieron para bioetanol basado en bagazo de caña de azúcar⁴⁰. De la misma forma, Restrepo y Bazzo aplicaron esta metodología a una planta de generación eléctrica basada en biomasa⁴¹.

Por otro lado, son destacables los trabajos en los que se efectuaron análisis exergéticos sin extender ello a una perspectiva de ciclo de vida. Ejemplo de esto se muestra en la investigación de Liao, Heijung y Huppes, en la que, a partir del estudio del proceso de obtención de bioetanol a base de rastrojo de maíz en los Estados Unidos, se pudo establecer que las conclusiones respecto a la sostenibilidad de un proceso pueden depender de la perspectiva termodinámica desde la que se adopte el análisis, esto es, que cada método utilizado (energía, exergía, emergía) puede aportar diferentes luces sobre un mismo proceso considerado, pues aunque los

³⁹ OFORI-BOATENG, Cynthia y LEE, Keat. Op. cit.

⁴⁰ PALACIO, José *et al.* Op. cit..

⁴¹ RESTREPO, Álvaro y BAZZO, Edson. Op. cit.

análisis energético y exergético mostraban que el bioetanol producido podía considerarse como un recurso renovable, los resultados que entregó el análisis emergético contradijeron esta conclusión⁴².

De manera similar, Velásquez, Ruiz y de Oliveira por un lado, y Jaimes por el otro, se enfocaron los procesos de obtención de biocombustibles. En ambos estudios se utiliza la teoría general relacionada con exergía (tanto termomecánica como química) para determinar la eficiencia exergética de los procesos y, de esta forma, establecer la viabilidad energética de éstos y los beneficios que puede representar la implementación de algunas mejoras en ellos^{43 44}.

También, dentro de las aplicaciones exploradas, se halló la de Velásquez, Agudelo y Chejne, en la que por medio de la aplicación de las primera y segunda ley de la termodinámica se estimaron las eficiencias energéticas y exergéticas para varias tecnologías comunes para la obtención de panela en Colombia, con lo que se pudo concluir que las mejoras en las técnicas de molienda de caña de azúcar y obtención

⁴² LIAO, Wenjie, HEIJUNGS, Reinout y HUPPES, Gjalt. Is bioethanol a sustainable energy source? An energy-, exergy- and energy-based thermodynamic system analysis. *Renewable Energy*. Leiden. 2011, vol. 36, p. 3479-3487.

⁴³ VELÁSQUEZ, Héctor, RUIZ, Ángela y DE OLIVEIRA, Silvio. Análisis energético y exergético del proceso de obtención de etanol a partir de la fruta del banano. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Medellín. 2010, vol. 51, p. 87-96.

⁴⁴ JAIMES, Wilmer. Evaluación de tecnologías de extracción de aceite y producción de biodiesel de palma africana aplicando el análisis exergético. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2013. 165 p.

de panela se traducen en un incremento importante en la eficiencia energética del proceso, mientras que este efecto fue mucho menor en las eficiencias exergéticas⁴⁵.

Algunas conclusiones que pueden extraerse respecto a las tendencias generales en los análisis de este tipo se hallan en que los indicadores que se usan con mayor frecuencia son la eficiencia exergética y la exergía destruida, aplicadas tanto a sistemas del producto totales como a los procesos unitarios que los componen.

Adicionalmente, se pudo inferir que los métodos basados en exergía proveen una medida mejorada de la sostenibilidad, sobre todo porque permiten la realización de análisis más objetivos y razonables. Particularmente, existe una oportunidad para enfoques más comprensibles en los AExCV, debido a que, mientras las categorías de impacto tradicionales de los ACV muestran sus resultados a través de emisiones equivalentes (como de dióxido de carbono en el caso de la categoría de cambio climático), los indicadores basados en exergía suministran información completa en términos de una misma unidad (la exergía), por lo cual se puede retratar e identificar con mayor claridad la contribución que se tiene por cada sustancia emitida.

Por último, con base en las investigaciones encontradas y seleccionadas, se puede afirmar que las aplicaciones de los indicadores basados en exergía son amplias y pueden adaptarse dependiendo del objetivo que se tenga en el estudio.

⁴⁵ VELÁSQUEZ, Héctor, AGUDELO, Andrés y CHEJNE, Farid. Energy use in the production of unrefined sugar in Colombia (exergy analysis). *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Medellín. 2011, vol. 58, p. 17-26.

1.9 INFORMACIÓN GENERAL PLANTA PILOTO

Para la identificación general de la planta piloto resulta oportuno primero presentar una descripción general de ésta y, luego, la enumeración de los subsistemas que la componen.

En las etapas de diseño de la planta, se estableció que ésta estuviese apta para satisfacer un área productiva máxima de cultivo de 5,79 hectáreas de orégano, a través de un total de 8 horas hábiles de operación al día, mínimo 3 baches al día y 300 días hábiles de operación al año, que corresponderían a máximo alrededor de 2300 kilogramos de aceite esencial de orégano producido. La ubicación definida para la planta fue la sede de Barbosa de la Universidad Industrial de Santander y los proveedores del MV fueron los cultivos asignados por la Gobernación de Arauca al CENIVAM con este fin. Los subsistemas que constituyen la planta fueron:

- *Etapla agrícola.*
- *Transporte de MV desde instalaciones de cultivo hasta bioplanta.*
- *Sistema de picado.*
- *Alambique de destilación por arrastre de vapor.*
- *Sistema de generación de vapor (caldera).*
- *Sistema de secado.*
- *Condensador.*
- *Economizador.*
- *Ciclón - Filtro de mangas.*
- *Vaso florentino.*
- *Tanque de cohobación.*

Cada uno de estos subsistemas será explorado con mayor detalle en las secciones posteriores.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Aunque Colombia posee una gran biodiversidad y cuenta con condiciones climáticas, de tierra y de tradición agrícola que favorecen el desarrollo de la industria de los AE, en realidad es un país que no posee demasiada experiencia en el aprovechamiento a escala industrial de plantas aromáticas y medicinales. Este hecho se explica teniendo en cuenta que todas estas ventajas no pueden ser aprovechadas idóneamente si no son acompañadas con proyectos de prospección e investigación con aspiraciones productivas que puedan generar un valor agregado apreciable y un aprovechamiento sostenible de ellas.

En el marco del *Programa Bio-Reto XXI 15:50 Desarrollo de bioproductos para los sectores salud, agropecuario y cosmético, como resultado de la biodiversidad colombiana*, impulsado por MINCIENCIAS, se instaló una planta piloto de obtención de aceites esenciales que pretende aprovechar cultivos experimentales de especies que han sido identificadas previamente como promisorias, cuyo diseño procura mejorar y complementar desarrollos previos y nuevos del grupo Centro de Investigación en Biomoléculas y del Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (GIEMA) para enlazar eficientemente los procesos de obtención de AE y de extractos vegetales (la planta, de acuerdo a cómo se configure su operación, puede producir o aceites o extractos en procesos que son independientes entre sí).

El diseño de la planta integral tiene como pilares fundamentales el aumento de la eficiencia de todo el proceso y la reducción de costos de producción de AE. Para este estudio, se consideró particularmente la especie *Lippia organoides*, conocida comúnmente como orégano de monte, como objeto de demostración de una estrategia de aprovechamiento integral tal que tiene como productos el AE y su hidrolato, pero que también puede utilizar la masa vegetal residual como biocombustible o como material para compostaje.

Se plantea, entonces, la pregunta sobre si la planta propuesta presenta mejores desempeños en términos ambientales, energéticos y exergéticos al compararse con las líneas de producción de AE tradicionales que servirán como escenario de referencia y en las que, entre otras cosas, en vez de aprovechar el potencial combustible del material de trabajo, se recurre a combustibles fósiles como el gas natural. Con este fin en mente, se emplearon las metodologías propuestas en las normas ISO 14040 y 14044 con algunas modificaciones que incluyen, por ejemplo, la adición de un análisis exergético al análisis de ciclo de vida tradicional. Se buscó con lo anterior establecer si los impactos potenciales ambientales y la destrucción exergética en la bioplanta son inferiores a los que se tienen en el escenario de referencia y, además, proporcionar un insumo a la dirección del proyecto para la identificación de oportunidades de mejora en estos aspectos.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un análisis de ciclo de vida y un análisis exergético de ciclo de vida basados en la metodología de las normas ISO 14040-44 para la Bio-planta piloto de aceites esenciales y extracto vegetal proyectada en el marco del programa Bio-Reto XXI 15:50.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los sistemas del producto correspondientes a la planta piloto y a una planta hipotética basada en las técnicas más comunes en el contexto nacional (línea base o escenario de referencia) para la producción de aceites esenciales a partir de MV.
- Elaborar el inventario de ciclo de vida de los dos sistemas del producto definidos en el objetivo anterior, considerando todos los procesos que los constituyen, incluyendo entradas y salidas másicas, energéticas y exergéticas.
- Evaluar el perfil ambiental, a través del cálculo de indicadores de categorías de impacto asociadas a cambio climático y agotamiento de recursos fósiles, y el perfil exergético, por medio del cálculo de la demanda exergética acumulada, del proceso de obtención de aceites esenciales a partir de orégano de monte en los dos sistemas del producto escogidos con base en la unidad funcional de 1 kg de AE producido.

4. METODOLOGÍA

La metodología por abordar se basó en lo planteado por la normativa de referencia⁴⁶, con algunas modificaciones, dadas por el enfoque deseado de este proyecto, que pretende englobar también consideraciones muy vinculadas al carácter energético y exergético. En este capítulo se describe la forma en que será abordada cada una de las etapas que fueron presentadas en la sección 1.4.

4.1 DEFINICIÓN DEL PROPÓSITO

4.1.1 Aplicación prevista. El análisis fue aplicado a la planta piloto de obtención de AE con la especie *Lippia origanoides* como modelo de planta aromática.

4.1.2 Razones para realizar el estudio. Se esperaba comparar la línea de producción en estudio con el caso que se tendría para una línea base representativa del proceso de obtención de AE a nivel industrial en Colombia.

4.1.3 Público previsto. El trabajo se destina, esencialmente, a todas las partes interesadas en el proyecto de Biofábrica que incluyen las directivas del proyecto, la junta técnica establecida para él y MINCIENCIAS. Además, se espera pueda ser útil a investigadores que requieran hacer trabajos similares o relacionados.

4.2 ALCANCE

4.2.1 Sistemas del producto. Los sistemas del producto a considerar fueron 1) la bioplanta piloto de obtención de AE y 2) el escenario de referencia o línea base. La tabla siguiente resume los procesos unitarios que constituyen ambos escenarios.

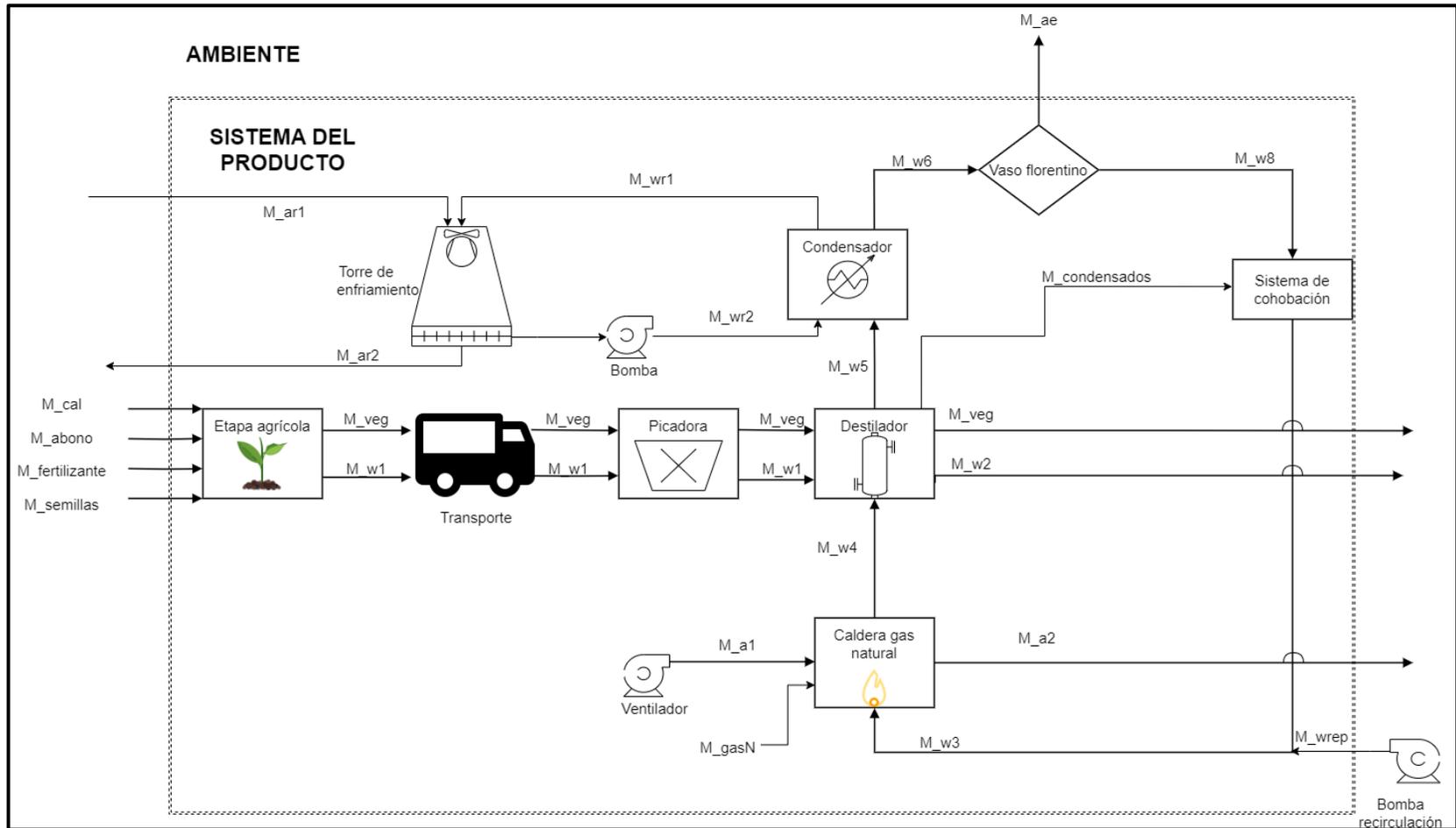
⁴⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Op. Cit.

Tabla 2. Comparación de procesos en los sistemas del producto de estudio.

PROCESO UNITARIO	SISTEMA DEL PRODUCTO	
	BIOPLANTA	ESC. REFERENCIA
Etapa agrícola	Los proveedores del MV son cultivos experimentales realizados en Tame, Arauca y el material debe ser trasladado hasta Barbosa, Santander, sitio de instalación de la bioplanta.	
Sistema de picado	El material que se recibe debe ser pre-tratado en una picadora antes de pasar a la etapa de destilación.	
Alambique de destilación	Se trata de un alambique con capacidad de 2 metros cúbicos, diseñado para operar por arrastre de vapor.	
Generación de vapor	Cámara de combustión de biomasa	Caldera de gas natural
Sistema de secado	La humedad del material proveniente del destilado y que va a ser quemado debe ser removida para mejorar el rendimiento de la combustión en el secador rotativo que aprovecha como fluido de secado los gases de combustión provenientes de la caldera.	No se utiliza (pues no se utilizará el MV como combustible).
Condensador	Intercambiador de calor aire-vapor encargado de condensar el hidrolato proveniente del destilador.	Intercambiador de calor vapor-agua enfriada por una torre de enfriamiento.
Economizador	Dado que los gases de combustión salen de la caldera a temperaturas superiores a las que se desean para el secado, la energía térmica de éstos se aprovecha para precalentar el agua de alimentación de la caldera.	No se utiliza.
Ciclón	Primera etapa de separación de partículas sólidas que van suspendidas en los gases de combustión.	No se utiliza.
Filtro de mangas	Situado antes de la entrada al secador para separar las partículas sólidas que puedan provenir en la corriente gaseosa.	No se utiliza.
Vaso florentino	Almacena el hidrolato para que, por diferencia de densidades, se pueda separar el aceite esencial obtenido del agua.	
Sistema de cohobación	Almacena el agua separada en el vaso florentino para usarla para alimentar la caldera. Adicionalmente, también recibe los condensados del alambique.	

Nótese que la información es idéntica para múltiples procesos unitarios en los dos casos. Para mayor claridad, seguidamente se presentan dos diagramas que ilustran todos los subsistemas descritos y las relaciones existentes entre ellos para ambos sistemas del producto. En este diagrama, los subíndices representan la naturaleza de la sustancia en cuestión: *w* para agua (ya sea líquida, vapor o como humedad), *a* para aire y gases, *veg* para MV seco y *gasN* para gas natural, por ejemplo.

Figura 5. Representación esquemática de flujos másicos escenario de referencia.



En los esquemas anteriores se puede apreciar que las diferencias esenciales entre los dos sistemas del producto estudiados se hallan en el combustible usado para la generación del vapor de arrastre, pero también es claro que ello tiene repercusiones en la existencia o inexistencia de otros procesos como el de secado, el economizador, etc... También se encuentra una diferencia en el método de condensación utilizado.

4.2.2 Función del sistema del producto. La función fundamental de ambos sistemas del producto en cuestión es la producción de AE de orégano. Se debe resaltar que, si bien en términos generales se estableció que a través de la bioplanta también fuese posible obtener extractos vegetales a través del método de dispersión de la matriz en base sólida (MSPD), la obtención de este producto es independiente de la del AE, de manera que no se constituye como un coproducto de la cadena y, por consiguiente, puede ser omitida para los propósitos de este proyecto.

4.2.3 Unidad funcional. Se define como la unidad másica de AE de orégano producido, es decir, 1 kg de AE que, de acuerdo con las condiciones en que se obtengan los cultivos, se espera que sean del quimiotipo B, también denominado Carvacrol.

4.2.4 Límites del sistema. Teniendo en cuenta que se adopta una modalidad de análisis de la cuna a la puerta, se pretende abarcar desde el proceso de cultivo del orégano, hasta la obtención del producto final en la puerta de la planta. Ello implica que se tienen los procesos unitarios mostrados en los esquemas de la sección 4.2.1.

4.2.5 Procedimientos de asignación. Los procesos de obtención de AE y extractos vegetales funcionan de manera independiente, razón por la que se puede considerar que a la salida del sistema no se tienen productos diferentes del de interés que es el AE, de tal forma que en este punto no es necesario realizar ningún

tipo de asignación (*allocation*). Para los procesos intermedios, en cambio, se recurre a asignación másica.

4.2.6 Suposiciones. En general, las suposiciones consisten en formas de complementar información que no estaba disponible o no fue susceptible de ser medida.

En primer lugar, cabe mencionar que se considerará una destilación con un rendimiento de masa de AE por masa de MV del 1,1% con un tiempo total de destilación de 250 minutos⁴⁷.

