

Estudio exergoambiental de la implementación de un sistema de co-combustión biomasa-biogás, en una caldera de parrilla fija de una planta extractora de aceite.

Odacyr Beleño Mier

Trabajo de grado para optar el título de magister Ciencias y Tecnologías ambientales

Director

Ph.D Carlos Alirio Díaz González

Codirector

Ph.D (c) Omar Alberto Ávila Rojas

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Química Ambiental

2025

Dedicatoria

Dedicado en primer lugar a Dios, por darme las fuerzas, el conocimiento y la tenacidad
para culminar este proceso en mi vida.

A mi esposa Deisy Johana Vargas Álvarez, por su paciencia, apoyo y abnegación.

A mis padres, Alejandro Aníbal Beleño Ospino y Gleidys Esther Mier de Beleño, por su
apoyo y cariño

Agradecimientos

Quiero agradecer a los Drs. Carlos Alirio Díaz González y Omar Alberto Ávila Rojas, por su guía, orientación y paciencia durante todo este proceso de investigación.

Al Dr. Álvaro Hernán Restrepo Victoria por su orientación, consejos, disposición y amabilidad.

Al Instituto Universitario de la Paz de Barrancabermeja, por generar los espacios para realizar mis estudios de maestría.

Contenido

Introducción	14
1 Estudio exergoambiental de la implementación de un sistema de co-combustión biomasa-biogás, en una caldera de parrilla fija de una planta extractora de aceite.....	17
1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivos.....	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	23
2 Marco referencial.....	24
2.1 Marco conceptual.....	24
2.1.1 Biomasa y biogás residual de las plantas de beneficio de aceite de palma.....	24
2.1.2 Sistemas de generación de vapor	26
2.1.3 Co-firing (Co-combustión)	27
2.1.4 Cogeneración	27
2.1.5 Análisis exergético.....	29
2.1.6 Análisis de ciclo de vida (ACV).....	33
2.1.7 Análisis exergoambiental.....	36
3 Marco legal	38
4 Diseño metodológico.....	39
4.1 Fase I. Límites del sistema.....	40
4.2 Fase II. Simulación	46
4.3 Fase III. Análisis energético y exergético del sistema de generación de vapor.....	48

4.3.1	Análisis térmico del sistema	49
4.3.2	Análisis exergético.....	51
4.4	Fase IV. Aplicación NTC ISO 14040/14044 del 2007- ACV.	55
4.4.1	Definición del objetivo y alcance del estudio.....	56
4.4.2	Selección de software y método a evaluar.....	56
4.4.3	Construcción de los perfiles medioambientales.....	57
4.4.4	Análisis de resultados de ACV	57
4.5	Fase V. Análisis exergoambiental y obtención de indicadores.....	58
4.5.1	Obtención de flujos de impactos ambientales.....	58
4.5.2	Flujos de impacto ambiental asociados a los componentes del sistema Yk	59
4.5.3	Indicadores exergoambientales.....	59
5	Resultados.....	61
5.1	Resultados objetivo No 1.....	61
5.1.1	Análisis de resultados	64
5.2	Resultados objetivo No 2.....	65
5.2.1	Análisis de resultados	69
5.3	Resultados objetivos No 3	70
5.3.1	Inventarios.....	70
5.3.2	Análisis de resultados	81
5.4	Resultados objetivo No 4.....	96
5.4.1	Análisis comparativo	97
6	Conclusiones.....	102

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Corrientes de masa y energía del sistema de generación de vapor</i>	45
Tabla 2. <i>Flujos de biomasa que ingresan a caldera por escenario</i>	46
Tabla 3. <i>Condiciones de operación del sistema de generación de vapor</i>	47
Tabla 4. <i>Análisis elemental de biomasa empleada en la caldera del generador de vapor</i>	48
Tabla 5. <i>Poder Calorífico Superior e Inferior del combustible de caldera</i>	49
Tabla 6. <i>Propiedades del biogás generado en la industria de la palma de aceite</i>	49
Tabla 7. <i>Composición volumétrica del biogás</i>	49
Tabla 8. <i>Flujos de exergía de entrada y de salida por componentes</i>	53
Tabla 9. <i>Fracciones molares de los gases de combustión en la corriente No 12 del proceso</i>	54
Tabla 10. <i>Definición de los flujos de exergía Fuel y Producto</i>	55
Tabla 11. <i>Definición de los flujos de impacto exergoambientales Fuel y Producto</i>	59
Tabla 12. <i>Indicadores y variables exergoambientales</i>	60
Tabla 13. <i>Variables de ingreso y salida del software Aspen PLUS</i>	61
Tabla 14. <i>Eficiencia térmica del sistema</i>	63
Tabla 15. <i>Eficiencia exergética sistema. Producción de 14,43 t/h de vapor</i>	66
Tabla 16. <i>Eficiencia exergética. Producción de 17.31 t/h de vapor</i>	67
Tabla 17. <i>Análisis de inventario para una tonelada de fibra</i>	71
Tabla 18. <i>Análisis de inventario para la obtención 1 m³ de biogás</i>	72
Tabla 19. <i>Composición química de los Racimos de Fruta Fresca (RFF)</i>	72
Tabla 20. <i>Caracterización de los efluentes del POME</i>	73
Tabla 21. <i>Caracterización de los lodos del biodigestor</i>	73
Tabla 22. <i>Inventarios del sistema operando en forma convencional</i>	75

Tabla 23. <i>Inventarios del sistema operando en forma co-firing</i>	76
Tabla 24. <i>Inventarios del sistema operando en forma cogeneración</i>	77
Tabla 25. <i>Inventarios del sistema operando en forma co-firing-cogeneración</i>	79
Tabla 26. <i>Caracterización del agua de alimentación</i>	80
Tabla 27. <i>Composición másica de los gases de combustión</i>	80
Tabla 28. <i>Impactos ambientales por corriente. Modo de operación convencional</i>	81
Tabla 29. <i>% categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo convencional</i>	82
Tabla 30. <i>Impactos ambientales por corriente. Modo de operación co-firing</i>	84
Tabla 31. <i>% categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo co-firing</i>	85
Tabla 32. <i>Impactos ambientales por corriente. Modo de operación cogeneración.</i>	87
Tabla 33. <i>% categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo cogeneración</i>	88
Tabla 34. <i>Impactos ambientales por corriente. Modo de operación co-firing-cogeneración.</i>	90
Tabla 35. <i>% categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo co-firing-cogeneración</i>	91
Tabla 36. <i>Comparación de impactos ambientales globales</i>	93
Tabla 37. <i>% de incidencia de las categorías de impacto por Escenarios</i>	93
Tabla 38. <i>Datos de referencia para obtención del YB</i>	96
Tabla 39. <i>Términos B_f, B_p y η_B por escenario.</i>	97
Tabla 40. <i>Términos b_f, Ad_t y BD por escenarios</i>	98
Tabla 41. <i>Cálculo de la variable $BTOTAL$ por escenario</i>	100

Lista de figuras

Figura 1. <i>Proceso general de extracción de aceite de palma</i>	25
Figura 2. <i>Proceso de cogeneración</i>	28
Figura 3. <i>Fases de un EICV</i>	35
Figura 4. <i>Sistema de generación de vapor régimen convencional</i>	41
Figura 5. <i>Sistema de generación de vapor modo co-firing</i>	42
Figura 6. <i>Sistema de generación de vapor modo cogeneración</i>	43
Figura 7. <i>Sistema de generación de vapor modo co-firing- cogeneración</i>	44
Figura 8. <i>Eficiencia térmica con producción 14,43 t/h y 17,31 t/h de vapor</i>	64
Figura 9. <i>Perdidas de exergía. Producción 14,43 t/h de vapor</i>	68
Figura 10. <i>Perdidas de exergía. Producción 17,31 t/h de vapor</i>	68
Figura 11. <i>Eficiencias exergéticas por escenario</i>	69
Figura 12. <i>Diagrama del sistema modo operación convencional</i>	74
Figura 13. <i>Diagrama del sistema modo operación co-firing</i>	76
Figura 14. <i>Diagrama del sistema modo de operación cogeneración</i>	77
Figura 15. <i>Diagrama del sistema modo de operación co-firing-cogeneración</i>	78
Figura 16. <i>Resultados ACV planta de vapor operando en forma convencional</i>	83
Figura 17. <i>Resultados ACV planta de vapor operando en forma co-firing</i>	86
Figura 18. <i>Resultados ACV planta de vapor operando en forma cogeneración</i>	89
Figura 19. <i>Resultados ACV planta de vapor operando en forma co-firing-cogeneración</i>	92
Figura 20. <i>Evaluación ambiental por escenarios de la planta</i>	95
Figura 21. <i>Coeficiente exergo-ambiental η_B por escenario</i>	97
Figura 22. <i>Flujos de impacto ambiental por destrucción de exergía BD. por escenario</i>	99

Figura 23. Flujos de impacto ambiental total *BTOTAL* por escenario 100

Listado de apéndices

Apéndice A. <i>Impactos ambientales proceso de extracción de aceite de palma</i>	110
Apéndice B. <i>Sistemas de vapor y calderas del sector palmero colombiano.</i>	111
Apéndice C. <i>Exergías químicas estándar</i>	113
Apéndice D. <i>Digramas de simulaciones en Aspen PLUS V 10,0</i>	114
Apéndice E. <i>Método de evaluación de impacto Eco-indicador 99.</i>	118
Apéndice F. <i>Balances exergoambiental</i>	119

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis exergoambiental que permita establecer indicadores para evaluar el desempeño ambiental de una planta generadora de vapor, cuando es operada de cuatro formas distintas: convencional, co-firing, cogeneración y co-firing - cogeneración. Se realizaron balances de masa, cálculos de la eficiencia térmica del sistema, análisis exergético, análisis del ciclo de vida y análisis exergoambiental a la planta en sus diferentes escenarios de operación utilizando Aspen PLUS 10.0® y SimaPro 9.0®.

Con los resultados obtenidos, se calcularon tres variables exergoambientales, estableciéndose el coeficiente de desempeño exergoambiental η_B , el flujo de impacto ambiental asociado a la exergía destruida \dot{B}_D y el flujo de impacto ambiental total de sistema \dot{B}_{TOTAL} para cada forma de operación de la planta.

Se pudo concluir que las máximas eficiencias térmica y exergética de la planta son de 65,9% y 34% respectivamente, cuando el sistema realiza cogeneración de energía. Adicionalmente, la planta de vapor presenta el mejor desempeño ambiental cuando realiza co-firing con cogeneración de energía, con un valor mínimo de 0,98 Pt/t. Por último, se determinó que cuando el sistema realiza co-firing biomasa-biogás, presenta el menor flujo de impacto ambiental total \dot{B}_{TOTAL} con un valor de mínimo de 55,77 Pt/h

Palabras claves: generador de vapor, exergía, exergoambiental, impacto ambiental.

Abstract

The objective of this research was to conduct an exergo-environmental analysis to establish indicators for evaluating the environmental performance of a steam generation plant, when operated in four different ways: conventional without co-firing, conventional with co-firing, conventional with cogeneration and conventional with both co-firing and cogeneration. Mass balances, thermal efficiency calculations of the system, exergetic analysis, life cycle analysis, and exergoenvironmental analysis were performed on the plant under its different operating scenarios using Aspen PLUS 10.0® and SimaPro 9.0®.

Using the obtained results, three exergo-environmental variables were calculated: the exergo-environmental performance coefficient η_B , the environmental impact flow associated with the destroyed exergy \dot{B}_D , and the total environmental impact flow of the system \dot{B}_{TOTAL} , for each operational mode of the plant.

It was concluded that the maximum thermal and exergetic efficiencies of the plant are 65.9% and 34% respectively, when the system engages in cogeneration of energy. Additionally, the steam plant exhibits the best environmental performance when it performs co-firing with cogeneration of energy, with a minimum value of 0.98 Pt/h. Finally, it was determined that when the system engages in biomass-biogas co-firing, it has the lowest total environmental impact flow \dot{B}_{TOTAL} with a minimum value of 55.77 Pt/h.

Keywords: steam generator, exergy, exergoenvironmental, environmental impact.

Glosario

ACV: sigla que representa al Análisis de Ciclo de Vida

Análisis exergoambiental: es la metodología utilizada para realizar un acercamiento exergético a los impactos ambientales de un proceso determinado (Restrepo & Bazzo, 2016, p. 8)

Biogás: el biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido en las lagunas anaerobias (FAO; Ministerio de Energía de Chile, 2011).

Biomasa: se define como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedente de actividades agrarias (Herguedas, Taranco, & Garcia, 2012)

Caldera: son equipos que se utilizan para generar vapor a partir de una fuente de calor. En la industria, generalmente el calor proveniente de la energía química almacenada por los combustibles la cual se libera al reaccionar estos con el oxígeno (ECOCARBÓN, 1998)

Co-firing: se define como la quema simultánea de dos combustibles en un mismo equipo (Pérez Jeldres, 2016)

Cogeneración: la cogeneración es entendida como la producción combinada de calor o frío útil y con valor económico justificable, y energía eléctrica o mecánica (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía_IDAE, 2007)

DQO: Demanda Química Oxígeno. Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (M., 2007)

Efluente: Término empleado para nombrar a las aguas servidas con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por viviendas y/o industrias (CONICET, 2020)

Exergía: Es el máximo trabajo teórico que puede obtenerse hasta alcanzar el equilibrio (Moran & Shapiro, 2004)

Lagunas anaerobias: piscinas donde se realiza un proceso biológico complejo y degradativo en el cual materiales orgánicos del sustrato son transformados a Biogás, mezcla de Dióxido de Carbono y Metano con trazas de otros elementos (FAO; Ministerio de Energía de Chile, 2011)

Lagunas aerobias: piscinas donde bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular (FAO; Ministerio de Energía de Chile, 2011)

Lagunas de estabilización: es una excavación en el suelo donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana (Comisión Nacional del Agua (México), 2020)

Poder calorífico: el poder calorífico de un combustible es un número positivo igual a la magnitud de la entalpía de combustión (Moran & Shapiro, 2004)

SimaPro: es una herramienta profesional para recopilar, analizar y monitorear datos de desempeño de sostenibilidad de los productos y servicios de su empresa. El software se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, como informes de sostenibilidad, huella de carbono y agua, diseño de productos y determinación de indicadores clave de rendimiento (Pré Consultants, 2020)

Volumen control: región del espacio a través de la cual puede fluir masa (Moran & Shapiro, 2004)

Introducción

El Análisis Exergoambiental (AE) es una metodología novedosa propuesta en Alemania en el año 2009, que emplea la propiedad termodinámica de la exergía y los impactos ambientales estimados por un análisis Ciclo de Vida (ACV) para evaluar y plantear mejoras en los sistemas de conversión de energía. (Morosuk T & Tsatsaronis G, 2013, p. 3). El AE plantea, por dispositivo del sistema, un balance de flujos de impactos ambientales relacionados con las corrientes másicas o de energía que ingresan o salen y el flujo de impacto ambiental relacionado con la vida útil del equipo analizado. Todo lo anterior permite calcular las variables exergoambientales del dispositivo y evaluar su desempeño.

Por otro lado, una aplicación del análisis exergoambiental, es la evaluación y comparación de forma global, del desempeño ambiental de una tecnología y sus variantes, lo que genera una línea base de comparación (Qi et al., 2024, pp. 617–618). Se debe resaltar que este enfoque fue el utilizado en este trabajo de investigación, el cual pretende identificar el mejor desempeño ambiental y termodinámico de un sistema de generación de vapor de una planta de extracción de aceite de palma. Por medio del software Aspen Plus, se simularon y analizaron los siguientes escenarios:

- Convencional: cuando solo se emplea como combustible de caldera a la biomasa (fibra y cuesco) y se genera vapor
- Cogeneración: se realiza combustión de biomasa en la caldera, generándose vapor y energía eléctrica.
- Co-firing: se queman biomasa y biogás en la caldera, para la producción de vapor
- Co-firing-Cogeneración: hay combustión de biomasa y biogás en la caldera y se producen vapor y energía eléctrica.

Como resultado de la evaluación exergoambiental, se creó un documento que contiene seis (6) capítulos o secciones, organizados de la siguiente forma:

- Capítulo 1: donde se establecen los objetivos de la investigación, planteamiento del problema y justificación.
- Capítulo 2: se definen los conceptos básicos, para la realización de los balances de energía, exergía y exergoambiental.
- Capítulo 3: se redacta un breve marco legal que delimita los alcances del proceso de investigación.
- Capítulo 4: en esta sección se establecen los procedimientos, las razones, argumentos y suposiciones con los cuales se realizaron los cálculos.
- Capítulo 5: es en esta sección donde se encuentran los resultados y el análisis los conceptos.
- Capítulo 6: conclusiones donde se pueden encontrar de forma sucinta los hallazgos más importantes del trabajo de maestría .

1 Estudio exergoambiental de la implementación de un sistema de co-combustión biomasa-biogás, en una caldera de parrilla fija de una planta extractora de aceite.

1.1 Planteamiento del problema

Dado a que el consumo de combustibles (renovables y no renovables) en los diferentes procesos de producción tienen un impacto sobre el medio ambiente, se han planteado entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), propuestas que procuran establecer lineamientos referentes a transformar los procesos productivos actuales. Los objetivos que tienen una incidencia directa en la transformación de las materias primas y consumo de energía son: *Objetivo 7*: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna; *objetivo 12*: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles; y el *objetivo 13*: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Unidas, 2.018, pp. 37–59).

Se debe mencionar, que entre los diferentes procesos productivos desarrollados en la actualidad por la humanidad, encontramos a la industria de los aceites comestibles, y entre estos, se destaca la agroindustria de los aceites de palma, la cual se encuentra en constante desarrollo. En ese sentido, según Mesa Deshington, para la década del 2.000 al 2.010 la producción de aceite de palma africana creció en un 7% a nivel mundial (Mesa Dishington, 2.013, p. 15) y que para los años 2.017/2.018, presento una producción de 69,3 millones de toneladas que representó el 35,2% de la producción mundial de aceites (Fundación Española del aceite de palma sostenible, 2.018, p. 5)

No obstante, esta industria genera una serie de impactos ambientales debido a sus residuos sólidos, líquidos y gaseosos provenientes de sus fases de extracción y otros procesos alternos inherentes tales como los sistemas de generación de vapor. En el Apéndice A se establecen los

posibles impactos ambientales generados en los procesos de producción, de una planta de extracción de Aceite de palma africana.

Es importante mencionar que, entre los impactos ambientales mencionados en el Apéndice A, el de cambio climático por la emisión de gases provenientes de las piscinas de estabilización, ha recibido especial atención. Se estima que la industria de la palma en Colombia genera en promedio, 68 m^3 de biogás por cada tonelada de aceite de palma producido, siendo la producción de aceite para el año 2.023 de 1,7 millones de toneladas. (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2.023) (Chaparro Triana et al., 2.022).

Con el fin de reducir los impactos ambientales generados por residuos del proceso de extracción y aprovechar el potencial energético de los mismos, la agroindustria de la palma en Malasia ha empezado a buscar tecnologías que permitan transformar sus Plantas de Beneficio de Aceite de Palma (PBAP) en fábricas verdes, con cero emisiones al aire, suelo o agua (Yeit Haan & Sobri Takriff Mohd, 2.022, p. 43). Por su parte, en Colombia, desde el año 2008 se reporta del interés del sector palmero por realizar cogeneración eléctrica, empleando la captura del biogás proveniente de las piscinas de estabilización por medio de la tecnología sombrilla MDL (Mazorra V, 2.008, p. 67), pero para la fecha de 2.022, solo el 12% de las Plantas de Beneficio de Aceite de Palma (PBAP) contaban con la tecnología de biodigestores para la captura de subproducto gaseoso (Chaparro Triana et al., 2.022).

Ahora bien, como una alternativa para el aprovechamiento del biogás en los sistemas de generación de vapor en las plantas de beneficio de aceite de palma, se plantea el proceso de co-firing biomasa-biogás, para el aprovechamiento del recurso. Sin embargo, se hace necesario que la agroindustria de la palma evalúe el desempeño ambiental y termodinámico de las tecnologías de conversión de energía existentes y el de las nuevas tecnologías proyectadas, generando así una

línea base de comparación, que permita cuantificar las mejoras incorporadas y el aporte a la mitigación de los impactos ambientales.

En Colombia se han realizado algunos estudios para evaluar la implementación de tecnologías de aprovechamiento de residuos en el sector palmero, con el fin de mejorar su eficiencia energética, sostenibilidad y competitividad. A continuación, se mencionan estudios de evaluación de tecnológica, basados en conceptos termodinámicos, económicos y ambientales, encaminados a establecer la viabilidad de las tecnologías de co-firing o cogeneración en los sistemas de generación de vapor.

En primer lugar, Basto y colaboradores (2014, p. 2), realizaron un estudio técnico y económico, encaminado a evaluar la producción de energía a partir del biogás o biomasa (Cogeneración). Por su parte, Carvajal Diaz evaluó el uso de una tecnología de co-firing Biomasa-biogás en un sistema de generación de vapor, empleando análisis de exergético y análisis ciclo de vida (Carvajal Diaz, 2.018, p. 28). Posteriormente, Albarracín y Méndez, realizaron el diseño de un sistema de co-combustión biomasa-biogás , evaluándolo técnica y económicamente(Albarracín Becerra & Méndez Rangel, 2019, p. 36). Por último, Barrera evaluó el potencial para implementar un proceso de cogeneración a partir de biomasa, en plantas de beneficio de la costa caribe colombiana, empleando conceptos termodinámicos y Análisis Ciclo de Vida (Barrera Hernández, 2.021, p. 19).

Es necesario recalcar que, las metodologías de evaluación empleadas por estos autores presentan limitaciones, debido a que los enfoques termodinámicos, económicos y ambiental no están interrelacionados, presentando resultados con enfoques independientes de un mismo problema. Por esta razón, se plantea la siguiente pregunta: ¿Existe la forma de determinar la

viabilidad ambiental de la implementación tecnológica del proceso co-firing Biogás-Biomasa, teniendo en cuenta las propiedades termodinámicas de exergía e irreversibilidades del sistema?

Según Cavalcanti, la metodología exergoambiental es un enfoque integrado que permite relacionar el concepto termodinámico de la energía con los impactos ambientales de un proceso (Cavalcanti et al., 2024, p. 1). Este tipo de análisis se fundamenta en que se pueden asignar valores de impacto ambiental a la energía transportada y a las ineficiencias del dispositivo por medio de la propiedad termodinámica de la exergía (Morosuk T & Tsatsaronis G, 2013, p. 3).

La presente propuesta de investigación plantea la realización de un estudio exergoambiental de la implementación de un sistema de co-combustión o co-firing biomasa-biogás, en una caldera de parrilla fija, de una planta extractora de aceite, para establecer indicadores de comparación que permitan determinar la viabilidad ambiental del aprovechamiento del biogás generado en el sistema de tratamiento de efluentes.

1.2 Justificación

Sectores agroindustriales como el de la palma, tienen gran proyección en el aprovechamiento de sus residuos, para la generación de energía térmica o eléctrica requerida en sus procesos de extracción de aceite y para la venta al sistema energético nacional (Soh Kheang, 2016, pp. 145–146). Sin embargo, las plantas extractoras de aceite, solo se reutiliza parte de la biomasa residual en sus calderas de parrilla fija y se desaprovecha el potencial energético del biogás.

Aunque el aprovechamiento del biogás y la biomasa con fines energéticos se proyectan como una gran oportunidad, se desconocen muchos aspectos que permitan garantizar su viabilidad técnica y ambiental. Es por lo anterior, que se requiere de indicadores que cuantifiquen las mejoras

generadas por el aprovechamiento de los gases provenientes de las lagunas de estabilización o biodigestores. Como respuesta, se plantea la realización de un análisis exergoambiental, el cual es un acercamiento exergético a los impactos ambientales, relacionando variables termodinámicas, con los resultados del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (Cavalcanti et al., 2020a, p. 2). Debido a esto, la aplicación de la metodología exergoambiental cuantifica la potencial capacidad de reducción de impactos ambientales de un dispositivo del sistema por medio del indicador r_b (Boyano et al., 2011, p. 2209). También, identifica los componentes de la planta que generan mayores flujos de impactos, por medio del término \dot{B}_{total} . (Restrepo & Bazzo, 2016, p. 113). Por último, por medio de la variable \dot{B}_D se cuantifican los impactos ambientales relacionados con las irreversibilidades o exergía destruida en el dispositivo (Meyer et al., 2009, p. 80). Es por razón de su enfoque integrador y la información que brinda, que la metodología exergoambiental puede ser empleada como una herramienta de evaluación del desempeño de equipos o tecnologías.

Simultáneamente, es preciso decir que la metodología de análisis exergoambiental permite evaluar diferentes tipos de tecnologías de los procesos de transformación de energía. A continuación, se presentan algunos trabajos de investigación donde fue implementada y que sirvieron como punto de apoyo para la realización de este documento.

Para el año 2008, Meyer y colaboradores (2009, p. 75) presentaron su trabajo que consistió en un análisis exergoambiental a una celda de combustible de óxido sólido de alta temperatura integrado con un proceso alotérmico de gasificación de biomasa. Este trabajo de investigación identificó los equipos del sistema con mayores impactos ambientales y obtuvo información para posibles mejoras en el diseño del componente. Posteriormente, Boyano y colaboradores realizaron una evaluación exergoambiental a un proceso de reforma metano para producción de hidrógeno. El autor menciona, la necesidad de diseñar procesos industriales con un enfoque ambiental y no

solamente basados en el punto de vista técnico o económico. (Boyano et al., 2011, p. 2.203). Por su parte, para el año 2016, Restrepo y Bazzo publicaron los resultados de un análisis exergoambiental a una termoeléctrica de 50 MWe, operando a base de carbón y realizando co-firing carbón-biomasa. Por medio de los resultados obtenidos, los autores pudieron cuantificar, desde un punto de vista ambiental, la introducción de la tecnología co-firing en el proceso de generación de energía (Restrepo & Bazzo, 2016, p. 107). De igual manera, en el año 2019, Blumberg empleo el análisis exergoambiental para comparar la producción de metanol por medio de vapor de gas natural reformado y reformado autotérmico (Blumberg et al., 2019, p. 1.273). En ese mismo periodo Cavalcanti et al, presentaron su informe sobre el estudio exergoambiental de una planta de energía de 100 MW, que emplea Eucalipto como combustible. Este trabajo, les permitió evaluar el uso de la biomasa (Eucalipto) en la producción de energía térmica (Cavalcanti et al., 2019, p. 1). Por último, nuevamente se presenta un trabajo de Cavalcanti, el cual realizo un análisis exergoambiental para evaluar la sostenibilidad de un sistema de cogeneración de energía que produce 33,4 MW de energía eléctrica y 10,9 MW de energía térmica, empleando bagazo de caña de azúcar como combustible (Cavalcanti et al., 2020b, p. 2).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar un análisis exergoambiental a un sistema de generación de vapor en una planta extractora de aceite de palma, en régimen de combustión convencional con biomasa y en régimen de co-firing biomasa-biogás, operada en escenarios de cogeneración y de no cogeneración

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia térmica de un sistema de generación de vapor realizando: combustión convencional, co-firing biomasa-biogás, cogeneración de energía y realizando co-firing con cogeneración.
- Identificar por medio de un análisis exergético, las partes críticas del sistema que generan mayor irreversibilidad en el proceso
- Evaluar el desempeño ambiental de las cuatro (4) diferentes formas de operación del sistema de generación de vapor, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Establecer indicadores de desempeño exergoambientales, que evalúen la sostenibilidad de la implementación del sistema de co-firing en el sistema de generación de vapor estudiado.

