

La aplicación de la exergía al análisis de ciclo de vida. Un enfoque integrador para la medición de la sustentabilidad

Herrería, Elisabeth Ruth

eherreria@unlam.edu.ar

Universidad Nacional de La Matanza (Argentina).

Carucci, Juan

jcarucci@unlam.edu.ar

Universidad Nacional de La Matanza (Argentina).

Vidal, Mauro Hernán Ricardo

mvidal@unlam.edu.ar

Universidad Nacional de La Matanza (Argentina).

Jurado, Vanina Gabriela

vjurado@alumno.unlam.edu.ar

Universidad Nacional de La Matanza (Argentina).

Fecha de recepción RIII: 10/05/2024

Fecha de aprobación RIII: 27/10/2024

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo demostrar por qué la aplicación de la exergía a la metodología del análisis del ciclo de vida permite evaluar más integralmente la utilización de los recursos energéticos y no-energéticos consumidos en diversos procesos de reconversión energética. Por otra parte, la exergía puede ser considerada como un valor físico de un recurso, pudiendo cuantificarse y así presupuestar el alcance de los requerimientos para conocer qué tan eficiente exergéticamente resulta ser el consumo de energía y materia en determinados procesos. Así pues, se expone en primer lugar cómo se relaciona la exergía con la medición de la sustentabilidad. A continuación, se presenta cuáles resultan ser las limitaciones metodológicas en el análisis de ciclo de vida, y, por ende, sus implicaciones para la medición de la sustentabilidad en términos de impacto ambiental. Posteriormente, se compara el alcance del enfoque exergético aplicado al análisis de ciclo de vida para un caso hipotético de biodigestión de un flujo residual del faenamiento de ganado bovino, a fin de evaluar qué permite mejorar para la medición de sustentabilidad. Por último, se reflexiona sobre cómo la integración de la exergía a la metodología del análisis de ciclo de vida proporciona un enfoque integrador para avanzar en la evaluación de los impactos ambientales en términos de recuperación de eficiencia exergética y como medida de sustentabilidad, respondiendo así a un orden de cosas sujetas a transformaciones entrópicas.

Palabras Claves: exergía; análisis ciclo de vida; evaluación impactos ambientales; sustentabilidad.

Exergy applied to life cycle analysis. An integrative approach to measuring sustainability

ABSTRACT

This work aims to demonstrate why the application of exergy to life cycle assessment methodology gives a more comprehensive understanding of both energy and non-energy resources consumed in various energy conversion processes.

Moreover, exergy can be considered a physical value of a resource. In this respect, it might be quantified to account for requirements needed. In doing so, it is possible to determine how exergetically efficient might result to be the consumption of energy and materials in specific processes.

Firstly, it is explained how exergy relates to sustainability assessment.

Secondly, a discussion about methodological limitations in life cycle assessment and its implications for sustainability measurement in terms of environmental impacts are thoroughly examined.

Thirdly, a comparison between the exergetic approach and the conventional approach to life cycle assessment of a hypothetical case study of biogas from bovine slaughterhouse waste is presented to evaluate to which extent the exergetic approach provides a better measure of sustainability.

To sum up, some final considerations are put forward to provide insights into the application of exergy to life cycle assessment methodology. Therefore, the integration of exergy into this methodology might enhance the scope of sustainability measurement, delivering a better tool for assessing environmental impacts in terms of exergetic efficiency recovery, and as a response to an order of things subject to entropic transformations.

Keywords: exergy; life cycle analysis; environmental impact assessment; sustainability.

A aplicação da exergia à análise do ciclo de vida. Uma Abordagem Integrativa para a Mensuração da Sustentabilidade

RESUMO

O objetivo deste artigo é demonstrar porque a aplicação da exergia à metodologia de análise do ciclo de vida permite uma avaliação mais abrangente do uso de recursos energéticos e não energéticos consumidos em diversos processos de reconversão energética. Por outro lado, a exergia pode ser considerada como um valor físico de um recurso, sendo capaz de quantificar e assim orçar o alcance dos requisitos para saber quão eficiente, exergeticamente falando, é o consumo de energia e matéria em determinados processos. Desta forma, explica-se primeiramente, como a exergia está relacionada à mensuração da sustentabilidade. A seguir, são apresentadas as limitações metodológicas na análise do ciclo de vida e, portanto, suas implicações para a mensuração da sustentabilidade em termos de impacto ambiental. Posteriormente, estabelece-se uma comparação entre o alcance da abordagem exergetica aplicada e a análise do ciclo de vida para um caso hipotético de biodigestão de um fluxo residual do abate de bovinos, a fim de avaliar o que pode ser melhorado para a mensuração da sustentabilidade. Por último, faz-se uma reflexão sobre como a integração da exergia à metodologia de análise do ciclo de vida fornece um enfoque integrador para avançar na avaliação dos impactos ambientais em termos de recuperação da eficiência exergetica e como medida de sustentabilidade, respondendo assim a uma ordem de coisas sujeitas a transformações entrópicas.