Por otra parte, si bien se encontró que el poder calorífico de un bache de MV (15,635 kJ/kg) es más que suficiente para generar el vapor requerido para la destilación⁴⁸, se considera que la totalidad de éste se utiliza en el escenario de Biofábrica en la cámara de combustión, debido a la posibilidad de bajas eficiencias que pueden tenerse allí.

Además, en el momento de las pruebas realizadas no se encontraba aún instalado el sistema de secado, de forma que la información relacionada con su desempeño y funcionamiento general se extrajo del modelo térmico desarrollado durante el diseño de la bioplanta⁴⁹ y de cálculos termodinámicos.

⁴⁷ RAMÍREZ, Karen. Op. Cit.

⁴⁸ MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Evaluación del bagazo de *Lippia Origanoides* HBK derivado del proceso de extracción de aceites esenciales como combustible sólido para procesos de combustión. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2021. 104 p.

⁴⁹ LEÓN, Diego y MANTILLA, Nicolás. Diseño y construcción de un prototipo del secador de la planta piloto de obtención de aceites esenciales y extracto vegetal en el marco del Programa Bio-Reto XXI 15:50. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2020. 175 p.

Asimismo, se considera que los cambios en masa y energía que suceden en filtro de mangas y ciclón son insignificantes, además de que no implican consumo energético, y, por consiguiente, sus efectos en el análisis son despreciables.

4.2.7 Limitaciones. Como limitaciones cabe mencionar que en la medida de lo posible se buscó información de primera mano, pero, en todo caso, la disponibilidad de los datos no fue total debido a falta de información detallada proporcionada por proveedores en la fase agrícola o imposibilidad de medición de algunos datos en la fase industrial. En esos casos, la información hallada fue complementada con valores del diseño de la bioplanta y con la literatura disponible.

4.2.8 Requisitos de calidad de los datos. Como parte del estudio se adoptó un enfoque de transparencia, de forma que las fuentes de toda la información son adecuadamente referenciadas. Según fue expresado en el punto anterior, se buscó información de primera mano en la medida de lo posible y se procuró mantener al mínimo la fracción de la información extraída de la literatura. Respecto a los puntos que sugiere la normativa que deben tratarse en cuanto a requisitos de calidad de los datos pueden mencionarse:

- *Tiempo:* los datos medidos se adquirieron entre los años 2019 y 2023, abarcando desde pruebas experimentales que fueron parte del diseño de la bioplanta hasta pruebas de operación en su instalación y cultivos experimentales de la especie vegetal estudiada.
- *Geografía:* la información de la fase industrial se obtuvo directamente del diseño o la operación de la bioplanta y la de la fase agrícola se extrae de reportes directos de los agrónomos encargados de proveer el MV.
- *Representatividad:* la información fue casi totalmente representativa pues en su mayoría se extrae directamente del caso de estudio.
- *Fuentes de los datos:* como se ha expresado se considera información medida, de diseño y disponible en la literatura, con ese orden de prioridad.

4.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

En esta etapa se compilan y cuantifican las entradas y salidas de los procesos unitarios que constituyen el ciclo de vida del producto analizado. Estas entradas y salidas pueden provenir o dirigirse respectivamente a otros procesos o al ambiente. Lo anterior coincide con lo que fue ilustrado en la Figura 3.

De acuerdo con esto, en esta sección se desarrollan los balances másicos requeridos y se muestran los resúmenes de entradas y salidas para cada proceso unitario; adicionalmente, dado que fue necesaria la utilización de plantillas de procesos incluidos en las bases de datos internacionales Ecoinvent versión 3.0 y Agribalyse versión 3.0.1, se especifica qué plantilla se utilizó para el modelamiento de cada entrada/salida. Mientras tanto, los diferentes productos intermedios, que constituyen salidas de algunos procesos unitarios y entradas de otros, son modelados y nombrados de forma que puedan ser correctamente identificados; por ejemplo, para identificar el MV en los diferentes puntos de la línea de producción se le añade un complemento que indica en qué punto se halla: material vegetal cosechado, picado, post-destilado, etc... Esta misma lógica se aplicó para los demás materiales.

Dado que para la construcción del inventario también se requiere la ejecución de balances energéticos, en esta sección se menciona cómo fue determinado el consumo energético en los diferentes procesos unitarios.

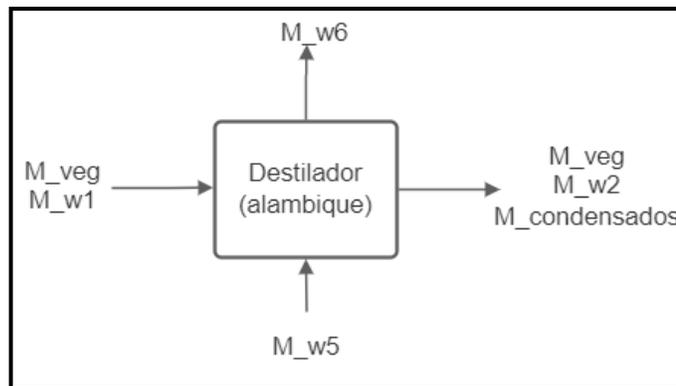
La forma de proceder fue primero analizando todos los procesos unitarios que constituyen el sistema del producto de la bioplanta y, luego, se analizaron los procesos unitarios diferentes que se tienen en el escenario de referencia. No está de más resaltar que el análisis se realiza sobre la base de la unidad funcional definida, es decir, 1 kg de AE producido. A partir de este valor y de las relaciones de proporcionalidad identificadas, se ajustan todos los flujos a la base de la unidad funcional, con lo cual fue posible construir el inventario de ciclo de vida.

Debido a que la unidad funcional se encuentra en la salida final del sistema del producto, el análisis debe iniciar allí y dar pasos hacia atrás con el fin de estimar las proporciones existentes entre las diferentes entradas y salidas en los procesos unitarios.

4.3.1 Bioplanta

4.3.1.1 Destilación. El orégano picado pasa al alambique, en donde tiene lugar el proceso de destilación. Se identifican como entradas, primero, el orégano que ha sido pre-tratado con su correspondiente humedad y el vapor de agua necesario para el arrastre del aceite, que constituye una salida del proceso unitario de caldera, como se verá más adelante.

Figura 6. Esquema de proceso de destilación.



Para los propósitos de este trabajo, toda vez que se mencione el MV en cada subsistema, se discriminará la masa seca y la correspondiente a humedad, teniendo en cuenta la naturaleza higroscópica del material; estos valores de humedad se establecieron a partir de mediciones realizadas en planta.

Para la especie vegetal de interés, se considera un rendimiento de producción de AE del 1,1%⁵⁰. A partir de esta relación, se calcula el MV requerido para la producción de 1 kg de AE según se muestra ahora:

$$\text{Rendimiento}_{\text{destilación}} = \frac{1,1}{100} = \frac{M_{AE}}{M_{veg}}$$

$$\rightarrow M_{veg} = M_{AE} * \frac{100}{1,1} \rightarrow M_{veg} = 1 * \frac{100}{1,1}$$

$$M_{veg} = 91 \text{ [kg de MV seco]}$$

Mientras tanto, las humedades del MV fueron medidas en su condición de pre-destilado y post-destilado, con lo que se obtuvieron humedades en base seca de 15% y 41% respectivamente. De acuerdo con esto, las masas de agua equivalentes a la unidad funcional son determinadas:

$$\rightarrow M_{w1} = H_1 * M_{veg} = \frac{15}{100} * 91$$

$$M_{w1} = 14 \text{ [kg de humedad en MV pre – destilado]}$$

$$\rightarrow M_{w2} = H_2 * M_{veg} = \frac{41}{100} * 91$$

$$M_{w2} = 37 \text{ [kg de humedad en MV post – destilado]}$$

Por otra parte, para la estimación de las masas de vapor y de hidrolato, se parte del hecho de que, en la Biofábrica, donde se tiene un alambique con capacidad de 2

⁵⁰ RAMÍREZ, Karen. Op. Cit.

metros cúbicos o 304 kg de MV seco, se ha determinado que el funcionamiento óptimo se halla con un flujo de hidrolato alrededor de 1,2 L/min a la salida del condensador; ahora, con un tiempo de destilación de 250 minutos, con la densidad del agua (teniendo en cuenta que el hidrolato líquido es, en su mayoría, agua) y llevando este valor a la proporción de MV procesado en la unidad funcional (es decir, escalando el anterior valor de 304 kg a 91 kg de MV seco), se obtiene la masa de hidrolato total obtenida durante el proceso:

$$M_{w6} = \dot{m}_{w6} * t_{destilación} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right) = (1,2 * 1) * 250 * \left(\frac{91}{304} \right)$$

$$M_{w6} = 90 [kg\ hidrolato]$$

Asimismo, en pruebas se vio que alrededor del 1,8% del vapor quedaba en forma de condensado en el alambique, además del que impregnaba el material y se volvía parte de su humedad. En este caso se incluyen los condensados del alambique debido a que estos son recirculados a través del sistema de cohobación, en donde son reutilizados como agua para el bache siguiente, aprovechando que es posible que contengan también cierta fracción de aceite esencial. Con este valor y luego balanceando la masa de agua del proceso se determinan las masas de vapor y de condensados como sigue:

$$M_{condensados} = \frac{1,8}{100} * M_{w5}$$

$$M_{w5} + M_{w1} = M_{w6} + M_{w2} + M_{condensados}$$

Resolviendo este sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, se encuentra:

$$\rightarrow M_{w5} = 116 [kg\ de\ vapor]$$

$$\rightarrow M_{condensados} = 3 [kg\ de\ condensados]$$

De acuerdo con esto, las entradas y salidas para este proceso unitario se muestran a continuación.

Tabla 3. Entradas para la destilación.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco picado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano picado (15%)	14	kg	N.A.	N.A.
Vapor de agua	116	kg	N.A.	N.A.

Tabla 4. Salidas de la destilación.

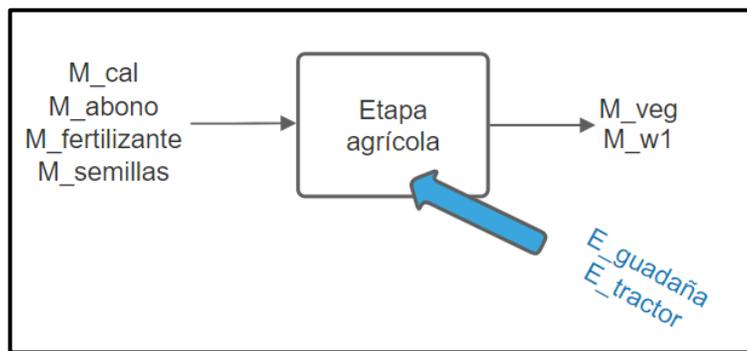
Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco destilado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano destilado (41%)	37	kg	N.A.	N.A.
Hidrolato	90	kg	N.A.	N.A.
Condensados del alambique	3	kg	N.A.	N.A.

Por otra parte, nótese que el vapor de agua suministrado para este proceso no contribuye directamente a la huella de agua del producto, debido a que éste es recirculado y reutilizado en el siguiente bache de producción mediante el sistema de cohobación. Por esta razón, no se incluye un gasto de agua. Sin embargo, como se puede apreciar en el hecho de que la masa de vapor de entrada es superior a la masa de hidrolato y condensados producidos, sí se pierde cierta cantidad de agua en el proceso. Dicha pérdida se produce por dos fuentes principales: 1) la humedad absorbida por el orégano durante el proceso (véanse los valores de humedad de la Tabla 3 y la

Tabla 4) y que es emitida al ambiente durante el proceso de secado; y 2) la cantidad de hidrolato que no alcanza a pasar a fase líquida en el condensador, que, se estima en alrededor del 3%. Esta cantidad perdida sí se debe reponer y, por tanto, es tenida en cuenta como consumo adicional de agua, pero en el análisis del economizador.

4.3.1.2 Etapa agrícola. La información aquí presentada se obtuvo a partir de los cultivos experimentales desarrollados en el municipio de Tame, en Arauca. Esta información fue complementada con plantillas de las bases de datos utilizadas. Para la contabilización de entradas se reconocen las entradas de insumos materiales requeridos para el cultivo: cal, abono y fertilizante de la referencia Nutrifert 11-30-10⁵¹, además del área de cultivo.

Figura 7. Esquema de etapa agrícola.



La información suministrada corresponde a un área disponible para siembra de 1 hectárea de orégano de monte, con una densidad de siembra de 28570 plantas por hectárea sembradas en sencillo, dejando 50 cm entre plantas y 70 cm entre calles (siembra en rectángulo); la base de cálculo se hizo como monocultivo. A

⁵¹ PRECISAGRO. Hoja de seguridad fertilizante Nutrifert 11-30-10. Disponible en [MSDS 11-30-10 \(recintodelpensamiento.com\)](https://www.recintodelpensamiento.com)

continuación, se muestran los datos de los insumos requeridos para una producción medida de 5 toneladas de orégano por hectárea anual.

Tabla 5. Cantidades de insumos requeridos para cultivo de *Lippia origanoides*.

PARA 5000 kg/ha-año		
Insumo	Cantidad	Relación
Cal	1550 [kg]	0,31 $\left[\frac{kg \text{ insumo}}{kg \text{ MV}} \right]$
Abono	11428 [kg]	2,29 $\left[\frac{kg \text{ insumo}}{kg \text{ MV}} \right]$
Fertilizante	286 [kg]	0,06 $\left[\frac{kg \text{ insumo}}{kg \text{ MV}} \right]$
Semillas	28570 [plántulas]	5,71 $\left[\frac{plántulas}{kg \text{ MV}} \right]$

Las relaciones anteriores, junto con la equivalencia de producción de 5000 kg de MV por hectárea al año, fueron utilizadas para calcular la cantidad correspondiente de cada insumo requerido para la producción del MV equivalente a la unidad funcional (91 kg en base seca y 105 kg en base húmeda).

$$\rightarrow M_{cal} = 33 \text{ [kg de cal]}$$

$$\rightarrow M_{abono} = 240 \text{ [kg de abono]}$$

$$\rightarrow M_{fertilizante} = 6 \text{ [kg de fertilizante]}$$

También, se debe tener en cuenta que durante el crecimiento de las plantas existe un proceso de captación de dióxido de carbono; sin embargo, en esta aplicación particular el MV será usado como combustible y, por tanto, emitirá también dióxido de carbono como parte de los gases de combustión. De acuerdo con esto, la literatura sugiere que existe equivalencia entre absorciones y emisiones y que, por

ende, éstas se compensan⁵². Particularmente, en este caso, para la compensación se asume un balance neto de CO₂ igual a cero, de manera que las captaciones y emisiones de dióxido de carbono de la biomasa serán nombradas en el inventario, pero con un valor másico de cero para ambas.

Mientras tanto, para el consumo de energía se tiene lo relacionado con la guadaña para desmonte y el tractor de arado. No obstante, debido a que no se cuenta con valores concretos de consumo de combustible por estos equipos, se recurre a datos teóricos. Nótese que la aplicación de las plantillas sobre la base de la unidad funcional implica la cantidad de área de tierra de cultivo necesaria para producir anualmente la masa de orégano cosechado, que para 105 kg de MV húmedo se estima en 0,02 hectáreas. En cuanto a uso de agua, se considera que no se requiere para el riego de plántulas, debido a que con el agua proporcionada por las lluvias en Tame es suficiente, según lo observado en campo.

La etapa en que la materia vegetal cosechada se lleva desde el sitio de cultivo hasta la planta no debe ser modelada como un proceso, sino que puede ser incluida como parte de la caracterización de este proceso unitario. Teniendo en cuenta que las plantillas de transporte están dadas en unidades del producto entre kilómetro de transporte y tonelada métrica transportada, se deben tener en cuenta estos dos parámetros, que son 453 kilómetros de Tame, Arauca hasta Barbosa, Santander, con una carga de material de 105 kg.

El resumen de las entradas, entonces, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Entradas para la etapa agrícola.

Entrada	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Cal	33	kg	Lime (GLO) - market	Ecoinvent

⁵² IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 4.

Abono orgánico	240	kg	Compost (GLO) - market	Ecoinvent
Fertilizante Nutrifert - N=11%	0,5	kg	Nitrogen fertiliser, as N (GLO)	Ecoinvent
Fertilizante Nutrifert - P2O5=30%	2	kg	Phosphate fertiliser, as P2O5 (GLO)	
Fertilizante Nutrifert - K2O=10%	0,5	kg	Potassium fertiliser, as K2O (GLO)	
Uso de tierra	0,02	ha	Land use II-III	Agribalyse
Dióxido de carbono	0,00	kg	Carbon dioxide, biogenic	Agribalyse
Proceso de guadañado	0,02	Ha	Mowing by motor mower (GLO)	Ecoinvent
Proceso de arado	0,02	Ha	Tillage, cultivating, chiselling	Ecoinvent
Transporte Tame - Barbosa	48	Ton*km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 3 (GLO)	Ecoinvent

Por otro lado, entre las salidas de este proceso sólo se encuentra el MV de trabajo que llega a la bioplanta. Las emisiones para tener en cuenta incluyen las directas e indirectas de óxido nitroso debido a la aplicación de nitrógeno sobre el suelo mediante el fertilizante sintético y las de dióxido de carbono relacionadas con la aplicación de cal. En ambos casos, para su estimación se recurre a los factores de emisión proporcionados por IPCC⁵³, en donde consta que los factores de emisión medios son:

- 0,46 kg CO₂ por kg de cal para procesos de encalado.
- 0,016 kg de N₂O como emisión directa al aire por kg de N aplicado mediante fertilizantes sintéticos.
- 0,0016 kg de N₂O como emisión indirecta al aire por kg de N aplicado mediante fertilizantes sintéticos.
- 0,0049 kg de N₂O como emisión indirecta al agua por lixiviación por kg de N aplicado mediante fertilizantes sintéticos.

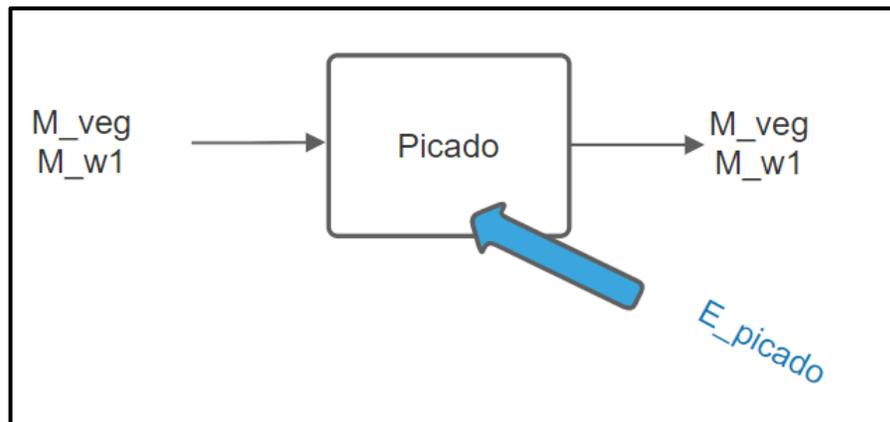
⁵³ IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 4.