Se debe decir que, la implementación del enfoque exergoambiental puede establecer cuantitativamente los efectos ambientales de la implementación de nuevas tecnologías en el proceso. Por tanto, la consecución de los objetivos planteados generará una línea base de comparación para evaluar el desempeño ambiental de los diferentes escenarios de la planta de producción de vapor. Todo lo anterior apunta a que, el análisis exergoambiental puede ser utilizado por la industria de la palma de aceite, como una herramienta para valorar las mejoras proyectadas en sus sistemas de transformación de energía y la toma de decisiones.

2 Marco referencial

2.1 Marco conceptual

El objetivo del presente trabajo es el análisis de exergoambiental a un sistema de generación de vapor de una planta extractora de aceite de palma, por tal razón se realizará una breve recopilación documental, donde se expone los conceptos fundamentales que estarán siendo abordados a lo largo del documento.

2.1.1 Biomasa y biogás residual de las plantas de beneficio de aceite de palma

La biomasa empleada como combustible en los generadores de vapor de las plantas de extracción de aceite, está constituida por *fibra* y *cascarilla*, los cuales son residuos del proceso de prensado del fruto, y de la sección de palmistería de la planta de extracción de aceites, tal y como se muestra e la figura No 1.

Por otra parte, dada la importancia energética que presenta la fibra y cascarilla, y con el objetivo de cuantificar y optimizar los procesos de combustión se han formulado expresiones matemáticas que permiten determinar el Poder Calorífico Superior (PCS o HHV en inglés) y el Poder Calorífico Inferior (PCI o LHV en inglés) a partir de la composición elemental de estos materiales. Un ejemplo de esto son las expresiones presentadas por Dulong.

$$HHV (PCS)[MJ/kg] = \frac{33,3 * C + 1.442,8 * (H - \frac{O}{8})}{1000} \quad Ec (1)$$

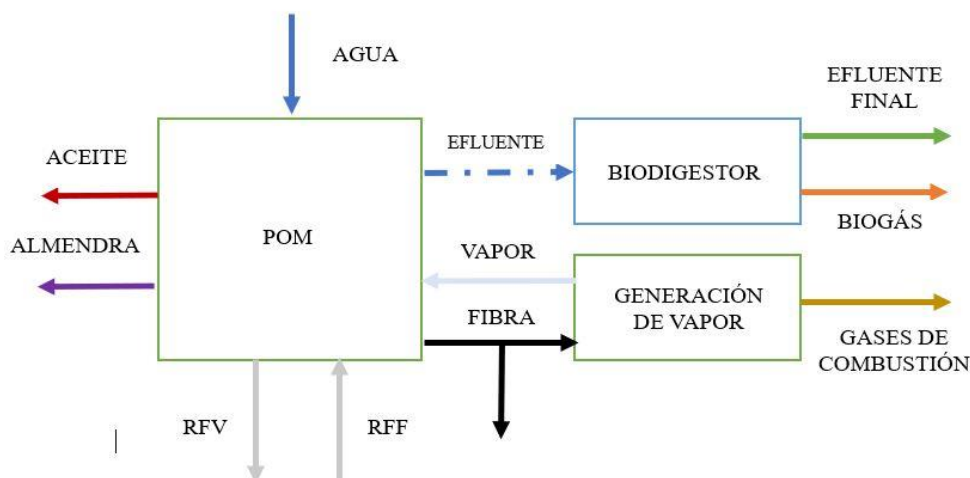
$$LHV (PCI)[MJ/kg] = \frac{HHV - 20,16 * H - 2,24M}{1.000} \quad Ec (2)$$

(Halim Shah Ismail & Zahra Haddadian, 2.012, p. 267).

Adicional a lo anterior, el biogás es otro residuo generado por procesos de digestión anaerobia (D.A) en las piscinas de estabilización o biodigestores de las plantas de extracción de aceite de palma. Su composición puede ser muy variada y depende de la composición de la materia orgánica de origen y de las condiciones de la D.A. El biogás es una mezcla constituida principalmente por: Metano (CH_4) con un 60-80% en volumen; Dióxido de carbono (CO_2) con un 30-40% en volumen; Nitrógeno (N_2) entre 1-2% en volumen y trazas de Ácido sulfhídrico (H_2S), Monóxido de carbono (CO) y vapor de agua (H_2O) (Duarte Cely, 2006, p. 16). Es preciso recalcar que, este subproducto presenta un potencial energético importante (Briceño Álvarez et al., 2015, p. 48) que puede ser empleado como combustible para calderas, mores de biogás o para conversión a biocombustibles (Althausen, 2016, p. 34).

En la figura No 1, se presenta un esquema global de un proceso de extracción de aceite de palma, donde se pueden identificar sus productos, subproductos y desechos generados.

Figura 1. *Proceso general de extracción de aceite de palma*



Nota: Adaptado de (Torres Ortega et al., 2017, p. 20).

2.1.2 *Sistemas de generación de vapor*

Los sistemas de generación de vapor se llaman al conjunto o sistema de equipos, en el cual la caldera es el dispositivo más importante y que tienen como fin la producción del vapor en la planta de extracción de aceite. Cabe decir que, todo sistema de generación de vapor industrial, dependiendo de sus dimensiones y requerimientos, puede presentar hasta cuatro áreas principales que son: Generación, Distribución, Usos finales y/o Cogeneración, Recuperación de condensado. Cada una de estas áreas presenta una serie de equipos y accesorios propios de los procesos que en ellas se desarrollan. (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, 2.018, p. 22). Para más información ver *Apéndice B Sistemas de generación de vapor y calderas en la industria de extracción de aceite de palma en Colombia*

Adicionalmente, es adecuado destacar que un parámetro importante para evaluar el desempeño de una caldera es el cálculo de la eficiencia térmica de la misma. La eficiencia termodinámica de una caldera puede ser determinada a través de dos métodos conocidos como: Método directo y el método indirecto. A continuación, se define el método *directo* para determinar la eficiencia de una caldera, el cual se puede escribir matemáticamente de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} \quad Ec (3)$$

Donde:

η = Es la eficiencia térmica de la caldera

\dot{Q}_1 = Energía absorbida por el fluido de trabajo en la caldera. El término Q_1 puede calcularse como $\dot{Q}_1 = \dot{m}_{vapor} \times (h_{vapor} - h_{agua\ de\ alimentación})$

\dot{Q}_2 = Energía que ingresa por el combustible. Matemáticamente, Q_2 puede calcularse como: $\dot{Q}_2 = \dot{m}_{combustible} \times PCI$

Donde el *PCI* es el Poder Calorífico Inferior del Combustible.

Para el uso de la anterior ecuación es obligatorio tener presente la cantidad de vapor generado, la cantidad de combustible consumido y la temperatura y presión del agua de alimentación y del vapor generado. (Dipak Pilankar & Kale, 2.016, p. 347).

2.1.3 Co-firing (Co-combustión)

La tecnología de Co-firing o Co-combustión es el proceso de quemar dos combustibles en un mismo equipo o caldera, lo cual puede presentar ventajas comparativas en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , NO_x , MP y SO_2) (Pérez Jeldres, 2.016, p. i). Este tipo de tecnología está siendo utilizada en las centrales eléctricas de carbón convencional, en donde se combina un porcentaje de biomasa y carbón (Entre 2 al 20% de Biomasa), para la generación de electricidad (Royo et al., 2.008, p. 3)

También es importante decir que, desde hace algunos años la co-combustión entre Biomasa y Biogás, se viene planteando en el sector palmero, como una alternativa para la quema del biogás producido en las lagunas de estabilización y biodigestores en las plantas de beneficio, y de esta manera aprovechar los residuos generados en el proceso de producción de aceite de palma (Soh Kheang, 2.016, p. 145), pero es necesario resaltar que, hasta el día de hoy no se conoce un proceso a escala piloto o industrial que este en operación.

2.1.4 Cogeneración

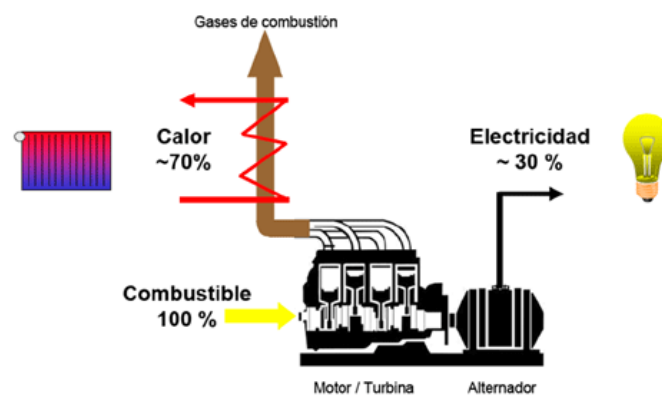
La tecnología de Cogeneración permite la producción simultánea de dos o más tipos de energía. Por lo general las energías que se producen son Electricidad y energía Térmica, tal y como

se observa en la figura No 2, pero también puede ser Energía Mecánica y energía Térmica. Dos principales características de los procesos de Cogeneración son:

El aprovechamiento de varios tipos de energía permite un rendimiento mayor al de una Central de energía.

La producción de energía donde se consume genera menores pérdidas por transporte y aumenta la autonomía de las fábricas (García Garrido & Fraile Chico Diego, 2.008, p. 5)

Figura 2. *Proceso de cogeneración*



Nota: tomado de <http://multitekingenieros.com/> micro cogeneración

Como en un proceso de cogeneración se obtienen dos tipos de energía diferentes, el calor útil y energía eléctrica de cogeneración, los cálculos de eficiencia del proceso se realizan por separado para cada tipo de energía. Las ecuaciones que se presentan a continuación son las más utilizadas para determinar esta propiedad tan importante del proceso.

Eficiencia térmica

$$\eta_Q = \frac{Q_u}{Q_2} \quad Ec \quad (4)$$

Eficiencia eléctrica

$$\eta_E = \frac{E_u}{Q_2} \quad Ec \quad (5)$$

Donde

Q_u es la energía útil aprovechado en el proceso

Q_2 es la energía liberada por el combustible

E_u es la energía eléctrica útil del proceso de cogeneración

2.1.5 *Análisis exergético*

A continuación, se exponen las expresiones matemáticas y conceptos básicos que se emplearon para la realización de los balances exergéticos en la planta objeto de estudio, la eficiencia exergética de la misma, las ineficiencias o irreversibilidades de cada componente, así como también, flujos de exergía que son transportadas en cada una de sus corrientes másicas

2.1.5.1 Conceptos generales. Basado en la ley de la conservación de la masa, se plantea un balance de masa donde se identifican los flujos masicos de entrada y salida, a cada uno de los componentes del generador de vapor. Esto se puede expresarse a través de la siguiente ecuación.

$$\sum_i^n \dot{m}_{ie} = \sum_i^n \dot{m}_{is} \quad Ec \quad (6)$$

Posteriormente, para desarrollar un balance exergético a un volumen de control, se debe tener en cuenta el flujo de exergía que acompaña a la transferencia de calor, el flujo de exergía que acompaña a la transferencia de energía en forma de trabajo, la cantidad de exergía destruida por las irreversibilidades propias del sistema y adicional a todo esto, es requisito contabilizar la transferencia de exergía total que acompaña al flujo masico.

El balance exergético se puede se expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dA_{vc}}{dt} = \sum_j \dot{A}_Q - \dot{A}_W + \sum_e \dot{A}_e - \sum_s \dot{A}_s - \dot{A}_d \quad Ec (7)$$

El termino $\frac{dA_{vc}}{dt}$ representa la variación de exergía del sistema por unidad de tiempo en el volumen de control, pero cuando el sistema se encuentra en estado estable o régimen permanente y no hay incremento en el valor de la exergía que ingresa o sale del sistema a lo largo del tiempo, la ecuación anterior puede reescribirse de la siguiente forma:

$$0 = \sum_j \dot{A}_Q - \dot{A}_W + \sum_e \dot{A}_e - \sum_s \dot{A}_s - \dot{A}_d \quad Ec (8)$$

Donde $\dot{A}_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j$ y representa el flujo de exergía que acompaña a la transferencia de energía en forma de calor. En este término, T_o es la temperatura de referencia o estado muerto. Por su parte, T_j indica la temperatura en la frontera del volumen de control, donde se realiza la transferencia de calor.

El término $\dot{A}_W = \left(\dot{W}_{vc} - p_o \frac{dV_{vc}}{dt}\right)$ indica el flujo de exergía que acompaña a la transferencia de energía neta cuando el sistema realiza trabajo. Si el sistema presenta fronteras estáticas y no hay variación en su volumen, el termino $p_o \frac{dV_{vc}}{dt} = 0$.

\dot{A}_d es el flujo de exergía destruida o irreversibilidades que son propias de cada proceso o equipo.

Por otro lado, es importante decir que los términos $\dot{A}_e = \dot{m}_e a_{T_e}$ y $\dot{A}_s = \dot{m}_s a_{T_s}$ representan los flujos de exergía que acompañan a las corrientes másicas que ingresan o salen del volumen de control. Donde \dot{m} es el flujo masico de una corriente y a_T es la exergía especifica total de la corriente. Es preciso indicar que, el termino de exergía especifica total del flujo masico a_T , es la sumatoria de la exergía especifica física, más la exergía especifica química, más la exergía

especifica por energía cinética y potencial que presenta cada corriente. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma

$$a_T = a_{física} + a_{química} + a_{cinética} + a_{potencial} \quad Ec (9)$$

Donde el termino de $a_{física}$ se puede calcular por medio de la siguiente ecuación

$$a_f = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad Ec (10)$$

Donde h y s son la entalpia y entropía a las condiciones de temperatura y presión en que se encuentra el flujo masico. Por su parte, h_o y s_o son las entalpías y entropías de la corriente a la temperatura y presión del estado de referencia o estado muerto (Moran & Shapiro, 2004, pp. 309–360)

Por otro lado, el termino de exergía específica química $a_{química}$, para sustancias solidas se puede calcular por medio de correlaciones matemáticas que dependen de la composición química elemental de la sustancia. A su vez, si la corriente es una mezcla de sustancias gaseosas de composición química definida y se comporta como un gas ideal, su exergía química se puede calcular de la siguiente manera:

$$a_{química} = \sum y_i a_q^{\circ} + \bar{R}T_o y_i \ln y_i \quad Ec (11)$$

Donde y_i es la fracción molar de la sustancia gaseosa.

El termino a_q° es la exergía química estándar de la sustancia, la cual se registra en bibliografía. Donde, $\bar{R}T_o$ son la constante general del gas y la temperatura de referencia (Moran & Shapiro, 2.004, pp. 738–755). Las exergías químicas estándar de las sustancias involucradas en el análisis exergético, se pueden apreciar en el Apéndice C.

Después de haber definido todos los flujos de exergía que entran o salen del volumen de control, se puede calcular la exergía destruida A_d . Para un volumen de control en estado

estacionario, donde no hay transferencia de energía en forma de calor, ni realiza trabajo, se establece de la siguiente forma:

$$A_d = A_e - A_s \quad Ec (12)$$

Para finalizar esta sección, se establece que la eficiencia exergetica de un sistema se puede calcular por medio del método de pérdidas separadas o indirecto (Lozano & Valero, 1.986, p. 115), que se resume en la siguiente ecuación matemática:

$$\eta_{exer} = \left(\frac{\dot{A}_{Comb} - \dot{A}_{dt}}{\dot{A}_{Comb}} \right) \times 100\% \quad Ec (13)$$

Esta ecuación se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\eta_{exer} = 100\% - \% \dot{A}_{dt} \quad Ec (14)$$

Donde el termino \dot{A}_{Comb} representa el flujo de exergía total que posee el combustible y \dot{A}_{dt} , representa a las irreversibilidades del sistema, la exergía que acompaña a los flujos masicos de desecho y los flujos de pérdidas de exergía incontroladas y que acompaña a la transferencia de calor (Lozano & Valero, 1.986, p. 83).

2.1.5.2 Flujos de exergía Fuel y Producto. Siendo ya establecidos todos los flujos de exergía involucrados en el volumen de control, se pueden identificar el flujo de exergía *Fuel* (A_{fuel}) y el flujo de exergía *Producto* ($A_{producto}$). Donde, A_{fuel} se define como la cantidad de exergía gastada para generar un producto y $A_{producto}$ es la cantidad de exergía realmente aprovechada para generar un producto (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p. 1257). Esta forma de agrupar las corrientes de exergía es útil para la realización del análisis exergetico y análisis exergoambiental. Por último, según Lazzaretto y Tsatsaronis, se definen de la siguiente manera.

$A_{producto}$ = Es la suma de todos los valores de exergía a la salida del sistema, incluyendo la exergía de corrientes de energía generadas en el componente, mas todo el incremento de exergía

en los flujos masicos, entre la salida y entrada del componente analizado (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2.006, p. 1.260).

A_{fuel} = Es la suma de todos los valores de exergía que ingresan al componente, incluyendo los flujos de exergía de corrientes de energía suplidas al sistema, más los decrecimientos de exergía presentados en las corrientes de masa entre la entrada y salida del dispositivo, menos los incrementos de exergía entre la entrada y la salida, que no son acordes con el propósito del componente (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2.006, p. 1.260).

2.1.6 Análisis de ciclo de vida (ACV).

El ciclo de vida, según la norma colombiana ISO 14.040 DE 2.007, son las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de la materia o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final. Ahora bien, a la recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto, es lo que se conoce como *Análisis de ciclo de vida* (ICONTEC, 2.007, p. 2).

Todo análisis de ciclo de vida (ACV o LCA por sus siglas en el idioma inglés) presenta cuatro (4) fases fundamentales que son:

2.1.6.1 Definición del objetivo y el alcance. Para fijar el objetivo de un ACV se debe determinar:

- Aplicación prevista
- Las razones para realizar el estudio
- El público previsto o personas a quienes se prevé comunicar los resultados

- Si se prevé utilizar los resultados y aseveraciones comparativas que se divulgaran al público.

Por otro lado, a la hora de establecer el alcance de un ACV, es importante determinar:

- El sistema del producto a estudiar
- Las funciones del sistema del producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas a evaluar.
- La unidad funcional
- Los límites del sistema
- Los procedimientos de asignación
- Las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto
- Requisitos relativos a los datos
- Las suposiciones
- Los requisitos iniciales de calidad de los datos
- El tipo de revisión crítica, si la hay
- El tipo y formato del informe requerido para el estudio

(ICONTEC, 2.007, pp. 11–12).

2.1.6.2 Análisis de inventarios del ciclo de vida (ICV). En esta fase se efectúa la recopilación de los datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas del sistema del producto. Esta fase es un proceso iterativo. A medida que se conoce más información del sistema, se pueden encontrar nuevos requisitos o limitaciones que requerirán cambios en la toma de los datos. Dentro de esta fase del análisis se desarrollan las siguientes tareas:

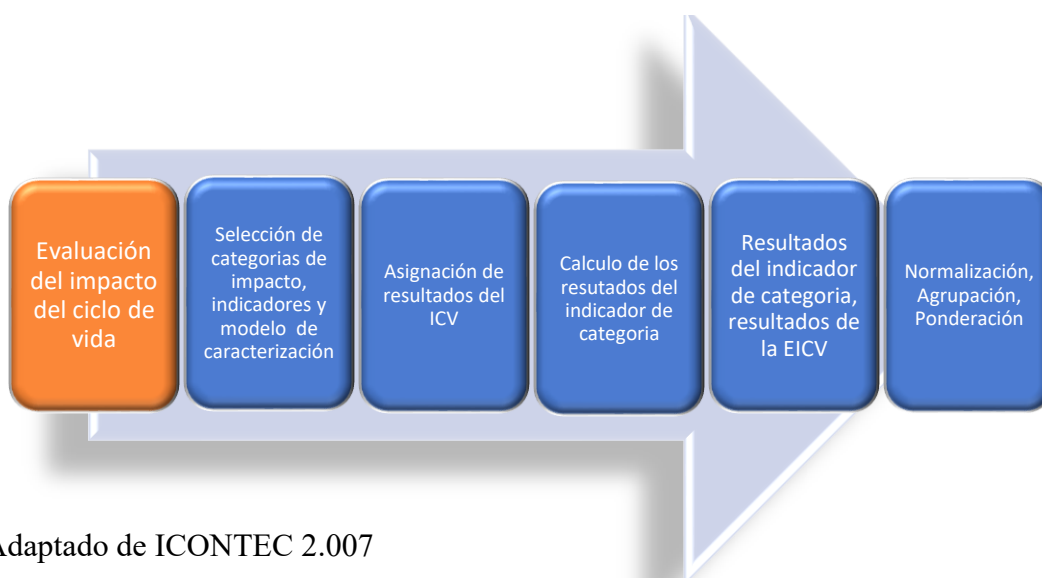
Recopilación de datos. Es imprescindible cuantificar las entradas de energía, de materias primas, entradas auxiliares, otras entradas físicas. Por otro lado, se requiere fijar datos de los flujos

de productos, coproductos y residuos. A su vez, es necesario estimar las emisiones al aire, los vertidos al agua, suelo y otros aspectos ambientales

Cálculo de datos. En esta parte del análisis se realiza la validación de los datos recopilados, la relación de los datos con los procesos unitarios, y la relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional (ICONTEC, 2.007, pp. 13–14).

2.1.6.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV). Al realizar los Análisis de Inventarios, se pueden presentar una serie categorías de impacto potenciales del sistema en estudio. Estas categorías representan las consecuencias ambientales generadas por las diferentes actividades y procesos de producción humana. El propósito de realizar la Evaluación de impacto del Ciclo de Vida es determinar cuál, de los impactos ambientales evidenciados, tiene mayor significancia para el sistema en estudio. En la figura 3, se establecen los componentes de una Evaluación Impactos de un Análisis del Ciclo de Vida.

Figura 3. Fases de un EICV



Nota: Adaptado de ICONTEC 2.007

Una de las principales debilidades del EICV, es que su evaluación solo está dirigida a aspectos ambientales que están previamente establecidas en el objetivo y alcance del ACV y por lo tanto no es una evaluación completa.

2.1.6.4 Interpretación del análisis del ciclo de vida. La fase de interpretación debe proporcionar una serie de resultados que sean coherentes con los objetivos y alcances establecidos al iniciar el ACV. Estos resultados solo indican efectos ambientales potenciales y no predicen los impactos reales en los puntos finales de categoría. La fase de Interpretación puede involucrar un proceso iterativo de revisión y de actualización del alcance de un Análisis de Ciclo de Vida (ICONTEC, 2.007, p. 17).

2.1.7 Análisis exergoambiental

El análisis exergoambiental reposa sobre la noción de que la exergía es la única forma de establecer los impactos ambientales del transporte de energía y de las ineficiencias presentes en el interior de los dispositivos industriales. Un análisis exergoambiental consiste en: a) un análisis exergético combinado con b) un Análisis de Ciclo de Vida, el cual se realiza a cada componente y corriente de entrada de sistema analizado y por último c) el cálculo de impactos ambientales asociados con cada flujo de exergía del sistema, y la exergía destruida en cada dispositivo (Morosuk T & Tsatsaronis G, 2.013, p. 3).

Balance exergoambiental. Para un volumen de control abierto a la masa, en estado estacionario, el balance exergoambiental se puede plantear de la siguiente manera:

$$\dot{B}_q + \dot{B}_w + \dot{Y}_k + \dot{B}_k^{pf} + \dot{B}_{dis} = \sum_{j=1}^n B_{j,o} - \sum_{j=1}^n B_{j,i} \quad Ec (15)$$

El segundo miembro de la ecuación representa los flujos de impacto ambiental debido a transferencia de masa en sistema analizado.

$$\sum_{j=1}^n B_{j,o} - \sum_{j=1}^n B_{j,i} \quad Ec (16)$$

Donde $\dot{B}_j = b_j \dot{A}_j$, donde \dot{A}_j es el flujo exergético y b_j representan la cantidad de impactos ambientales generados por unidad de exergía transferida y se puede calcular de la siguiente forma:

$$b_j = \frac{\dot{B}_j}{\dot{A}_j} \quad Ec. (17)$$

Por su parte, los términos \dot{B}_q y \dot{B}_w son los flujos de impacto ambiental asociados a la exergía que acompaña a la transferencia de calor y en forma de trabajo, respectivamente. Estos términos se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$\dot{B}_q = b_q \dot{A}_q = b_q \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \quad Ec (18)$$

$$\dot{B}_w = b_w \dot{W} \quad Ec (19)$$

Los términos b_q y b_w son los impactos ambientales por unidad de exergía que acompaña a el calor o trabajo, respectivamente.

\dot{Y}_k , es el flujo de impacto ambiental asociado a cada componente de la planta, debido al montaje, operación y desmonte del equipo.

Se debe destacar que, el término \dot{B}_k^{pf} es el flujo de impacto que es debido a la formación de contaminantes en el interior del equipo. Este término se presenta solo si dentro del dispositivo analizado se genera una reacción química o de combustión. Y por último, \dot{B}_{dis} es el flujo de impacto ambiental asociado con dispositivos disipativos, que solo presentan consumo de exergía

sin generar exergía **producto**. Este tipo de componentes necesitan ser asignados a otros subsistemas (Restrepo & Bazzo, 2016, p. 112).

3 Marco legal

Como toda industria, el sector palmero, debido a los impactos ambientales que genera debe ceñirse a la normatividad ambiental vigente del estado colombiano, el cual es el encargado de preservar y vigilar los recursos naturales. Dado que el gobierno nacional ha firmado una serie de protocolos internacionales, se han generado un conjunto de leyes, decretos, resoluciones y protocolos de medición con el fin de ratificar e implementar esos acuerdos internacionales. Ahora bien, todo esto genera un marco legal para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A continuación, se expondrán en forma cronológica las normas legales relacionadas con la emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI), calentamiento global, vertimiento de aguas residuales industriales y demás aspectos que son de importancia para el tema de investigación de este proyecto.

Ley 164 de 1.994, que ratifico el convenio marco de las Naciones Unidas, donde el estado colombiano se compromete a formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas orientados a mitigar el cambio climático

Ley 629 de 2.000 aprueba el protocolo de Kioto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre, el cual comprometió a los países a estabilizar las emisiones de gases efecto invernadero

Resolución 909 del 5 de junio de 2.008, por el cual se establecen las normas y estándares de emisiones admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas.

Resolución 0760 del 20 de abril de 2.010, por lo cual se adopta el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.

Ley 1.715 de 2.014 tiene como objetivos generales promover la eficiencia energética y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER). La implementación de esta ley abre oportunidades técnicas y de mercado para aumentar la producción de bioelectricidad, biogás y biocombustibles. Por otro lado, esta ley establece una serie de incentivos para el caso de proyectos de cogeneración con Biogás (UPME, 2.015, p. 96).