Palavras chave: exergia; análise do ciclo de vida; avaliação de impacto ambiental; sustentabilidade.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se basa en un proyecto de investigación en curso, cuyo objetivo es evaluar a partir de un caso de estudio hipotético de biodigestión del flujo residual de la línea roja del faenamiento de ganado bovino, cómo la aplicación del análisis de ciclo de vida exergético (ACVx) permite identificar mejor los potenciales impactos ambientales del proceso de reconversión energética de residuos orgánicos industriales generados localmente en comparación con el análisis de ciclo de vida (ACV) en términos de eficiencia exergética. Así pues, el núcleo del problema a investigar surge de extender la tradicional metodología del ACV, estandarizada en las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006, al análisis exergético y su relación con la búsqueda de un manejo sustentable de procesos de reconversión energética para afrontar la denominada transición ecológica, paradigma emergente.

La metodología del ACV basada en los estándares de las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006 se erige en una herramienta que permite evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a procesos productivos y tecnológicos, productos y servicios con el propósito de cuantificar la sustentabilidad de los mismos y brindar un marco de referencia empírico para diferentes fines tales como eco-diseño, eco-etiquetado, descarbonización, reducción de agentes tóxicos, etc., asociados a la agenda de la eco-innovación y los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). No obstante, la metodología del ACV no se encuentra exenta de ciertos problemas dado que, si bien supone analizar un orden de cosas sujetas a cambio cualitativo, su puesta en práctica debe sortear precisamente una serie de cuestiones inherentes a cuantificar lo que esencialmente ocurre como transformaciones entrópicas.

Así pues, la incorporación del enfoque exergético a la metodología del ACV presentaría ventajas relativas a los inconvenientes que se presentan en el proceso de caracterización y valorización de los factores de los recursos energéticos y no-energéticos, recursos que difícilmente pueden ser medidos por una misma unidad de medida en la metodología convencional del ACV.

2. EXERGÍA Y SU RELACIÓN CON LA SUSTENTABILIDAD

En esta sección, se aborda la aplicación de la exergía como unidad de medida del ACV, especialmente, orientado a los flujos residuales de los procesos productivos. Su interrelación con el concepto de sustentabilidad ambiental surge a partir de la necesidad de evaluar los impactos ambientales producidos por los residuos generados durante los procesos productivos concernientes. Orientando el enfoque de esta interrelación en función del desarrollo sustentable, que considera el triple resultado de desarrollo económico, social y con la protección del medio ambiente, bajo este paradigma de análisis, se consideran los recursos invertidos en el tratamiento y/o la recuperación de los residuos utilizando a la exergía como una medida de su eficiencia e indicador de la degradación de la calidad de los recursos. Además, se vincularán estos conceptos con la aplicación a un caso de estudio hipotético de biodigestión de un flujo residual proveniente del faenamiento de ganado bovino.

Por un lado, la necesidad de cuantificar la cantidad de energía requerida en los flujos residuales de un proceso industrial plantea tomar un indicador que sea comparable y medible para las corrientes y sustratos principales que caractericen la transformación de su energía y calidad. Para ello, resulta relevante valerse de los principios de la termodinámica para sustentar la cuantificación y medición de la calidad de la energía asociada al tratamiento de los flujos residuales, particularmente, en el caso hipotético de estudio. El concepto de exergía se basa en la primera ley de la termodinámica explicándose en el principio de conservación de la energía que establece que nada desaparece porque la energía no se crea ni se destruye, y en la segunda ley, relacionada con la calidad de la energía, que trata específicamente de la degradación de la energía durante un proceso.