Tabla 7. Salidas de la etapa agrícola.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco cosechado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano cosechado (15%)	14	kg	N.A.	N.A.
CO2 por encalado – al aire	15	kg	Carbon dioxide – to air	Agribalyse
Óxido nitroso directo (N2O) – al aire	0,008	kg	Dinitrogen monoxide – to air	Agribalyse
Óxido nitroso volatilización (N2O) – al aire	0,0008	kg	Dinitrogen monoxide – to air	Agribalyse
Óxido nitroso lixiviación (N2O) – al agua	0,002	kg	Dinitrogen monoxide – to water	Agribalyse

4.3.1.3 Sistema de picado de MV. El proceso de pretratamiento del MV una vez se encuentra en planta consiste en que el orégano húmedo que ingresa es el mismo que sale, pero con un tamaño de tallos y hojas reducido. De acuerdo con esto y en función de la nomenclatura que se está trabajando, se dice que a este proceso ingresa orégano cosechado y se produce orégano picado.

Figura 8. Esquema de sistema de picado.



Por otra parte, la máquina de picado requiere de energía eléctrica para funcionar y ésta debe ser tenida en cuenta. La picadora utilizada en planta es la Penagos modelo PP-9MR, cuya información de referencia se puede obtener de su ficha

técnica⁵⁴. Específicamente, en planta se encontró una capacidad de procesamiento de alrededor de 700 kg/h para el orégano fresco, a partir de lo que se estima el tiempo de operación requerido para procesar la masa correspondiente a la unidad funcional (alrededor de 7-8 minutos) y, luego, con la potencia nominal de operación de 3 HP, el consumo energético asociado.

De acuerdo con esto, las entradas que se tienen son las siguientes.

Tabla 8. Entradas para el sistema de picado.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco cosechado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano cosechado (15%)	14	kg	N.A.	N.A.
Electricidad (picadora)	1188	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

Y, tras el proceso, las salidas obtenidas son las siguientes.

Tabla 9. Salidas del sistema de picado.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco picado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano picado (15%)	14	kg	N.A.	N.A.

4.3.1.4 Sistema de secado. El MV humidificado durante la destilación debe ser tratado antes de pasar a la caldera para servir como combustible. Este tratamiento consiste en un secado que aprovecha, a su vez, el potencial deshumidificador de los gases de combustión. Adicionalmente, el proceso requiere de una entrada de energía asociada al ventilador que impulsa los gases y otra al movimiento rotativo del tambor del secador. La primera se calcula teniendo en cuenta que este mismo ventilador es el que se usa para condensador, economizador y secador, de manera

⁵⁴ PENAGOS HERMANOS. Picapasto PP-9MR. [página web]. [Consultado el 2 de febrero, 2023] Disponible en: [[Picapasto PP-9MR - Penagos Hermanos](#)].

que su consumo energético se dividirá en 4 partes iguales y se distribuirá en estos 4 procesos unitarios. En términos concretos la estimación se hace sabiendo que para la bioplanta se tiene un ventilador de 9,2 kW que opera durante los 250 minutos de destilación y haciendo una corrección proporcional al valor equivalente de MV relacionado con la unidad funcional (el ventilador y el alimentador están dimensionados para una capacidad de procesamiento de un bache de producción); mientras que el segundo se estima sobre la base de que para la bioplanta real, con una capacidad promedio de procesamiento de 750 kilogramos de orégano seco por bache, se tiene un motor de 1,5 HP que funciona también durante todo el tiempo de destilación. Se escala el consumo asociado proporcionalmente a la masa vegetal de la unidad funcional.

El balance másico asociado al secado se hace primero con el establecimiento de la humedad removida en el proceso. Esto es, a través de la determinación de M_{w3} y M_{w4} . Por conservación de la masa y de las especies químicas, es claro que:

$$M_{w2} = M_{w3} + M_{w4}$$

Así lo muestra el esquema de detalle para el proceso.

Figura 9. Esquema de sistema de secado.

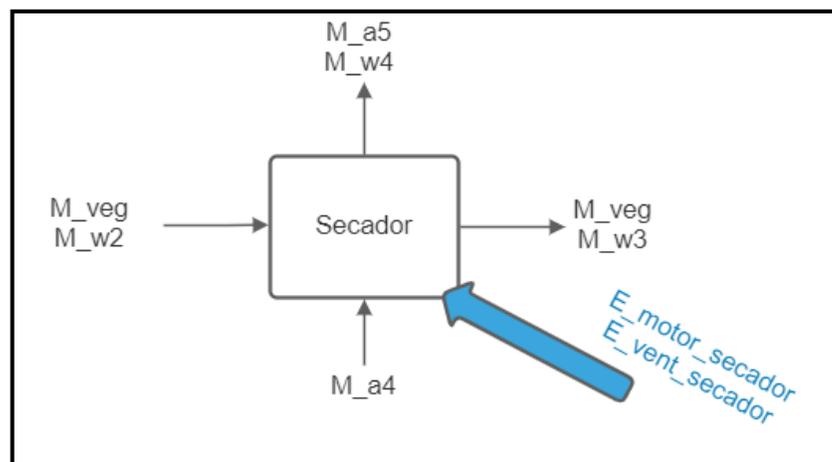


Tabla 10. Entradas de material del secador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco destilado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano destilado (41%)	37	kg	N.A.	N.A.
Gases de combustión para secado	736	kg	N.A.	N.A.
Electricidad (ventilador)	10327	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent
Electricidad (motor secador)	5029	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

A partir de este proceso se obtiene el orégano en condiciones apropiadas para ser utilizado como combustible. Además, después de que los gases de combustión atraviesan el secador para deshumidificar el orégano, son expulsados a la atmósfera. Se destaca que gran parte de los gases son inertes pues consisten en el aire suministrado, de manera que no es relevante su efecto en el ambiente; su masa ha aumentado debido a que llevan consigo la humedad retirada al MV; y, por otra parte, la fracción de emisiones que puede resultar perjudicial para el ambiente se contabiliza en la fuente que es, en este caso, la cámara de combustión.

Por otra parte, se usó el modelo térmico⁵⁵ desarrollado durante el diseño de los equipos de la Biofábrica para un tiempo de secado de 250 minutos, coincidente con el tiempo total de disponibilidad de gases de combustión, para estimar la humedad de salida del MV. Bajo esta condición, se espera una humedad en base seca de salida alrededor del 8%:

$$\rightarrow M_{w3} = \frac{8}{100} * M_{veg} = \frac{8}{100} * 91$$

⁵⁵ LEÓN, Diego y MANTILLA, Nicolás. Op. Cit.

$$M_{w3} = 7 \text{ [kg de humedad en MV]}$$

$$M_{w4} = M_{w2} - M_{w3} = 37 - 7$$

$$\rightarrow M_{w4} = 30 \text{ [kg de humedad en MV]}$$

Tabla 11. Salidas del secador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco post-secado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano post-secado (8%)	7	kg	N.A.	N.A.
Gases de combustión inertes húmedos	766	kg	N.A.	N.A.

4.3.1.5 Sistema de generación de vapor (cámara de combustión de biomasa).

El vapor necesario para el proceso de destilación se obtiene a partir de un sistema de generación de vapor. En el caso real de la bioplanta este sistema consiste en una cámara de combustión (o caldera) de biomasa. Las entradas identificables consisten en el orégano combustible, el aire y el agua precalentados que se estudian como salidas de los procesos unitarios de secador, condensador y economizador respectivamente. Particularmente, la proporción de aire requerida para la combustión se calculó analizando la estequiometría de esta reacción con un exceso de aire del 30%⁵⁶.

El análisis inicia partiendo de la bibliografía consultada, con la composición molar para 1 kg de material vegetal seco, obtenida mediante análisis último.

⁵⁶ RAMÍREZ, Katherine y SOLANO, David. Diseño térmico y mecánico de una caldera acuatubular de biomasa para la Biofábrica del proyecto Bio-retro Siglo XXI 15;50. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2020. 164 p.

Tabla 12. Composición *Lippia Origanoides*.

Elemento	Fración másica [%]	Moles
C	45,64	$n_c = 38,03$
H	5,58	$n_H = 55,80$
O	41,14	$n_O = 25,71$
Cenizas	6,98	-
S	<1	-
N	<1	-

Fuente: Muñoz y Pico (2021).⁵⁷

Usando la anterior composición puede ser planteada la ecuación que describe la combustión, suponiendo, en principio, que ésta se da de manera completa, razón por la que no hay residuos de CH₄, CO o H₂. De acuerdo con esto, para el cálculo de la proporción de aire teórico y sabiendo que la combustión se supone completa, el aire se suministra en la cantidad exacta ε para garantizar esta condición y que, además, según datos de pruebas previamente realizadas el porcentaje másico de cenizas es del 6,98%⁵⁸. Las condiciones atmosféricas promedio del aire en Barbosa son una temperatura de 20°C y humedad relativa del 80%.

⁵⁷ MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Op. Cit.

⁵⁸ MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Ibid.

Se propone determinar las moles de agua que vienen acompañadas con el aire atmosférico impulsado hacia la cámara de combustión. Esto se realiza como:

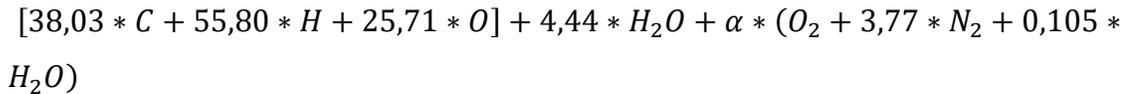
$$n_{H_2O_{aire}} = \frac{W * 4,77}{0,622} = \frac{0,01368 * 4,77}{0,622}$$

$$= 0,105 \text{ [moles de agua por 4,77 moles de aire]}$$

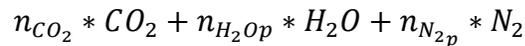
En donde el término W es la humedad absoluta del aire para las condiciones dadas (Temperatura media de 20°C, humedad relativa de 80% y presión de 86,92 kPa).

La ecuación que describe el proceso de combustión en este caso para 1 kg de biomasa teniendo en cuenta la humedad en base seca considerada en la sección 2.4 (80 g que equivalen a 4,44 moles de agua) es:

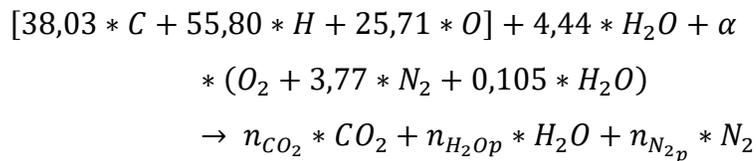
Reactivos:



Productos:



Reacción completa:



Con esto, se puede aplicar el principio de conservación de las especies químicas para obtener dos ecuaciones:

$$\text{Carbono: } 38,03 = n_{CO_2p}$$

$$\text{Hidrógeno: } 55,80 + 2 * 4,44 + 0,105 * \alpha * 2 = 2 * n_{H_2O_p}$$

$$\text{Nitrógeno: } 3,77 * \alpha * 2 = 2 * n_{N_2_p}$$

$$\text{Oxígeno: } 25,71 + 4,44 + \alpha * (2 + 0,105) = 2 * n_{CO_2_p} + n_{H_2O_p}$$

Sistema de cuatro ecuaciones, cuya solución es:

$$\alpha = 39,13$$

$$n_{N_2_p} = 147,5$$

$$n_{H_2O_p} = 36,45$$

$$n_{CO_2_p} = 38,03$$

Dado que en aplicaciones reales suministrar la cantidad exacta teórica de aire requerida para la combustión completa no es suficiente para garantizar esta condición, se requiere suministrar una cantidad de aire en exceso indicada por el factor ε . En este caso, los cálculos serán desplegados con un exceso de aire del 30%, por lo cual:

$$\varepsilon = 1,30$$

De esta manera, la ecuación total que permite describir la combustión consiste en:

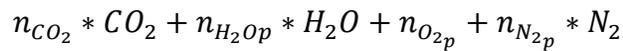
Reactivos:

$$[38,03 * C + 55,80 * H + 25,71 * O] + 4,44 * H_2O + \varepsilon * \alpha * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O)$$

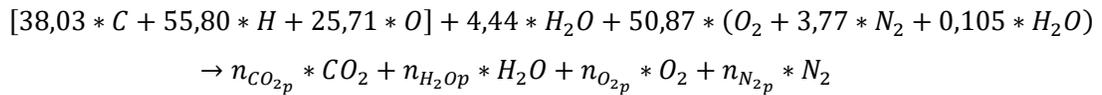
$$\rightarrow [38,03 * C + 55,80 * H + 25,71 * O] + 4,44 * H_2O + 39,13 * 1,3 * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O)$$

$$\rightarrow [38,03 * C + 55,80 * H + 25,71 * O] + 4,44 * H_2O + 50,87 * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O)$$

Productos:



Reacción completa:



De la anterior expresión, partiendo una vez más de la conservación de las especies químicas, se pueden obtener las ecuaciones:

$$\text{Carbono: } 38,03 = n_{CO_{2p}}$$

$$\text{Nitrógeno: } 50,87 * 3,77 * 2 = n_{N_{2p}} * 2$$

$$\text{Hidrógeno: } 55,80 + 2 * 4,44 + 50,87 * 0,105 * 2 = 2 * n_{H_2O_p}$$

$$\text{Oxígeno: } 25,71 + 4,44 + 55,07 * (2 + 0,105) = n_{H_2O_p} + 2 * n_{CO_{2p}} + 2 * n_{O_{2p}}$$

De las cuales se encuentra:

$$n_{N_{2p}} = 191,8$$

$$n_{H_2O_p} = 37,68$$

$$n_{CO_{2p}} = 38,03$$

$$n_{O_{2p}} = 11,74$$

Por tanto, conociendo todos los valores antes calculados, se puede establecer la ecuación química de la combustión:

Reactivos:

$$[38,03 * C + 55,80 * H + 25,71 * O] + 4,44 * H_2O + 50,87 * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O)$$

Productos:

$$38,03 * CO_2 + 37,68 * H_2O + 11,74 * O_2 + 191,8 * N_2$$

Reacción completa:

$$[38,03 * C + 55,80 * H + 25,71 * O] + 4,44 * H_2O + 50,87 * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O) \\ \rightarrow 38,03 * CO_2 + 37,68 * H_2O + 11,74 * O_2 + 191,8 * N_2$$

Con base en los cálculos realizados, se puede obtener otro resultado particularmente interesante que consiste en la proporción másica aire-combustible que requerirá la combustión bajo las condiciones de operación establecidas. Esta proporción se calcula como:

$$\text{Proporción aire - combustible} = \alpha * \varepsilon * (2 * 16 + 14 * 2 * 3,77 + 0,105 * 18) \\ = 7093,68 \left[\frac{g \text{ de aire}}{kg \text{ de combustible}} \right] = 7,09 \left[\frac{kg \text{ de aire}}{kg \text{ de combustible}} \right]$$

Para llevar esta relación a los términos de la unidad funcional, se utiliza la masa de combustible seco conocida:

$$M_{aire} = 7,09 * M_{veg} = 7,09 * 91$$

$$\rightarrow M_{aire} = M_{a2} = 645 \text{ [kg de aire para combustión]}$$

Ahora también se puede determinar el flujo másico de gases de combustión que se tiene por unidad de masa de combustible. Con este fin también se considera la conservación de la masa en la reacción, teniendo en cuenta además que una gran parte de los productos son gases de combustión, pero sin olvidar que también se tiene cierta cantidad de productos en forma de cenizas.

Con este fin en mente, para 1 kg de biomasa, se plantea que la masa de gases de combustión producidos es:

$$m_{gases} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{O_{2p}} + m_{N_{2p}}$$

$$\rightarrow m_{gases} = (44 * 38,03) + (37,68 * 18) + (11,74 * 32) + (191,8 * 28)$$

$$m_{gases} = 8097,64 [g] = 8,10 [kg]$$

Análogamente a lo que se hizo para el aire, se determina la relación entre la masa de gases producidos y la masa de biomasa quemada como:

$$Proporción\ gases - combustible = 8,10 \left[\frac{kg\ de\ gases\ de\ combustión}{kg\ de\ combustible} \right]$$

Llevándolo a la base de la unidad funcional:

$$M_{gases} = 8,10 * M_{veg} = 8,10 * 91$$

$$\rightarrow M_{gases} = M_{a3} = 737 [kg\ de\ gases\ de\ combustión]$$

De manera similar, para las cenizas, utilizando la información de la Tabla 12:

$$M_{cenizas} = \% Cenizas * M_{veg} = \frac{6,98}{100} * 91$$

$$\rightarrow M_{cenizas} = 6 [kg\ cenizas]$$

Además, el consumo energético del ventilador se distribuye según se describió previamente. Mientras tanto, se encontró que el sinfín de alimentación tenía una potencia nominal de 0,37 kW y se establece una operación de 250 minutos. Estos valores se corrigen a la base de la unidad funcional.

Tabla 13. Entradas de material a la caldera de biomasa.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Orégano seco post-secado	91	kg	N.A.	N.A.
Humedad en orégano post-secado (8%)	7	kg	N.A.	N.A.

Aire precalentado	645	kg	N.A.	N.A.
Agua para caldera	116	kg	N.A.	N.A.
Electricidad (ventilador)	10327	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent
Electricidad (alimentación combustible)	1661	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

Y, tras el proceso de combustión, las salidas esperables son el vapor de agua, las cenizas y los gases de combustión; estos últimos merecen un análisis especial: una parte de ellos es inerte en tanto que la otra, según se explicó antes, consiste en el dióxido de carbono emitido que se supone se compensa con el captado por el orégano durante la etapa agrícola, y en los valores correspondientes de metano y óxido nitroso, que son estimados a partir de los factores de emisión por defecto propuestos por IPCC para la combustión estacionaria de biomasa sólida primaria⁵⁹, que son de 300 kg CH₄ y 4 kg de N₂O por TJ de calor. Para determinar el calor de combustión y, por tanto, las correspondientes emisiones, se utiliza el poder calorífico del MV, que es de 15635 kJ/kg⁶⁰ y una masa de combustible de 91 kg, con lo cual se tienen 0,0014 TJ de calor.

Tabla 14. Salidas de la caldera de biomasa.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Gases de combustión de caldera	737	kg	N.A.	N.A.
CO ₂	0,00	kg	Carbon dioxide, biogenic	Agribalyse
CH ₄	0,43	kg	Methane, biogenic	Agribalyse
N ₂ O	0,0057	kg	Dinitrogen monoxide – to air	Agribalyse
Vapor de agua	116	kg	N.A.	N.A.
Cenizas	6	kg	Wood ashes	Agribalyse

⁵⁹ IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 2.

⁶⁰ MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Op. Cit.