Resolución 0631 de 2.015, por lo cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

4 Diseño metodológico

El objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis exergoambiental que permita establecer indicadores para evaluar el desempeño ambiental de una planta generadora de vapor, que fue simulada con el software Aspen Plus V 10.0 en cuatro formas de operación distintas que son: convencional, co-firing, realizando cogeneración de energía y co-firing-cogeneración. Con el fin de alcanzar los cuatro objetivos específicos planteados en este documento, los escenarios de operación fueron analizados por medio de: balances de masa, eficiencia térmica del sistema, análisis exergético, Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del proceso y análisis exergoambiental. Para establecer el procedimiento a utilizar, se realizó una revisión bibliográfica que permitió encontrar trabajos de investigación con objetivos similares y enfoques parecidos, para así argumentar las fases metodológicas que se plantearan a continuación.

Para el desarrollo de presente propuesta de investigación se realizaron cinco fases metodológicas, que son:

4.1 Fase I. Límites del sistema

En esta primera fase se delimito el sistema de generación de vapor a estudiar, para de esta manera plantear los balances de masa, balances de energía, balance exergético y Análisis Ciclo de Vida-ACV. El sistema analizado consta de:

- Una caldera de parilla fija
- Un intercambiador de calor
- Un Sobrecalentador
- Un economizador
- Dos bombas
- Una turbina (Cuando se realiza cogeneración de energía)

En las siguientes figuras, se presentan los esquemas del sistema de generación de vapor cuando es operado en los regímenes de combustión convencional, cogeneración de energía, co-firing biomasa-biogás y co-firing-cogeneración de energía.

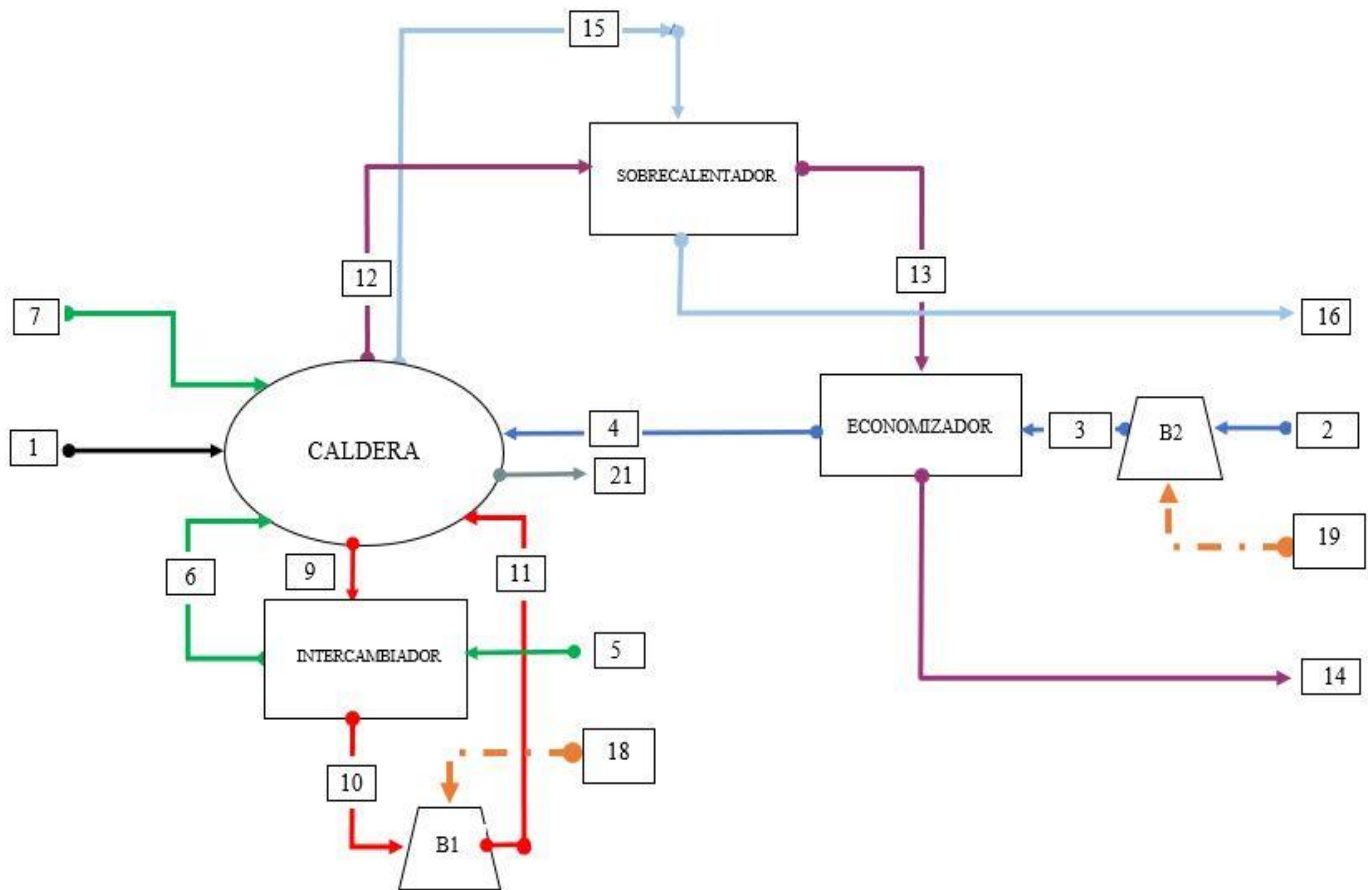
Figura 4. Sistema de generación de vapor régimen convencional

Figura 5. Sistema de generación de vapor modo co-firing

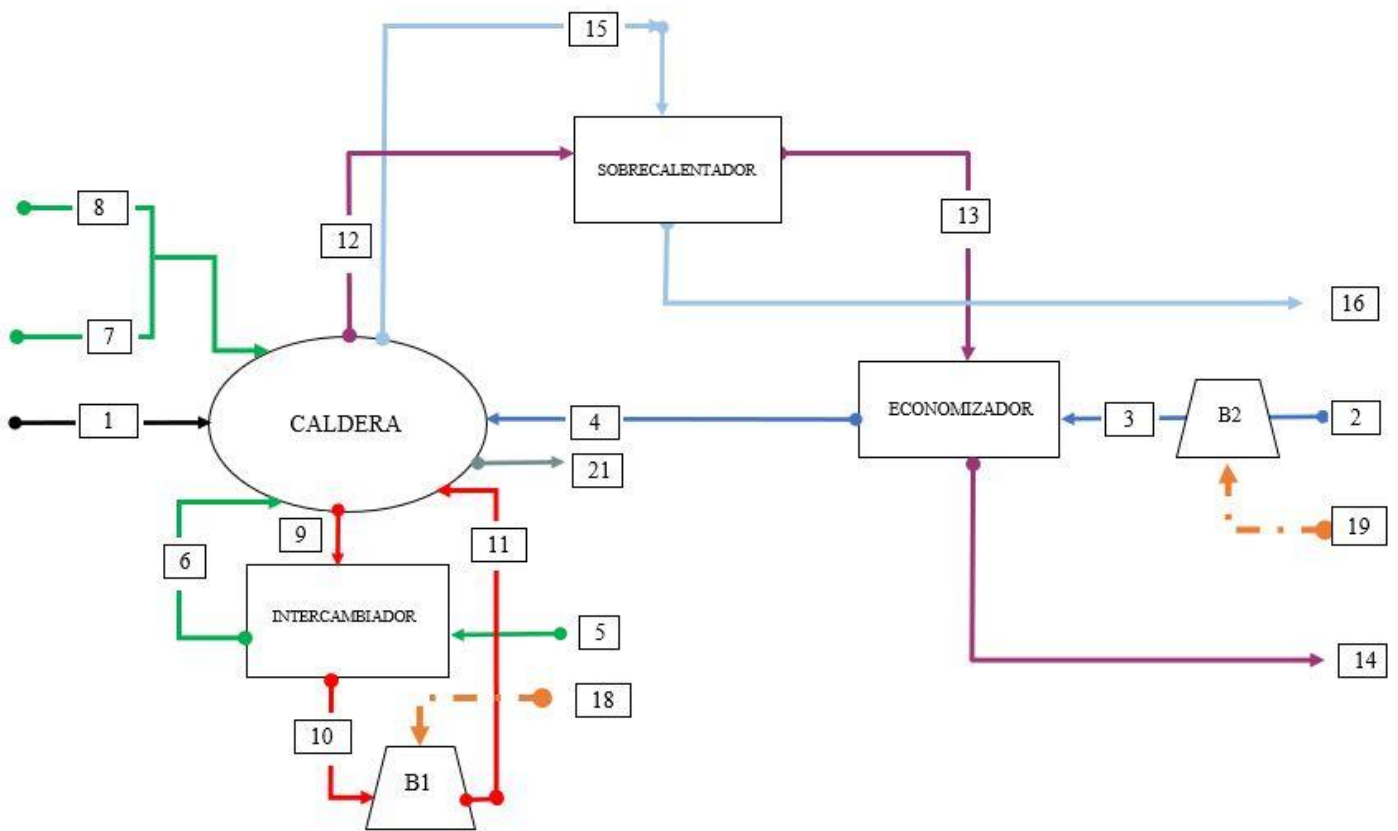


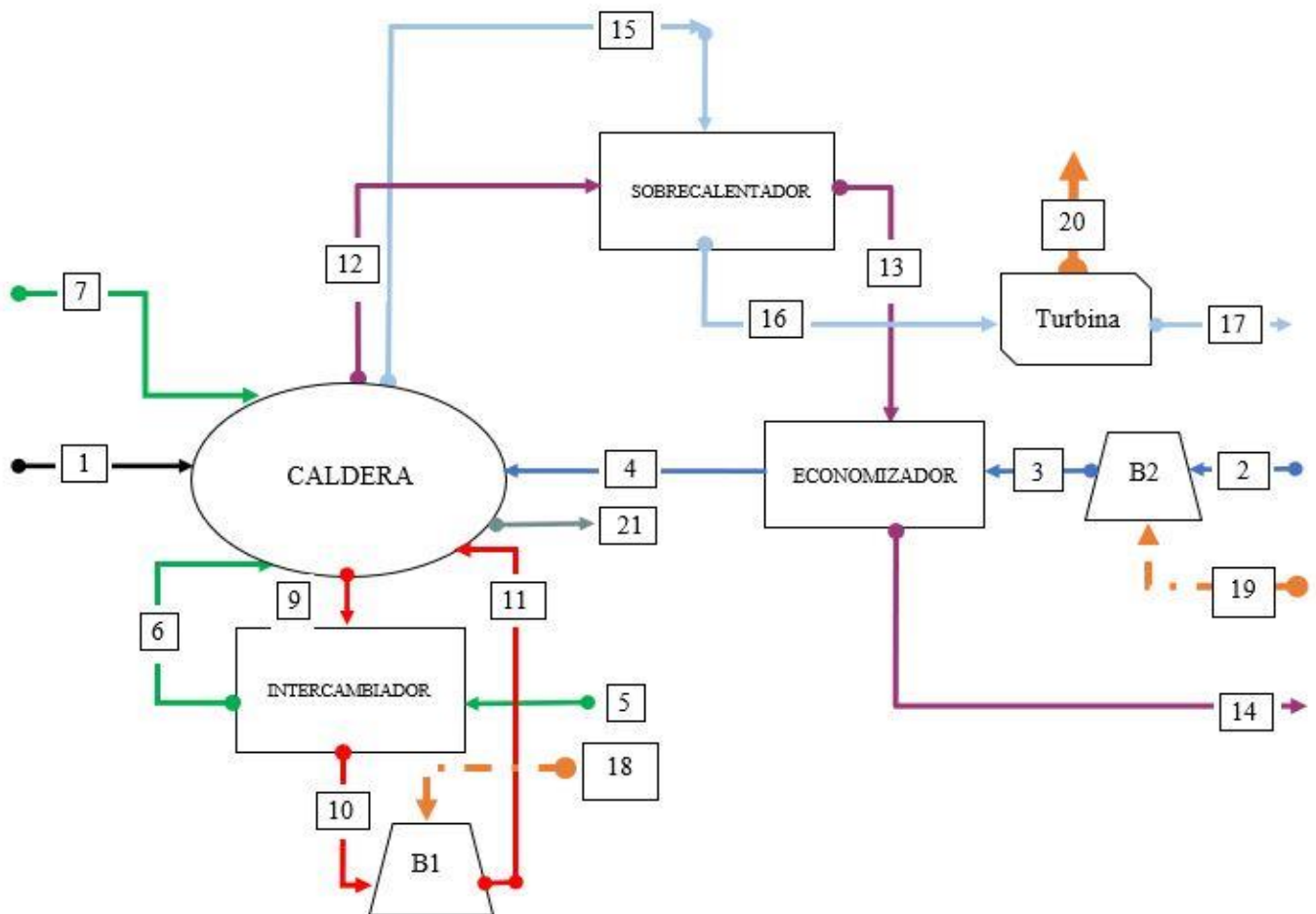
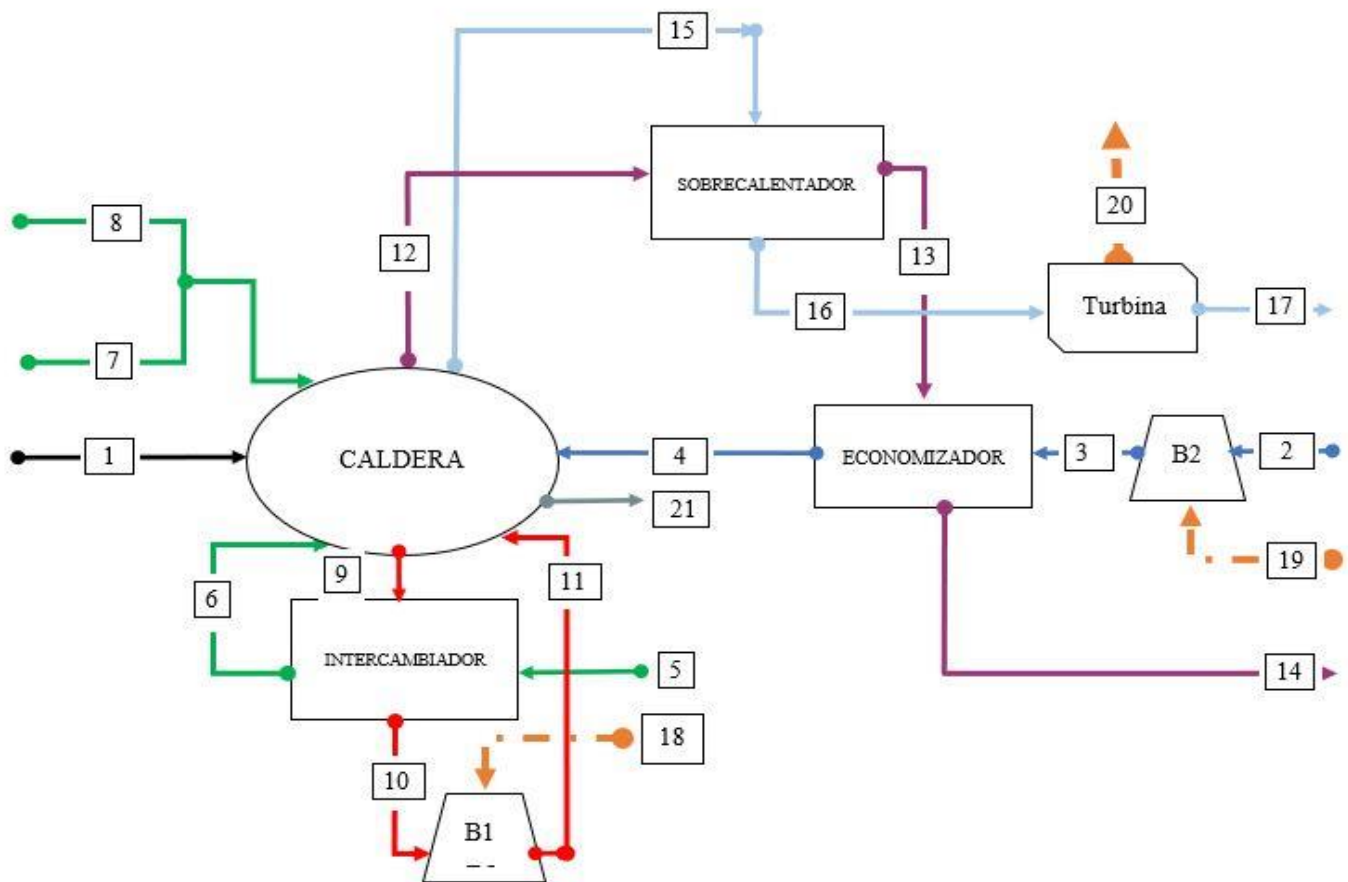
Figura 6. Sistema de generación de vapor modo cogeneración

Figura 7. Sistema de generación de vapor modo co-firing- cogeneración

Para una mejor comprensión de los gráficos, se definieron en la siguiente tabla todas las corrientes que ingresan o salen de cada uno de los equipos presentes en el sistema.

Tabla 1. *Corrientes de masa y energía del sistema de generación de vapor*

Numero	Corriente	Estado
1	Biomasa	Solido
2	Agua de alimentación al sistema	Liquido subenfriado
3	Agua de alimentación al Economizador	Liquido subenfriado
4	Agua de alimentación a la Caldera	Liquido subenfriado
5	Aire primario UGA	Gas
6	Aire primario UGA a la caldera	Gas
7	Aire secundario OFA	Gas
8	Biogás	Gas
9	Agua del sistema de refrigeración al intercambiador	Liquido subenfriado
10	Agua del sistema de refrigeración a la Bomba No1	Liquido subenfriado
11	Agua del sistema de refrigeración a la caldera	Liquido subenfriado
12	Gases de combustión rumbo al Sobrecalentador	Gas
13	Gases de combustión rumbo al Economizador	Gas
14	Gases de combustión rumbo a Chimenea	Gas
15	Vapor saturado rumbo al Sobrecalentador	Vapor saturado
16	Vapor sobrecalentado rumbo a Proceso/Turbina	Vapor sobrecalentado

Numero	Corriente	Estado
17	Vapor Rumbo a procesos	Vapor sobrecalentado/Vapor saturado
18	Potencia requerida por la Bomba 1	
19	Potencia requerida por la Bomba 2	
20	Potencia generada en Turbina	
21	Cenizas de caldera	Solido

4.2 Fase II. Simulación

Para la siguiente fase metodológica, con la ayuda de la información reportada por la empresa de aceite de palma, se estableció como flujo máximo de vapor producido a 17,31 t/h y como flujo mínimo 14,43 t/h. Posteriormente, conociendo el flujo de vapor que se requiere producir, se calcula los flujos de biomasa que ingresan a la caldera. Basados en el trabajo Carvajal Díaz (2018) se definieron los flujos masicos de biomasa y biogás, tal y como se muestra en la tabla No 2.

Tabla 2. *Flujos de biomasa que ingresan a caldera por escenario*

Modo de operación	Producción de 14,43 t/h de vapor			Producción de 17,31 t/h de vapor		
	Biomasa [kg/h]	Biogás [kg/h]	% Co-firing	Biomasa [kg/h]	Biogás [kg/h]	% Co-firing
Convencional	3090,00	0	0	3707,00	0	0
Co-firing	2310,00	741	24,2	2927,00	741	20,2
Cogeneración	3090,00	0	0	3707,00	0	0
Co-firing-Cogeneración	2310,00	741	24,2	2927,00	741	20,2

Nota: Adaptado de (Carvajal Díaz, 2018)

Quedando establecidas ya los límites del sistema y los flujos de combustibles que ingresan al sistema, se empleó la herramienta computacional ASPEN PLUS versión 10, para realizar una simulación Rating con las condiciones de operación observadas en una planta real de generación de vapor de una extractora de aceite, el cual realiza cogeneración de energía y captura de biogás de sus piscinas de oxidación. (Ver tabla No 3). Hay que remarcar, que todos los escenarios planteados en esta investigación fueron simulados con estas mismas condiciones de operación, salvo en los escenarios de convencional y co-firing, donde se planteó que el vapor se produce a 150 ° C y 3 bar de presión, porque esas son las características del vapor requerido en el proceso de extracción de aceite(Torrado Patiño, 2007, p. 9). Para mayor detalle de la simulación de ASPEN PLUS, ver Apéndice D.

Tabla 3. *Condiciones de operación del sistema de generación de vapor*

Corriente	Condición de operación
Ingreso de Biomasa	30 ° C y 1,01325 [bar]
Aire secundario OFA	30 ° C
Aire primario UGA	100 ° C
Relación aire [kg]/combustible [kg]	7,20
Agua de alimentación al sistema	105 ° C y 2 [bar]
Gases de combustión a la salida de la caldera	670 ° C
Vapor sobrecalentado para Turbina	300 ° C y 30 [bar]
Vapor para proceso cuando hay cogeneración	138,86 ° C y 3,5 [bar]
Vapor para proceso cuando no hay cogeneración	150 ° C y 3,0 [bar]

Nota: Adaptado de(Albarracín Becerra & Méndez Rangel, 2019)

Por medio de las simulaciones realizadas, se determinaron flujos masicos, las fracciones másicas y molares de las diferentes corrientes del proceso, temperaturas de los diferentes flujos de masa en cualquier punto del proceso.

4.3 Fase III. Análisis energético y exergético del sistema de generación de vapor

Para iniciar los balances térmicos y de exergía, se indica la temperatura de 25°C y 1 atm de presión como las condiciones de referencia o estado muerto. Adicional a esto, también se estableció la composición elemental de la biomasa y la composición volumétrica del biogás (Ver tablas No 4, 5, 6 y 7), que serán utilizados en los balances de energía y para establecer la exergía química de los combustibles.

Tabla 4. *Análisis elemental de biomasa empleada en la caldera del generador de vapor*

Composición Porcentual			
Elemento	Símbolo	Fibra	Cascarilla
Carbono	C	47,2 %	52,4 %
Hidrogeno	H	6,05 %	6,3 %
Oxigeno	O	36,8 %	37,3 %
Nitrógeno	N	1,4 %	0,6 %
Azufre	S	0,28 %	0,2 %

Nota: Tomados de (Halim Shah Ismail & Zahra Haddadian, 2012, p. 267).

Con la ayuda de la ecuación No 1 y 2 y la composición elemental de la tabla No 4 se estableció el Poder Calorífico Superior (PCS) y el Poder Calorífico Inferior (PCI) de la fibra y cascarilla, tal y como lo establece la siguiente tabla.

Tabla 5. Poder Calorífico Superior e Inferior del combustible de caldera.

	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
Fibra	18.001,00	17.808,71
Cascarilla	20.084, 27	19.930,38

Por otro lado, también se reporta las propiedades fisicoquímicas del biogás generado en las plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia.

Tabla 6. Propiedades del biogás generado en la industria de la palma de aceite

Propiedad	Valor
Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1,09
Poder Calorífico Inferior $\left[\frac{kJ}{m^3}\right]$	22.900

Nota: Adaptado de (Duarte Cely, 2.006, p. 17) y (Briceño Álvarez et al., 2.015, p. 49)

Tabla 7. Composición volumétrica del biogás

Componente	% Volumétrico
CH ₄	65
CO ₂	34
N ₂	1

Nota: Adaptados de datos aportados por la empresa de extracción de aceite de palma.

4.3.1 Análisis térmico del sistema

Para el desarrollo de la evaluación térmica del sistema, se asumió que la biomasa empleada como combustible en caldera, es una mezcla de 70% fibra y 30% cascarilla tal como lo estableció Halim Shah y Zahra Haddadian (2.012, p. 268). Por tal motivo, para determinar el poder calorífico de esta mezcla se emplea la siguiente expresión matemática:

$$LHV_{mezcla} = x_f LHV_f + x_c LHV_c \quad Ec (20)$$

Donde x_f y x_c representan la fracción másica de la fibra y la cascarilla en la mezcla (Halim Shah Ismail & Zahra Haddadian, 2.012, pp. 267–268) y los términos LHV_f y LHV_c representan el poder calorífico inferior de la fibra y la cascarilla respectivamente. Por consiguiente, para los escenarios convencional y de cogeneración, la energía que ingresa al sistema se calculó por medio de la siguiente expresión matemática.

$$\dot{E}_{combustible} = \dot{m}_{biomasa} * LHV_{mezcla} \quad Ec (21)$$

Para los escenarios co-firing y co-firing-cogeneración, cuando la caldera realiza la combustión de biomasa y biogás, siempre se consideró el máximo flujo masico del subproducto gaseoso reportado por la empresa extractora de aceite, el cual fue de 741 kg/h. Es por esta razón, que el porcentaje de biogás en la masa total del combustible es del 24,2% y del 20,2%, cuando hay producción de 14,43 t/h y 17,31 t/h de vapor, respectivamente.

Por su parte, para el cálculo de la energía que ingresa por el combustible al generador de vapor con implementación de tecnología Co-firing, se empleó por medio de la siguiente ecuación.

$$\dot{E}_{Combustible} = \dot{m}_{biomasa} LHV_{mezcla} + \dot{m}_{biogás} LHV_{biogas} \quad Ec (22)$$

Donde $\dot{m}_{biomasa}$ y $\dot{m}_{biogás}$ son los flujos masicos de biomasa y biogás respectivamente.

Habiendo establecido en la tabla No 3, las condiciones de presión y temperatura para el agua de alimentación y el vapor generado por el sistema en todos los escenarios, se pudo establecer las entalpías para cada una de estas corrientes y de paso, el flujo de energía aprovechado por el fluido.

Se debe aclarar que, la planta presenta perdidas por transferencia de calor e inevitables que se asume que se presentan solo en la caldera del sistema (Lozano & Valero, 1.986, p. 115). Dichas perdidas, no pueden ser calculadas debido a que se desconocen datos importantes del sistema de

generación vapor, tales como materiales, dimensiones, áreas y volúmenes de los equipos. Es por todo lo anterior, que se empleó la ecuación No 3 del método directo para el cálculo de la eficiencia térmica.

4.3.2 Análisis exergético

Es preciso decir que, el único lugar donde se realiza una reacción química en el sistema de generación de vapor es en la caldera. Por tal motivo, se establecieron las exergías físicas y químicas del flujo del combustible, del aire que ingresan a la caldera, al igual que al agua de alimentación, al vapor generado y a los gases de combustión.

Por consiguiente, dado que la biomasa empleada como combustible no presenta una fórmula molecular definida, el valor de su exergía química fue tomado del dato calculado y reportado por Song y colaboradores empleando la ecuación Szargut. De esta manera se establece que la exergía química de la biomasa proveniente de la extracción de aceite de palma es de 19.815 kJ/kg (Song et al., 2011, p. 9.762).

Por otro lado, se asumió que el biogás y los gases de combustión presenta un comportamiento de gas ideal, por tal razón se empleó la ecuación No 11 para determinar su exergía química. Para ello, se empleó la exergía química estándar de los componentes de las corrientes gaseosas, que es reportada en literatura (Ver Apéndice C) y la composición molar de estas mezclas, establecida por el software Aspen PLUS V.10 y en la tabla No 7.

Se debe mencionar que, para el desarrollo del análisis exergético se configuró en el software de Aspen PLUS V.10 las condiciones de temperatura y presión de referencia o estado muerto, para realizar los cálculos de exergía física específica de cada corriente que ingresa y sale del sistema y de cada uno de los componentes que lo constituyen. Fue de esta manera, que se

estableció la exergía física de las corrientes de aire, agua de alimentación, flujo de vapor y gases de combustión en su paso por la planta de generación de vapor.