La aplicación de la exergía como unidad de medida única y comparable para los distintos flujos de residuos es de gran importancia. Según proponen Jaimes, Rocha, Vesga y Kafarov (2012) la utilización del balance de exergía en un proceso productivo “es considerada una herramienta de estudio y diagnóstico de sistemas, útil en el diseño de soluciones alternativas que busquen reducir la utilización innecesaria de recursos, y por ende los impactos potenciales generados por la misma, orientando así hacia la búsqueda del desarrollo sostenible” (Jaimes M. et al., 2012).

En cuanto al concepto de exergía, los estudios surgen a mediados del siglo XX, focalizándose en las aplicaciones energéticas y de eficiencia de procesos de producción. De igual forma, la investigación desarrollada a partir de esa época es continuada en este sentido; sin embargo, esos estudios no incluyen sistemas de aguas residuales (Ibagón Gutiérrez, 2021, p. 171). No obstante, cabe destacar que resulta sustancial el aporte potencial de evaluar la degradación en la calidad de los recursos, energéticos y no energéticos, dado que “cuando hay irreversibilidades presentes durante el proceso, entonces parte del potencial de generar trabajo que existía originalmente es disipado.” (Jaimes M. et al., 2012) entendiendo esta disipación como pérdida de trabajo útil, lo cual es posible su medición en una unidad común para todos los recursos. Más precisamente, se puede definir el concepto de exergía como un trabajo potencial del sistema cuando está llegando al equilibrio con el medio ambiente (Ignatenko, van Schaik & Reuter, 2007; Szargut, 2005).

Asimismo, para la recuperación de recursos a partir de residuos es de mayor difusión la aplicación de dos enfoques metodológicos para la contabilidad de recursos en el análisis de exergía y definiciones de sistemas. Por un lado, el enfoque de mapear todos los flujos y pérdidas de exergía dentro del sistema bajo investigación denominado “análisis de flujo de exergía”, y el enfoque de contabilidad de exergía siguiendo los principios de evaluación del ACVx mediante la aplicación de indicadores a los materiales y recursos incluidos en el sistema (Laner, Rechberger, De Soete, De Meester & Astrup, 2015, p.654), siendo esta última metodología la que se desarrollará en este trabajo.

Sobre la aplicación de la exergía como unidad común de medida, diversos autores plantean metodológicamente la demanda acumulada de exergía, con relación al ciclo de vida de un producto. Se propone como indicador “Cumulative Exergy Demand (CExD)” que se especifica en MJ-eq. como la sumatoria de exergía de todos los recursos intervinientes para proporcionar un proceso o producto. De igual forma, se plantea la CExD por unidad de producto, dividiendo el requerimiento total de exergía por el número de salidas de la unidad durante este período de tiempo (Bösch, Hellweg, Huijbregts & Frischknecht, 2007, p. 182). Esto permite el cálculo del requerimiento de recursos a partir de las bases de datos del ciclo de vida como Ecoinvent con un enfoque específico del producto. Asimismo, esta metodología brinda la posibilidad de contemplar como recurso para cálculo en las distintas categorías de CExD el agua, la biomasa y los recursos renovables, en comparación con CML'01 (the abiotic-resource-depletion category of CML 2001) y Eco-indicator 99, que no contemplan estos recursos o en las categorías CED (demanda acumulada de energía) que sí evalúa la biomasa, pero no el agua (Bösch et al., 2007, p. 181). Por otra parte, el indicador CExD incluye la calidad de la energía y los materiales no utilizados energéticamente, siendo fácilmente calculable los valores de exergía para los recursos con composición conocida.

De igual forma, diversos autores basan la metodología en el reconocimiento que la exergía acumulada ocurre en forma de energía química, térmica, cinética, potencial, nuclear y radiactiva (Bösch et al., 2007; Ignatenko et al., 2007; Jaimes M. et al., 2012; Szargut, 2005) incluida en los recursos evaluados, considerando las formas de energía relevantes asociadas a la utilización de cada recurso. Por lo tanto, algunas variantes en la aplicación y clasificación de esta metodología dependerán de los recursos intervinientes y de los procesos evaluados.