4.3.1.6 Economizador. Con el propósito de aprovechar el potencial térmico que tienen los gases de combustión salientes de la caldera, se implementa un economizador que sirve para precalentar el agua de alimentación, que consiste en vapor condensado del bache anterior (tanto en destilador como en condensador) y reposición proveniente de la red hidrosanitaria y que va a ser evaporada. Esta agua requiere de una bomba para alimentación. Acá se tiene en cuenta el consumo asociado a ella también, estimándolo a partir de que la bomba que se tiene a escala de bioplanta real es de 1,5 kW y tiene una capacidad de 100 L/min; con los datos anteriores se estima el consumo energético correspondiente.

Tabla 15. Diagrama economizador.

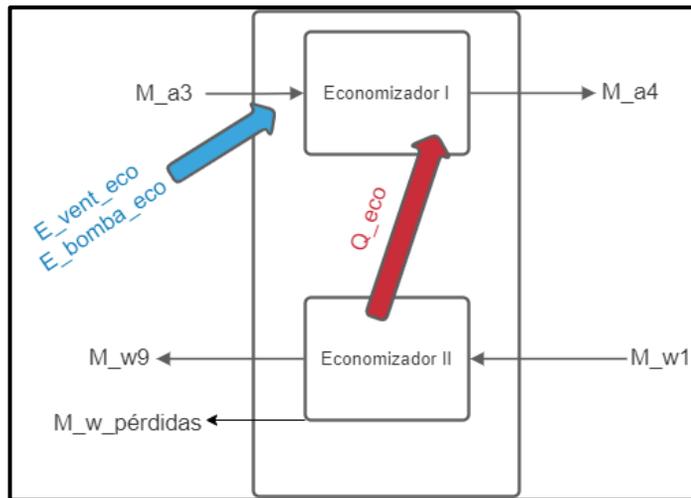


Tabla 16. Entradas al economizador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Gases de combustión de caldera	737	kg	N.A.	N.A.
Agua condensada	87	kg	N.A.	N.A.
Condensados del alambique	3	kg	N.A.	N.A.
Agua de la red (reposición)	26	kg	Water (fresh water)	Agribalyse
Electricidad (bomba)	6735	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent
Electricidad (ventilador)	10327	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

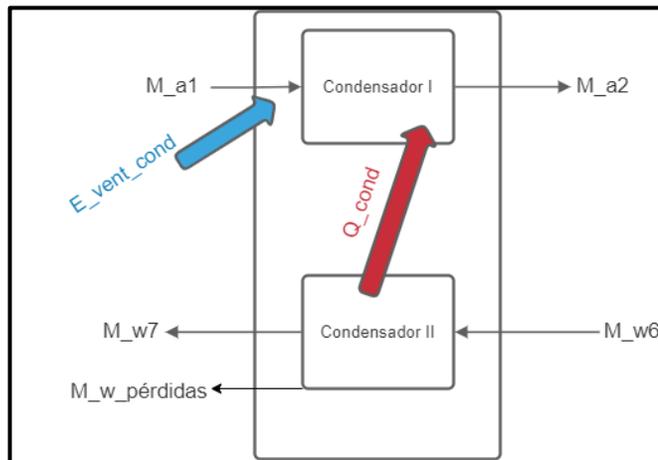
Como en este proceso sólo tiene lugar transferencia de calor, las salidas útiles obtenidas son exactamente las mismas entradas, con la diferencia de que se obtienen gases de combustión más fríos y agua precalentada.

Tabla 17. Salidas del economizador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Gases de combustión para secado	737	kg	N.A.	N.A.
Agua para caldera	116	kg	N.A.	N.A.

4.3.1.8 Condensador. El hidrolato que se generó en la destilación debe ser condensado para poder separar el AE del agua por decantación. Con este fin se utiliza un radiador en el que intervienen el hidrolato y aire ambiente. Las entradas de material al condensador son, simplemente, los dos fluidos intercambian calor.

Figura 10. Esquema de condensador.



El único gasto de energía que implica este proceso es el asociado al ventilador que hace que el aire atraviese el intercambiador. Su valor se estima según fue descrito previamente, teniendo en cuenta que es el mismo ventilador que se usa para los procesos de caldera, economizador y secador.

Tabla 18. Entradas de material al condensador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Hidrolato	90	kg	N.A.	N.A.
Aire ambiente	645	kg	Air	Agribalyse
Electricidad (ventilador)	10327	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

Tras la condensación, ya se pueden discriminar las dos sustancias que contenía el hidrolato y que constituyen las salidas útiles del proceso. De forma adicional, también se incluye el aire precalentado que pasará a la cámara de combustión.

Las cantidades involucradas en este proceso ya fueron definidas previamente, puesto que la demanda de aire está dada por la cantidad requerida para la combustión, en tanto que el hidrolato se definió al analizar el proceso de destilación. No obstante, se estima que en este proceso existen pérdidas del 3% del vapor, que deben ser contabilizadas.

$$M_{w,pérdidas} = \frac{3}{100} * M_{w5} = \frac{3}{100} * 116$$

$$M_{w,pérdidas} = 3 [kg \text{ de pérdidas de vapor}]$$

Tabla 19. Salidas del condensador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Agua condensada	87	kg	N.A.	N.A.
Aceite esencial	1	kg	N.A.	N.A.
Aire precalentado	645	kg	N.A.	N.A.
Vapor de agua (emisión)	3	kg	Water	Agribalyse

4.3.2 Escenario de referencia. Como se mostró en la Tabla 2, en Figuras 4 y 5, el escenario de referencia guarda bastantes similitudes con el sistema del producto asociado a la bioplanta. Por tanto, esta sección se dedica únicamente al desarrollo

del inventario de ciclo de vida de los procesos unitarios que diferencian este sistema del producto, esto es, los procesos de caldera, condensador y torre de enfriamiento.

4.3.2.1 Sistema de generación de vapor (caldera a gas natural). Se consideran: 1) el agua que será evaporada; 2) el aire requerido para la combustión partiendo de la composición típica del gas natural en Colombia⁶¹ y suponiendo un exceso de aire del 10%, común en calderas de gas natural según la literatura⁶², y haciendo el análisis estequiométrico respectivo; y el suministro de calor con origen en una caldera a gas natural proporcional a la unidad funcional, teniendo en cuenta que para la capacidad de bioplanta se tiene dimensionada una capacidad de 10 BHP, para la producción de 156 kilogramos por hora de vapor y un consumo de 11 metros cúbicos por hora de gas natural. De acuerdo con esto, se requieren 0,056 kg de gas natural por cada kg de vapor a generar. Por tanto, según el vapor requerido para la unidad funcional:

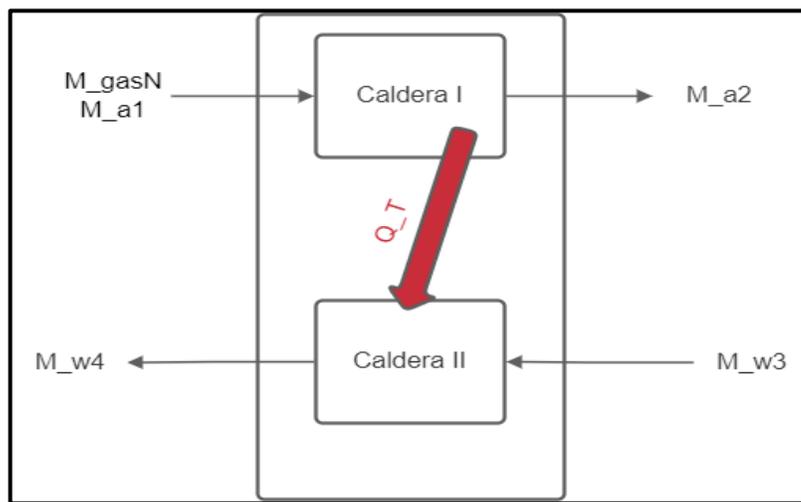
$$M_{gasN} = 0,056 * M_{vapor} = 0,056 * 116$$

$$M_{gasN} = 6 [kg \text{ de gas natural}]$$

⁶¹ VANTI. Distribución del gas natural [página web]. [Consultado el 19 de diciembre de 2022]. Disponible en: [<https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>]

⁶² MARADEY, Juan Francisco. Termodinámica aplicada. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander, 2002.

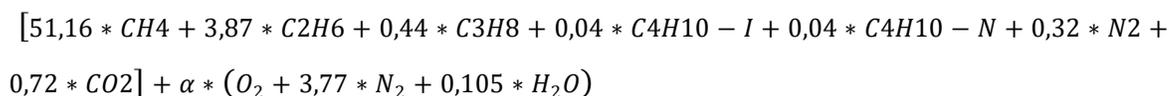
Figura 11. Esquema de caldera a gas natural.



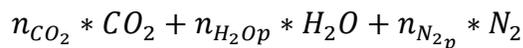
Ahora, con el fin de completar el inventario de entradas y salidas de este proceso, es necesario evaluar la estequiometría de la combustión que tiene lugar en la caldera. Para 1 kg de gas natural en condición estequiométrica:

Con lo anterior, se plantea la estequiometría de la combustión para 1 kg de gas natural en condición estequiométrica:

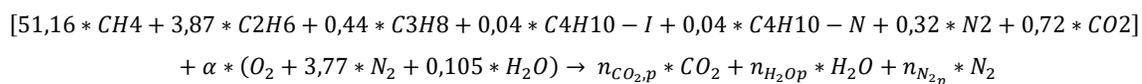
Reactivos:



Productos:



Reacción completa:



Con esto, aplicando el principio de conservación de las especies químicas se obtienen las siguientes ecuaciones:

Carbono:

$$51,16 + 3,87 * 2 + 0,44 * 3 + 0,04 * 4 + 0,04 * 4 + 0,72 = n_{CO_2,p}$$

Hidrógeno:

$$51,16 * 4 + 6 * 0,44 + 8 * 0,44 + 0,04 * 10 + 0,04 * 10 + \alpha * 0,105 * 2 = n_{H_2O,p} * 2$$

Nitrógeno:

$$0,32 * 2 + \alpha * 3,77 * 2 = n_{N_2,p} * 2$$

Oxígeno:

$$0,72 * 2 + \alpha * 2 = 2 * n_{CO_2,p} + n_{H_2O,p}$$

Con lo que se encuentra:

$$\alpha = 118,6$$

$$n_{CO_2,p} = 61,24$$

$$n_{H_2O,p} = 128,5$$

$$n_{N_2,p} = 894,6$$

Ahora bien, suponiendo un exceso de aire del 10% ($\varepsilon = 1,1$), típico de las calderas de gas natural según la literatura, la ecuación química que describe la combustión real es la siguiente:

Reactivos:

$$[51,16 * CH_4 + 3,87 * C_2H_6 + 0,44 * C_3H_8 + 0,04 * C_4H_{10} - I + 0,04 * C_4H_{10} - N + 0,32 * N_2 + 0,72 * CO_2] + \alpha * \varepsilon * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O)$$

Productos:

$$n_{CO_2} * CO_2 + n_{H_2O,p} * H_2O + n_{N_2,p} * N_2 + n_{O_2,p}$$

Reacción completa:

$$[51,16 * CH_4 + 3,87 * C_2H_6 + 0,44 * C_3H_8 + 0,04 * C_4H_{10} - I + 0,04 * C_4H_{10} - N + 0,32 * N_2 + 0,72 * CO_2] + \alpha * \varepsilon * (O_2 + 3,77 * N_2 + 0,105 * H_2O) \rightarrow n_{CO_2,p} * CO_2 + n_{H_2O,p} * H_2O + n_{N_2,p} * N_2 + n_{O_2,p} * O_2$$

Y haciendo nuevamente el balance de las especies químicas se encuentra:

$$n_{CO_2,p} = 61,24$$

$$n_{H_2O,p} = 129,8$$

$$n_{N_2,p} = 492$$

$$n_{O_2,p} = 23,71$$

Haciendo uso de estos resultados, se obtiene la proporción másica aire combustible que requiere la combustión bajo estas condiciones:

$$\begin{aligned} \text{Proporción aire - combustible} &= \alpha * \varepsilon * (2 * 16 + 14 * 2 * 3,77 + 0,105 * 18) \\ &= 18186 \left[\frac{g \text{ de aire}}{kg \text{ de combustible}} \right] = 18,2 \left[\frac{kg \text{ de aire}}{kg \text{ de combustible}} \right] \end{aligned}$$

Para llevar esta relación a los términos de la unidad funcional, se utiliza la masa de combustible antes mencionada:

$$M_{aire} = 18,2 * M_{gasN} = 18,2 * 6$$

$$M_{aire} = M_{a2} = 109 [kg \text{ de aire para combustión}]$$

Las entradas de material identificables según todo lo anterior son las siguientes:

Para la estimación de las salidas, se debe establecer el flujo másico de gases de combustión por unidad de masa de combustible.

$$m_{gases} = m_{CO_2,p} + m_{H_2O} + m_{O_2p} + m_{N_2p}$$

$$\rightarrow m_{gases} = (44 * 61,24) + (129,8 * 18) + (23,71 * 32) + (492 * 28)$$

$$Proporción gases - combustible = 19565,7 [g] = 19,6 [kg]$$

Llevándolo a la base de la unidad funcional:

$$M_{gases} = 19,6 * M_{gasN} = 19,6 * 6$$

$$M_{gases} = M_{a2} = 118 [kg \text{ de gases de combustión}]$$

En este caso, la única fuente de pérdidas de agua es la asociada al condensador, que está estimado en un 3%, de manera que se contabiliza también el agua de reposición requerida.

Tabla 20. Entradas a la caldera a gas natural.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Calor caldera gas natural	441	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (GLO)	Ecoinvent
Aire	109	kg	Air	Agribalyse
Agua para caldera	113	kg	N.A.	N.A.
Agua de la red (reposición)	3	kg	Water (fresh water)	Agribalyse
Electricidad (bomba alimentación)	6735	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

En lo que a emisiones respecta, es necesario resaltar que, en este caso, a diferencia de lo que fue expresado para la bioplanta, la emisión de dióxido de carbono es fósil y no neutra. Por tanto, los valores correspondientes de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso son estimados a partir de los factores de emisión por defecto

propuestos por IPCC para la combustión estacionaria de gas natural⁶³. Allí consta que los factores de emisión en kg de GEI por TJ de calor son 56100 para CO₂, 1 para CH₄ y 0,1 para N₂O, estimando un calor de combustión de 441 MJ, como se detallará en la sección de análisis exergético.

Tabla 21. Salidas de la caldera a gas natural.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Vapor de agua	116	kg	N.A.	N.A.
Gases de combustión inertes húmedos	118	kg	N.A.	N.A.
CO ₂	25	kg	Carbon dioxide, fossil	Agribalyse
CH ₄	0,00044	kg	Methane	Agribalyse
N ₂ O	0,000044	kg	Dinitrogen monoxide	Agribalyse

4.3.2.2 Condensador. Las entradas de material al condensador son, simplemente, los dos fluidos que van a intercambiar calor.

Tabla 22. Entradas al condensador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Hidrolato	90	kg	N.A.	N.A.
Agua de condensación fría	5700	kg	N.A.	N.A.

Tras la condensación, se discriminan las dos sustancias que contenía el hidrolato y que constituyen las salidas del proceso.

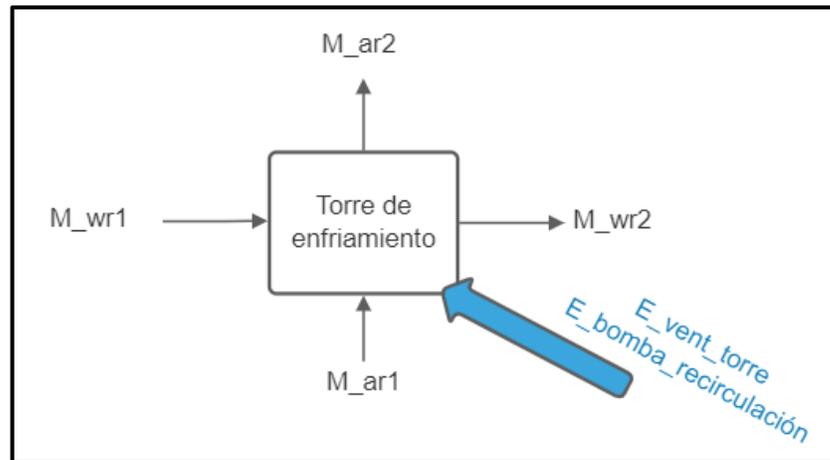
Tabla 23. Salidas del condensador.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Agua condensada	89	kg	N.A.	N.A.
Aceite esencial	1,00	kg	N.A.	N.A.
Agua de condensación caliente	5700	kg	N.A.	N.A.

⁶³ IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 2.

4.3.2.3 Torre de enfriamiento. En este caso, dado que la condensación se hace con agua, es necesario incluir el análisis de la torre de enfriamiento requerida.

Figura 12. Esquema de torre de enfriamiento.



Para este análisis, se debe hacer la respectiva selección de la torre como se ve con mayor detalle en la sección dedicada análisis exergético. Por ahora, considere que se establecen como temperaturas de ingreso y salida del agua 35 °C y 24 °C respectivamente, un caudal de 144 litros por minuto para el diseño en escala de bioplanta, unas condiciones ambientales de 24,0 °C, 65% de humedad relativa y con altitud de 1300 msnm; y que, bajo estas condiciones, se encuentra que se requeriría una torre con un ventilador de 0,75 HP y una bomba de 0,125 kW y se tendría una evaporación máxima de agua de 2,65 kg por minuto; esta evaporación de agua debe reponerse con agua de la red hidrosanitaria. Estos valores se escalan a la base de la unidad funcional.

Tabla 24. Entradas a la torre de enfriamiento.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Agua de condensación caliente	5587	kg	N.A.	N.A.
Electricidad (ventilador torre)	1661	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent

Electricidad (bomba recirculación)	1661	kJ	Electricity, medium voltaje (CO)	Ecoinvent
Aire ambiente	12300	kg	Air	Agribalyse
Agua de la red (reposición)	113	kg	Tap water (GLO)	Ecoinvent

Y como salida se reconoce únicamente el agua a baja temperatura que se usa para condensación.

Tabla 25. Salidas de la torre de enfriamiento.

Nombre del material	Cantidad	Unidad	Plantilla	Base de datos
Agua de condensación fría	5700	kg	N.A.	N.A.
Aire humidificado	12413	kg	N.A.	N.A.

4.4 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA

Tras revisar las metodologías más comúnmente utilizadas para la realización de la etapa de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), se encontraron algunas categorías de impacto que se repiten en la mayoría de los casos de estudio. Sin embargo, para los propósitos particulares de este trabajo, que están ligados a evaluar las eventuales innovaciones o características de eficiencia energética del proceso estudiado, se consideró que es suficiente con dos de estas categorías y con la adición de una más, cuyo fin es abarcar la parte exergética del análisis. Así mismo, de esta forma se limita la incertidumbre introducida en el análisis teniendo en cuenta la información disponible. Las tres categorías seleccionadas, entonces, fueron:

- Cambio climático o calentamiento global (GWP).
- Agotamiento abiótico: recursos fósiles (AD).
- Demanda exergética acumulada (CExD) y destrucción de exergía.