También es importante decir, que una de las corrientes de salida en el generador de vapor son las Cenizas. Para el cálculo del flujo de exergía física específica en dicha corriente, se emplea la siguiente expresión matemática reportada por Lozano y Valero

$$a_{Cenizas}(t) = \int_{t_0}^t C_{p,z}(t) \times \left(1 - \frac{t_0}{t + 273,15}\right) dt \quad Ec (23)$$

Donde el $C_{p,z}(T)$ se calcula por medio de la correlación de Voskoboinikov para temperatura inferiores a 1.350 °C

$$C_{p,z}(t) = 0,169 + \left[2,01 - 0,17 \times \left(1 - \frac{CaO}{\Sigma}\right)\right] 10^{-4}T - 0,277 * 10^{-6}T^2 + 0,139 * 10^{-9}T^3$$

(Lozano & Valero, 1.986, p. 118).

Donde el flujo de exergía que acompaña a las cenizas se calcula de la siguiente forma:

$$A_{Cenizas} = \dot{m}_{Cenizas} * a_{Cenizas} \quad Ec (24)$$

Por otra parte, para determinar las irreversibilidades en cada elemento del sistema de generación de vapor se determinó los flujos de exergía que ingresan (A_e) y salen (A_s) del componente analizado y se determina el termino A_d utilizando la ecuación No 12, pero para el caso particular de la caldera, donde según Lozano y Valero se pueden asumir perdidas de exergía por transferencia de energía en forma de calor e incontroladas (Lozano & Valero, 1986, p. 120), se estableció la siguiente expresión matemática

$$A_d = A_e - A_s - A_Q - A_u \quad Ec (25)$$

Donde

A_Q y A_u son los flujos de exergía por transferencia de calor a los alrededores y por causas incontroladas, respectivamente . Pero, debido a la dificultad para calcular estos flujos dado a que

se requieren datos más exhaustivos de la caldera, el valor de la exergía destruida en caldera A_{dc} se define de la siguiente forma

$$A_{dc} = A_d + A_Q + A_u \quad Ec \quad (26)$$

Reescribiendo la expresión inicial tenemos:

$$A_{dc} = A_e - A_s \quad Ec \quad (27)$$

Ahora, por medio de la tabla No 8, se definen los flujos de exergía de entrada (A_e) y exergía de salida (A_s) para cada uno de los componentes del generador de vapor. Para una fácil identificación de los flujos de exergía asociados a las diferentes corrientes másicas y de energía, se emplearon como subíndices los números de las corrientes previamente definidas en la tabla No 1.

Tabla 8. *Flujos de exergía de entrada y de salida por componentes*

Componente	Exergía Entrada [A_e]	Exergía Salida [A_s]
Caldera en régimen Convencional o Cogeneración	$A_1^T + A_6^T + A_7^T + A_4^T + A_{11}^T$	$A_{15}^T + A_9^T + A_{12}^T + A_{21}^T$
Caldera en régimen Co-firing o Co-firing-Cogeneración	$A_1^T + A_6^T + A_7^T + A_8^T + A_4^T + A_{11}^T$	$A_{15}^T + A_9^T + A_{12}^T + A_{21}^T$
Intercambiador de calor	$A_9^F + A_5^F$	$A_6^F + A_{10}^F$
Bomba 2	$W_{18} + A_{10}^F$	A_{11}^F
Sobrecalentador	$A_{12}^F + A_{15}^F$	$A_{16}^F + A_{13}^F$
Economizador	$A_{13}^F + A_3^F$	$A_4^F + A_{14}^F$
Bomba 1	$W_{19} + A_2^F$	A_3^F
Turbina	A_{16}^F	$W_{20} + A_{17}^F$

*T es componente total de la exergía de la corriente, en ella se considera el componente físico y químico del flujo de exergía

** F representa solo el componente físico del flujo de exergía.

Se debe aclarar que, para calcular el flujo de exergía de los gases de combustión rumbo al Sobrecalentador calentador A_{12}^T , se utilizó la ecuación No 11, las exergías químicas estándar de las sustancias que constituyen los gases de combustión y las fracciones molares de los mismos en la mezcla. A continuación, se presentan en la tabla No 9 las fracciones molares en la corriente No 12 del sistema

Tabla 9. Fracciones molares de los gases de combustión en la corriente No 12 del proceso

Sustancia	Convencional y Cogeneración con producción de 14,34 t/h y 17,31 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 14,43 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 17,31 t/h de vapor
N2	0,73	0,70	0,71
O2	0,02	1,04E-11	3,38E-11
CO2	0,14	0,12	0,13
H2O	0,11	0,14	0,13
SO2	3,13E-04	2,30E-04	2,43E-04
SO3	2,93E-06	5,63E-11	1,07E-10
NO2	3,72E-07	2,49E-16	8,17E-16
NO	1,75E-04	4,48E-09	8,14E-09
S	1,83E-17	1,98E-08	6,39E-09
H2	2,59E-07	1,24E-02	6,77E-03
Ar	0,01	0,01	0,01
CH4	0,00	7,76E-12	7,60E-13
C	0,00	0,00	0,00
CO	6,91E-07	2,27E-02	1,34E-02
Total	1,00	1,00	1,00

Nota: Adaptado de Aspen PLUS V10.

Habiendo ya establecido los flujos de exergía destruida en la caldera y demás elementos del sistema, al igual que las pérdidas de exergía por gases de combustión y cenizas, ahora se puede establecer el termino exergía total destruida \dot{A}_{dt} como:

$$\dot{A}_{dt} = A_{dc} + \sum A_d + A_{gases} + A_{Cenizas} \quad Ec (28)$$

Y se utilizó la ecuación No 13 para el cálculo de la eficiencia exergética de la planta de vapor.

Para terminar esta parte de la metodología, se hizo un análisis a todo el sistema y se definieron los flujos de exergía que se agruparon como flujos de exergía Fuel \dot{A}_f y Producto \dot{A}_p por medio de la tabla No 10,

Tabla 10. Definición de los flujos de exergía Fuel y Producto

Escenario	$[\dot{A}_f]$	$[\dot{A}_p]$
Convencional	$\dot{A}_1 + \dot{A}_5 + \dot{A}_7 + \dot{A}_{18} + \dot{A}_{19}$	$\dot{A}_{16} - \dot{A}_2$
Co-firing	$\dot{A}_1 + \dot{A}_8 + \dot{A}_5 + \dot{A}_7 + \dot{A}_{18} + \dot{A}_{19}$	$\dot{A}_{16} - \dot{A}_2$
Cogeneración	$\dot{A}_1 + \dot{A}_5 + \dot{A}_7 + \dot{A}_{18} + \dot{A}_{19}$	$\dot{A}_{17} - \dot{A}_2 + \dot{A}_{20}$
Co-firing- Cogeneración	$\dot{A}_1 + \dot{A}_8 + \dot{A}_5 + \dot{A}_7 + \dot{A}_{18} + \dot{A}_{19}$	$\dot{A}_{17} - \dot{A}_2 + \dot{A}_{20}$

4.4 Fase IV. Aplicación NTC ISO 14040/14044 del 2007- ACV.

En esta sección se especifica los ítems relevantes al alcance, objetivo, límites, funcionalidad y reglas de exclusiones que se tuvieron presentes en este estudio.

4.4.1 Definición del objetivo y alcance del estudio

Se identificó y evaluó los impactos ambientales potenciales, asociados a la obtención de una tonelada de vapor proveniente de un sistema de generación de vapor de una planta de aceite de palma africana, mediante la utilización del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), dado a que se pretende realizar una comparación ambiental cuantitativa entre los diferentes regímenes de operación del sistema objeto de estudio. La tonelada de vapor se toma como unidad funcional para el análisis ACV, debido a que es el único producto de proceso común en los cuatro escenarios.

El alcance ACV incluyó el tributo de la puerta a puerta, pues considera el ingreso de la biomasa y los procesos de generación de vapor de forma convencional, con cogeneración de energía, realizando co-firing biomasa-biogás y co-firing-cogeneración, teniendo en cuenta los impactos ambientales asociados al consumo de materias primas (Biomasa, biogás y agua industrial) y consumo de servicios industriales (electricidad, aire), necesarios en el proceso mencionado. Durante la realización de la simulación en ASPEN PLUS se consideraron variables de suposición y otros aspectos excluyentes de la evaluación ambiental, que serán la base para definir las reglas de exclusión de la metodología ACV.

4.4.2 Selección de software y método a evaluar

Es importante decir que, luego de identificar los parámetros anteriormente descritos, se seleccionó el software y el método a utilizar para el cálculo de las emisiones a partir del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) creado con anterioridad. Para la evaluación se dio uso al software SimaPro versión 9.0, lo cual permitió hacer la cuantificación de los impactos ambientales que se generaron en todos los escenarios del proceso. Por medio de la revisión del estado del arte en cuanto a la

metodología exergoambiental, se determinó que el método de evaluación de impacto a emplearse en este documento es ECOINDICADOR-99 (Ver más detalle Apéndice E)

Acorde al método de evaluación, se seleccionaron las categorías de impacto ambiental de acuerdo con la categoría de importancia, de puntuación media “(mid-point) y puntuación final (end-point)” que permitan englobar la totalidad de los impactos ambientales en un “score” o indicador único, para finalmente analizar los impactos de mayor sensibilidad ambiental en el ciclo de vida del producto de estudio

4.4.3 Construcción de los perfiles medioambientales

Luego de ingresar los balances de masas, energía y eco-balance al software (SimaPro 9.0), se procedió a la activación del método de evaluación como la creación del árbol de procesos internos del software, para su posterior corrida y obtención de resultados. Los resultados se organizarán según el grado de categorización: aprovechamiento de recursos por procesos, grado de incidencia de los procesos con relación a las categorías evaluadas y contribución ambiental global del proceso, entorno a las cargas ambientales analizadas.

4.4.4 Análisis de resultados de ACV

Considerando la evaluación de los impactos ambientales se analizaron los resultados del ACV del proceso objeto de estudio, para el cual se realizó:

- Análisis de contribución ambiental por procesos y subprocesos.
- Análisis de evaluación ambiental para las categorías de impacto.

4.5 Fase V. Análisis exergoambiental y obtención de indicadores

Para iniciar esta sección se debe aclarar que, el análisis exergoambiental se realizó de forma global a toda la planta de generación de vapor, en sus diferentes escenarios. Debido a que la planta se analiza cómo un *solo elemento* no se tuvo en cuenta el término \dot{B}_{dis} de la ecuación No 15. Por otro lado, dado a que la exergía que acompaña a la transferencia de calor se acuño en el término A_{dc} y, a su vez, este valor se contabilizó en las pérdidas totales de exergía del sistema A_{dt} , el término \dot{B}_q tampoco se tuvo en cuenta en la ecuación de Balance exergoambiental. Por otro lado, para el cálculo del término \dot{B}_k^{pf} se tuvo en cuenta el flujo de exergía que acompaña a los gases de combustión y el Eco-indicador reportado por SimaPro para la misma masa gaseosa.

4.5.1 Obtención de flujos de impactos ambientales

Para desarrollar esta parte de la metodología, se tomaron los impactos ambientales específicos por unidad funcional arrojados por el ACV, (b_{ACV}) de cada uno de los flujos de masa o energía involucrados en el sistema evaluado y por medio de relaciones matemáticas fueron transformados a impactos ambientales específicos por unidad de exergía (b_E). Luego de esto, el producto de los flujos de exergía de cada corriente del sistema y los impactos ambientales específicos por unidad de exergía, nos permiten obtener los flujos de impacto ambiental de cada corriente de masa o energía \dot{B}_k .

Hay que recalcar que, ya estando definidos los flujos de impactos ambientales para cada corriente que ingresa o sale del sistema, basados en los conceptos planteados por Tsatsaronis, se establecieron los flujos de impactos ambientales Producto y Fuel (\dot{B}_p, \dot{B}_f), tal y como lo establece la tabla No 6

Tabla 11. Definición de los flujos de impacto exergoambientales Fuel y Producto

Escenario	$[\dot{B}_f]$	$[\dot{B}_p]$
Convencional	$\dot{B}_1 + \dot{B}_5 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19}$	$\dot{B}_{16} - \dot{B}_2$
Co-firing	$\dot{B}_1 + \dot{B}_8 + \dot{B}_5 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19}$	$\dot{B}_{16} - \dot{B}_2$
Cogeneración	$\dot{B}_1 + \dot{B}_5 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19}$	$\dot{B}_{17} - \dot{B}_2 + \dot{B}_{20}$
Co-firing-Cogeneración	$\dot{B}_1 + \dot{B}_8 + \dot{B}_5 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19}$	$\dot{B}_{17} - \dot{B}_2 + \dot{B}_{20}$

4.5.2 Flujos de impacto ambiental asociados a los componentes del sistema \dot{Y}_k

Por otra parte, el termino \dot{Y}_k solo se determinó para la caldera y la turbina debido a importancia de estos elementos en el sistema de generación de vapor. Para ello, se consultó en la bibliografía existente el valor de \dot{Y}_k de quipos con características similares a los de la planta objeto de estudio y por medio de un factor de escalamiento se logró establecer el flujo de impactos ambientales asociados a estos componentes.

El factor de escalamiento, basado en la *Rule of six-tenths* (W. Whitesides, 2.012, p. 3) fue el siguiente:

$$\dot{Y}_A = \dot{Y}_B * \left(\frac{S_A}{S_B}\right)^{0,6} \quad Ec (29)$$

Donde: \dot{Y}_B es el valor de los impactos ambientales asociados al equipo, encontrado en la literatura

S_B = Propiedad del equipo encontrado en literatura

S_A =Propiedad del equipo de la planta analizada.

4.5.3 Indicadores exergoambientales

Como resultado del balance exergoambiental, se definieron los indicadores y variables a determinar para cada uno de los escenarios de la planta de generación de vapor.

En primer lugar, se calculó el coeficiente de desempeño exergoambiental η_B que es la relación de los flujos de impactos exergoambientales Producto y Fuel del proceso (ver tabla No 11). Este indicador es propuesto por los autores del presente documento, y puede ser empleado para evaluar y comparar el desempeño entre sistemas de producción, porque establece un valor adimensional de la relación de impactos ambientales que ingresan al sistema con los que se generan. Donde un valor negativo implica que el proceso reduce los impactos ambientales Producto a una proporción dada, mientras que un valor positivo del mismo coeficiente, indica una generación de impactos ambientales a partir de los impactos Fuel

Otro parámetro que se determinó fue el \dot{B}_D , el cual asocia el flujo de impactos ambientales que ingresan al sistema \dot{B}_f con las irreversibilidades que se generan en el proceso, y se calcula como el producto de los impactos específicos promedio por unidad de exergía fuel b_f y la a exergía destruida en el sistema (ver tabla No 11) (Meyer et al., 2009, p. 80).

Por último, se calculó el flujo de impactos ambientales totales (\dot{B}_{Total}) generados por el sistema, el cual tiene en cuenta los flujos de impactos ambientales por destrucción de exergía (\dot{B}_D), por formación interna de contaminantes (\dot{B}^{pf}) y por el ciclo de vida de los componentes del sistema (\dot{Y}) (ver tabla No 11). Este parámetro se empleó para determinar la relevancia ambiental de la planta (Cavalcanti et al., 2020b, p. 5).

Tabla 12. *Indicadores y variables exergoambientales*

Indicador o Variable	Símbolo	Ecuación
Coeficiente de desempeño exergoambiental	η_B	$\eta_B = \frac{\dot{B}_p}{\dot{B}_f} Ec (30)$
Flujo de impacto ambiental asociado a la exergía destruida	\dot{B}_D	$\dot{B}_D = b_f \times A_{at} Ec (31)$

Indicador o Variable	Símbolo	Ecuación
Flujo de impacto ambiental total de sistema	\dot{B}_{TOTAL}	$\dot{B}_{TOTAL} = \dot{B}_D + \dot{B}^{pf} + \dot{Y}$ Ec (32)

Nota: Adaptado de (Meyer et al., 2.009, p. 81; Restrepo & Bazzo, 2.016, p. 113)

5 Resultados

5.1 Resultados objetivo No 1.

Una herramienta fundamental para para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue el uso del software Aspen PLUS V.10 el cual, bajo las condiciones ya establecidas en las tablas No 2, 3 y la configuración correcta de los dispositivos adecuados, nos arrojó información valiosa que fue la base para los análisis energéticos y exergéticos del sistema de generación de vapor en sus diferentes formas de operación. Por medio de la tabla No 13, se presentan las variables de entrada y de salida que nos brinda Aspen PLUS junto su importancia.

Tabla 13. Variables de ingreso y salida del software Aspen PLUS

Software	VARIABLES DE INGRESO	VARIABLES DE SALIDA	Importancia
Aspen PLUS	Flujos masicos de combustibles, aire y agua	Flujos masicos de vapor, gases de combustión y cenizas	Realización de balances de masa
	Condiciones de iniciales depresión y temperatura de las corrientes que ingresan al sistema	Fracciones molares y másicas de los gases de combustión	Determinación exergía química de los gases de combustión
	Temperatura y Presión de referencia para establecer el estado muerto de referencia	Temperaturas y presión de los gases de combustión y vapor producido en cada punto del sistema	Eficiencia térmica
	Análisis elemental de la Biomasa y composición porcentual en volumen del Biogás y aire	Exergía Física de cada corriente a la entrada y salida de cada dispositivo del sistema	Balance exergético y calculo de las irreversibilidades

Software	Variables de ingreso	Variables de salida	Importancia de cada dispositivo del sistema
	Poder calorífico de la Biomasa	Flujos de energía requeridos y producidos en Bombas y Turbinas	

A continuación, se presentan los resultados del primer objetivo planteado para este trabajo de investigación, el cual dice: *Determinar la eficiencia térmica de un sistema de generación de vapor realizando combustión convencional, co-firing biomasa-biogás, cogeneración de energía y realizando co-firing con cogeneración.*

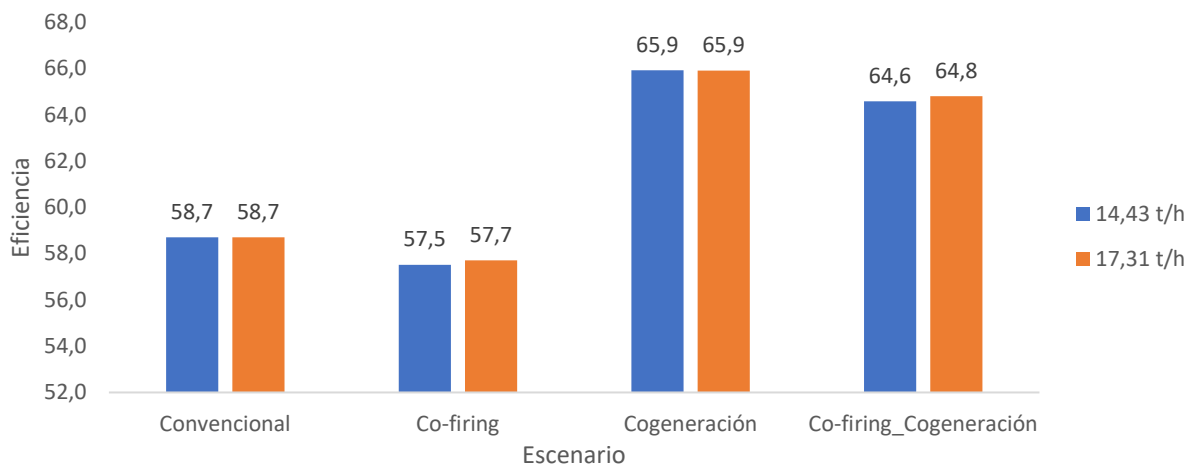
Por medio del uso de las ecuaciones No1 a la ecuación No 5, las características del sistema, los datos reportados sobre la biomasa y el biogás y la información obtenida de las simulaciones, se pudo cuantificar las eficiencias del generador de vapor en sus diferentes escenarios de operación. Dichos resultados se pueden apreciar en la tabla No 14

Tabla 14. *Eficiencia térmica del sistema*

	4,008 [kg/s] (14,43 t/h)				4,81 [kg/s] (17,31 t/h)			
	Convencional	Co-firing	Cogeneración	Co-firing-Cogeneración	Convencional	Co-firing	Cogeneración	Co-firing-Cogeneración
Flujo masico de Biomasa [kg/s]	0,858	0,642	0,858	0,642	1,03	0,813	1,03	0,813
Flujo masico de Biogás [kg/s]	0	0,206	0	0,206	0	0,206	0	0,206
Fibra (PCI) [kJ/kg]	17.808,7	17.808,7	17.808,7	17.808,7	17.808,7	17.808,7	17.808,7	17.808,7
Cuesco (PCI) [kJ/kg]	19.930,4	19.930,4	19.930,4	19.930,4	19.930,4	19.930,4	19.930,4	19.930,4
Biogás (PCI) [kJ/kg]	0	21.009,2	0	21.009,2	0	21.009,2	0	21.009,2
Calor sensible del combustible [kJ/s]	13,7	12,6	13,7	12,6	16,5	15,3	16,5	15,3
Flujo de energía por combustible [kJ/s]	15.845,9	16.172,6	15.845,9	16.172,6	19.009,9	19.336,7	19.009,9	19.336,7
Flujo masico de agua de alimentación [kg/s]	4,008	4,008	4,008	4,008	4,81	4,81	4,81	4,81
Flujo de vapor generado [kg/s]	4,008	4,008	4,008	4,008	4,81	4,81	4,81	4,81
Entalpia del de agua de alimentación [kJ/kg]	440,3	440,3	440,3	440,3	440,3	440,3	440,3	440,3
Entalpia del flujo de vapor generado [kJ/kg]	2.761,2	2.761,2	2.698,02	2.698,02	2.761,2	2.761,2	2.698,02	2.698,02
Flujo de energía aprovechado [kJ/kg]	9.302,0	9.302,0	9.049,5	9.049,5	11.159,4	11.159,4	10.855,6	10.855,6
Energía producida	0	0	1.395,10	1.395,095	0	0	1.673,5	1.673,5
Eficiencia térmica	58,7	57,5	65,9	64,6	58,7	57,7	65,9	64,8

A continuación, en la figura No 8 se grafican las eficiencias energéticas para cada escenario del sistema de generación de vapor, según la cantidad de vapor generado.

Figura 8. Eficiencia térmica con producción 14,43 t/h y 17,31 t/h de vapor



5.1.1 Análisis de resultados

Los balances de energía en la planta de generación de vapor, basados en datos obtenidos con la simulación de Aspen PLUS, evidencian que por escenario, el sistema presenta un comportamiento térmico similar, cuando realiza una producción de vapor de 14,43 t/h o 17,31 t/h. Por lo tanto, la variable flujo de vapor generado, no es relevante a la hora de establecer la eficiencia térmica de la planta.

Otro aspecto a destacar es, que las eficiencias calculadas en el sistema de generación de vapor se encuentran en un rango que va desde 57,5 % en forma de operación co-firing, hasta el 65,9% cuando la planta está realiza Cogeneración de energía. Aunque los valores son relativamente bajos, son coherentes a lo reportado por Husain et al (2003, p. 121) , el cual evaluó de forma experimental, la eficiencia térmica a siete (7) sistemas de generación de vapor de siete plantas de beneficio de aceite de palma diferentes, en Malasia. Los valores de eficiencia reportados se

encuentran en el rango de 61,4 al 83,1 %. Por último, se comparó las eficiencias del sistema de generación de vapor en los diferentes regímenes de operación y se observó que las más bajas eficiencias térmicas se registraron cuando se opera en los regímenes de co-firing y co-firing-cogeneración, estando aproximadamente un punto porcentual por debajo de las eficiencias reportadas por los escenarios convencional y cogeneración. Este hallazgo es similar a lo reportado por la EPRI y Restrepo (Hughes, 1.999, p. 8; Restrepo Victoria, 2.012, p. 132), los cuales establecen que sistemas co-firing carbón-biomasa presentan una leve reducción de su eficiencia térmica en la caldera. Según Van Loo y Koppejan, las eficiencias térmicas de los generadores de vapor operados en régimen Co-firing Carbón-Biomasa, presentan una pérdida de eficiencia en caldera modesta cuando la relación de Co-firing entre combustibles se encuentra en un rango del 3% al 5% en base másica (2.008, p. 235).

5.2 Resultados objetivo No 2

De aquí en adelante, se presentan los resultados del segundo objetivo planteado en el trabajo de investigación, el cual dice: *Identificar por medio de un análisis exergetico, las partes críticas del sistema que generan mayor irreversibilidad en el proceso.*

Teniendo en cuenta la información suministrada por el software Aspen PLUS V.10, y los procedimientos planteados en la sección 4.3.2 de la sección metodológica, se calcula la exergía física y química de todas las corrientes másicas y de energía en cualquier punto del sistema. Por consiguiente, por medio de la ecuación No 6 a la 14, y de la ecuación No23 a la 27 se calcularon las eficiencias exergeticas del sistema en sus diferentes formas de operación, las irreversibilidades en cada componente y la exergía Fuel y Producto, cuando presenta una producción de vapor de 14,43 t/h y 17,31 t/h.

Tabla 15. Eficiencia exergética sistema. Producción de 14,43 t/h de vapor

	Convencional		Cogeneración		Co-firing		Co-firing-Cogeneración	
Exergía total del Combustible [kW]	17.008,37		17.008,37		17.116,54		17.116,54	
Dispositivo o Corriente	Irreversibilidades [A_d] [kW]	%	Irreversibilidades [A_d] [kW]	%	Irreversibilidades [A_d] [kW]	%	Irreversibilidades [A_d] [kW]	%
Intercambiador	33,75	0,20	33,75	0,20	33,63	0,20	33,63	0,20
Bomba 2	0,46	0,00	0,46	0,00	0,46	0,00	0,46	0,00
Sobrecalentador	28,07	0,17	45,32	0,27	39,87	0,23	45,56	0,27
Economizador	86,31	0,51	65,08	0,38	86,58	0,51	65,41	0,38
Bomba 1	0,55	0,00	15,47	0,09	0,55	0,00	15,47	0,09
Turbina	0,00	0,00	318,75	1,87	0,00	0,00	318,75	1,86
	Irreversibilidades [A_{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A_{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A_{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A_{dc}] [kW]	%
Caldera	10.964,81	64,47	9.409,32	55,32	11.656,53	68,10	10.112,55	59,08
	Perdidas	%	Perdidas	%	Perdidas	%	Perdidas	%
A 21	15,62	0,09	15,62	0,09	11,68	0,07	11,68	0,07
A 14	1.495,80	8,79	1.321,85	7,77	904,00	5,28	730,04	4,27
Total perdidas \dot{A}_{dt} [kW]	12.625,38	74,23	11.225,62	66,00	12.733,30	74,39	11.333,54	66,21
Eficiencia Exergética [%]		25,77		34,00		25,61		33,79
\dot{A}_f	17.067,40		17.086,21		17.174,85		17.193,66	
\dot{A}_p	4.406,59		5.825,16		4.406,59		5.825,16	

Tabla 16. Eficiencia exergetica. Producción de 17.31 t/h de vapor

	Convencional		Cogeneración		Co-firing		Co-firing-Cogeneración	
Exergía total del Combustible [kW]	20.404,54		20.404,54		20.512,71		20.512,71	
Dispositivo o Corriente	Irreversibilidades [A _d] [kW]	%	Irreversibilidades [A _d] [kW]	%	Irreversibilidades [A _d] [kW]	%	Irreversibilidades [A _d] [kW]	%
Intercambiador	40,49	0,20	40,49	0,20	40,50	0,20	40,50	0,20
Bomba 2	0,55	0,00	1,12	0,01	0,55	0,00	0,55	0,00
Sobrecalentador	47,64	0,23	54,37	0,27	47,86	0,23	54,75	0,27
Economizador	103,55	0,51	76,13	0,37	103,92	0,51	78,60	0,38
Bomba 1	0,66	0,00	22,17	0,11	0,66	0,00	18,56	0,09
Turbina	0,00	0,00	382,36	1,87	0,00	0,00	382,36	1,86
	Irreversibilidades [A _{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A _{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A _{dc}] [kW]	%	Irreversibilidades [A _{dc}] [kW]	%
Caldera	13.140,65	64,40	11.288,79	55,32	13.931,45	67,92	12.079,29	58,89
	Perdidas	%	Perdidas	%	Perdidas o	%	Perdidas o	%
A 21	18,74	0,09	18,74	0,09	14,80	0,07	14,80	0,07
A 14	1.794,49	8,79	1.589,55	7,79	1.115,29	5,44	906,48	4,42
Total pérdidas \dot{A}_{dt} [kW]	15.146,77	74,23	13.473,73	66,03	15.255,03	74,37	13.575,90	66,18
Eficiencia [%]		25,77		33,97		25,63		33,82
\dot{A}_f	20.475,36		20.504,01		20.583,65		20.606,21	
\dot{A}_p	5.286,08		6.987,77		5.286,08		6.987,77	

En la gráfica No 9 se evidencian los porcentajes de exergía destruida y pérdidas con respecto a la exergía total que ingresa con el combustible, calculados en los análisis exeréticos . Ver tabla 15 y 16.