Por otra parte, los métodos de caracterización que se usaron para analizar las dos primeras categorías de impacto coinciden con los recomendados por ILCD: para cambio climático se aplicará el modelo de línea base de 100 años de IPCC y para

agotamiento de recursos fósiles se aprovechará lo establecido en la metodología CML 2002⁶⁴. Mientras tanto, los indicadores de la tercera categoría se determinarán a partir de la teoría relacionada con la segunda ley de la termodinámica.

El inventario de ciclo de vida construido fue trasladado a una herramienta computacional que permitió la obtención de los correspondientes valores de indicadores de categoría de impacto. En este caso se trabajó con el software Open LCA, acoplado a las bases de datos que tiene disponibles en su interior. De esta manera, las etapas de clasificación y caracterización son ejecutadas por el software según los métodos indicados antes; de estas etapas se destaca que los flujos elementales de emisión al ambiente de la parte inerte de los gases de combustión no son llevados a ningún impacto, debido a, evidentemente, su naturaleza inerte.

Los resultados presentados no solamente contemplan una configuración del modelo desarrollado, sino que incluyen también resultados de análisis de sensibilidad que contribuyeron a una etapa de interpretación más completa.

4.5 INTERPRETACIÓN DE CICLO DE VIDA

A través de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se procedió a desarrollar un análisis comparativo entre los valores de las 3 categorías de impacto establecidas correspondientes a los escenarios considerados, de manera que se pudiera definir con claridad cuál de ellos presenta un mejor desempeño ambiental y energético/exergético.

Asimismo, se abarcaron las conclusiones principales que pueden extraerse de los análisis de sensibilidad que fueron realizados.

⁶⁴ JOINT RESEARCH CENTRE. ILCD handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Ispra. JRC, 2011.

4.6 ANÁLISIS EXERGÉTICO

La información que fue recopilada en la etapa de ICV se usó también para la realización del análisis exergético de los diferentes subsistemas de la línea de producción. No obstante, debido a la naturaleza del análisis y a la necesidad de disponibilidad exhaustiva de información, éste se acotó a lo que sucede a nivel de planta, es decir, sin incluir las etapas agrícolas, de transporte del MV y de picado, porque, además, presentan duraciones diferentes y, por tanto, no pueden ser estudiadas en igualdad de condiciones bajo el modelo de flujo en estado estable. En este caso, fue conveniente trabajar con flujos por unidad de tiempo en lugar de valores absolutos, de manera que todas las masas y energías que se establecieron previamente fueron llevadas a flujos, dividiéndolas en el tiempo de destilación (250 minutos) de cada equipo.

De manera similar a lo que se hizo mediante balances másicos para la construcción del ICV, para el análisis exergético se deben realizar balances energéticos de los procesos que permitan conocer las propiedades termodinámicas de todos los flujos que se analizan. La temperatura y presión de las diferentes especies se identifica con las letras T y P respectivamente, acompañada de un subíndice que representa el tipo de material al que se refiere, siendo consistentes con lo que se ha hecho en las demás secciones de este trabajo; adicionalmente, se le añade como complemento al subíndice las palabras *in* o *out* según sea el caso, si es un flujo de ingreso o salida al proceso unitario analizado.

Se parte de las condiciones ambientales medias para el municipio de Barbosa en Santander, teniendo en cuenta el efecto de su altitud de 1300 metros sobre el nivel del mar, para la determinación de la presión atmosférica:

$$P_0 = 101325 \frac{2,718^{(-1,18 \cdot 10^{-4} \cdot 1300)}}{1000} \rightarrow P_0 = 86,92 [Pa]$$

$$T_0 = 20 [^{\circ}C]$$

En tanto, las exergías termomecánicas son calculadas según las expresiones planteadas en la sección 1.5.5, buscando las propiedades termodinámicas de las diferentes sustancias que intervienen en sus respectivas tablas de propiedades, a partir de sus condiciones de temperatura, presión y composición según sea el caso. El resumen de los valores encontrados de esta manera es presentado en la sección de resultados. Así mismo, para la exergía química de los gases de combustión y del MV se utilizan las expresiones de la 1.5.6; específicamente, para el caso de la exergía química del MV se utiliza el método 1 de Qian et al.⁶⁵. También cabe destacar que para las cenizas se consideraron las propiedades de la sílice, teniendo en cuenta que se ha encontrado que este compuesto constituye la mayor parte de las cenizas de origen agrícola⁶⁶ y que para el MV se utilizan valores de calor específico y poder calorífico, que fueron obtenidos experimentalmente en trabajos previos^{67 68}.

4.6.1 Destilación. La presión de este proceso fue medida en operación, donde se vio que es apenas ligeramente superior a la ambiental como se aprecia en la siguiente figura.

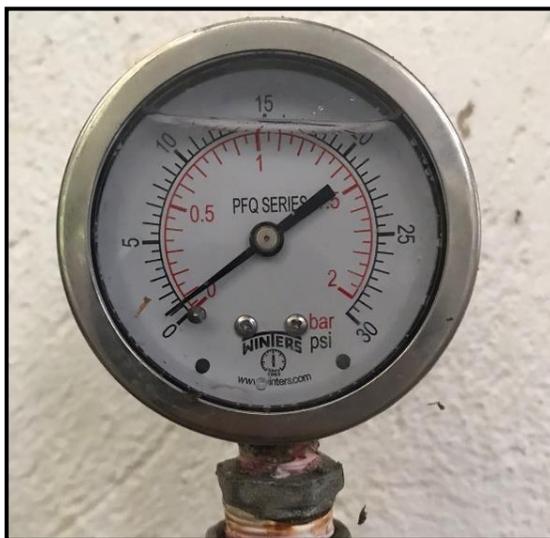
⁶⁵ QIAN, Hongliang *et al.* Prediction models for chemical exergy of biomass on dry basis from ultimate analysis using available electron concept. *Energy*. Nanjing, 2017, vol. 131, p. 251-258.

⁶⁶ GUTIÉRREZ, Cynthia *et al.* Contenido de sílice total en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. *Rev. Ind. Agric Tucumán* [online]. 2018, vol. 95, n.1. ISSN 1851-3018.

⁶⁷ LEÓN, Diego y MANTILLA, Nicolás. Op. Cit.

⁶⁸ MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Op. Cit.

Figura 13. Medición de presión de destilación.

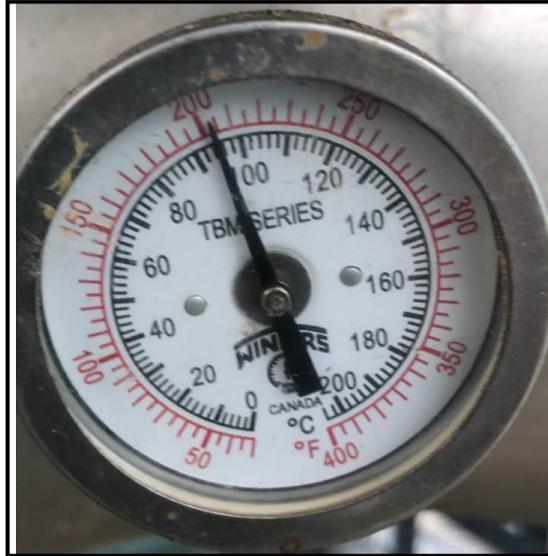


También se midió la temperatura del vapor e hidrolato a la entrada y salida del alambique, respectivamente:

Figura 14. Medición de temperatura a la entrada del destilador.



Figura 15. Medición de temperatura a la salida del destilador.



Por un lado, el MV ingresa en condiciones ambiente:

$$P_{veg,in,destilador} = 86,92 \text{ [kPa]}$$

$$T_{veg,in,destilador} = 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Y las condiciones en que es extraído fueron medidas en planta. Además, se considera que la mezcla de MV, humedad y condensados se encuentra en equilibrio térmico y, por ende, está toda a la misma temperatura, de manera que:

$$P_{veg,out,destilador} = P_{humedad,out,destilador} = P_{condensados,out,destilador} = 93,81 \text{ [kPa]}$$

$$T_{veg,out,destilador} = T_{humedad,out,destilador} = T_{condensados,out,destilador} = 60 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

De manera similar, las mediciones realizadas para el vapor de agua de ingreso y el hidrolato de salida:

$$P_{vapor,in,destilador} = 93,81 \text{ [kPa]}$$

$$T_{vapor,in,destilador} = 98 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$P_{hidrolato,out,destilador} = 86,92 \text{ [kPa]}$$

$$T_{hidrolato,out,destilador} = 96 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Estas mediciones muestran que, tanto a la entrada como a la salida, el vapor se encuentra en estado saturado, puesto que el sobrecalentamiento es prácticamente nulo (la temperatura de saturación a la presión de destilación y a la presión ambiente son 97,86 °C y 95,76 °C).

4.6.2. Sistema de picado. Para el sistema de picado, las condiciones del MV a la entrada y a la salida, se consideran iguales a las del ambiente:

$$P_{veg,in,picado} = P_{veg,out,picado} = 86,92 \text{ [kPa]}$$

$$T_{veg,in,picado} = T_{veg,out,picado} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

El consumo energético asociado a esta etapa se calcula teniendo en cuenta que se midió en planta una capacidad de 700 kg/h de procesamiento para la especie *lippia origanoides* y una potencia nominal de la picadora de 2,2 kW. A continuación, se presentan las placas de modelo del equipo de picado y de su motor.

Figura 16. Placa de modelo picadora.



Figura 17. Placa de motor picadora.



Esta información se lleva a un consumo energético correspondiente a la unidad funcional:

$$E_{picado} = Pot_{picado} * t_{picado} = Potencia_{picado} * \frac{M_{veg} + M_{w1}}{Capacidad_{picado}} = 2,2 * \frac{91 + 14}{\frac{700}{3600}}$$

$$E_{picado} = 1188 [kJ \text{ de energía eléctrica}]$$

4.6.3 Cámara de combustión. En la cámara de combustión se debe analizar el comportamiento del material vegetal que ingresa como combustible, el aire comburente, las cenizas generadas, los gases de combustión, el agua de alimentación y el vapor generado. En general, el análisis de las presiones de los flujos másicos que intervienen es trivial, dado que, exceptuando el caso del vapor generado, que ya se vio en la sección anterior que se tiene una presión ligeramente superior a la ambiental, la presión para los demás flujos es la atmosférica, es decir, 86,92 kPa. De acuerdo con esto, seguidamente sólo se estudiarán las temperaturas correspondientes a los flujos.

En primer lugar, se consideran las temperaturas de los flujos de entrada: el agua de alimentación y el aire comburente están en una condición de precalentamiento gracias a su paso por el economizador y el condensador, respectivamente; la

justificación de esas temperaturas será detallada cuando se consideren los balances energéticos de esos dos procesos de intercambio de calor. Mientras tanto, el MV proviene del secador y su temperatura de salida coincide con lo que se puede predecir con el modelo térmico de referencia⁶⁹.

$$T_{veg,in,combustión} = 60 [^{\circ}C]$$

$$T_{aire,in,combustión} = 173,7 [^{\circ}C]$$

$$T_{agua,in,combustión} = 76,1 [^{\circ}C]$$

En cuanto a las salidas, se midió la temperatura de salida de los gases y se consideró que la ceniza de desecho tendría esta misma temperatura por simplicidad. Las condiciones de vapor ya se vieron en la sección anterior a la entrada del destilador.

$$T_{ceniza,out,combustión} = 228 [^{\circ}C]$$

$$T_{gases,out,combustión} = 228 [^{\circ}C]$$

Adicionalmente, se incluye la energía requerida por el ventilador que, según ha sido expresado previamente, se repartió en partes iguales con el economizador, la cámara de combustión y el condensador. Para esto, se utiliza el tiempo de operación del ventilador, que coincide con el tiempo de destilación, la potencia nominal del ventilador que es de 9,2 kW y se lleva a la proporción correspondiente a la unidad funcional.

⁶⁹ LEÓN, Diego y MANTILLA, Nicolás. Op. Cit.

Figura 18. Placa de motor ventilador.



$$E_{vent,secador} = Potencia_{ventilador} * \frac{t_{destilación}}{4} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right)$$

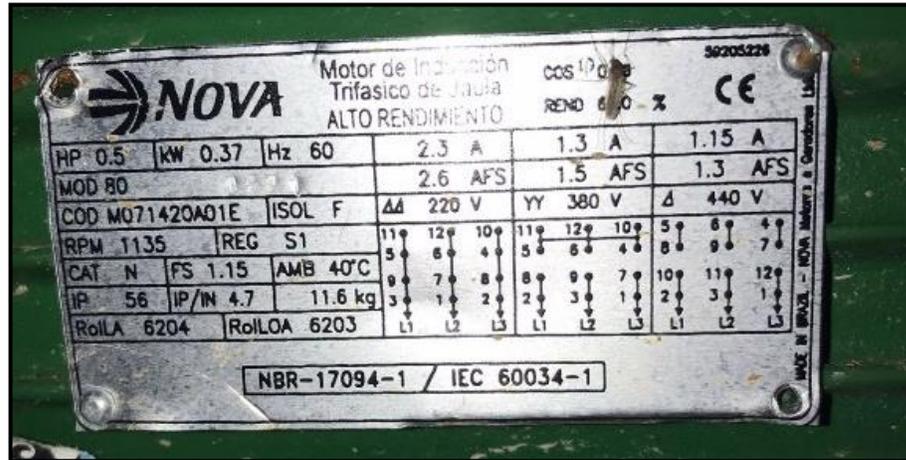
$$E_{vent,secador} = 9,2 * \frac{250 * 60}{4} * \left(\frac{91}{304} \right)$$

$$E_{vent,secador} = E_{vent,economizador} = 10327 [kJ\ de\ energía\ eléctrica]$$

$$E_{vent,combustión} = E_{vent,condensador} = 10327 [kJ\ de\ energía\ eléctrica]$$

Finalmente, se sigue una lógica similar para estimar el consumo energético del alimentador de combustible, utilizando su respectiva potencia nominal de 0,37 kW:

Figura 19. Placa de motor alimentador de combustible.



$$E_{alimentador,comb} = Potencia_{alimentador,comb} * t_{destilación} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right)$$

$$E_{alimentador,comb} = 0,37 * 250 * 60 * \left(\frac{91}{304} \right)$$

$$E_{alimentador,comb} = 1661 [kJ\ de\ energía\ eléctrica]$$

4.6.4 Economizador. Al economizador ingresa agua de alimentación para la caldera que pretende ser precalentada y gases de combustión que deben ser enfriados para que estén en una condición de temperatura tal que en el secador no se corra el riesgo de autoignición del MV. Esta temperatura se definió en los 180 °C, adoptando una perspectiva conservadora teniendo en cuenta que se estimó en pruebas en mufla sobre los 240°C. La presión de operación de este equipo se considera ambiente.

De acuerdo con lo anterior, la primera ley de la termodinámica para este intercambiador de calor, considerando una eficiencia del 75%:

$$Q_{eco} = 0,75 * \dot{m}_{gases} * Cp_{gases} * (T_{gases,in,eco} - T_{gases,out,eco})$$

$$Q_{eco} = \dot{m}_{agua} * Cp_{agua} * (T_{agua,out,eco} - T_{agua,in,eco})$$

A partir de los balances másicos planteados se tiene:

$$\dot{m}_{gases} = 0,049 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{agua} = 0,0077 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Los calores específicos, estimados a las condiciones promedio de ambos flujos y considerando que los gases de combustión se comportan como aire (suposición que no está muy lejos de ser cierta dado el alto contenido de aire en estos):

$$Cp_{gases} = 1,026 \left[\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right]$$

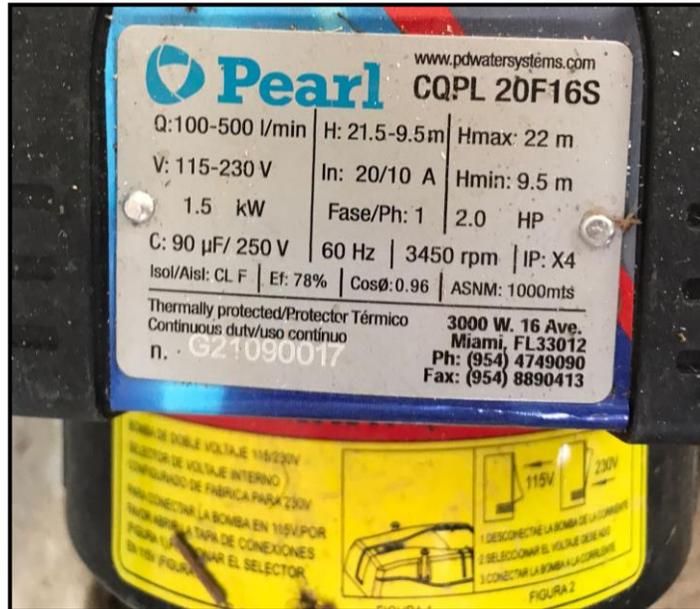
$$Cp_{agua} = 4,183 \left[\frac{kJ}{kg * ^\circ C} \right]$$

Con lo cual se obtiene:

$$T_{w,out,eco} = 76,1 [^\circ C]$$

Como entrada energética, por otra parte, se considera la bomba centrífuga necesaria para la alimentación del agua al economizador. La placa de ésta se muestra ahora.

Figura 20. Placa de bomba de alimentación.