Figura 9. *Perdidas de exergía. Producción 14,43 t/h de vapor*

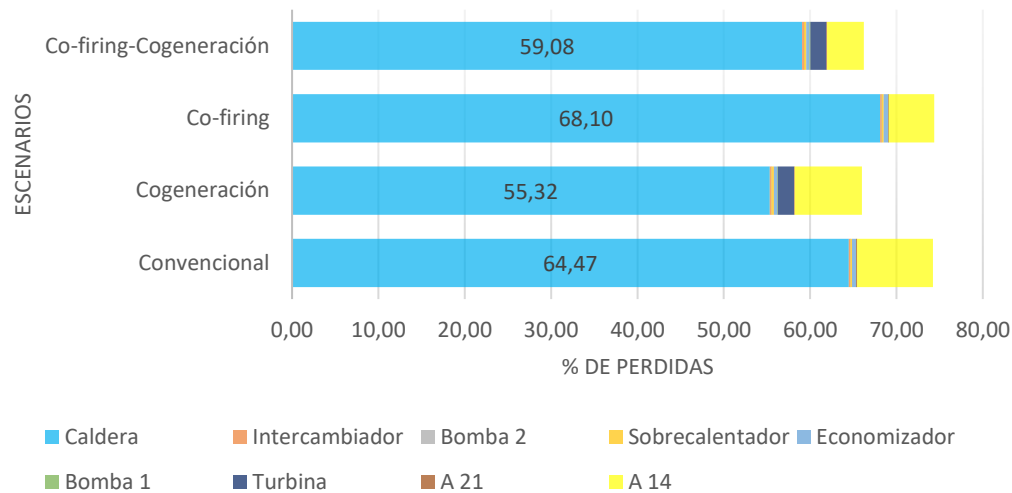
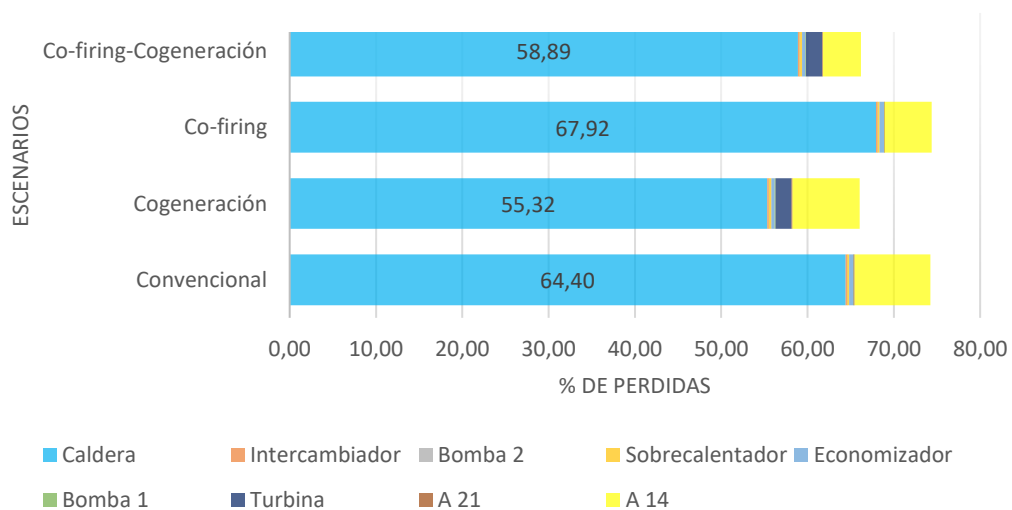


Figura 10. *Perdidas de exergía. Producción 17,31 t/h de vapor*

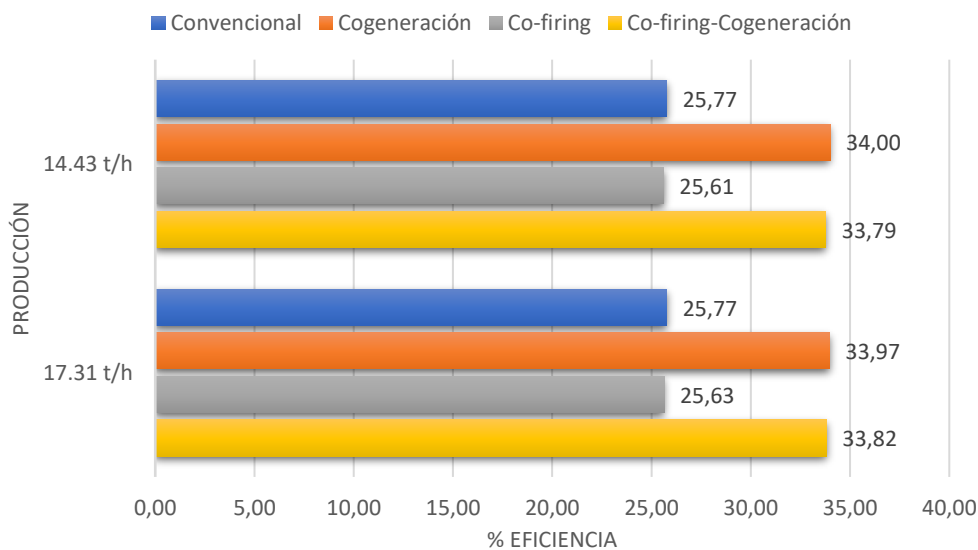


De las gráficas 9 y 10 se puede observar que en todos los escenarios simulados, es la caldera el componente del sistema que más destrucción de exergía presenta debido a la reacción de

combustión que en ella se genera (Dipak Pilankar & Kale, 2016, p. 349). Se estableció que las pérdidas de exergía en caldera, en los diferentes escenarios, están en el rango del 55 % al 68% con respecto a la exergía total que ingresa en el combustible. También se observa, que son los escenarios de co-firing y co-firing-cogeneración, donde se reportan los mayores porcentajes de irreversibilidades en este dispositivo por la composición de los gases de combustión generados por la quema de biomasa-biogás, lo cual afecta el valor de exergía química de los gases de combustión.

Adicional a todo lo anterior, en la figura No 11 se presentan las eficiencias exergéticas del sistema, presentadas en las tablas 15 y 16

Figura 11. *Eficiencias exergéticas por escenario*



5.2.1 Análisis de resultados

El análisis exergético permite establecer que el sistema de generación de vapor en todos sus escenarios analizados presenta un comportamiento similar cuando tiene una producción de 14,3 t/h o de 17,1 t/h de vapor.

Por último, se enfatiza que las diferentes simulaciones realizadas predicen un comportamiento exerético similar entre los escenarios convencional y co-firing, al igual que en entre los escenarios cogeneración y co-firing-cogeneración. Los resultados obtenidos, son un punto de partida para el estudio, análisis y mejoramiento de los sistemas de generación de vapor en la industria palmera colombiana, dado que no hay registro ni datos experimentales de la operación a escala industrial o piloto, de un sistema de Co-firing o Co-firing-Cogeneración, tal y como se plantea en este trabajo.

5.3 Resultados objetivos No 3

El tercer objetivo del proyecto de investigación busca: *Evaluar el desempeño ambiental de las cuatro (4) diferentes formas de operación del sistema de generación de vapor, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).*

5.3.1 Inventarios

Para dar cumplimiento al anterior objetivo, se tuvo en cuenta que la biomasa y el biogás son los combustibles empleados en el sistema de generación de vapor, pero son subproductos del proceso de extracción de aceite de palma tal y como se muestra en la figura No 1, por tal razón, los flujos masicos de estos combustibles traen consigo un impacto ambiental asociado, el cual también fue estimado.

Para determinar el impacto ambiental de la fibra, el cuesco y el biogás empleados como combustibles, se identificaron las corrientes de entrada y de salida de las secciones del proceso denominadas POM (Palm Oil Mill) y el Biodigestor (Ver figura No 1). Se estableció como unidad funcional una tonelada de fibra y cuesco y un metro cubico de biogás para el análisis ambiental.

Posteriormente, se realizó el análisis de inventario a estas secciones del proceso y, por medio de datos bibliográficos se obtuvieron los flujos masicos y de energía requeridos. No se puede pasar por alto, que los datos que son expuestos en los inventarios fueron obtenidos bajo las condiciones de operación de las plantas de beneficio de aceite de palma africana en Colombia y que fueron reportados por CENIPALMA y Torres Ortega *et al* (2017)

Ahora, se presentan los inventarios para obtención de una tonelada de fibra en la sección de proceso POM.

Tabla 17. *Análisis de inventario para una tonelada de fibra*

Unidad funcional: 1 ton de biomasa constituida por fibra y cascara de nueces		
Entradas		
Corriente	Unidad	Cantidad
Racimos de fruta fresca	t	4,75
Agua	t	5,21
Autogeneración de electricidad	kWh	35.143
Electricidad de red	kWh	64,49
Electricidad Diesel	kWh	0,905
Vapor	m ³	2,06
Salidas		
Biomasa	t	1,0
Aceite crudo de palma	t	1,01
Tusa	t	1,01
Aceite de palmiste	t	0,095
Harina de palmiste	t	0,136
Agua residual	t	4,61

Nota: Adaptado de (Torres Ortega et al., 2.017, p. 27)

También, se expone el inventario para la obtención de un metro cubico de biogás en la sección de Biodigestor.

Tabla 18. *Análisis de inventario para la obtención 1 m³ de biogás*

Unidad funcional: 1 m ³ de biogás generado en las lagunas de estabilización			
Corriente	Unidad	Cantidad	Densidad kg/m ³
Entradas			
Efluentes	m3	0,083	1.100
Salidas			
Biogás	m3	1	1,09
Lodos	m3	0,083	1.000

Nota: Adaptado de (Torres Ortega et al., 2.017, p. 31)(Conil, 1.989, p. 34)

Por otra parte, también se presenta la caracterización de las corrientes que hacen parte de los procesos. Esto datos, fueron requeridos para la construcción de los inventarios y el cargue de información en el software SimaPro, fase fundamental del análisis ciclo de vida.

Tabla 19. *Composición química de los Racimos de Fruta Fresca (RFF)*

Parámetro	Unidad	Valor
Humedad	%	24,94
C	%	54,3
H	%	18,7
S	%	0,22
N	%	3,8
O	%	11,02
Contenido de cenizas	%	8,93

Nota: Adaptado de (Torres Ortega et al., 2.017, p. 27)

A continuación, en las tablas siguientes, se presenta la caracterización hallada de los efluentes del proceso POM y de los lodos de los Biodigestores.

Tabla 20. *Caracterización de los efluentes del POME*

Parámetro	Unidad	Promedio
pH		4,55
Temperatura	°C	67,4
DBO5	mg/l	48.873
DQO	mg/l	79.730
Solidos totales	mg/l	45.670
Solidos suspendidos	mg/l	35.105
Solidos sedimentables	mg/l	677
Solidos totales volátiles	mg/l	48.988
Parámetro	Unidad	Promedio
P	mg/l	66,1
N	mg/l	284,1
Grasas y aceites	mg/l	18.747
Acidez total	mg/l	1.611

Nota: Adaptado de (Torres Ortega et al., 2.017, p. 31)

Tabla 21. *Caracterización de los lodos del biodigestor.*

Parámetro	Unidad	Valor
pH		8,4
Conductividad eléctrica	dS/m	11
Carbono Orgánico	%	8,5
Nitrógeno	%	5,9
Potasio	cmol/kg	31,8
Calcio	cmol/kg	41,4
Magnesio	cmol/kg	32,3
Sodio	cmol/kg	0,7
C.I.C	cmol/kg	11
Fosforo	mg/kg	500
Boro	mg/kg	5,1

Parámetro	Unidad	Valor
Azufre	mg/kg	388
Cobre	mg/kg	0,9
Hierro	mg/kg	2,9
Manganeso	mg/kg	4,1
Zinc	mg/kg	0,5

Nota: Adaptado de (Ramírez Contreras et al., 2.011, p. 28)

De ahora en adelante, se presentarán los inventarios de la planta de generación de vapor en sus diferentes escenarios de operación. Se analizará el sistema de forma global, como un todo. Se debe aclarar que, los flujos de energía, al igual que los flujos de masa que ingresan o salen del sistema, y sus composiciones porcentuales fueron obtenidos por medio del software Aspen PLUS V 10,0.

Como primer caso, se presenta el sistema de generación de vapor convencional, donde solo se produce vapor para proceso, empleando como combustible biomasa (Fibra y cuesco)

Figura 12. Diagrama del sistema modo operación convencional

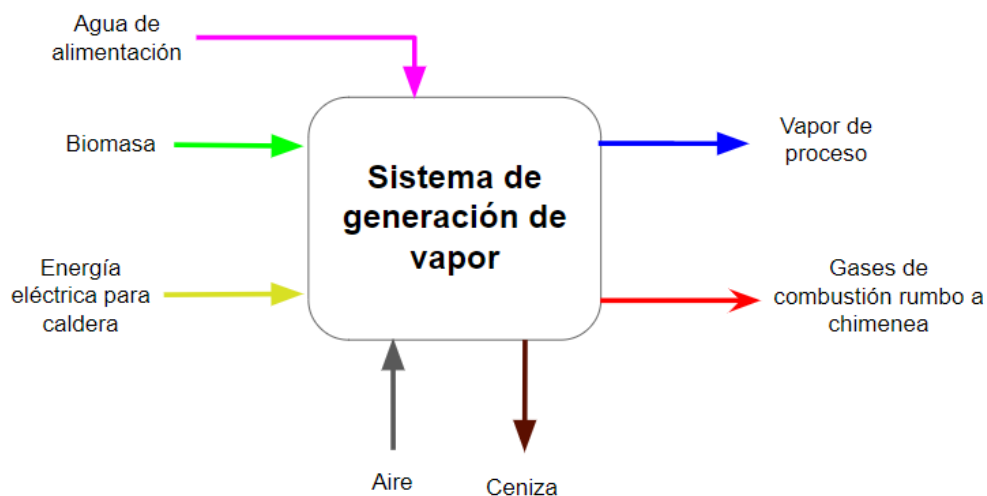
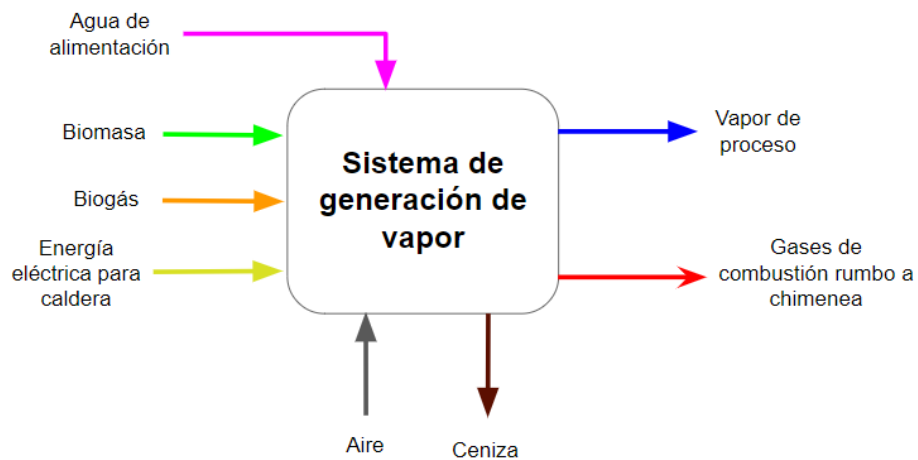


Tabla 22. *Inventarios del sistema operando en forma convencional*

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 14,43 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,214	
Aire	t	1,815	
Agua de alimentación	t	1,0	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	8,11E-2	
Salidas			
Cenizas	t	0,017	
Gases de combustión	t	2,012	

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 17,31 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,214	
Aire	t	1,815	
Agua de alimentación	t	1,0	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	8,11E-2	
Salidas			
Cenizas	t	0,017	
Gases de combustión	t	2,011	

Ahora, en la siguiente figura y tabla se presenta la forma en que se concibe el sistema de generación de vapor cuando opera en régimen co-firing y el inventario de los flujos masicos y de energía establecido para este modo de operación de la planta.

Figura 13. Diagrama del sistema modo operación co-firing**Tabla 23.** Inventarios del sistema operando en forma co-firing

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 14,43 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,16	
Biogás	t	0,051	
Aire	t	1,856	
Agua de alimentación	t	1	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	8,11E-2	
Salidas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Cenizas	t	0,013	
Gases de combustión	t	2,054	

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 17,31 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,169	
Biogás	t	0,043	
Aire	t	1,848	
Salidas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Agua de alimentación	t	1	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	8,11E-2	

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor		
Producción de vapor: 17,31 t		
Entradas		
Salidas		
Corriente	Unidad	Cantidad
Cenizas	t	0,014
Gases de combustión	t	2,046

De la misma forma, en las siguientes figura y tabla se define a la planta de vapor y sus inventarios, cuando realiza cogeneración de energía eléctrica.

Figura 14. Diagrama del sistema modo de operación cogeneración

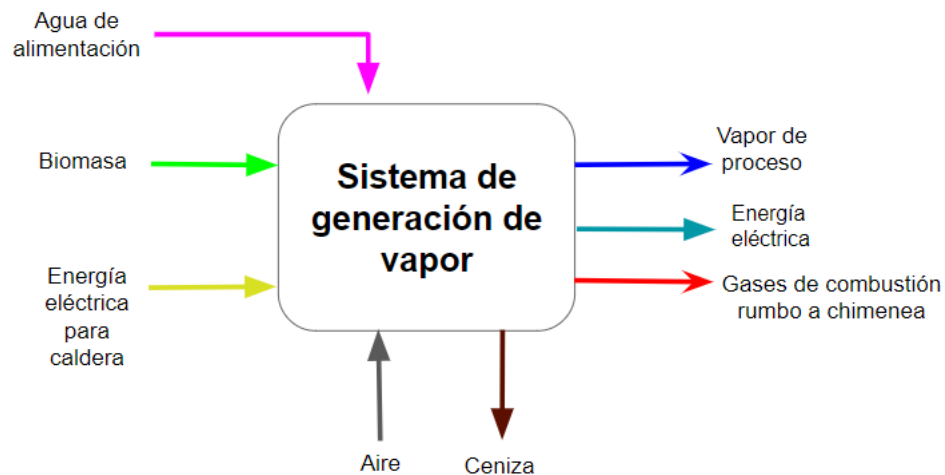


Tabla 24. Inventarios del sistema operando en forma cogeneración

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor		
Producción de vapor: 14,43 t		
Entradas		
Corriente	Unidad	Cantidad
Biomasa	t	0,214
Aire	t	1,815
Agua de alimentación	t	1,0
Energía eléctrica para el sistema	kWh	1,29

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 14,43 t			
Entradas			
Salidas			
Energía eléctrica generada	kWh		96,68
Cenizas	t		0,017
Gases de combustión	t		2,017

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 17,31 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,214	
Aire	t	1,815	
Agua de alimentación	t	1,0	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	1,86	
Salidas			
Energía eléctrica generada	kWh	96,86	
Cenizas	t	0,017	
Gases de combustión	t	2,011	

Para terminar esta parte, son mostradas las características e inventarios del sistema en régimen de co-firing-cogeneración.

Figura 15. Diagrama del sistema modo de operación co-firing-cogeneración

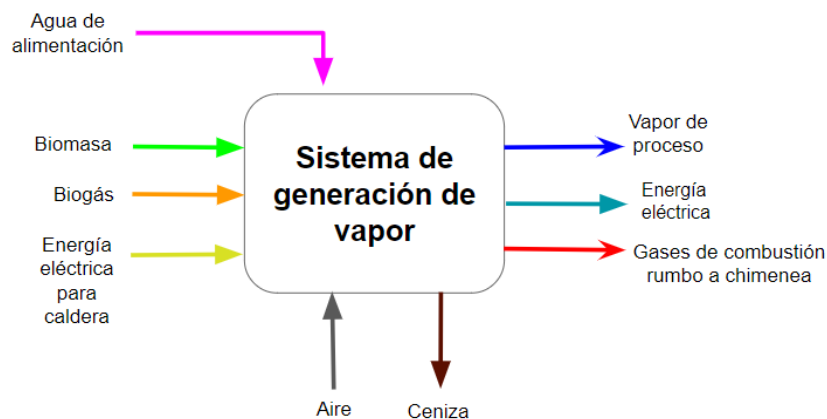


Tabla 25. *Inventarios del sistema operando en forma co-firing-cogeneración*

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 14,43 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,16	
Biogás	t	0,051	
Aire	t	1,856	
Agua de alimentación	t	1,0	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	1,29	
Salidas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Energía eléctrica generada	kWh	96,68	
Cenizas	t	0,013	
Gases de combustión	t	2,055	

Unidad funcional: Una Tonelada de Vapor			
Producción de vapor: 17,31 t			
Entradas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Biomasa	t	0,169	
Biogás	t	0,043	
Aire	t	1,848	
Agua de alimentación	t	1,0	
Energía eléctrica para el sistema	kWh	1,29	
Salidas			
Corriente	Unidad	Cantidad	
Energía eléctrica generada	kWh	96,68	
Cenizas	t	0,014	
Gases de combustión	t	2,046	

En la construcción de los inventarios, se estableció que la composición del agua de alimentación es igual para todos los escenarios analizados del sistema de generación de vapor. En la tabla No 26, se presenta la composición másica del agua de alimentación.

Tabla 26. Caracterización del agua de alimentación

Parámetro	Unidad	Valor
Dureza total	ppm	2
Contenido de oxígeno	ppb	8
Dióxido de carbono	ppm	25
Contenido de hierro	ppm	0,05
Contenido de cobre	ppm	0,01
Taninos	ppm	150
Hidracina	ppm	5
Sulfito de sodio	Ppm	50
Dietilhidroxilamina	Ppm	5
Fosfato trisódico	Ppm	45

Nota: Adaptado de la norma británica BS 2486

A través de las simulaciones realizadas en el software Aspen PLUS, se pudo establecer que la composición másica de los gases de combustión, en los diferentes escenarios no son iguales. Esto se debe a los combustibles empleados en caldera y a la proporción de cada uno de ellos.

Tabla 27. Composición másica de los gases de combustión

Corriente	Fracción másica		
	Convencional y Cogeneración con producción de 14,34 t/h y 17,31 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 14,43 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 17,31 t/h de vapor
H_2O	0,67	8,60 E-02	841 E-02
N_2	0,69	0,69	0,69
O_2	0,02	1,17 E-11	3,78 E-11
NO_2	5,83 E-07	4,04 E-16	1,31 E-15
NO	1,79 E-04	4,74 E-09	8,52 E-09
S	2,0 E-17	2,23 E-08	7,51 E-09
SO_2	6,82 E-4	5,20 E-04	5,43 E-04
SO_3	7,99 E-06	1,59 E-10	2,99 E-10
H_2	1,78 E-08	8,79 E-04	4,76 E-04
CO	6,59 E-07	2,24 E-02	1,31 E-02
CO_2	0,21	0,19	0,20
Cenizas	3,07 E-04	2,32 E-04	2,42 E-04
Ar	8,28 E-03	8,26 E-03	8,28 E-03

Corriente	Fracción másica		
	Convencional y Cogeneración con producción de 14,34 t/h y 17,31 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 14,43 t/h de vapor	Co-firing y Co-firing-Cogeneración con producción de 17,31 t/h de vapor
CH_4		4,39 E-12	4,25 E-13
Suma	1,00	1,00	1,00

Nota: Adaptado de Aspen PLUS V10.

5.3.2 Análisis de resultados

Todos estos datos de caracterización de las corrientes e inventarios de los diferentes escenarios fueron recopilados e introducidos en el software SimaPro para establecer los potenciales impactos ambientales que se podrían generar de las diferentes formas de operar de la planta de generación de vapor.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos de SimaPro para el escenario de régimen convencional de operación. Los resultados mostraron, que el comportamiento ambiental del sistema en régimen convencional de operación es idéntico cuando se presentan producción de vapor de 14,43 t y 17,31 t. tal y como lo indica la tala No 27 y 28.

Se debe resaltar, que impacto ambiental de la corriente de gases de combustión, equivale al 95,6% del eco-indicador global en la producción de vapor de forma convencional.

Tabla 28. Impactos ambientales por corriente. Modo de operación convencional

Producción de 14,43 t/h de vapor							
Unidad	Total	Biomasa	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida para caldera	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	9,1	0,394	0	0,000103	0,0016	8,7009	0
Producción de 17,31 t/h de vapor							
Unidad	Total	Biomasa	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida para caldera	Gases de combustión	Cenizas de caldera

Pt	9,1	0,393	0	0,000103	0,0016	8,7009	0
----	-----	-------	---	----------	--------	--------	---

Nota: Adaptado de SimaPro

Por otro lado, se destaca que las categorías de impacto con mayor aporte en el valor del ecoindicador son: *Respiratory Inorganics* y *Climate Change*, tal y como se evidencia en la tabla No 29

Tabla 29. % categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo convencional

% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Convencional 14,43 t/h de vapor	54,42	39,11	0,10	3,09	2,42	0,86

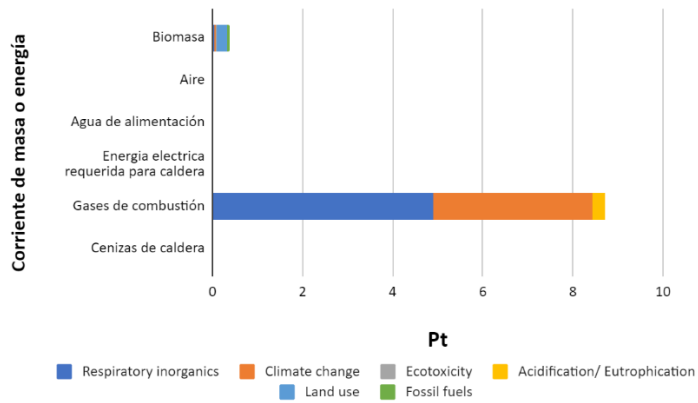
% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Convencional 17,31 t/h de vapor	54,42	39,11	0,10	3,09	2,42	0,86

Nota: Adaptado de SimaPro

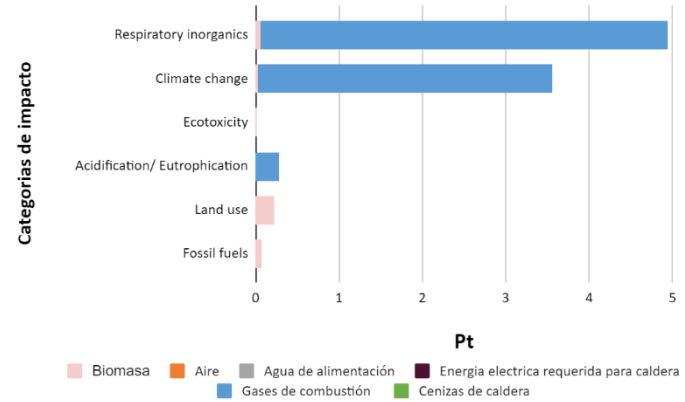
Para cerrar esta parte del documento, en la figura No 16, se presentan los resultados de SimaPro en forma de graficas de barras.