El consumo energético asociado a la bomba se estima teniendo en cuenta su potencia nominal, un tiempo de operación igual al de destilación y se escala a la unidad funcional:

$$E_{bomba} = Potencia_{bomba} * t_{destilación} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right)$$

$$E_{bomba} = 6735 \text{ [kJ de energía eléctrica]}$$

4.6.5 Secador. La presión de operación de este equipo se considera ambiente. El comportamiento de las salidas del secador se estima en su totalidad con el modelo térmico desarrollado previamente que ha sido referenciado a lo largo de este trabajo. Las condiciones de entrada del MV fueron exploradas ya al evaluar el destilador y las de los gases se mostraron al analizar el economizador. A partir del modelo térmico, por tanto, bajo las condiciones de operación esperadas, se encuentra:

$$T_{veg,out,secado} = 60 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{gases,out,secado} = 65 [^{\circ}C]$$

Mientras tanto, para estimar el consumo energético del motor que hace rotar el tambor del secador, se utiliza su respectiva potencia nominal de 1,12 kW:

Figura 21. Placa de motor secador.



$$E_{motor,secador} = Potencia_{motor,secador} * t_{destilación} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right)$$

$$E_{motor,secador} = 1,12 * 250 * 60 * \left(\frac{91}{304} \right)$$

$$E_{motor,secador} = 5029 [kJ\ de\ energía\ eléctrica]$$

4.6.6 Condensador. Para el análisis del condensador se utilizó un enfoque similar al que se propuso para el economizador. En este caso, se parte de que el aire utilizado para la condensación ingresa a temperatura y presión ambiente, mientras que el hidrolato ingresa en las condiciones de temperatura, presión y calidad en que salió del destilador. Esto es:

$$P_{aire,in,condensador} = 86,92 [kPa]$$

$$T_{aire,in,condensador} = 20 [^{\circ}C]$$

$$P_{hidrolato,in,condensador} = 93,81 [kPa]$$

$$T_{hidrolato,in,condensador} = 98 [^{\circ}C]$$

$$Calidad: X_{hidrolato,in,condensador} = 1 \text{ (vapor saturado)}$$

Por otro lado, según mediciones realizadas en planta, las condiciones de salida del hidrolato en fase líquida fueron:

$$P_{hidrolato,out,condensador} = 86,92 [kPa]$$

$$Calidad: X_{hidrolato,out,condensador} = 0 \text{ (líquido saturado)}$$

Si se aplica la primera ley al proceso que tiene lugar en este equipo con una eficiencia del 50% en la transferencia de calor (eficiencias superiores se traducirían en procesos imposibles desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica con las condiciones dadas):

$$Q_{condensador} = 0,5 * \dot{m}_{aire} * (h_{aire,out,condensador} - h_{aire,in,condensador})$$

$$Q_{condensador} = \dot{m}_{hidrolato} * q_{latente}$$

A partir de los balances máxicos planteados se tiene:

$$\dot{m}_{aire} = 0,043 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{hidrolato} = 0,0060 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

El calor de vaporización del hidrolato en esta condición:

$$q_{latente} = 2268 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Con lo cual se obtiene:

$$T_{aire,out,condensador} = 173,7 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

4.6.6 Torre de enfriamiento. En el caso del escenario de referencia el proceso de condensación se hace gracias a una torre de enfriamiento. En esta sección se dimensiona la torre que se requeriría para las condiciones de capacidad de un alambique de 2 m³, que es equivalente a un suministro de hidrolato de 1,2 L/min ($\dot{m}_{hidrolato} = 0,02 \text{ [kg/s]}$). En este caso:

$$Q_{cond} = \dot{m}_{agua,torre} * C_{p_w} * (T_{agua,in,torre} - T_{agua,out,torre})$$

$$Q_{eco} = \dot{m}_{hidrolato} * q_{latente}$$

Se suponen las propiedades y temperaturas de selección del agua recirculada en la torre:

$$C_{p_w} = 4,18 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} \right]$$

$$T_{agua,in,torre} = 35 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{agua,out,torre} = 24 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Con lo cual se estima, considerando una eficiencia del 15%:

$$\dot{m}_{agua,torre} = 1,16 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \text{ (a escala Biofábrica)}$$

Con los valores anteriores se selecciona la torre de enfriamiento que se requeriría:

Figura 22. Selección de torre de enfriamiento.

Parámetros de Diseño		Condiciones de Operación	
Temperatura entrada del agua (°F):	95.00	Temperatura entrada del agua (°F):	93.00
Temperatura salida del agua (°F):	75.20	Temperatura salida del agua (°F):	73.20
Caudal de Agua (gpm):	20.0	Caudal de agua Máxima (gpm):	23.9
Rango (°F):	19.80	Eficiencia Térmica:	119.5%
Approach (°F):	11.42	Rango (°F):	19.80
Capacidad (Btu/h):	198,158	Approach (°F):	9.42
Delta de presión (psig):	0.10	Evaporación Máxima (gpm):	0.4
Diámetro de la boquilla:	3/4"		
Condiciones Ambientales		Ventilador	
Altura sobre el nivel del mar (ft):	4,265	Caudal de aire corregido (cfm):	4,584
Temperatura de Bulbo Seco (°F):	78.78	Presión estática (in WG):	0.244
Temperatura de Bulbo Húmedo (°F):	63.78	Temperatura del aire (°F):	78.02
Volumen específico del aire (ft³/lb):	16.1637	Potencia del motor (hp):	0.50

Fuente: GLACIAR Ingeniería S.A.S⁷⁰.

De esta selección se pueden extraer la masa de aire, el consumo energético y la demanda de reposición de agua llevados a la escala de la unidad funcional planteada:

$$\dot{m}_{aire,torre} = \dot{V}_{aire,torre} * \rho_{aire} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biofábrica}} \right)$$

$$m_{aire,torre} = 0,82 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

⁷⁰ GLACIAR. GLACIAR Ingeniería S.A.S. - Cooling Towers / Torres de Enfriamiento. Glaciar Ingeniería | Sistemas de enfriamiento evaporativo [página web]. [Consultado el 3, enero, 2023]. Disponible en: [https://glaciaringenieria.com.co/selecciontorres/glaciar_clientes.htm].

$$\dot{m}_{agua,torre} = \dot{V}_{agua,torre} * \rho_{agua} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biof\acute{a}brica}} \right)$$

$$m_{agua,torre} = 0,38 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{agua,reposici\acute{o}n} = \dot{m}_{agua,reposici\acute{o}n} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biof\acute{a}brica}} \right)$$

$$\dot{m}_{agua,reposici\acute{o}n} = 0,0075 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$E_{vent,torre} = Potencia_{vent,torre} * t_{destilaci\acute{o}n} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biof\acute{a}brica}} \right)$$

$$E_{vent,torre} = 1661 [kJ\ de\ energ\u00eda\ el\u00e9ctrica]$$

Adicionalmente, se requerir\u00eda del uso de una bomba para recirculaci\u00f3n del agua, que se estima tendr\u00eda una potencia nominal de 0,5 HP para la escala de Biof\u00e1brica. A continuaci\u00f3n se estima el consumo energ\u00e9tico respectivo sobre la base de la unidad funcional:

$$E_{bomba,torre} = Potencia_{bomba,torre} * t_{destilaci\acute{o}n} * \left(\frac{M_{veg,unidad\ funcional}}{M_{veg,Biof\acute{a}brica}} \right)$$

$$E_{bomba,torre} = 1661 [kJ\ de\ energ\u00eda\ el\u00e9ctrica]$$

4.6.7 Caldera a gas natural

Se parte de la información de la caldera a gas natural que se tiene como respaldo y con una capacidad para procesamiento de destilaciones de 2 m³ de MV. La placa de esta caldera se muestra ahora.

Figura 23. Placa caldera a gas natural.



De acuerdo con esta placa, se infiere que la capacidad calorífica requerida en escala Biofábrica es 10 BHP. Esta capacidad debe ser llevada a la escala de la unidad funcional:

$$Q_{caldera} = \dot{Q}_{caldera, Biofábrica} * t_{destilación} * \left(\frac{M_{veg, unidad funcional}}{M_{veg, Biofábrica}} \right) =$$

$$Q_{caldera} = 441 [MJ]$$

4.7 ANÁLISIS TERMEOECONÓMICO

Para el análisis termoeconómico se parte del análisis de costos de producción del MV, para con este valor calcular los costos asociados a los productos de cada proceso en planta. Para ello, considere el siguiente resumen de costos, que fue establecido con las cantidades y precios medidos durante los cultivos experimentales.

Tabla 26. Resumen costos de producción del MV.

COSTOS DE PRODUCCIÓN CON UN RENDIMIENTO MEDIO DE 5 TON/ha DE MV						
Actividad	# por año	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario [\$ COP]	Valor total [\$ COP]
Siembra	1	Análisis de suelos		1	80000	80000
	1	Desmote con guadaña (incluye máquina)	Jornal	7	50000	350000
	1	Preparación mecanizada del terreno (tractor de arado)	Horas	8	70000	560000
		Cal	Bulto x 50 kg	31	20500	635500
	1	Aplicación de cal	Jornales	3	30000	90000
		Semilla	Plántulas	28570	100	2857000
	1	Transporte semilla	Flete	1	150000	150000
	1	Transporte insumos	Flete	1	150000	150000
	1	Siembra	Jornales	20	30000	600000
	5	Riego plántulas	Jornales	5	30000	150000
	1	Plántulas para resiembra	Plántulas	2000	100	200000
	1	Resiembra	Jornales	3	30000	90000
Prácticas Culturales	4	Control manual de malezas	Jornales	45	30000	1350000
	3	Fertilización	Jornales	15	30000	450000
	2	Abono orgánico	kg	11428	150	1714200
	1	Fertilizante químico compuesto	kg	286	1400	399980
Cosecha	3	Corte del material	Jornales	20	30000	600000
	3	Pesaje y cargue material	Jornales	9	30000	270000
	3	Transporte material	Flete	3	150000	450000
	12	Visitas técnicas	Unidad	12	25000	300000
TOTAL						11446680

Con lo cual se encuentra un costo total de \$11.446.680 COP. Con esto, se estima el costo total para producción por kilogramo de MV seco:

$$C_{producción\ MV} = 2693 \left[\frac{\$ COP}{kg\ MV\ seco} \right]$$

Y, por tanto, con el poder calorífico, el costo total por kJ de energía, que se usó para estimar los costos de pérdidas por exergía en el escenario de bioplanta, teniendo

en cuenta que, para éste, el orégano como combustible es la fuente de energía primaria:

$$C_{energía\ calorífica\ MV} = 0,17 \left[\frac{\$ COP}{kJ\ calor\ de\ MV} \right]$$

Estos valores hacen referencia al MV puesto cosechado y puesto en bioplanta; por tanto, con este valor como base, también se procede a calcular los costos asociados a la obtención de cada uno de los flujos intermedios que intervienen en la línea de producción y, finalmente, del AE, que es el producto final.

De forma similar, es necesario establecer el costo por energía calorífica asociado al gas natural, puesto que ésta es establecida como la fuente de energía primaria para el escenario de referencia. Para ello, se recurre a datos históricos de tarifas a nivel industrial del metro cúbico de gas natural en Colombia⁷¹.

$$C_{energía\ calorífica\ gas\ natural} = 6200 \left[\frac{\$ COP}{m^3\ calor\ de\ gas\ natural} \right]$$

$$C_{energía\ calorífica\ gas\ natural} = 0,14 \left[\frac{\$ COP}{kJ\ calor\ de\ gas\ natural} \right]$$

⁷¹ EPM. Tarifas Para Servicios De Gas - EPM. (Hogares - Tarifa Gas Natural). Datos Abiertos Colombia | Datos Abiertos Colombia [página web]. (12, enero, 2017). [Consultado el 17, enero, 2023]. Disponible en: [<https://www.datos.gov.co/Funci-n-p-blica/Tarifas-Para-Servicios-De-Gas-EPM-Hogares-Tarifa-G/ekup-y869>].

También, dado que hay procesos que se sirven de energía eléctrica, se debe contemplar su costo. Éste se estima con el valor medio para el sector industrial en el año 2022⁷²:

$$C_{electricidad} = 0,17 \left[\frac{\$ COP}{kJ \text{ energía eléctrica}} \right]$$

Se destaca que el análisis se realizó para una vida útil de 20 años de la planta, con una operación de 3 batches de 250 minutos al día y un total de 300 días laborados al año y sobre la base de la unidad funcional considerada a lo largo de todo el trabajo, es decir, para la producción de 1 kg de AE.

Se procedió aplicando las expresiones presentadas en la sección 1.7 para todos los equipos analizados como se muestra ahora. Los subíndices usados en las ecuaciones coinciden con los correspondientes a las figuras esquemáticas de ambos sistemas del producto que fueron expuestas en la sección 4.2. Particularmente, se supone que los costos por unidad de masa de los productos de cada proceso son iguales para todas las salidas de ese proceso, y se denominan $C_{u,productos}$ en cada caso. Adicionalmente, se considera que los costos de productos del condensador se concentran totalmente en el hidrolato producido, dado que allí se encuentra el foco del interés económico. Las expresiones de balance de costos para ambos sistemas del producto en estudio se exponen en las secciones siguientes.

4.7.1 Bioplanta

⁷² SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS. Boletín tarifario. [página web]. (12, enero, 2017). [Consultado el 17, enero, 2023]. Disponible en: [[Boletín Tarifario Energía Trimestre 1 2022 VF.pdf \(superservicios.gov.co\)](#)]

- *Destilador.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{veg1} + \dot{C}_{w1} + \dot{C}_{w5} + \dot{Z}_{destilador} + \dot{C}_{pérdidas,destilador} \\ = c_{u,productos,destilador} * (\dot{m}_{veg2} + \dot{m}_{w2} + \dot{m}_{w6}) \end{aligned}$$

- *Cámara de combustión.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{veg3} + \dot{C}_{w3} + \dot{C}_{w10} + \dot{C}_{a2} + \dot{C}_{electricidad} + \dot{Z}_{caldera MV} - \dot{C}_{pérdidas,caldera MV} \\ = c_{u,productos,cámara} * (\dot{m}_{ceniza} + \dot{m}_{w6} + \dot{m}_{a3}) \end{aligned}$$

- *Economizador.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{w9} + \dot{C}_{a3} + \dot{C}_{electricidad} + \dot{Z}_{economizador} + \dot{C}_{pérdidas,economizador} \\ = c_{u,productos,economizador} * (\dot{m}_{w10} + \dot{m}_{a4}) \end{aligned}$$

- *Secador.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{veg2} + \dot{C}_{w2} + \dot{C}_{electricidad} + \dot{Z}_{secador} + \dot{C}_{pérdidas,secador} \\ = c_{u,productos,secador} * (\dot{m}_{w10} + \dot{m}_{a4}) \end{aligned}$$

- *Condensador.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{w6} + \dot{C}_{a1} + \dot{C}_{electricidad} + \dot{Z}_{condensador} + \dot{C}_{pérdidas,condensador} \\ = c_{u,productos,condensador} * (\dot{m}_{w7}) \end{aligned}$$

Por otro lado, para completar los valores de \dot{Z} se requieren los costos de inversión inicial y de operación y mantenimiento, que se obtuvieron de información previa general del proyecto y son resumidos seguidamente.

Tabla 27. Resumen costos equipos para bioplanta.

EQUIPO	COSTO INICIAL [\$]	COSTO OPERACIÓN Y MTO ANUAL [\$/AÑO]
Cámara de combustión	68887000	1500000

Secador	25555250	1200000
Alambique (destilador)	51646000	600000
Condensador	37364000	400000
Economizador	14000000	900000
Ventilador	24276000	2000000

4.7.2 Escenario de referencia

Para el escenario de referencia los balances son equivalentes para los subsistemas antes mostrados, con la diferencia de subíndices a que haya lugar según los diagramas de la sección 4.2. Mientras tanto, los subsistemas especiales de este caso son:

- *Torre de enfriamiento.*

$$\dot{C}_{wr1} + \dot{C}_{ar1} + \dot{Z}_{torre} + \dot{C}_{pérdidas,torre} = c_{u,productos,torre} * (\dot{m}_{wr1} + \dot{m}_{ar2})$$

- *Caldera a gas natural.*

$$\begin{aligned} \dot{C}_{a1} + \dot{C}_{gasN} + \dot{C}_{w3} + \dot{Z}_{caldera\ gas} + \dot{C}_{pérdidas,caldera\ gas} \\ = c_{u,productos,caldera} * (\dot{m}_{w5} + \dot{m}_{veg2} + \dot{m}_{w2}) \end{aligned}$$

Y de manera análoga a lo que se vio para la bioplantita, los costos de inversión inicial y de operación y mantenimiento se resumen seguidamente.

Tabla 28. Resumen costos de equipos para escenario de referencia.

EQUIPO	COSTO INICIAL [\$]	COSTO OPERACIÓN Y MTTTO ANUAL [\$/AÑO]
Caldera gas	45000000	1500000

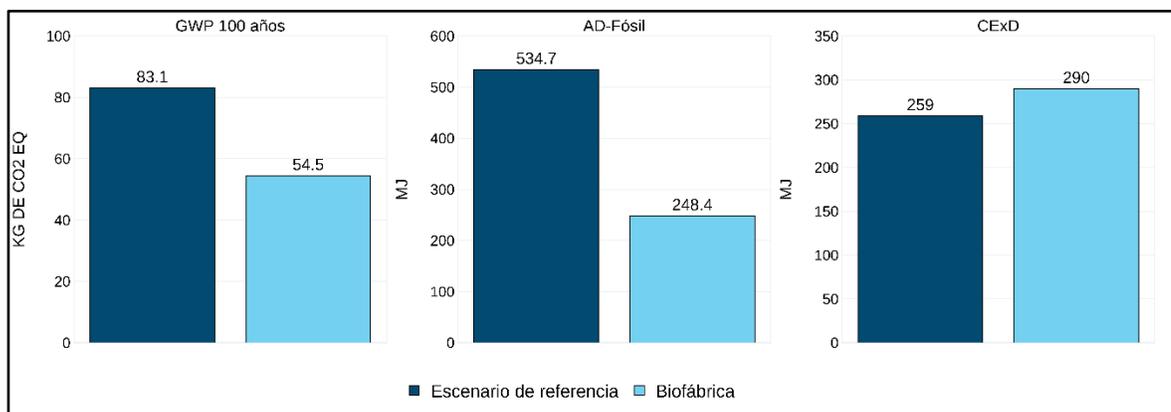
Alambique (destilador)	51646000	600000
Condensador	3500000	100000
Torre de enfriamiento	22000000	600000

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA

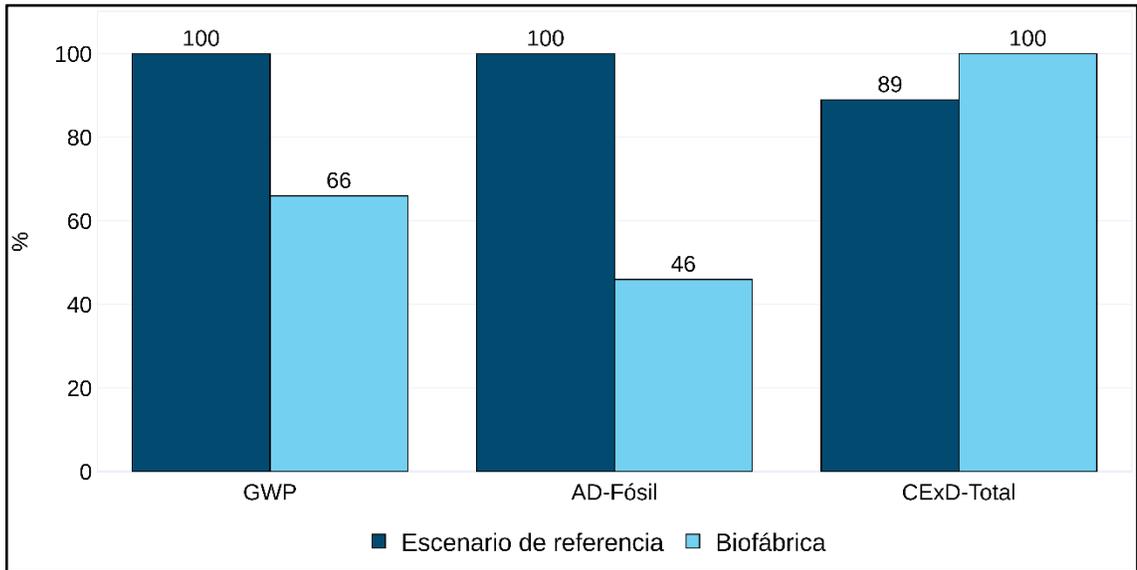
De acuerdo con las categorías de impacto que fueron establecidas como parte del análisis, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para las categorías de Calentamiento Global (GWP), agotamiento abiótico fósil (AD-fósil) y demanda exergética acumulada.

Figura 24. Resultados comparativos para las categorías GWP, AD-fósil y CExD.



También se muestran en forma de comparación porcentual.

Figura 25. Comparación porcentual para las categorías GWP, AD-fósil y CExD.



Estos resultados muestran que existe una reducción significativa en las categorías de impacto consideradas al comparar el sistema de producto de la Biofábrica contra la línea convencional de producción de AE. Específicamente, para la categoría de cambio climático la Biofábrica muestra un impacto un 34% menor que el del escenario de referencia; diferencia que se acentúa en la categoría de agotamiento de recursos fósiles con una disminución del 54%.

Algunas razones claras que justifican lo anterior, se hallan en el hecho de que, por un lado, además de que se aprovecha el potencial combustible de un recurso renovable como es la biomasa (el MV) en lugar de una fuente fósil como el gas natural, los cálculos realizados mostraron que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se tienen por la combustión del primero son considerablemente menores que las que se tienen cuando se quema el segundo.

Estas diferencias demuestran que se obtienen beneficios representativos en cuanto a desempeño ambiental con el aprovechamiento del potencial combustible del MV

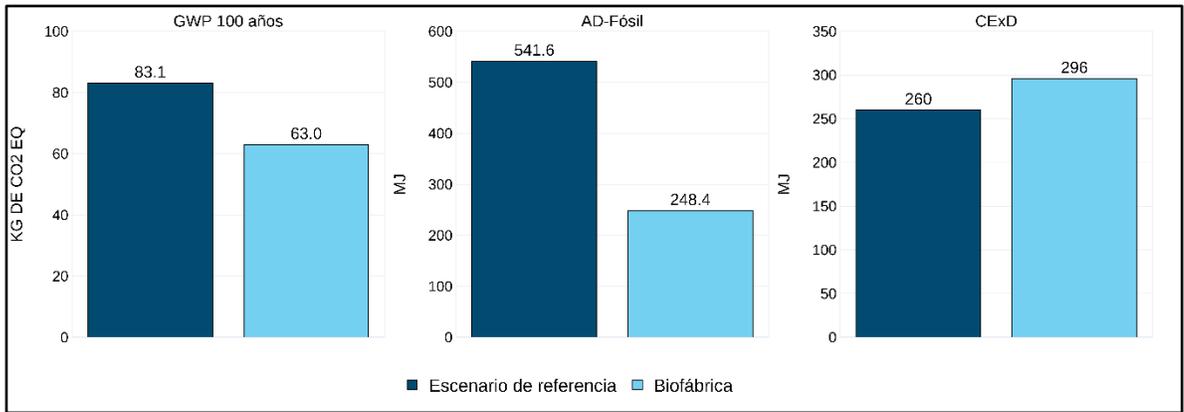
y del potencial térmico de los gases de combustión, a pesar de que ello implique la utilización de una mayor cantidad de energía eléctrica.

Por otra parte, en la categoría de demanda exergética acumulada se observa que se tiene un valor ligeramente superior para la Biofábrica. No obstante, al examinar con detalle el modelo desarrollado, se encontró que la razón principal para este resultado se encuentra en la mayor demanda de energía eléctrica que se tiene en el escenario de Biofábrica, por estar constituido por una mayor cantidad de equipos. De hecho, si se estudian las diferentes ramificaciones de la CExD, se encuentra que la Biofábrica presenta menor demanda exergética de todos los orígenes, excepto de la de origen potencial que, a su vez, se concentra específicamente en potencial hídrica, la cual constituye la principal fuente de generación eléctrica en la matriz colombiana. Además, los resultados desde la perspectiva del ACV en términos exergéticos pueden resultar incompletos, puesto que no contemplan las pérdidas de exergía que tienen lugar en los procesos internos del ciclo de vida. Por esta razón, para tener un panorama completo en lo que a destrucción exergética respecta, se realizó el análisis exergético, cuyos resultados serán mostrados y analizados en la sección siguiente.

Ahora, con el fin de estudiar la sensibilidad de estos resultados frente algunas decisiones metodológicas que fueron asumidas, a continuación, se muestran algunos resultados alternativos que se exploraron.

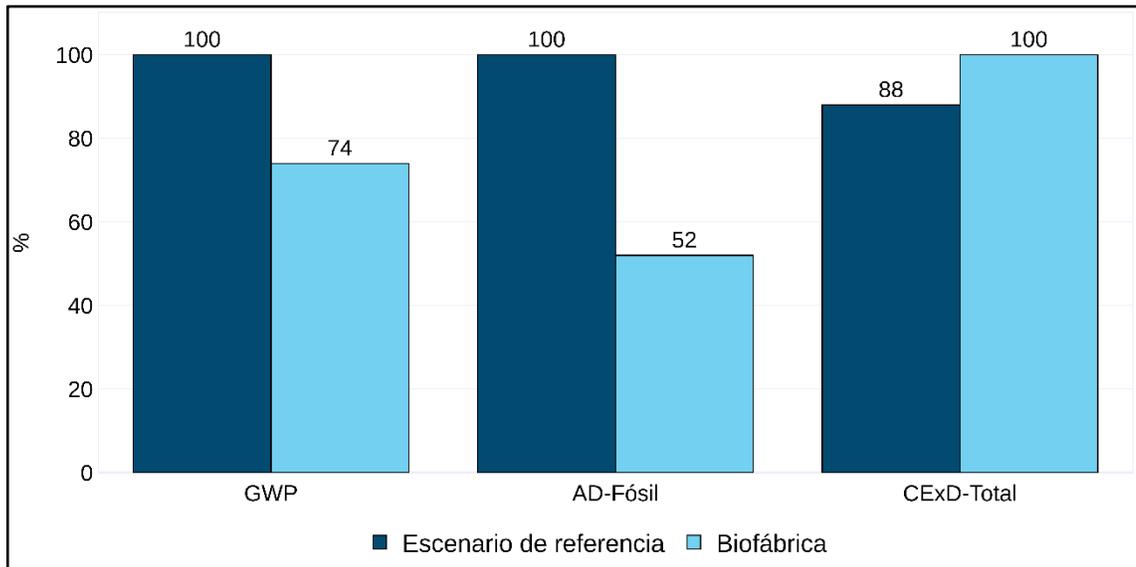
Primero, teniendo en cuenta que se utilizó una plantilla de Ecoinvent para el consumo de energía eléctrica correspondiente a la torta energética colombiana, resulta interesante contemplar el caso en que se efectúe el mismo análisis, pero con una plantilla asociada a la torta energética global. Este caso se construye sustituyendo la plantilla utilizada en todos los procesos unitarios en que hay consumo de energía eléctrica por: *Electricity, medium voltaje (GLO)*. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Figura 26. Resultados comparativos para las categorías GWP, AD-fósil y CExD con *Electricity medium voltaje (GLO)*.



Y en forma porcentual.

Figura 27. Comparación porcentual para las categorías GWP, AD-fósil y CExD con *Electricity medium voltaje (GLO)*.



Estos resultados muestran una disminución en la brecha que existe entre Biofábrica y el escenario de referencia en términos de desempeño ambiental, puesto que en este caso el impacto potencial en las categorías de GWP y AD sólo se reduce un 26% y un 48%, respectivamente. Esto tiene que ver, muy probablemente, con el

hecho de que Colombia se caracteriza por tener una matriz de generación eléctrica bastante limpia en comparación con la mayor parte del mundo, con una contribución aproximada del 68% de fuentes renovables a la capacidad instalada⁷³; por esto, es esperable que el modelamiento con una plantilla representativa a nivel mundial, que implica mayor contribución de fuentes fósiles en la generación eléctrica, en conjunto con el hecho de que el sistema de Biofábrica consume una mayor cantidad de energía eléctrica, se traduzca en una reducción en su ventaja sobre el escenario de referencia.

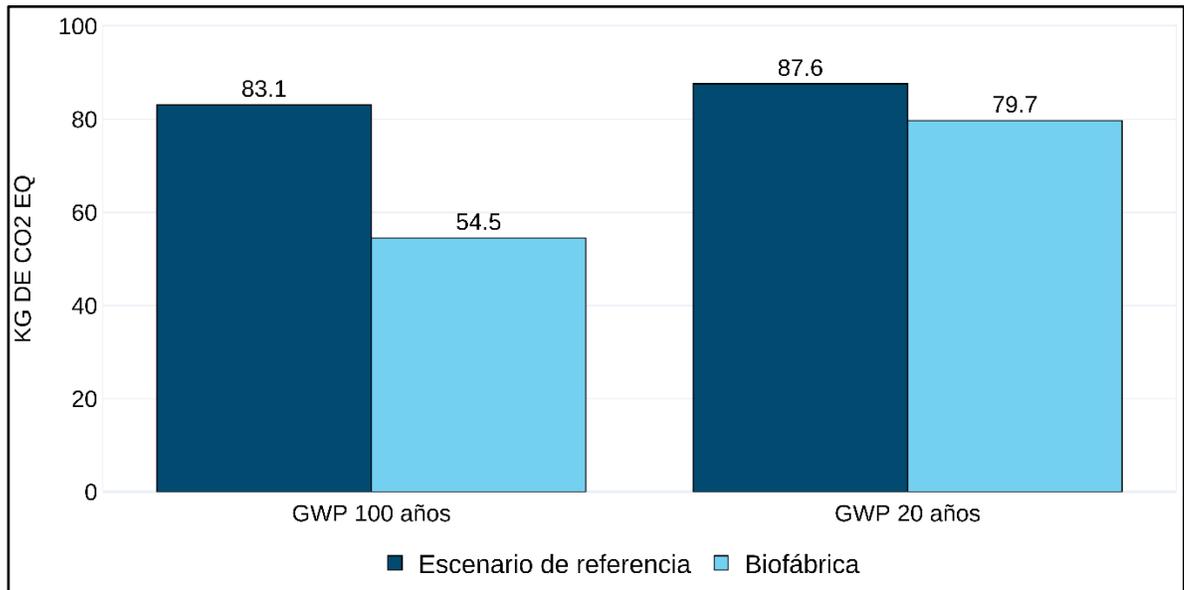
De manera coherente y como era de esperarse, en este caso la diferencia entre el desempeño del escenario de referencia y la Biofábrica para la CExD se acentuó más, con lo que se comprueba que este resultado está estrictamente condicionado por el consumo de energía eléctrica de ambos sistemas del producto, pues, con una generación eléctrica con orígenes fósiles en mayor proporción se traduce en mayores demandas en términos de exergía. Así pues, se infiere que la ventaja en términos ambientales de la bioplanta sobre las tecnologías convencionales se acentúa en cuya matriz de generación eléctrica sea en gran medida de origen renovable.

Por otro lado, también se incluye la posibilidad de variar el enfoque de la categoría de impacto de cambio climático, con un horizonte de 20 años en lugar de 100 años. Este análisis resulta especialmente útil para sistemas que tienen etapas agrícolas, debido a las variaciones en los factores de caracterización a lo largo del tiempo que

⁷³ MURILLO, Eliana. Caracterización estadística de la matriz óptima de generación eléctrica colombiana. Trabajo dirigido presentado como línea de énfasis. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Programa de Ingeniería Eléctrica. 2021. 49 p.

tienen emisiones típicas de las actividades relacionadas en la agricultura⁷⁴. Los resultados logrados de esta forma son los siguientes.

Figura 28. Resultados comparativos para las categorías GWP 100 años y GWP 20 años.



Este ejercicio muestra que el horizonte adoptado para el examen del calentamiento global (20 años o 100 años) tiene un efecto significativo en los resultados que se obtienen. Concretamente, se ve que la distancia en el desempeño de Biofábrica y el escenario de referencia se reduce con el enfoque de 20 años: de un 34% a un 9%. Esto se debe a que la emisión más importante de GEI que se tiene en el sistema de Biofábrica es el metano, que se caracteriza por tener una fuerza radiativa alta y una vida útil corta, cosa que se traduce en un factor de impacto considerablemente alto en un horizonte de 20 años (82,65), pero que se reduce con el tiempo hasta alcanzar valores mucho más pequeños en los horizontes de 100 y 500 años (27,75 y 7,6 respectivamente). En este sentido, no obstante, desde un punto de vista

⁷⁴ JOINT RESEARCH CENTRE. Op Cit.

científico y de sostenibilidad, es más dicente y confiable usar un horizonte de 100 años como recomienda ILCD, pues captura y refleja con mayor claridad los impactos de las emisiones relevantes y coincide con los métodos establecidos en el Protocolo de Kyoto.

5.2 INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Los resultados que se obtuvieron pueden ser interpretados bajo diferentes perspectivas. En primer lugar, se verifica que la tecnología de producción de aceites esenciales de *lippia organoides* propuesta en la Biofábrica constituye un avance en este sector en lo que respecta a los esfuerzos globales que existen por mitigación del cambio climático y aprovechamiento sostenible de los recursos de la naturaleza.

No obstante lo anterior, también se halló que, a pesar de que la Biofábrica muestra un mejor desempeño ambiental, también implica la implementación de más subsistemas, cosa que, a su vez, se traduce en un mayor costo de inversión inicial y un mayor costo operativo. Por esta razón resulta interesante a futuro la posibilidad de la ejecución de un análisis económico que contemple estos aumentos de costos y lo contraste con los beneficios ambientales hallados. Incluso, se vio que este alto consumo energético se tradujo en un peor desempeño de la Biofábrica desde el punto de vista de la categoría de demanda exergética acumulada. Empero, la comparación exergética de ambas líneas de producción se profundizará más adelante.

Mientras tanto, los análisis de sensibilidad realizados permiten inferir que las decisiones metodológicas adoptadas en principio, respecto a un horizonte de 100 años para la categoría de GWP y un modelamiento del consumo de energía eléctrica con una plantilla correspondiente al contexto colombiano, no alteran los resultados y conclusiones generales que pueden extraerse del análisis.

Por otro lado, se considera que la elección de la unidad funcional y de los límites de los sistemas fue adecuada, puesto que permitió comparar en igualdad de condiciones ambas líneas de producción de interés (obtención de 1 kg de AE), a la vez que se contempló la contribución de la fase agrícola al impacto potencial ambiental, que surge principalmente por la generación de emisiones de GEI por procesos de enclavado y fertilizado, cosa que muestra que un análisis en modalidad puerta-a-la-puerta no habría sido la mejor opción.

En lo que a calidad de los datos concierne, se considera que se tuvo en general información de primera mano, dado que se utilizó información directa de los cultivos experimentales de los proveedores del MV e información medida en planta. De hecho, ello constituyó un punto clave para la ejecución del análisis y para validez de los resultados obtenidos, dado que las actividades agrícolas para las plantas aromáticas no están estandarizadas en Colombia. Sin embargo, tras observar la gran influencia que tiene el consumo de energía eléctrica en los resultados finales y teniendo en cuenta que se usó como referencia la potencia nominal de todos los equipos, se identifica como una medida a futuro la actualización del modelo aquí desplegado, pero con potencias reales consumidas por los equipos mediante la medición de sus tensiones y amperajes de operación.

5.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO

Los balances energéticos necesarios para esta parte del análisis fueron expuestos antes. Luego, es necesario evaluar las propiedades termodinámicas influyentes en la exergía para los flujos que salen e ingresan en todos los procesos. Por lo anterior, a continuación, se muestran las condiciones relevantes de todos los flujos másicos y energéticos primero para el caso de Biofábrica.

Tabla 29. Flujos másicos y sus propiedades - Biofábrica.

Flujo	Flujo másico [kg/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]	Entalpía [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg-K]	Exergía [kJ/kg]
\dot{m}_{veg1}	0,006	20	86,92	17	12	19526
\dot{m}_{w1}	0,0009	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{veg2}	0,006	60	86,92	50	12	19526
\dot{m}_{w2}	0,002	60	86,92	251	0,8	10
\dot{m}_{veg3}	0,006	160	86,92	133	12	19547
\dot{m}_{w3}	0,0005	160	86,92	2796	8	535
\dot{m}_{w4}	0,002	160	16,87	2758	7	781
\dot{m}_{w5}	0,008	98	93,81	2672	7	512
\dot{m}_{w6}	0,006	96	86,92	2669	7	501
\dot{m}_{w7}	0,006	96	86,92	401	1	35
\dot{m}_{w9}	0,008	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{w10}	0,008	76	86,92	84	0,3	20
\dot{m}_{cond}	0,0001	60	86,92	251	0,8	10
\dot{m}_{a1}	0,04	20	86,92	-187	7	-52
\dot{m}_{a2}	0,04	174	86,92	-29	7	-21
\dot{m}_{a3}	0,05	228	86,92	-2751	8	32
\dot{m}_{a4}	0,05	180	86,92	-2804	7	12
\dot{m}_{a5}	0,05	160	86,92	-2826	7	-52
\dot{m}_{ceniza}	0,0004	228	86,92	160	1	36
Estado referencia						
\dot{m}_{veg0}	-	20	86,92	17	12	0
\dot{m}_{w0}	-	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{a0}	-	20	86,92	-187	7	0
\dot{m}_{ceniza}	-	20	86,92	14	0,7	0

Tabla 30. Flujos energéticos - Biofábrica.

Flujo	Potencia [kW]	Exergía [kW]
$\dot{W}_{alimentación,caldera}$	0,1	0,1
$\dot{W}_{bomba\ alimentación}$	0,4	0,4
$\dot{W}_{motor\ secador}$	0,3	0,3
$\dot{W}_{ventilador\ caldera}$	0,7	0,7
$\dot{W}_{ventilador\ condensador}$	0,7	0,7
$\dot{W}_{ventilador\ economizador}$	0,7	0,7
$\dot{W}_{ventilador\ secador}$	0,7	0,7

A partir de estos valores, se aplicaron las expresiones presentadas en las secciones 1.5 y 1.6. De esta forma, los resultados de exergía destruida en cada etapa de producción fueron los siguientes:

Tabla 31. Resultados análisis exergético – Biofábrica.

Proceso unitario	Tasa de destrucción de exergía [kW]	Contribución porcentual a la destrucción exergética
Caldera	88,77	93,7%
Condensador	0,73	0,77%
Destilador	0,91	0,96%
Economizador	1,98	2,09
Secador	2,34	2,47%
TOTAL	94,73	100%

Como era de esperarse, la mayor fuente de destrucción de exergía se localiza en la caldera, debido a la alta transferencia de calor que allí se tiene y la reacción misma de combustión que constituyen fuentes significativas de irreversibilidad. En concordancia con esto, los subsistemas que siguen a la caldera en cuanto a destrucción de exergía son aquellos en que se presentan mayores cantidades de transferencia de calor y de masa como son el secador y el economizador.

Un análisis similar se lleva a cabo para el escenario de referencia. Acá se tiene en cuenta el hecho de que el potencial exergético químico del MV, al ser utilizado para compostaje, se pierde por completo. En primer lugar, considere las propiedades termodinámicas de interés en los flujos másicos para este caso.