Figura 16. Resultados ACV planta de vapor operando en forma convencional

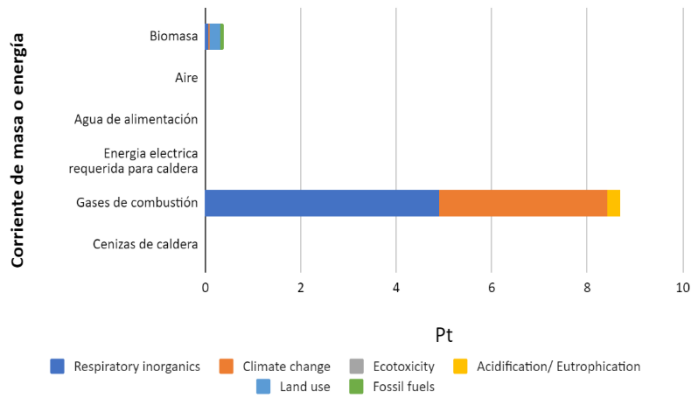
Categoría de impacto por corriente de proceso Convencional 14,43 t



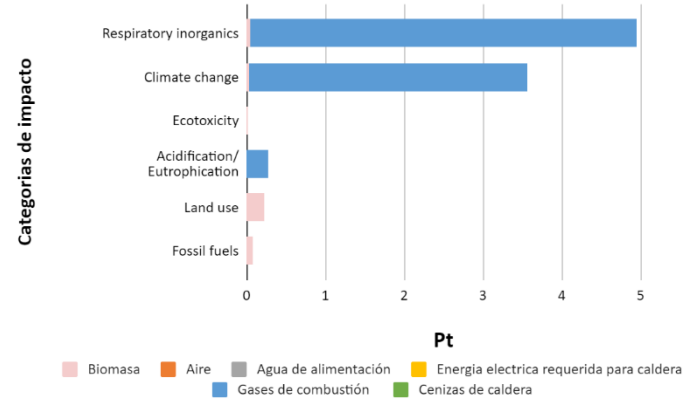
Categorías de impacto escenario Convencional 14,43 t



Categorías de impacto por corriente de proceso Convencional 17,31 t



Categorías de impacto escenario Convencional 17,31 t



Nota: Adaptado de SimaPro

De aquí en adelante, se exponen los resultados del ACV del sistema de generación de vapor, cuando opera en modo co-firing.

En la tabla No 30, se reportan los valores de los impactos ambientales globales por corriente del proceso.

Tabla 30. *Impactos ambientales por corriente. Modo de operación co-firing*

Producción de 14,43 t/h de vapor								
Unidad	Total	Biomasa	Biogás	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida para caldera	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	2,72	0,294	-4,8	0	0,000103	0,0016	7,2	0
Producción de 17,31 t/h de vapor								
Unidad	Total	Biomasa	Biogás	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida para caldera	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	3,1	0,310	-4,04	0	0,000103	0,0016	6,81	0

Nota: Adaptado de SimaPro.

De los resultados anteriores se puede apreciar que, la corriente de Biogás registra un impacto ambiental con valor negativo, esto se debe a que dicha corriente gaseosa es un producto evitado del proceso de Biodigestores que al no ser emitido al ambiente y ser aprovechado como combustible en el sistema, ayuda a disminuir los impactos ambientales globales del proceso de producción de vapor.

Se observa también que, el desempeño ambiental de la planta es diferente en los dos escenarios de producción de vapor. Tal y como se estableció en la sección 4.3.1 del documento, los porcentajes de biogás en la corriente del combustible que ingresa a la caldera son del 24,2% y del 20,2%, cuando hay producción mínima y máxima de vapor, respectivamente. Todo esto influyo

en los impactos ambientales de las corrientes biomasa, biogás, pero también en la corriente gases de combustión, debido a que su composición másica es diferente (Ver tabla No 27).

Por otra parte, en la tabla No 31 se reportan las categorías más influyentes en el valor del Eco-indicador del proceso.

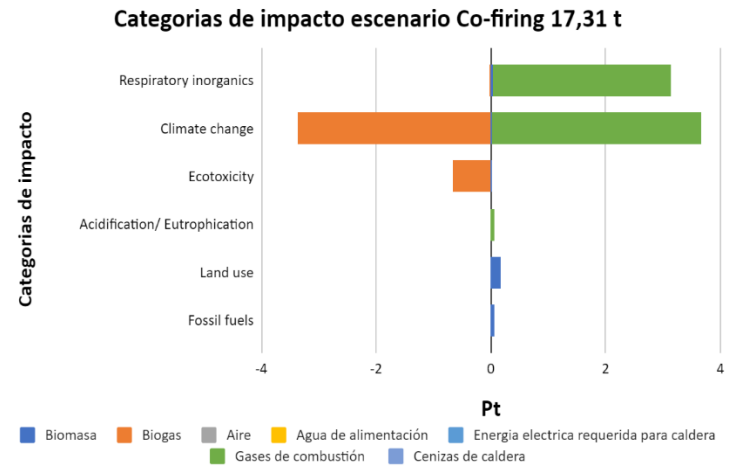
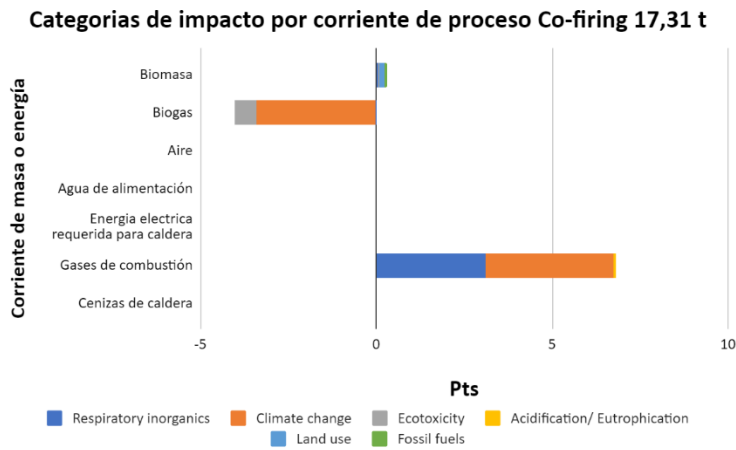
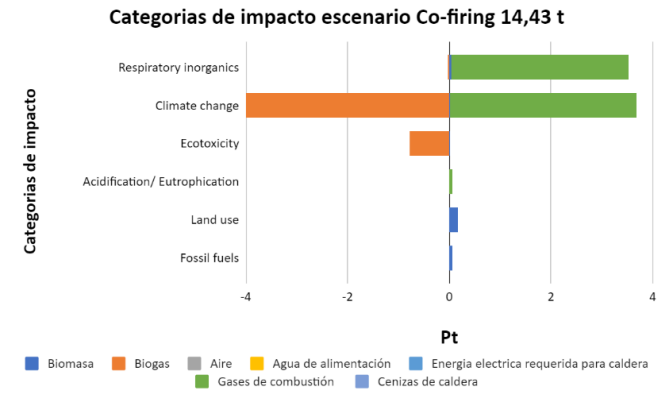
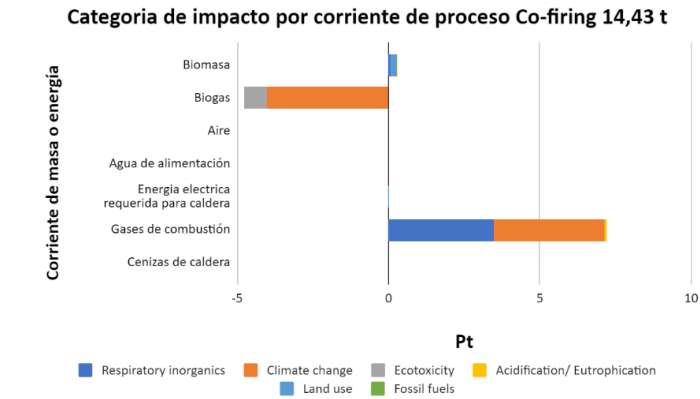
Tabla 31. % categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo co-firing

% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/ Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Co-firing 14,43 t/h de vapor	129,09	-11,65	-28,11	2,46	6,05	2,16
.% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/ Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Co-firing 17,31 t/h de vapor	101,38	9,55	-20,88	2,29	5,64	2,01

Nota: Adaptado de SimaPro

Es de resaltar que, los porcentajes de las categorías de impacto presentan valores positivos y negativos, indicando su contribución con respecto al Eco-indicador global del sistema. Para este escenario, las categorías de impacto más influyentes son: *Respiratory inorganics*, *Climate change* y *Ecotoxicity*. Por último, se indica que la variación de los porcentajes en los dos escenarios de producción de vapor se debe a la cantidad de biogás que ingresa a la caldera. Por último, en la figura No 17 se reportan en forma de histograma los datos obtenidos del software SimaPro.

Figura 17. Resultados ACV planta de vapor operando en forma co-firing



Nota: Adaptado de SimaPro

De ahora en adelante, se presentarán los resultados ambientales arrojados por SimaPro, cuando hay producción de vapor y proceso de cogeneración de energía eléctrica.

Tabla 32. *Impactos ambientales por corriente. Modo de operación cogeneración.*

Producción de 14.43 t/h de vapor								
Unidad	Total	Biomasa	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida	Energía eléctrica producida	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	7,36	0,3926	0	0,000103	0,0254	-1,76	8,70	0
Producción de 17.31 t/h de vapor								
Unidad	Total	Biomasa	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida	Energía eléctrica producida	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	7,36	0,3926	0	0,000103	0,0254	-1,76	8,70	0

Nota: Adaptado de SimaPro.

Los resultados obtenidos del simulador evidencian que el escenario de cogeneración de energía presenta un desempeño ambiental similar cuando la producción de vapor es de 14,43 t/h o de 17,31 t/h.

Por su parte, la corriente del proceso *energía eléctrica producida* presenta valores de impacto ambiental negativos. Lo anterior se debe a que, la producción autónoma de energía eléctrica por parte de la planta de vapor evita los impactos ambientales generados en las hidroeléctricas, termoeléctricas y el sistema de interconexión del país. Como consecuencia de lo anterior, se presenta una disminución del impacto ambiental global por producción de vapor en este escenario.

De ahora en adelante, en la tabla No 33, se exponen las categorías de impacto más relevantes en el desempeño ambiental del sistema cuando realiza cogeneración de energía.

Tabla 33. % categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo cogeneración

% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Cogeneración 14,43 t/h de vapor	63,99	46,59	-0,41	3,68	-10,21	-3,64

% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Cogeneración 17,31 t/h de vapor	63,99	46,59	-0,41	3,68	-10,21	-3,64

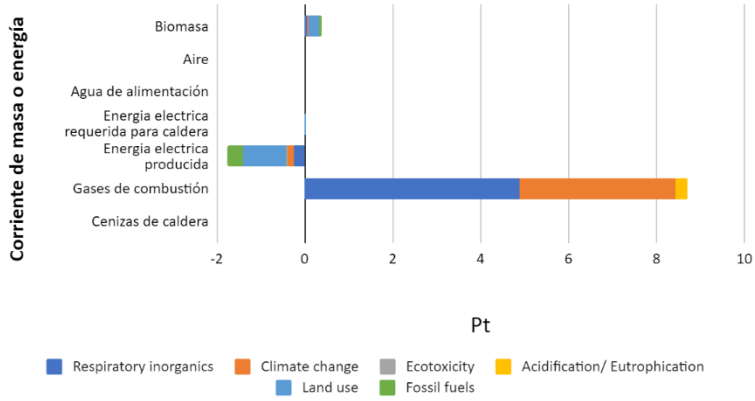
Nota: Adaptado de SimaPro.

Se puede apreciar de la información expuestas en la tabla que, el valor del Ecoindicador del proceso se debe en gran medida a las categorías de impacto *Respiratory Inorganics* y *Climate change*. También sobresale que, las categorías de impacto *Land use*, *Fossil fuel* y *Ecotoxicity* influyen de manera negativa en el valor de la puntuación del proceso y están relacionadas con la corriente de proceso *energía eléctrica producida*.

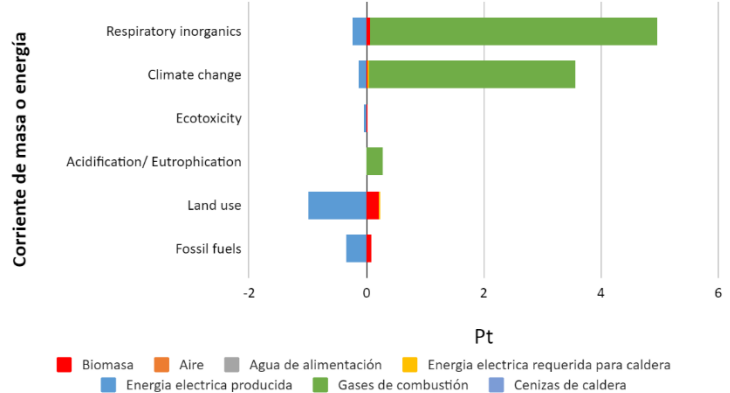
Por último, en la figura No 18, se exhiben los datos de SimaPro para el sistema de generación de vapor en modo cogeneración de energía eléctrica.

Figura 18. Resultados ACV planta de vapor operando en forma cogeneración

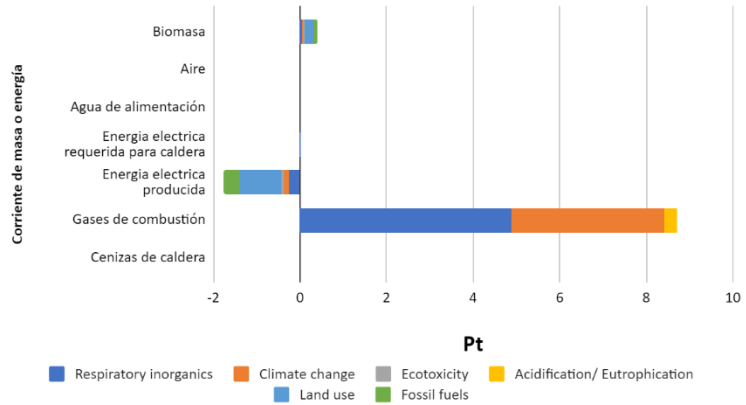
Categorías de impacto corriente de proceso Cogeneración 14,43 t



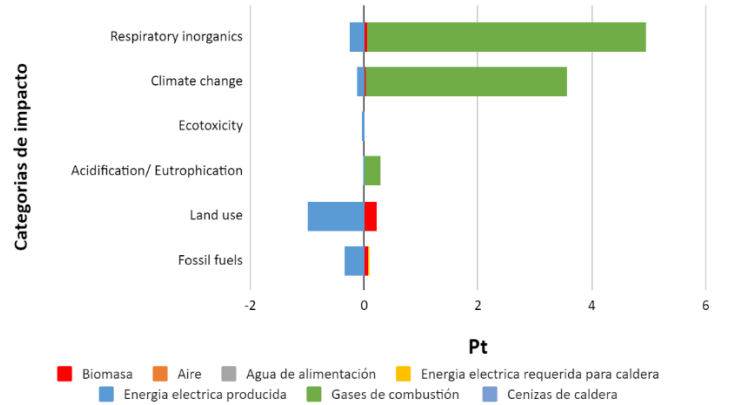
Categorías de impacto escenario Cogeneración 14,43 t



Categoría de impacto corriente de proceso Cogeneración 17, 31 t



Categorías de impacto escenario Cogeneración 17,31 t



Nota: Adaptado de SimaPro

Por último, se presentarán los resultados del ACV al proceso de producción de vapor, cuando el sistema opera en modo Co-firing-Cogeneración

Tabla 34. *Impactos ambientales por corriente. Modo de operación co-firing-cogeneración.*

Producción de 14,43 t/h de vapor									
Unidad	Total	Biomasa	Biogás	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida	Energía eléctrica producida	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	0,98	0,2935	-4,8	0	0,000103	0,0254	-1,764	7,21	0
Producción de 17,31 t/h de vapor									
Unidad	Total	Biomasa	Biogás	Aire	Agua de alimentación	Energía eléctrica requerida	Energía eléctrica producida	Gases de combustión	Cenizas de caldera
Pt	1,34	0,3100	-4,04	0	0,000103	0 0254	-1,764	6,81	0

Nota: Adaptado de SimaPro

Dado que en este último escenario del sistema, fue simulado con incorporación de la tecnología co-firing y de cogeneración de energía eléctrica, los resultados presentados son similares al de los escenarios que presentan igual nombre y que fueron expuestos anteriormente. Nuevamente, las corrientes del proceso *Biogás* y *Energía eléctrica producida* presentan impactos ambientales negativos, permitiendo que el Eco-indicador global de esta forma de operación presente los valores más bajos, entre los cuatro escenarios analizados.

Una vez más, se aprecia como el flujo masico de biogás es una variable importante en el desempeño ambiental de la planta. En este escenario, también se simulo que el porcentaje del flujo masico de Biogás representan el 24,2% y 20,2% en el flujo de combustible que ingresa a la caldera, cuando se producen 14,43 t/h y 17,31 t/h de vapor, respectivamente. Es por lo anterior, que el desempeño de la planta es diferente en los dos escenarios de producción de vapor.

Por otra parte, en la tabla No 35, se exponen los valores porcentuales de las categorías de impacto más relevantes en el valor del Eco-indicador global del escenario. De los valores presentados, es evidente que la implementación simultánea de las tecnologías co-firing y de cogeneración eléctrica, evita impactos ambientales de las categorías *Climate Change*, *Ecotoxicity*, *Land use*, y *Fossil fuels*.

Tabla 35. % categoría de impacto en el Eco-indicador. Modo co-firing-cogeneración

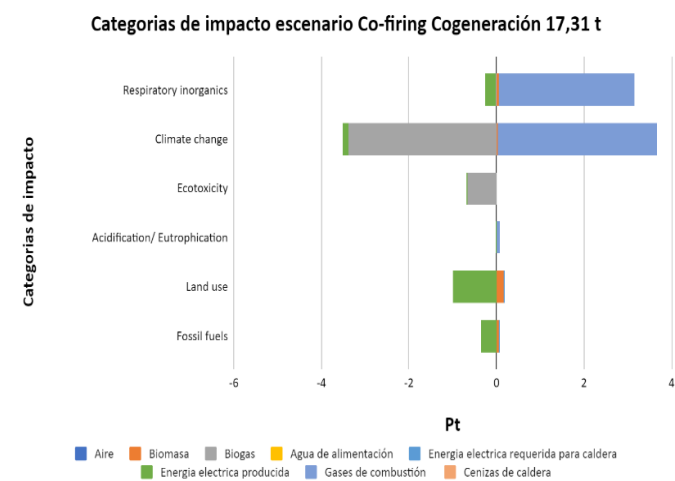
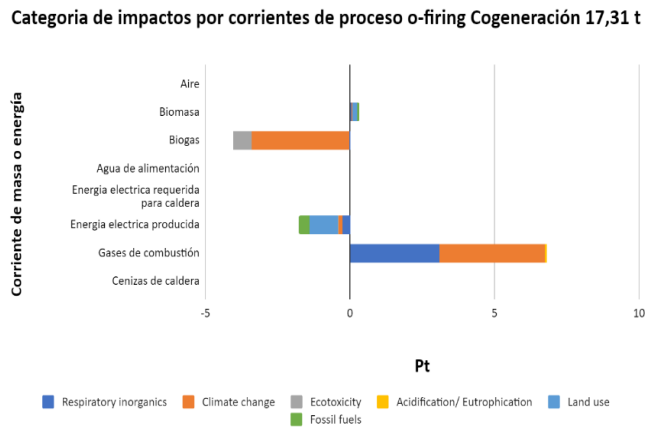
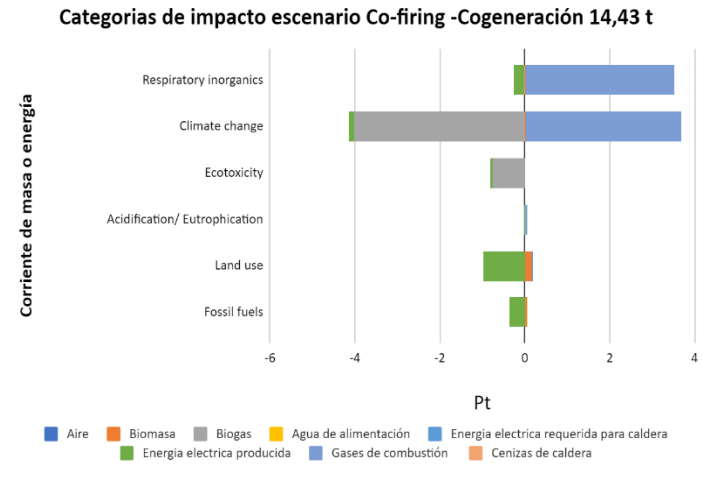
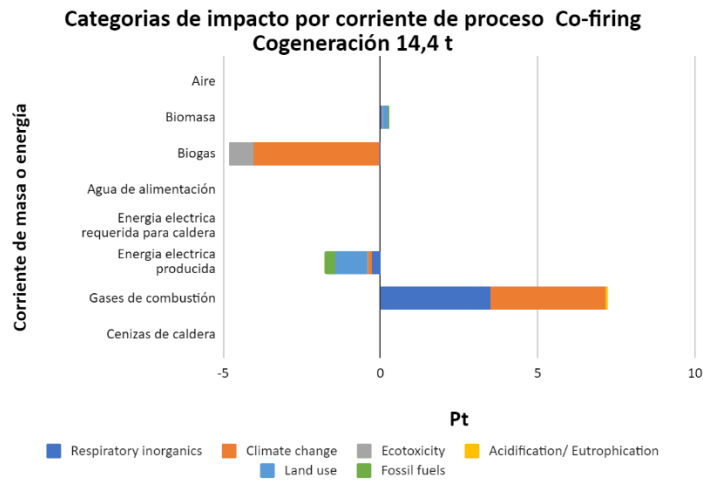
% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/ Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Co-firing-Cogeneración 14,43 t/h de vapor	333,54	-45,68	-82,00	5,80	-82,30	-29,36

% Categoría de impacto						
Escenario	Respiratory inorganics	Climate change	Ecotoxicity	Acidification/ Eutrophication	Land use	Fossil fuels
Co-firing-Cogeneración 17,31 t/h de vapor	214,81	12,18	-50,87	4,53	-59,45	-21,20

Nota: Adaptado de SimaPro

Para cerrar el ACV del escenario co-firing-cogeneración, se presentan los resultados de SimaPro expresados en forma de histogramas.

Figura 19. Resultados ACV planta de vapor operando en forma co-firing-cogeneración.



Nota: Adaptado de SimaPro

Después de haber realizado el ACV a cada escenario planteado del sistema de generación de vapor, se realiza la evaluación del desempeño ambiental. En la tabla No 36, se presenta el valor de los Eco-indicadores globales por escenario de la planta. Como era de esperarse, es el escenario de co-firing-cogeneración, el que presenta mejor desempeño ambiental, reduciendo los impactos ambientales en un 89,23% y del 85,27% con respecto a la misma variable de los escenarios con modo de operación Convencional.

Tabla 36. *Comparación de impactos ambientales globales*

Producción de 14,43 t/h de vapor				
Escenario	Co-firing_ Cogeneración	Co-firing	Cogeneración	Convencional
Eco-indicador Total [Pt]	0,98	2,72	7,36	9,10
Producción de 17.31 t/h de vapor				
Escenario	Co-firing_ Cogeneración	Co-firing	Cogeneración	Convencional
Eco-indicador Total [Pt]	1,34	3,08	7,36	9,10

Nota: Adaptado de SimaPro.

Por otra parte, en la tabla No 37 se presentan, a manera de resumen, los porcentajes con respecto al valor del Eco-indicador del escenario analizado, para las categorías de impacto más importantes en el proceso.