Tabla 32. Flujos másicos y sus propiedades – Escenario de referencia.

Flujo	Flujo másico [kg/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]	Entalpía [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg-K]	Exergía [kJ/kg]
\dot{m}_{veg1}	0,006	20	86,92	17	12	19526
\dot{m}_{w1}	0,0009	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{veg2}	0,006	60	86,92	50	12	19526
\dot{m}_{w2}	0,002	60	86,92	251	0,8	10
\dot{m}_{w3}	0,008	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{w4}	0,008	158	579	2755	7	773

Flujo	Flujo másico [kg/s]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]	Entalpía [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg-K]	Exergía [kJ/kg]
\dot{m}_{w5}	0,006	98	93,81	2672	7	512
\dot{m}_{w6}	0,006	85	86,92	356	1	26
\dot{m}_{wr1}	0,7	45	86,92	189	0,6	4
\dot{m}_{wr2}	0,7	30	86,92	126	0,4	0,7
\dot{m}_{cond}	0,0001	60	86,92	251	0,8	11
\dot{m}_{a1}	0,007	20	86,92	-187	7	-52
\dot{m}_{a2}	0,008	228	86,92	-2751	8	32
\dot{m}_{ar1}	2,068	20	86,92	61	6	0
\dot{m}_{ar2}	2,068	33	86,92	84	6	0,3
$\dot{m}_{compost}$	0,006	20	86,92	-	-	0
Estado referencia						
\dot{m}_{veg0}	-	20	86,92	17	12	0
\dot{m}_{w0}	-	20	86,92	84	0,3	0
\dot{m}_{a0}	-	20	86,92	-187	7	0

Tabla 33. Flujos energéticos – Escenario de referencia.

Flujo	Potencia [kW]	Exergía [kW]
$\dot{W}_{bomba\ alimentación}$	0,4	0,4
$\dot{W}_{bomba\ torre}$	0,75	0,75
$\dot{W}_{ventilador\ torre}$	0,37	0,37

Con esto, los resultados de los balances exergéticos son:

Tabla 34. Resultados análisis exergético – Escenario de referencia.

Proceso unitario	Tasa de destrucción de exergía [kW]	Contribución porcentual a la destrucción exergética
Caldera	12,84	9,34%
Condensador	0,30	0,22%
Destilador	2,86	2,08%
Torre de enfriamiento	3,18	2,31%
Compostaje	118,3	86,05%
TOTAL	137,48	100%

Por un lado, si bien los resultados son similares a los de Biofábrica respecto a que la caldera constituye la fuente más grande destrucción exergética, en este caso se

ve que su contribución porcentual es mucho menor. Esto tiene que ver con que las eficiencias de las calderas industriales de este tipo son muy superiores a las que se tienen en cámaras de combustión de biomasa; además, como muestra el inventario de ciclo de vida y la estequiometría desplegada, la masa de aire comburente que se debe suministrar en este caso es mucho menor a la que se tiene para la combustión del MV y parte de la energía disponible se debe consumir para calentar este aire.

Al comparar los resultados totales obtenidos para ambos casos se encuentra que la pérdida de exergía es un 45% mayor en el escenario de referencia que en Biofábrica. Este hecho se explica debido, esencialmente, al desaprovechamiento de la exergía química disponible en el MV. Estos resultados contrastan con lo obtenido para la categoría de demanda exergética acumulada, según se previó antes, pues con el análisis exergético detallado aporta una perspectiva diferente, en la que es posible apreciar el comportamiento de la exergía del sistema en los diferentes procesos que lo contienen y no sólo aguas arriba o aguas abajo de la línea de producción. De esta manera se hace aún más apreciable el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos que se logra en la Biofábrica.

5.4 TERMONECONÓMICO

Ahora, resolviendo las expresiones planteadas en la metodología y con los costos presentados allí, los resultados obtenidos para el análisis termoeconómico se recogen ahora. En primer lugar, se presentan los costos en que se incurre por las pérdidas exergéticas por hora de operación de ambos escenarios considerados.

Tabla 35. Resultados de costos por destrucción exergética.

EQUIPO	COSTOS PÉRDIDAS EXERGÍA POR HORA BIOPLANTA [\\$]	COSTOS PÉRDIDAS EXERGÍA POR HORA ESCENARIO REFERENCIA [\\$]
--------	--	---

Caldera / cámara de combustión	54327	6472
Secador	1432	-
Destilador	558	1443
Condensador	447	153
Economizador	1209	-
Compostaje	-	59648
Torre de enfriamiento	-	1603
TOTAL	$57973 \left[\frac{\$ COP}{hora\ operación} \right]$	$69319 \left[\frac{\$ COP}{hora\ operación} \right]$

Estos resultados muestran el efecto representativo, desde un punto de vista económico, que tiene la mayor destrucción de exergía que tiene lugar en el caso del escenario de referencia. Concretamente, se observa una diferencia de \$11.346 COP por hora de operación que, para un año de operación según el régimen de operación planteado, significaría \$4.254.750, aún a pesar de que, como se vio, en la sección 4.7 la fuente primaria de energía es menos costosa por unidad de kJ en el escenario de referencia que en la bioplanta, Una vez más, la explicación de este hecho se halla sobre todo en que el escenario de referencia no aprovecha el potencial de exergía química del MV y, por tanto, esta disponibilidad acaba perdiéndose.

Por otro lado, se examina el valor del término de los costos unitarios (c_u) calculados para cada proceso estudiado en ambos sistemas del producto, según el

procedimiento que fue planteado en la sección 4.7. A continuación se muestra lo que se obtuvo por kg de productos de cada proceso.

Tabla 36. Resultados costos termoeconómicos de producción por kg de producto de proceso.

EQUIPO	COSTOS DE PRODUCCIÓN BIOPLANTA $\left[\frac{\$ COP}{kg\ producto}\right]$	COSTOS DE PRODUCCIÓN ESCENARIO REFERENCIA $\left[\frac{\$ COP}{kg\ producto}\right]$
Caldera / cámara de combustión	374	297
Secador	514	-
Destilador	1373	1349
Condensador	1442	1480
Economizador	333	-
Torre de enfriamiento	-	18
Compostaje	-	3288

Sin embargo, aunque se muestran los resultados de costos para cada proceso y sus respectivos productos, el insumo más útil que se tiene para comparación de las dos líneas de producción es el valor correspondiente al condensador, dado que éste muestra los costos de producción de 1 kg de hidrolato, el cual, a su vez, contiene alrededor de 11 g de AE, que es el producto final en el que se concentra el interés. Si se llevan estos resultados a la base de la unidad funcional, que es la producción de 1 kg de AE, los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla 37. Resultados costos termoeconómicos de producción por kg de AE.

EQUIPO	COSTOS DE PRODUCCIÓN BIOPLANTA $\left[\frac{\\$ COP}{kg AE}\right]$	COSTOS DE PRODUCCIÓN ESCENARIO REFERENCIA $\left[\frac{\\$ COP}{kg AE}\right]$
Condensador	131222	134680

Estos resultados específicos muestran que, desde una perspectiva del análisis termoeconómico, la bioplanta implica un ahorro de \$3.458 COP por kilogramo de aceite esencial producido. Esto, para el régimen de operación propuesto, que corresponde a una producción anual de 3020 kg de AE, se traduciría en un ahorro de \$10.441.431 COP, lo cual muestra una disminución significativa en los costos.

De esta forma, se confirma que también desde el punto de vista termoeconómico, tanto por pérdidas de dinero relacionadas con destrucción de la exergía, como por costos de operación, la Biofábrica presenta un desempeño más favorable que la línea de producción convencional considerada, a pesar de implicar mayores costos de inversión inicial y mayor consumo energético directo.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó el desempeño ambiental y exergético de la producción de 1 kg de aceite esencial de la especie *lippia origanoides* en un bache de 250 minutos en la Biofábrica, midiéndolo contra un escenario de referencia que pretendió representar una línea de destilación con tecnologías convencionales. Con este fin, se definieron como sistemas del producto para analizar, por un lado, la Biofábrica y, por el otro, el escenario de referencia; para ambos casos se elaboró el respectivo inventario de ciclo de vida, cuantificando las entradas y salidas másicas, energéticas y exergéticas que se tenían en los diferentes procesos unitarios que constituían cada uno de ellos. De esta forma, se calcularon los impactos potenciales ambientales en las categorías de impacto de calentamiento global, agotamiento de recursos abióticos – fósiles y demanda exergética acumulada, y la destrucción o pérdida exergética de ambas líneas de producción.

Desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida y del análisis exergético, se confirmó que la Biofábrica presenta en general un mejor desempeño ambiental, energético y exergético, respecto al escenario de referencia. Específicamente, se encontraron reducciones considerables en los impactos relacionados con calentamiento global (34%), agotamiento de recursos fósiles (54%) y pérdida o destrucción de exergía (31%). De esta forma se verifica el cumplimiento de algunos de los principios más importantes de la bioplanta que consistían en el aprovechamiento integral de recursos e incremento en la eficiencia energética del proceso de obtención de AE; concretamente, esto se logra mediante la explotación del potencial combustible del MV en la caldera y del potencial térmico de los gases de combustión generados para el pre-calentamiento del agua de alimentación y el secado del MV.

Esto último constituye una representación de las brechas existentes en las tecnologías de extracción actuales y, por tanto, de las oportunidades de mejora que

se tienen en el mediano y largo plazo para incrementar el desempeño ambiental y energético de este proceso, con una aproximación cuantitativa del beneficio esperable.

Por otra parte, adoptando una perspectiva del análisis termoeconómico, se encontró también que la bioplanta presenta una menor pérdida de dinero asociada a la destrucción de exergía; específicamente, ésta es un 16% menor que la que se tiene en el escenario de referencia contemplado como vara de medida; además, también se encontró que presenta una significativa reducción en lo que a costos de producción del AE respecta, con un ahorro proyectado de más de \$10.000.000 al año.

Con todo lo anterior, se puede afirmar que el proyecto Biofábrica aporta al desarrollo de la industria de los aceites esenciales en el país, mediante la propuesta, implementación y evaluación de nuevas tecnologías y filosofías de proceso, con las que se obtienen los productos deseados con una huella de carbono, un consumo de recursos energéticos reducido y una disminución en los costos de producción, abriendo lugar a líneas de producción más sostenibles.

Por último, también se puede afirmar que este trabajo representa una contribución significativa en lo que concierne a la aplicación de las metodologías de ACV, AExCV, análisis exergéticos y estudios termoeconómicos en casos reales, a escalas mayores que las de laboratorio, utilizando información, en su mayoría, medida para el caso de estudio particular y en operación real de planta, con lo que se limitó la incertidumbre introducida al usar grandes cantidades de información secundaria; asimismo, se contribuye a la repetibilidad de estudios relacionados, puesto que con el enfoque de transparencia y explicitud adoptado, la metodología seguida puede servir a futuros autores para la realización de trabajos similares en otros casos de interés a nivel industrial.

BIBLIOGRAFÍA

AGHABASHLO, Mortaza *et al.* Determining biomass chemical exergy using a novel hybrid intelligent approach to promote biomass-based biorefineries. *Cleaner Production*. 2020, vol. 277.

ARANGO, Óscar *et al.* Optimización del rendimiento y contenido de timol de aceite esencial de orégano silvestre obtenido por arrastre con vapor. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Pasto. 2012, vol. 10, p. 217-226.

BECCALI, Marco, et al. Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. *Journal of environmental management*, 2010, vol. 91, no 7, p. 1415-1428.

BEJAN, Adrian, TSATSARONIS, George y MORAN, Michael. Thermal Design & Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1996, p. 113-166.

EPM. Tarifas Para Servicios De Gas - EPM. (Hogares - Tarifa Gas Natural). Datos Abiertos Colombia | Datos Abiertos Colombia [página web]. (12, enero, 2017). [Consultado el 17, enero, 2023]. Disponible en: [<https://www.datos.gov.co/Funcion-p-blica/Tarifas-Para-Servicios-De-Gas-EPM-Hogares-Tarifa-G/ekup-y869>].

FERRERO, Lucas M. Machin; WHEELER, Jonathan; MELE, Fernando D. Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, vol. 29, p. 672-684.

GONZÁLEZ, José; SOLARTE, Juan y CARDONA, Carlos. Supply chain and environmental assessment of the essential oil production using Calendula (*Calendula Officinalis*) as raw material. *Heliyon*, 2020, vol. 6, 13 p.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Nancy Consuelo. Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis*) en Santander Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias y

Tecnologías ambientales. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás. División de Ingenierías y Arquitectura. Facultad de Química Ambiental. 2021. 149 p.

GUTIÉRREZ, Cynthia *et al.* Contenido de sílice total en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. *Rev. Ind. Agric Tucumán* [online]. 2018, vol. 95, n.1. ISSN 1851-3018.

GWEE, Yong Ling, et al. Techno-economic and life-cycle assessment of volatile oil extracted from *Aquilaria sinensis* using supercritical carbon dioxide. *Journal of CO2 Utilization*, 2020, vol. 38, p. 158-167.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC-ISO 14040: Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Bogotá, D.C., 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC-ISO 14044: Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida. Bogotá, D.C., 2007.

IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 2.

IPCC. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Japón: IGES, 2006. Vol. 4.

JAIMES, Wilmer. Evaluación de tecnologías de extracción de aceite y producción de biodiesel de palma africana aplicando el análisis exergético. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2013. 165 p.

JOINT RESEARCH CENTRE. ILCD handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Ispra. JRC, 2011.

KHANALI, Majid *et al.* Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 196, p. 714-725.

LAMBERT, Maxime. Cradle-to-gate Life Cycle Analysis (LCA) of *Ylang-Ylang* complete essential oil destined for cosmetic use from central region, Ghana using the software SimaPro. Trabajo de grado para optar por el título de *Master en Sciences et Gestion de l'Environnement*. Bruselas: *Université Libre de Bruxelles. Faculté de Sciences*. 2018. 120 p.

LEÓN, Diego y MANTILLA, Nicolás. Diseño y construcción de un prototipo del secador de la planta piloto de obtención de aceites esenciales y extracto vegetal en el marco del Programa Bio-Reto XXI 15:50. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2020. 175 p.

LIAO, Wenjie, HEIJUNGS, Reinout y HUPPES, Gjalt. Is bioethanol a sustainable energy source? An energy-, exergy- and emergy-based thermodynamic system analysis. *Renewable Energy*. Leiden. 2011, vol. 36, p. 3479-3487.

MAHAM, Soheila, RAHIMI, Asghar y SMITH, Donald. Environmental assessment of the essential oils produced from dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in conventional and organic farms with different irrigation rates. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 204, p. 1070-1086.

MARADEY, Juan Francisco. Termodinámica aplicada. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander, 2002.

MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias, et al. Energy-water nexus strategies for the energetic valorization of orange peels based on techno-economic and environmental impact assessment. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, vol. 117, p. 380-387.

MONCADA, Jonathan; TAMAYO, Jhonny A.; CARDONA, Carlos A. Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Oregano (*Origanum vulgare*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, p. 172-181.

MONTOYA, Gildardo. ACEITES ESENCIALES: Una alternativa de diversificación para el eje cafetero. 1er ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2010, p. 64-72.

MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard. Fundamentos de termodinámica técnica, 2da ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2012, p. 309-372.

MOURA, Bruna, et al. Life cycle energy and carbon emissions of essential oil extraction from Rosemary. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, p. 291-297.

MUÑOZ, Carlos y PICO, Camilo. Evaluación del bagazo de Lippia Origanoides HBK derivado del proceso de extracción de aceites esenciales como combustible sólido para procesos de combustión. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2021. 104 p.

MURILLO, Eliana. Caracterización estadística de la matriz óptima de generación eléctrica colombiana. Trabajo dirigido presentado como línea de énfasis. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Programa de Ingeniería Eléctrica. 2021. 49 p.

OFORI-BOATENG, Cynthia y LEE, Keat. An oil palm-based biorefinery concept for cellulosic ethanol and phytochemicals production: Sustainability evaluation using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 62, p. 90-104.

PELARACCI, Simone, et al. Agricultural Co-Product Management: An LCA Perspective on the Use of Safflower Oilcake from Bio-Oil Production in Umbria

Region, Italy. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, vol. 26, no 1, p. 25-35.

PENAGOS HERMANOS. Picapasto PP-9MR. [página web]. [Consultado el 2 de febrero, 2023] Disponible en: [Picapasto PP-9MR - Penagos Hermanos].

PEÑA, Ignacio et al. Preliminary environmental study of the citrus industry of Tucuman (Argentina) based on the Life Cycle Assessment. *Sixth International Conference on Life Cycle Assessment -CILCA*, 2015.

PÉREZ-LÓPEZ, Paula, et al. Environmental life cycle optimization of essential terpene oils produced by the macroalga *Ochtodes secundiramea*. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 542, p. 292-305.

PETRUZZI, Dominique. Essential Oils Market Worldwide – Statistics & Facts. Disponible en [Essential Oils Market Worldwide - Statistics & Facts | Statista](#).

PRECISAGRO. Hoja de seguridad fertilizante Nutrifert 11-30-10. Disponible en [MSDS 11-30-10 \(recintodelpensamiento.com\)](#)

QIAN, Hongliang *et al.* Prediction models for chemical exergy of biomass on dry basis from ultimate analysis using available electron concept. *Energy*. Nanjing, 2017, vol. 131, p. 251-258.

RAMÍREZ, Karen. Evaluación del efecto de la distribución del material vegetal de *Lippia origanoides* (orégano de monte) sobre el rendimiento y la composición del aceite esencial obtenido por destilación por arrastre de vapor. Trabajo de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. 2021. 120 p.

RAMÍREZ, Katherine y SOLANO, David. Diseño térmico y mecánico de una caldera acuotubular de biomasa para la Biofábrica del proyecto Bio-reto Siglo XXI 15;50. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga:

Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. 2020. 164 p.

RESTREPO, Álvaro y BAZZO, Edson. Biomass: Technical and Environmental Alternative in the Thermoelectric Generation Process. *Ing. Univ. Bogotá*. 2014, vol. 19, no.1, p. 67-86.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS. Boletín tarifario. [página web]. (12, enero, 2017). [Consultado el 17, enero, 2023]. Disponible en: [[Boletín Tarifario Energía Trimestre 1 2022 VF.pdf \(superservicios.gov.co\)](#)]

STASHENKO, Elena. Aceites esenciales. Bucaramanga: División de Publicaciones UIS, 2009. 180 p. ISBN: 978-958-44-5944-2.

STASHENKO, Elena *et al.* Lippia organoides chemotype differentiation based on essential oil GC-MS and principal component analysis. *Journal of Separation Science*, 2010, vol. 33, p. 93-103.

VANTI. Distribución del gas natural [página web]. [Consultado el 19 de diciembre de 2022]. Disponible en: [<https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/ques/>]

VELÁSQUEZ, Héctor, AGUDELO, Andrés y CHEJNE, Farid. Energy use in the production of unrefined sugar in Colombia (exergy analysis). *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Medellín. 2011, vol. 58, p. 17-26.