Tabla 37. *% de incidencia de las categorías de impacto por Escenarios*

Producción de vapor de 14,43 t/h				
Categoría de impacto	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
Respiratory inorganics	54,42	63,99	129,09	333,54
Climate change	39,11	46,59	-11,65	-45,68

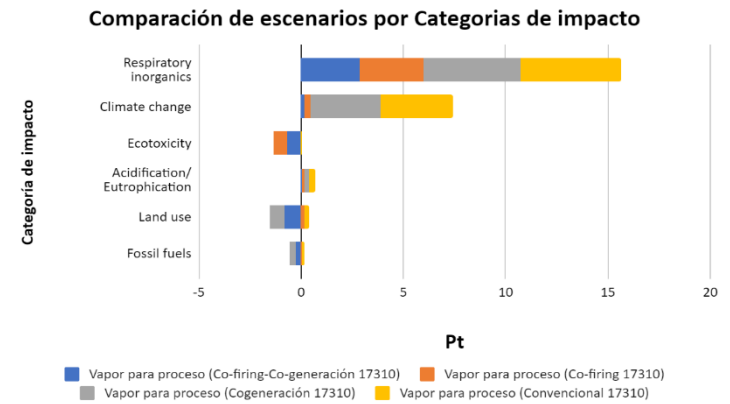
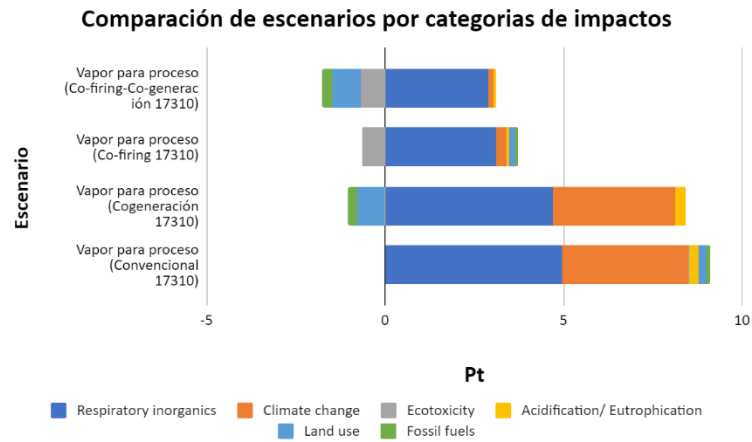
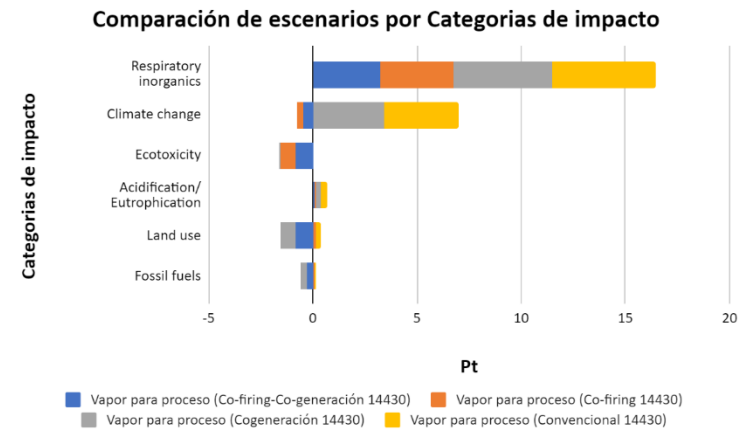
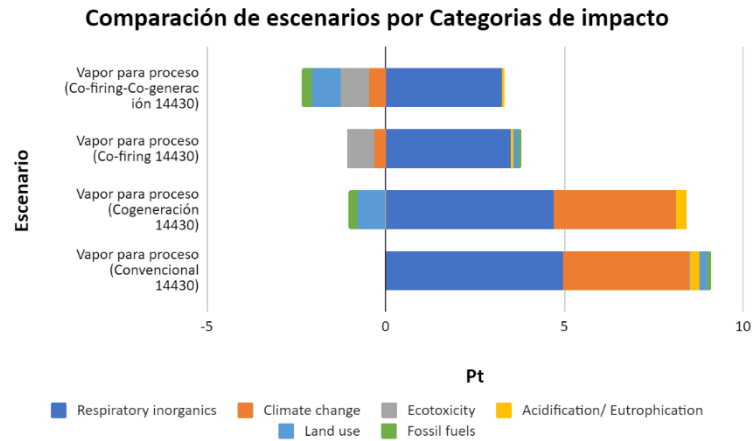
Producción de vapor de 14,43 t/h				
Categoría de impacto	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
Ecotoxicity	0,10	-0,41	-28,11	-82,00
Acidification/ Eutrophication	3,09	3,68	2,46	5,80
Land use	2,42	-10,21	6,05	-82,30
Fossil fuels	0,86	-3,64	2,16	-29,36

Producción de vapor de 17,31 t/h				
Categoría de impacto	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
Respiratory inorganics	54,42	63,99	101,38	214,81
Climate change	39,11	46,59	9,55	12,18
Ecotoxicity	0,10	-0,41	-20,88	-50,87
Acidification/ Eutrophication	3,09	3,68	2,29	4,53
Land use	2,42	-10,21	5,64	-59,45
Fossil fuels	0,86	-3,64	2,01	-21,20

De los resultados anteriores se aprecia que, solo los escenarios que implementan tecnologías co-firing o de cogeneración de energía, se presentan categorías de impacto con porcentajes negativos. También es evidente, que los impactos ambientales por *Climate change* y *Ecotoxicity* son reducidos por la implementación de un sistema co-firing. Por su parte, el empleo de tecnologías de cogeneración de energía en el proceso, disminuyen los efectos del *Land use* y *Fossil fuel*. Se debe mencionar, que es el escenario donde se incorpora tecnología co-firing y de cogeneración, donde hay una reducción en los porcentajes por efectos potenciales *Climate change*, *Ecotoxicity*, *Land use* y *Fossil fuel*.

A continuación, en la figura No 20, se aprecian los resultados de SimaPro en forma de histograma que corroboran lo dicho en páginas anteriores.

Figura 20. Evaluación ambiental por escenarios de la planta



Nota: Adaptado de SimaPro

5.4 Resultados objetivo No 4.

El ultimo objetivo de este trabajo de maestría determina lo siguiente: *Establecer indicadores de desempeño exergoambientales, que evalúen la sostenibilidad de la implementación del sistema de co-firing en el sistema de generación de vapor estudiado.*

Se debe tener presente, que el sistema objeto de estudio tiene una producción máxima de 17.31 t de vapor y que la turbina empleada, según simulación hecha en Aspen PLUS, presento una potencia máxima de 1.673,53 kW o 1,673 MW. En la tabla No 38, se reportan los datos base para la obtención del \dot{Y}_k empleando la ecuación No 29.

Tabla 38. Datos de referencia para obtención del \dot{Y}_B

Componente	Producción nominal [S_B]	\dot{Y}_B [Pt/h]	Autor	Dato del sistema [S_A]	\dot{Y}_A [Pt/h]
Caldera	185 [t/h de vapor]	0,2356	(Restrepo & Bazzo, 2016, p. 109) (Restrepo Victoria, 2012, p. 105)	17,31 [t/h de vapor]	0,0569
Turbina	15 MW	0,139	(Cavalcanti et al., 2020b, pp. 6–8)	1,673 MW	0,0354

En el Apéndice F, se presentan en forma de tablas los diferentes balances exergoambientales para cada uno de los escenarios planteados. Allí se encuentran los valores de b_E , \dot{B}_j y los valores calculados de los indicadores exergoambientales establecidas en la fase metodológica V.

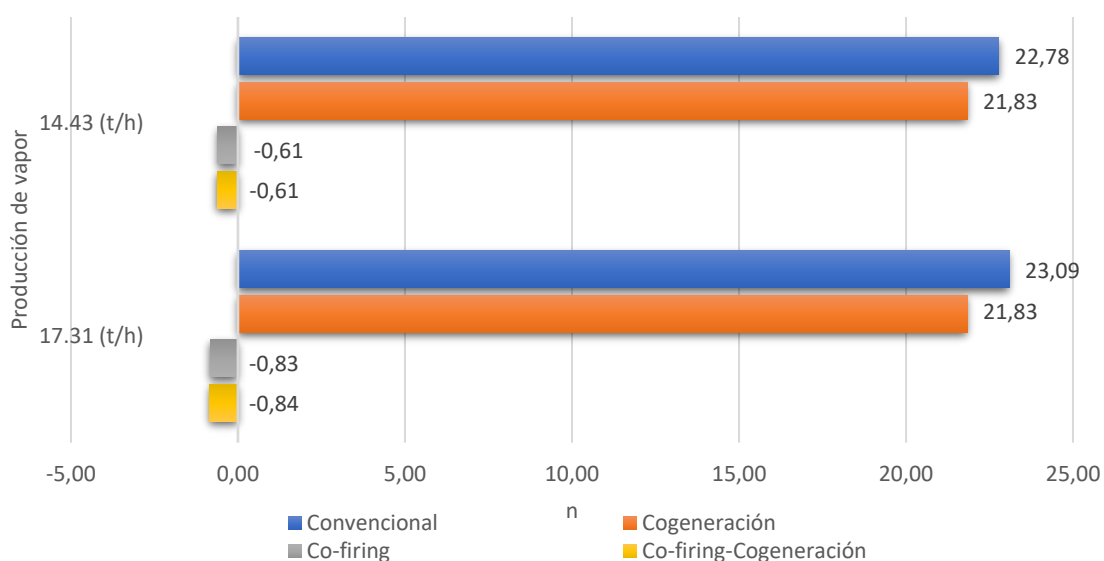
5.4.1 Análisis comparativo

Para terminar el objetivo No 4, se realizó una evaluación del desempeño ambiental del sistema, por medio de la comparación los indicadores exergoambientales calculados para cada escenario. Inicialmente se analizó el sistema, por medio de los resultados del coeficiente exergo ambiental. Para calcular los flujos de impacto ambiental \dot{B}_f y \dot{B}_p , se emplearon los resultados de los balances exergoambientales (Ver Apéndice F) y se organizaron según la tabla No 11. Posteriormente se empleó la ecuación No 30. En la tabla No 39, se reportan los valores de \dot{B}_f , \dot{B}_p y η_B para cada escenario.

Tabla 39. Términos \dot{B}_f , \dot{B}_p y η_B por escenario.

Termino	Producción 14,43 t/h				Producción 17,31 t/h			
	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
\dot{B}_f [Pt/h]	5,76	6,03	-64,85	-64,52	6,82	7,23	-64,85	-64,11
\dot{B}_p [Pt/h]	131,31	131,65	39,25	39,59	157,52	157,93	39,25	53,73
η_B	22,78	21,83	-0,61	-0,61	23,09	21,83	-0,83	-0,84

Figura 21. Coeficiente exergo-ambiental η_B por escenario

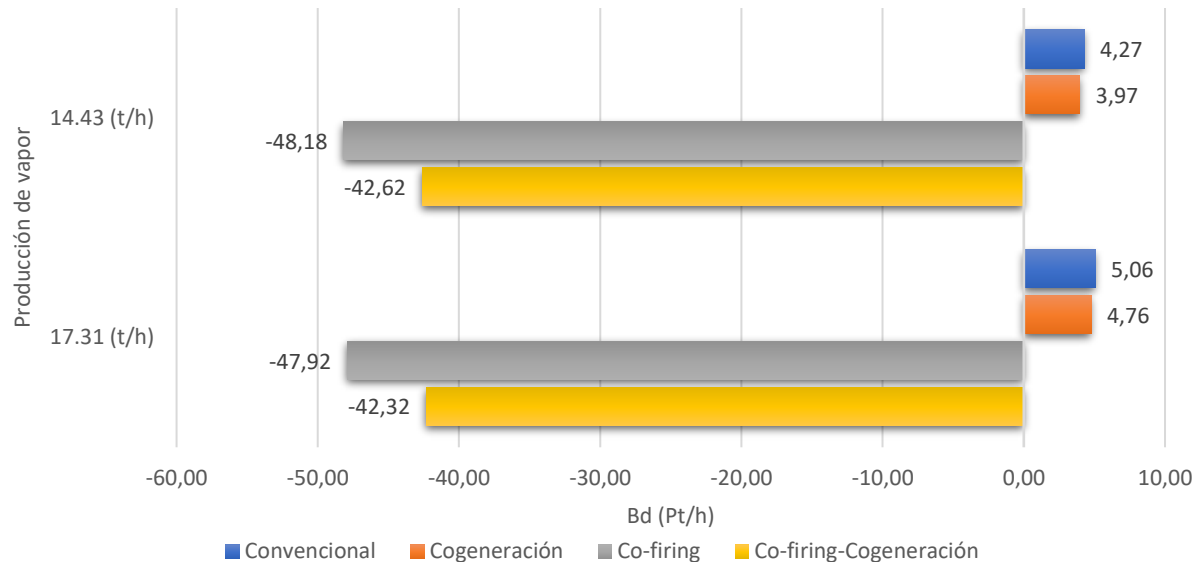


De la gráfica anterior, se pudo apreciar que los valores del coeficiente exergoambiental del sistema en sus diferentes escenarios, es muy similar cuando hay una producción de vapor de 14,43 t/h o 17,31 t/h, lo cual indica que dicho coeficiente no es afectado por los flujos de producción de la planta de vapor. Adicionalmente, se evidencio que son los escenarios de producción de vapor convencional y con cogeneración, los que presentan un cociente positivo, indicando que la planta, en estas formas de operación genero casi en 22 veces los impactos ambientales que inicialmente ingresaron. Por el contrario, los escenarios de producción de vapor empleando co-firing y co-firing con cogeneración de energía, fueron los que presentaron un valor de η_B negativos entre un -0,61 y -0.84, expresando de esta manera, que estas modalidades de operación generan la reducción de impactos ambientales. Se puede destacar en este análisis, que es la aplicación de la tecnología co-firing, empleando biomasa y biogás, son las que propician este comportamiento del sistema.

Por otro lado, también se evaluó el comportamiento del sistema por la comparación de la variable \dot{B}_D . A continuación, en la tabla No 40 y en la figura No 22 se presentan para cada escenario, los resultados del cálculo del flujo de impactos ambientales asociados a la exergía destruida del sistema, obtenidos por medio de la ecuación No 31.

Tabla 40. Términos b_f , \dot{A}_{dt} y \dot{B}_D por escenarios

Termino	Producción 14,43 t/h				Producción 17,31 t/h			
	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
b_f [Pt/kW]	3,38E-04	3,53E-04	-3,78E-03	-3,76E-03	3,33E-04	3,53E-04	-3,13E-03	-3,12E-03
\dot{A}_{dt} [kW/h]	12.625,38	11.225.62	12.733,30	11.333,54	15.146,77	13.473,73	15.255,03	13.575,90
\dot{B}_D [Pt/h]	4,27	3,97	-48,21	-42.62	5,06	4,76	-47,92	-42,32

Figura 22. *Flujos de impacto ambiental por destrucción de exergía \dot{B}_D . por escenario*

Para el caso de esta variable exergoambiental, la simulación de la planta de vapor operada con tecnologías convencional y con cogeneración de energía, presenta flujos de impactos ambientales asociados a la destrucción de exergía \dot{B}_D positivos, debido a que el término b_f es positivo en tales escenarios, indicando que estos escenarios hay producción de impactos.

Por su parte, los escenarios simulados de co-firing y co-firing-cogeneración presentan flujo de impactos ambientales \dot{B}_D negativos, debido al signo que posee término b_f para estos casos. Todo lo anterior indica que, los escenarios de co-firing y co-firing-cogeneración evitan impactos ambientales por exergía destruida y presentan un mejor desempeño exergoambiental. Se debe mencionar, que en el escenario de co-firing se reportan valores negativos más bajos de \dot{B}_D , debido a que en este escenario se produjo los mayores flujos de exergía destruida \dot{A}_{dt} .

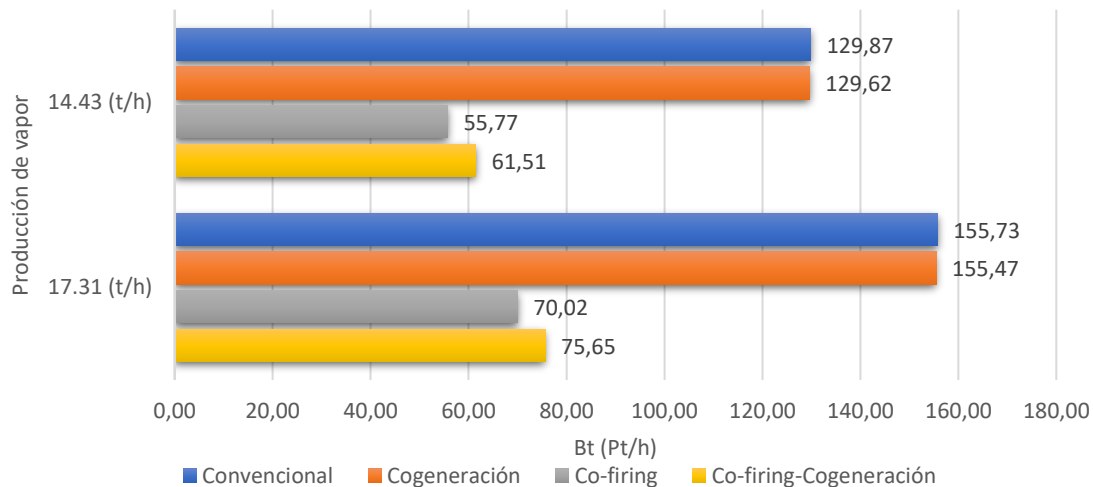
Es importante mencionar, que la diferencia de los valores de \dot{B}_D cuando hay producción de vapor de 17,31 t/h, se debe a que en estos escenarios hay mayor destrucción de exergía.

Por último, en la siguiente tabla y gráfica, se presentan para cada escenario, los valores de la variable \dot{B}_{TOTAL} calculada con la ecuación No 32. Esta variable establece el flujo de impacto ambiental generados en el interior del sistema y es un indicador del comportamiento exergoambiental del sistema.

Tabla 41. Cálculo de la variable \dot{B}_{TOTAL} por escenario

Termino	Producción 14,43 t/h				Producción 17,31 t/h			
	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración	Convencional	Cogeneración	Co-firing	Co-firing-Cogeneración
\dot{B}_k^{pf} [Pt/h]	125,50	125,553	103,90	104,04	150,61	150,612	117,88	117,88
\dot{B}_D [Pt/h]	4,28	3,97	-48,21	-42,62	5,06	4,77	-47,95	-42,32
$\dot{Y}_{Caldera}$ [Pt/h]	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569
$\dot{Y}_{Turbina}$ [Pt/h]		0,0354		0,0354		0,0354		0,0354
\dot{B}_{TOTAL} [Pt/h]	129,87	129,62	55,77	61,51	155,73	155,47	70,02	75,65

Figura 23. Flujos de impacto ambiental total \dot{B}_{TOTAL} por escenario



De los resultados presentados, se aprecia que la planta genera los mayores flujos de impacto ambiental, cuando emplea tecnología de producción de vapor convencional y con cogeneración de

energía. Esto se debe a los flujos de impactos ambientales asociados a la destrucción exergía y por la composición de los gases de combustión son mayores en estos escenarios.

Por otro lado, se pone de manifiesto que el empleo de la tecnología co-firing mejora el desempeño ambiental de la planta de vapor, debido a que los gases de combustión en estos escenarios generan menores impactos ambientales \dot{B}_k^{pf} . Se debe recalcar, que la co-combustión biomasa-biogás permite la mitigación de los impactos ambientales asociados a la destrucción de exergía \dot{B}_D , los cuales siempre presentan signo negativo y es por esta razón, que el valor \dot{B}_{TOTAL} siempre es inferior para los escenarios co-firing y co-firing-cogeneración.

6 Conclusiones

Teniendo en cuenta los objetivos planteados para este trabajo de maestría y los resultados obtenidos del análisis energético, exergético, de Ciclo de Vida (ACV) y exergo ambiental a las simulaciones de los cuatro escenarios de la planta de producción de vapor, se puede establecer que:

La planta de vapor registra un desempeño térmico diferente en cada uno de los escenarios planteados. Se pudo evidenciar que las máximas eficiencia del de la planta, con valores de 65,9%, se presenta cuando se realiza producción de vapor convencional con cogeneración de energía. Por el contrario, la eficiencia más baja se presentó cuando se genera vapor realizando co-firing biomasa-biogás en la caldera, con un valor promedio de 57,6%.

La implementación de un sistema co-firing no altera significativamente el comportamiento exergético de la planta de vapor, debido a que no hay diferencias significativas con las eficiencias exergéticas de los escenarios convencional y cogeneración. Se debe mencionar, que implementación de un sistema co-firing o co-firing con cogeneración de energía, presentaron los mejores desempeños ambientales entre los diferentes escenarios de operación del generador de vapor objeto de estudio. El aprovechamiento como combustible de residuos de los procesos de extracción de aceite, como es el caso del biogás, reduce los impactos ambientales del proceso de generación de vapor. Adicionalmente, se pudo comprobar que el porcentaje del biogás con respecto al flujo total de combustible influye en el comportamiento ambiental del sistema.

En cuanto al análisis exergoambiental, por medio del coeficiente η_B se puede establecer que las formas de operación que incrementan hasta en 23 veces los flujos de impactos \dot{B}_p con respecto a los flujos de impacto \dot{B}_f , son los escenarios de producción de vapor convencional y con cogeneración de energía. Por el contrario, el uso de biogás como uno de los combustibles quemados en la caldera del proceso de generación de vapor, permite que los escenarios co-firing

y co-firing-cogeneración, presenten valores negativos de η_B , evitando impactos ambientales en los flujos \dot{B}_f y mejorando el desempeño exergoambiental del sistema.

Por otra parte, se pudo establecer por medio de la variable exergoambiental \dot{B}_{TOTAL} , que la planta de vapor presenta un mejor desempeño cuando implementa la tecnología de co-firing, empleando biomasa y biogás como combustible en su caldera. Pero, por medio de la misma variable, también se pudo concluir que la planta genera menos impactos ambientales cuando tiene una producción de 14,43 t/h de vapor.

Ahora bien, basados en las simulaciones hechas en Aspen Plus y en los resultados de los análisis energéticos, exergéticos, ciclo de vida y exergoambiental, se concluye que la planta de vapor presenta el mejor desempeño, cuando produce 14,43 t/h, empleando la tecnología Co-firing y realizando Cogeneración de energía, porque presenta los indicadores más regulares.

Por último, también se concluye que, la metodología de análisis exergoambiental puede ser empleada para la comparación y evaluación de cualquier tipo de tecnología encaminada a la transformación y generación de energía a nivel de componentes o de forma global.

Se recomienda para futuros trabajos en este tema, la realización de una simulación Design de la caldera en el generador de vapor, donde se puedan incorporar datos de materiales, volúmenes, flujos y dimensiones para simular el comportamiento equipo, que posteriormente deben ser validados en campo. Por otra parte, también se recomienda analizar el comportamiento ambiental del sistema, modificando el flujo masico de biogás que ingresa a la caldera. Todo lo anterior, brindara herramientas más confiables para la evaluación del proceso.

Referencias

- Albarracín Becerra, F. H., & Méndez Rangel, J. P. (2019). *Diseño y evaluación de un sistema de co-firing Biomasa-biogás en una planta extractora de palma de aceite* [Trabajo de grado]. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB.
- Althausen, M. (2016). Palm Oil Mill Effluent Treatment-Converting a Residue into a Resource. *Revista Palmas*, 37, 31–37.
- Barrera Hernández, J. C. (2021). *Potencial de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa residual del proceso de extracción de palma de aceite en la zona norte de Colombia* [Tesis de Maestría]. Universidad de la Costa.
- Basto Sarmiento, J. A., Alvarado Serrano, J. A., & Meneses Rodríguez, H. M. (2014). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LAS POSIBLES DE LAS POSIBLES ALTERNATIVAS DE BIOENERGÍA PARA UNA PLANTA DE BENEFICIO DE PALMA DE ACEITE* [Monografía]. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Blumberg, T., Lee, Y. D., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2019). Exergoenvironmental analysis of methanol production by steam reforming and autothermal reforming of natural gas. *Energy*, 181(2019), 1273–1284. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.171>
- Boyano, A., Blanco-Marigorta, A. M., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2011). Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. *Energy*, 36(4), 2202–2214. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.020>
- Briceno Álvarez, I. C., Valencia Concha, J. F., & Posso V., M. (2015). Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *PALMAS*, 36(3), 43–53.

- Carvajal Diaz, P. D. (2018). *Estudio de desempeño de un sistema de co-combustión Biomasa-Biogás en una caldera de parrilla utilizando la herramienta thermoflex* [Trabajo de Grado]. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Cavalcanti, E. J. C., Barbosa, D. S., & Carvalho, M. (2024). Biodiesel production from microalgae: Exergoeconomic and exergoenvironmental assessments. *Energy Conversion and Management, 302*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118113>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & da Silva, D. R. S. (2020a). Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy Conversion and Management, 222*(2020), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & da Silva, D. R. S. (2020b). Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy Conversion and Management, 222*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & Jonathan, J. L. (2019). Exergoenvironmental results of a eucalyptus biomass-fired power plant. *Energy, 189*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116188>
- Chaparro Triana, D. C., Munar Flórez, D. A., Ramírez Contreras, N. E., & García Núñez, J. A. (2022, November 21). *El Palmicultor*. Biogás, Un Impulso Hacia La Economía Circular y La Descarbonización Del Sector Palmero Colombiano. <https://elpalmicultor.fedepalma.org/biogas-impulso-economia-descarbonizacion-sector/>
- Conil, P. (1989). Biodigestores para lodos de palma: La experiencia Colombiana. *Palmas, 31–35*.

- Dipak Pilankar, K., & Kale, R. (2016). Energy and Exergy Analysis of Steam and Power Generation Plant. *International Journal of Engineering Reseach & Technology (IJERT)*, 5(6), 344–350. www.ijert.org
- Duarte Cely, S. R. (2006). *Estudio de factibilidad del aprovechamiento de Biogas_ UIS* [Monografía]. Universidad Industrial de Santander.
- Fedepalma. (2013). *Propuesta del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008 de emisiones atmosféricas Contenido*.
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2023, December 13). *Fedepalma*. Fedepalma. <https://fedepalma.org/noticias/la-produccion-de-aceite-de-palma-crudo-supera-los-17-millones-de-toneladas-en-lo-corrido-del-ano/>
- Fundación Española del aceite de palma sostenible. (2018). *Informe económico del aceite de palma España 2018*.
- García Garrido, S., & Fraile Chico Diego. (2008). *Cogeneración: Diseño, operación y mantenimiento de plantas de Cogeneración* (Díaz de Santos, Ed.; 1st ed.).
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2000). *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report*. www.pre.nl
- Halim Shah Ismail, M., & Zahra Haddadian, R. (2012). *Process Simulation and Optimization of Palm Oil Waste Combustion Using Aspen Plus*. <https://www.researchgate.net/publication/279851723>
- Hughes, E. (1999). *EPRI Project Manager*. www.epri.com
- Husain, Z., Zainal, Z. A., & Abdullah, M. Z. (2003). Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 24).

- ICONTEC. (2007). *NORMA TÉCNICA NTC-ISO COLOMBIANA 14040 GESTIÓN AMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA.*
- Kotas, T. J. (1995). *The exergy method of thermal plant analysis* (T. Kotas, Ed.; Segunda). Krieger publishing Company.
- Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31(8–9), 1257–1289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>
- Lozano, M. A., & Valero, A. (1986). Evaluación de los rendimientos energético y exergético de calderas de vapor por pérdidas separadas. *Energía*, 109–124.
- Mazorra V, M. Á. (2008). Proyecto sombrilla MDL para la captura de metano, desplazamiento de fuentes fósiles y cogeneración de energía renovable en el sector de la palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 29, 67–68.
- Mesa Dishington, J. (2013). *La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Fedepalma.
- Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., & Schebek, L. (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, 34(1), 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.018>
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica* (Editorial Reverté S.A, Ed.; Segunda edición).
- Morosuk T, & Tsatsaronis G. (2013). EXERGOENVIRONMENTAL ANALYSIS IS A NEW TOOL FOR EVALUATION OF AN ENERGY CONVERSION SYSTEM. *Energía y Automatización*, 3, 3–14.

- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018). *Manual de optimización de sistemas de vapor industrial* (Organización de las Naciones Unidas par el Desarrollo Industrial, Ed.).
- Pérez Jeldres, R. A. (2016). *Estudio y modelación de la co-combustión con formación de depósitos en reactores a combustión* [Tesis Doctoral]. Universidad de Concepción.
- Qi, X., Kochan, O., Ma, Z., Siarry, P., Królczyk, G., & Li, Z. (2024). Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a hybrid renewable energy system with hydrogen fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 617–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.163>
- Ramírez Contreras, N., Silva Ramírez, Á. S., Garzón González, E. M., & Yáñez Angarita, E. E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. www.cenipalma.org
- Restrepo, Á., & Bazzo, E. (2016). Co-firing: An exergoenvironmental analysis applied to power plants modified for burning coal and rice straw. *Renewable Energy*, 91, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.048>
- Restrepo Victoria, Á. H. (2012). *METODOLOGIA DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL DE PLANTAS TERMOELÉTRICAS OPERANDO EM COMBUSTAO COMBINADA CARVAO-BIOMASSA* [Tesis Doctoral]. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Royo, J., Canalís, P., & Sabastián Fernando. (2008). *Módulo: Energía de la Biomasa*.
- Soh Kheang, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite*
Second Generation Biofuels from Oil Palm Biomass. *Revista Palmas*, 37(Especial), 137–148.

- Song, G., Shen, L., & Xiao, J. (2011). Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(16), 9758–9766. <https://doi.org/10.1021/ie200534n>
- Torrado Patiño, C. (2007). *Extraction de Aceite DAABON 2006*.
- Torres Ortega, J. A., Rubio, O. F. C., & Orozco, I. H. (2017). Análisis de ciclo de vida para una biorefinería derivada de residuos Agrícolas de palma aceitera Life cycle analysis for a biorefinery from oil palm fronds (*Elaeis guineensis*). *Revista Publicaciones e Investigación. Bogotá-Colombia*, 11, 13–36.
- Unidas, N. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. <http://www1.upme.gov.co/sgic/>
- Van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). *The handbook of Biomass Combustion & Co-firing* (S. Van Loo & J. Koppejan, Eds.; First). Earthscan.
- W. Whitesides, R. (2012). *Process Equipment Cost Estimating By Ratio And Proportion*. www.PDHcenter.com
- Yeit Haan, T., & Sobri Takriff Mohd. (2022). Zero Waste Technologies for Sustainable Development in Palm Oil Mills. *Palmas*, 43(3), 40–55. <https://doi.org/10.5366/jope.2021.04>

Apéndice A. Impactos ambientales proceso de extracción de aceite de palma

PROCESOS	IMPACTO NEGATIVO CRÍTICO	IMPACTO NEGATIVO SEVERO	IMPACTO POSITIVO
Recepción de fruto		Contaminación atmosférica por generación de gases Efecto Invernadero	Cambio en la dinámica laboral y en la salud de los trabajadores
Esterilización	Reducción de energía no renovable	Contaminación atmosférica por emisión de vapor de agua caliente	
		Afectación del curso natural	
Desfrutado	Contaminación atmosférica debido a la generación de material particulado en la caldera	Afectación a la salud pública y de los trabajadores	Generación de residuos biodegradables (Raquis) usado para otros procesos
Digestión	Contaminación de residuos sólidos impregnados de material peligroso	Contaminación atmosférica por material particulado en las calderas	
Prensado	Contaminación atmosférica debido a la generación de material particulado en la caldera	Afectación a la salud pública y de los trabajadores por contaminación auditiva	
Clarificación		Contaminación del agua por vertimientos industriales	
		Posibles afectaciones por derrames de aceite	
Sedimentación y Secado		Reducción de energía no renovables	
Deslodado	Afectación a la calidad del agua superficial y subterránea	Contaminación fuentes hídricas por la generación de vertimientos industriales	Generación de biomasa biodegradable
		Generación de gases efecto invernadero	
Palmistería		Reducción de fuentes de energía no renovables	Generación de material biodegradable (Fibra) para ser usado en otros procesos
		Afectación a la salud pública y de los trabajadores por contaminación auditiva	
Sistema Tratamientos de Aguas Residuales Industriales	Contaminación atmosférica por la generación de gases de efecto invernadero	Contaminación del agua por vertimientos industriales	Cambios en la dinámica laboral

Nota: Adaptado de Biogeoeco S.A.S, 2016

Apéndice B. *Sistemas de vapor y calderas del sector palmero colombiano.*

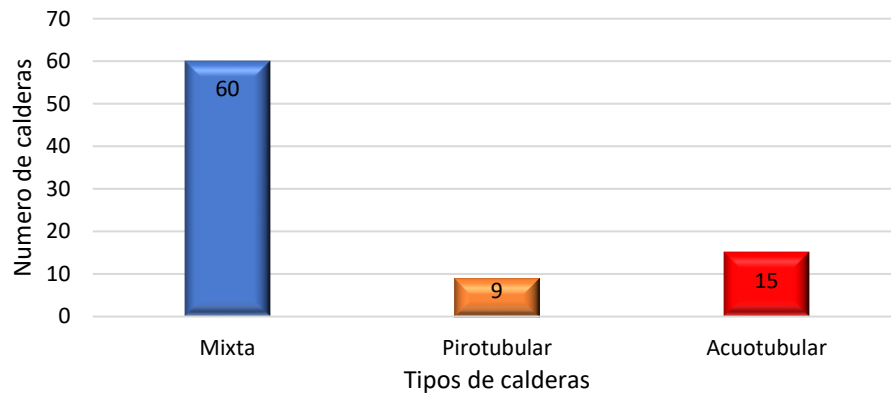
A continuación, se presentan las áreas y equipos de un sistema de generación de vapor

ÁREA			
Generación	Distribución	Usos finales	Recuperación de condensado
Calderas	Tuberías de vapor	Intercambiadores de calor	Trampas de vapor
Auxiliares de caldera	Estaciones de alivio de presión (Válvulas)	Columnas de separación	Tanques de recopilación de condensado
Economizadores	Ramales de purga	Evaporadores	Bombas de condensado
Precalentadores de aire	Desobrecalentador	Tanques de cocción	Tubería de condensado
Equipos de tratamiento de agua	Acumuladores de vapor	Secadoras	
Desgasificador		Equipo de calentamiento por proceso de inyección de vapor vivo	
Bombas de agua de alimentación		Turbinas de vapor	
Equipos de almacenamiento y manipulación de combustible			

Nota: Adaptado de ONUDI

Cabe resaltar que, se consultó los tipos de caldera que son utilizados en sector palmero colombiano. Según datos de FEDEPALMA de 2.013, los tipos de calderas más utilizadas en las plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia se representan en la siguiente figura .

Tipos de caldera más utilizadas en el sector palmero en Colombia



Nota: Adaptado de Fedepalma(Fedepalma, 2.013, p. 18).

A continuación, en la siguiente tabla, se presentan las características de operación de siete (7) Calderas que para 2.013 eran consideradas las más recientemente instaladas.

Características de las calderas usadas en Colombia

Empresa	Año de Arranque	Tipo de Caldera	Capacidad de generación de Vapor	Tipo de Combustible
Palmeras de la Costa S.A	04-2.010	Bi-drum acuotubular, vapor sobrecalentado a 300 PSI, 300 °C	25.000 kg/h	Fibra y Cuesco
Extractora Vizcaya S.A.S	12-2.010	Combinada, Vapor Saturado a 130 psi, 170 °C	300 BHP	Fibra y Cuesco
Oro Rojo LTDA	12-2.010	Combinada, vapor sobrecalentado a 30 Bares, 300 °C	20.000kg/h	Fibra y Cuesco
Alianza del Humea	2.012	Bi-Drum FWT	18.000 kg/h	Fibra y Cuesco
Hacienda la Gloria	2.012	Mixta	25.000 kg/h	Fibra y Cuesco
Palmeras del Cesar	2.013	Bi-Drum acuotubular	27.000 kg/h	Fibra y Cuesco

Empresa	Año de Arranque	Tipo de Caldera	Capacidad de generación de Vapor	Tipo de Combustible
Palmaceite S.A	2.009	Combinada, Vapor Sobrecalentado a 300 psi, 260 °C	13.000 kg/h	Fibra y Cuesco

Nota: Adaptado FEDEPALMA.

Apéndice C. Exergías químicas estándar

En la siguiente tabla, se presentan las exergías químicas estándar de las sustancias que son de interés para el presente proyecto.

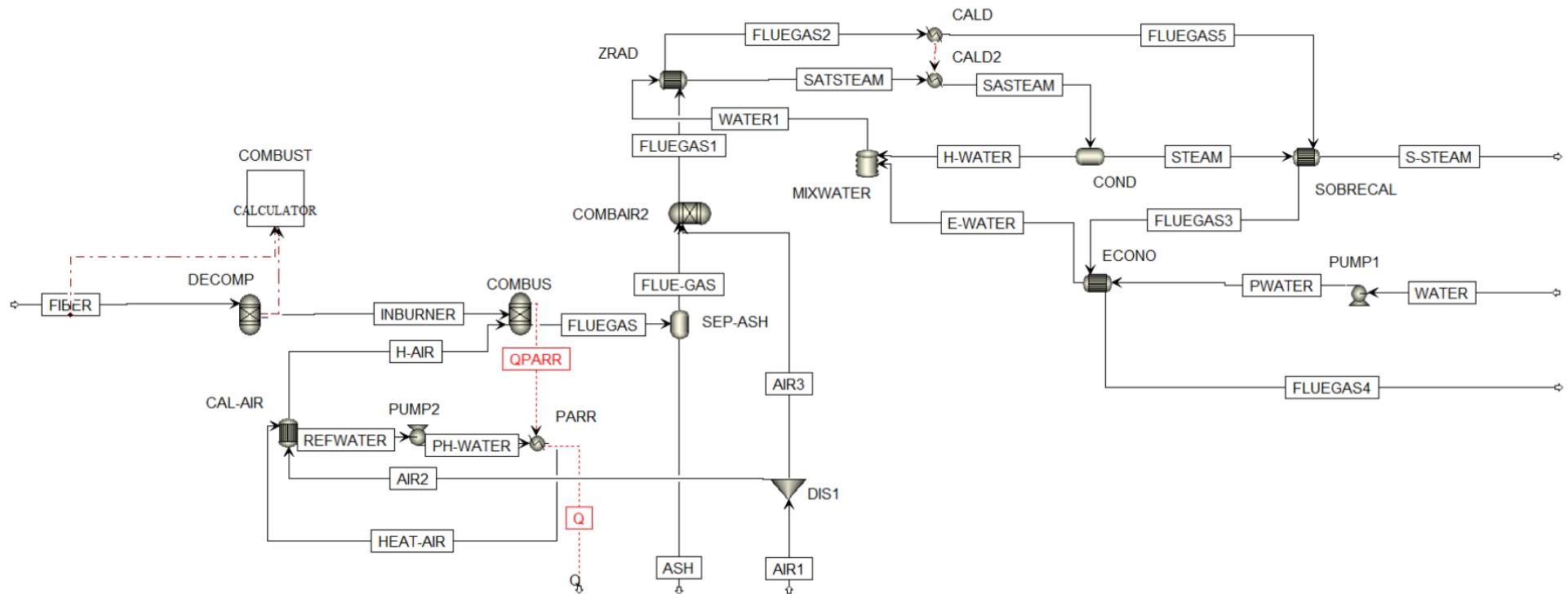
Exergías químicas estándar de las sustancias de interés.

Sustancia	Exergía química estándar $\left[\frac{kJ}{kmol} \right]$
N_2	720
O_2	3.970,0
CO_2	20.140
H_2O vapor	11.710,0
H_2O liquido	3.120,0
Ar	11.690,0
SO_2	303.500,0
NO_2	88.900,0
NO	56.220,0
CH_4	824.350

Nota: Adaptado de (T. J. Kotas, 1.995, pp. 242–251)(Moran & Shapiro, 2.004, p. Tabla A-26)

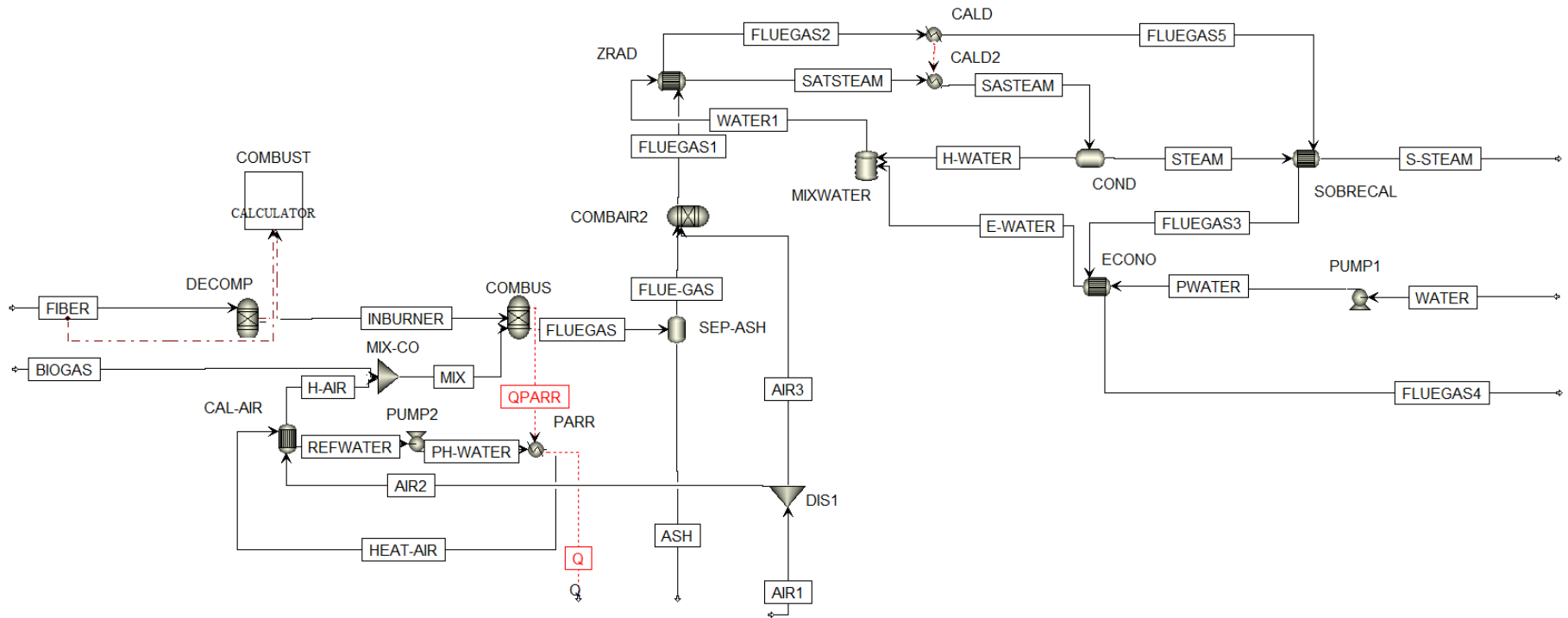
Apéndice D. Diagramas de simulaciones en Aspen PLUS V10,0

Escenario de combustión convencional de biomasa



Nota: Adaptado de Aspen PLUS V10,0

Escenario de combustión co-firing de biomasa-biogás



Nota: Adaptado de Aspen PLUS V10,0

Apéndice E. Método de evaluación de impacto Eco-indicador 99

Método de evaluación de impacto	Categoría de daño evaluado	Categoría de impacto
ECOINDICADOR-99	Categoría de daños fuentes naturales	Daño a fuentes causado por extracción de minerales
		Daño a fuentes causados por extracción de fuentes fósiles
	Categoría de daños Calidad del Ecosistema	Daño a la calidad de los ecosistemas causados por emisiones ecotóxicas
		Daño a la calidad del ecosistema causado por la acción combinada de la acidificación y eutroficación
		Daño causado al ecosistema causado por la ocupación y conversión del suelo
	Categoría de daño Salud humana	Efectos cancerígenos en los humanos
		Efectos respiratorios en humanos causados por sustancias orgánicas
		Efectos respiratorios en humanos causados por sustancias inorgánicas
		Daños causados a la salud humana causados por el cambio climático
		Efectos a la salud humana causados por radiación ionizante
		Efectos a la salud humana causados por el deterioro de la capa de ozono

Nota: Adaptado de PRé Consultans (Goedkoop & Spriensma, 2.000, pp. 113–119)

Apéndice F. *Balances exergoambiental*

Flujos de impacto ambiental régimen convencional.

Flujos de entrada al Sistema	Producción de 14,43 t					Producción de 17,31 t				
	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]
1	3,09	0,394	17.008,37	0,000334	5,6854	3,71	0,3926	20.404,54	0,00033	6,7959
5	15,57	0	51,05	0,00	0,0000	18,68	0,0000	61,25	0,00	0,0000
6	6,67	0	6,76	0,00	0,0000	8,01	0,0000	8,11	0,00	0,0000
\dot{B}_k^{pf} (Gases de combustión)	25,08	8,7	1.495,80	0,083929	125,50	30,09	8,7009	1.794,49	0,08393	150,61
2	14,43	0,0001027	866,87	0,000002	0,0015	17,31	0,0001	1.039,88	0,00000	0,0018
18 y 19		0,001562	1,22	0,018410	0,0225		0,0016	1,47	0,01839	0,0270
\dot{Y}_k					0,0569					0,0569
Suma					131,30					157,49
Flujos de salida del sistema										
16	14,43	9,1	5.273,46	0,02490	131,31	17,31	9,1	6.325,96	0,02	157,52
\dot{B}_f					5,76					6,82
\dot{B}_p					131,31					157,52

Ahora bien, con la ayuda de los balances exergoambientales, y las ecuaciones 30, 31 y 32, las variables exergoambientales que se calcularon para el escenario convencional del sistema de generación de vapor, fueron las siguientes.

Variables exergoambientales escenario Convencional

Variables e indicadores	Producción de vapor	
	$14,43 \frac{t}{h}$	$17,31 \frac{t}{h}$
b_f [Pt/kW]	3,38E-04	3,33E-04
b_p [Pt/kW]	2,98E-02	2,98E-02
η_B	22,78	23,09
\dot{B}_D [Pt/h]	4,28	5,06
\dot{B}_{TOTAL} [Pt/h]	129,87	155,73

De los resultados anteriores, se puede destacar que los flujos de impactos ambientales Producto son 22,78 veces mayores que los flujos de impacto ambiental fuente, evidenciando el grado de afectación ambiental que alcanza la planta bajo esta forma de operación. Otro aspecto a destacar es que el análisis exergoambiental, permitió establecer que la producción de 17,31 t/h de vapor con la planta operando de forma convencional genera un flujo de impactos totales, 19,91% mayor que los producidos cuando se presenta una producción de 14,43 t/h

Flujos de impacto ambiental régimen cogeneración

Flujos de entrada al sistema	Producción de 14.43 t de vapor					Producción de 17.31 t de vapor				
	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]
1	3,1	0,39259	17.008,37	3,33E-04	5,6651	3,707	0,39259	20,404.5	3,33E-04	6,796
5	15,6	0	51,06	0,00	0,0000	18,681	0	61,25	0,00	0,000
6	6,7	0	6,76	0,00	0,0000	8,006	0	8,11	0,00	0,000
2	14,4	0,0001027	866,87	1,71E-06	0,0015	17,31	0,0001027	1.039,88	1,71E-06	0,002
\dot{B}_k^{pf} (Gases de combustión)	25,1	8,700	1.321,85	9,50E-02	125,553	30,086	8,7008	1.589,55	9,48E-02	150,612
18 y 19		0,025356	20,03	1,83E-02	0,3659		0,0254	30,11	1,46E-02	0,439
20		-1,7636	1.395,09	-1,82E-02	-25,448		-1,7636	1.673,53	-1,8E-02	-30,528
$\dot{Y}_{caldera}$					0,0569					0,057
$\dot{Y}_{turbina}$					0,0354					0,035
Suma					106,23					127,41
Flujos de salida del sistema										
17	14,43	7,36	5.296,94	2,01E-02	106,20	17,31	7,36	6.354,12	2,01E-02	127,40
\dot{B}_f					6,03					7,23
\dot{B}_p					131,65					157,93

Seguidamente, se presentan los resultados del análisis exergoambiental para el escenario de Cogeneración. Se advierte que en este escenario la corriente No 20, corresponde al flujo de energía generado por la planta presenta un flujo de impacto exergoambiental de -25,45 Pt/h y -30,53 Pt/h cuando hay una producción de 14,43 t/h y 17,31 t/h, respectivamente. Este valor negativo se debe interpretar como una cantidad de impactos ambientales removidos al proceso de generación de vapor. (Cavalcanti et al., 2.024, p. 6) y supone una mejora del proceso desde el punto de vista ambiental.

Por su parte, las variables que se calcularon del escenario de Cogeneración se representan en la siguiente tabla.

Variables exergoambientales escenario Cogeneración

Variables e indicadores	Producción de vapor	
	14,43 $\frac{t}{h}$	17,31 $\frac{t}{h}$
b_f [Pt/kW]	3,53E-04	3,53E-04
b_p [Pt/kW]	2,26E-02	2,26E-02
η_B	21,83	21,83
\dot{B}_D [Pt/h]	3,97	4,77
\dot{B}_{TOTAL} [Pt/h]	129,62	155,47

Los resultados anteriormente presentados, evidencian que una mayor producción de vapor genera mayor cantidad de impactos ambientales por unidad de tiempo. Donde nuevamente, la producción de 17,31 t/h de vapor en régimen cogeneración presenta un mayor valor de \dot{B}_{TOTAL} .

Flujos de impacto ambiental régimen co-firing.

Flujos de entrada al sistema	Producción de 14,43 t/h de vapor					Producción de 17,31 t/h de vapor				
	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]
1	2,31	0,29	12.714,99	3,34E-04	4,24	2,93	0,31	16.111,16	3,33E-04	5,37
5	15,38	0	50,41	0,00	0,00	18,71	0	61,35	0,00	0,00
7	6,59	0	6,67	0,00	0,00	8,02	0	8,12	0,00	0,00
2	14,43	1,03E-04	866,87	1,71E-06	0,00148	17,31	1,03E-04	1.039,88	1,71E-06	1,78E-03
8	0,74	-4,79	4.401,55	-1,57E-02	-69,12	0,74	-4,0389	4.401,55	-1,6E-02	-69,91
\dot{B}_k^{pf} (Gases de combustión)	24,82	7,20	904,00	1,15E-01	103,90	30,16	6,81	1.115,29	1,06E-01	117,88
18 y 19		0,002	1,223315	1,84E-02	0,02	21,90	0,001556	1,47	1,84E-02	0,03
$\dot{Y}_{Caldera}$					0,0569					0,0569
Suma					39,10					53,42
Flujos de salida del sistema										
16	14,43	2,72	5.273,46	7,44E-03	39,25	17,31	3,08	6.325,96	8,43E-03	53,32
\dot{B}_f					-64,85					-64,52
\dot{B}_p					39,25					53,32

A continuación, se presentan los resultados del análisis exergoambiental para el escenario Co-firing. Indicando en este escenario, que la corriente No 2 (Biogás) presenta un flujo de impacto ambiental con valor negativo. Se debe asumir que, entre menor es el valor negativo, mayor será la cantidad de impactos ambientales evitados.

A continuación se presentan los indicadores y variables de evaluación para el sistema de generación de vapor en modo co-firing.

Variables exergoambientales régimen Co-firing.

Variables e indicadores	Producción de vapor	
	$14,43 \frac{t}{h}$	$17,31 \frac{t}{h}$
b_f [Pt/kW]	-3,78E-03	-3,13E-03
b_p [Pt/kW]	8,91E-03	1,01E-02
η_B	-0,61	-0,83
\dot{B}_D [Pt/h]	-48,21	-47,95
\dot{B}_{TOTAL} [Pt/h]	55,77	70,02

De la tabla anterior, se puede apreciar que algunas de las variables calculadas poseen signo negativo, como es el caso del coeficiente exergoambiental η_B con valores mayores a -1. Esto indica, que la simulación del proceso realizando co-firing tiene la capacidad de reducir los impactos ambientales Producto, siendo la producción de vapor de 14,43 t/h el escenario que presento mejor desempeño, porque redujo los efectos ambientales a -61% con respecto de los impactos ambientales Fuente.

Por otro lado, también se debe resaltar que el termino b_f es negativo e indica la cantidad de impactos ambientales removidos por unidad de exergía Fuente que ingresa al sistema cuando

se realiza co-firing. Dado que \dot{B}_D es el producto del termino b_f (que para el escenario Co-firing es negativo) y el valor de A_{dt} , su valor indica que el sistema presenta una eliminación de impactos ambientales asociados a la destrucción de exergía, y es el escenario con producción de 14,43 t/h de vapor es el que mayor supresión realiza, porque es en este escenario donde hay una mayor destrucción de exergía.

Por último, se presentan los resultados calculados para el termino \dot{B}_{TOTAL} , el cual es coherente con los resultados anteriores. Los resultados indican, que es el escenario Co-firing con producción de 17,31 t/h de vapor, es el de mayor relevancia ambiental debido a que presenta mayor flujo de impactos.

Flujos de impacto ambiental régimen Co-firing-Cogeneración.

Flujos de entrada al sistema	Producción de 14,43 t/h de vapor					Producción de 17,31 t/h de vapor				
	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]	$\frac{t}{h}$	b_{ACV} [Pt/t vapor]	A_T [kW/h]	b_E [Pt/kW]	\dot{B}_j [Pt/h]
1	2,31	0,2935	12.714,99	3,33E-04	4,24	2,93	0,31	16.111,16	3,33E-04	5,37
5	15,38	0	50,41	0,00E+00	0,00	18,71	0	61,35	0,00	0,00
7	6,59	0	6,67	0,00E+00	0,00	8,02	0	8,12	0,00	0,00
2	14,43	1,03E-04	866,87	1,71E-06	0,00148	17,31	0,000103	1.039,88	1,71E-06	0,0018
8	0,74	-4,790	4.401,55	-1,57E-02	-69,12	0,74	-4,0389	4.401,55	-1,59E-02	-69,91
\dot{B}_k^{pf} (Gases combustión)	24,82	7,21	730,04	1,43E-01	104,04	30,16	6,81	906,48	1,30E-01	117,88
18 y 19		0,02536	20,03	1,83E-02	0,37		0,02536	24,03	1,83E-02	0,44
20		-1,7636	1.395,09	-1,82E-02	-25,45		-1,7640	1.673,53	-1,82E-02	-30,53
$\dot{Y}_{caldera}$					0,06					0,06
$\dot{Y}_{turbina}$					0,04					0,04
Suma					14,16					23,33
Flujos de salida del sistema										
17	14,43	0,98	5.296,94	2,67E-03	14,14	17,31	1,34	6.354,12	3,65E-03	23,20
\dot{B}_f					-64,52					-64,11
\dot{B}_p					39,59					53,73

En esta parte de los Apéndice, se encuentran los resultados del análisis exergoambiental para la simulación del escenario co-firing-cogeneración. En este anexo, se reportan los flujos de impactos ambientales de cada corriente que ingresan o salen del sistema, y también se exponen los flujos de impacto ambiental Fuente y Producto calculados del proceso.

Las variables para evaluar el desempeño exergoambiental de la planta, se presentan a continuación.

Variables exergoambientales régimen Co-firing-Cogeneración

Variables e indicadores	Producción de vapor	
	$14,43 \frac{t}{h}$	$17,31 \frac{t}{h}$
b_f [Pt/kW]	-3,76E-03	-3,12E-03
b_p [Pt/kW]	6,80E-03	7,69E-03
η_B	-0,61	-0,84
\dot{B}_D [Pt/h]	-42,62	-42,32
\dot{B}_{TOTAL} [Pt/h]	61,51	75,65

En este escenario, se presenta supresión de impactos ambientales, en las corrientes de ingreso, debido al empleo de biogás como combustible. Lo anteriormente dicho, se refleja en los valores negativos de las variables b_f y η_B .

Por otra parte, el escenario evaluado, también presentó remoción de impactos ambientales debido a la destrucción de exergía \dot{B}_D . Por último se debe destacar que, los valores reportados para la variable \dot{B}_{TOTAL} del escenario co-firing-cogeneración disminuyeron significativamente, si se compara con los resultados de la misma variable, del escenario de Cogeneración de energía eléctrica.