Por su parte, Ignatenko (2007) propone estimar la sostenibilidad del rendimiento de los sistemas utilizando como indicador la eficiencia de los recursos, así como la recuperación de eficiencia; donde toma como herramienta de análisis exergético la eficiencia en el uso de los recursos, calculada como este sistema total. Determinando la exergía del sistema como:

$$E = (U - U^{eq}) + p^0 \cdot (V - V^{eq}) - T_0(S - S^{eq}) - \sum_c \mu_c^0 (n_c - n_c^{eq}) \quad (1)$$

Donde E refiere al valor de exergía del sistema, U, V y S son la energía, el volumen y la entropía del sistema; U^{eq} , V^{eq} y S^{eq} la energía, el volumen y la entropía del sistema en equilibrio con el entorno; p^0 y T_0 el presión y temperatura del ambiente; μ_c^{eq} es el potencial químico en el equilibrio con el medio ambiente (estado de referencia); n_c y n_c^{eq} son la concentración del componente c y en el equilibrio con el ambiente.

De una forma más general, Jaimes M. et al. (2012) consideran que se pueden clasificar las pérdidas de exergía, entre pérdidas externas (productos de desecho, pérdida de calor y pérdidas en la conversión de exergía) y pérdidas internas (pérdida en la calidad de la exergía dado el aumento de entropía del sistema). En el cálculo del balance de exergía para un proceso estacionario, estos últimos autores definen el balance total de exergía en estado estacionario como la exergía que entra al sistema igualándola a las exergías que salen sumado a las que se destruyen y se pierden del sistema, siendo de mayor utilidad en procesos continuos estacionarios.

$$E_{entra} = E_{sale} + E_{pierde} + E_{destruye} \quad (2)$$

Donde E refiere al valor de exergía del sistema.

En cuanto al desarrollo e investigación en Latinoamérica sobre la aplicación de la exergía, como unidad de medida, se ha centrado en la evaluación de combustibles energéticos y eficiencia de procesos de producción energética, siguiendo las líneas de investigación iniciales, siendo aún incipiente su aplicación a flujos residuales en la referida región (Ibagón Gutiérrez, 2021, p. 171,). Por otra parte, la aplicación de la exergía, como unidad de medida, viene siendo observada como estrategia de investigación regional para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el tratamiento de flujos residuales, fundamentalmente para la reducción de contaminantes y mejora de la calidad del agua; esto se debe a factores socioeconómicos, desarrollo agrícola e industrial, crecimiento de la población y la baja atención social y política que generan un incremento sobre la carga y el volumen de contaminación de las aguas residuales (Ibagón Gutiérrez, 2021, p. 171). Este tipo de análisis exergético proporciona las herramientas de cálculo para determinar la sostenibilidad de sistemas de aguas residuales, además, este trabajo representado en el concepto de exergía podría convertirse en energía utilizada para los sistemas de aguas residuales y otros procesos.

Lo abordado hasta aquí, sugiere que, en la evaluación de los recursos asociados a flujos residuales de un proceso industrial, la inclusión de metodologías que consideran la exergía como unidad de medida totalizante permitirá contemplar tanto recursos energéticos como no energéticos, para los que se conozca su composición. Esto corresponderá en la consideración de la inclusión de recursos como ser el agua, la biomasa o las energías renovables con mayor facilidad en el cálculo del ACVx y el desarrollo de su potencial para determinar la sostenibilidad de sistemas de flujos residuales.

3. LIMITACIONES METODOLÓGICAS EN EL ACV. IMPLICACIONES PARA LA MEDICIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

Si en la anterior sección, se plantearon ciertas consideraciones metodológicas asociadas a la exergía como medida de sustentabilidad de recursos energéticos y no-energéticos, entonces, resulta apropiado interpelar epistemológicamente la metodología del ACV para comprender por qué la aplicación de la exergía al ACV viene a resolver ciertas limitaciones metodológicas a la medición de la sustentabilidad.

Convencionalmente y en base a los requisitos y directrices señalados en la Norma IRAM-ISO 14044:2008, un estudio de ACV presenta 4 fases: 1) la definición del objetivo y el alcance, en donde se define cuál es el propósito y qué se pretende analizar; 2) el análisis del inventario del ciclo de vida, en donde se realiza un inventario para calcular las entradas y salidas del sistema bajo estudio; 3) la evaluación del impacto ambiental, en donde se evalúan los impactos ambientales significativos en base a ciertas categorías de impacto ambiental, y 4) la interpretación de los resultados hallados.

Considerando que la primera fase de la referida metodología comprende definir los límites del sistema de un producto o procesos en estudio, resulta plausible comprender que establecer los límites de un sistema de referencia en un estudio de ACV se presenta en la práctica como viajar desde un Todo sin costuras a una porción de ese Todo, porque se otorga esencialidad a la intencionalidad representada en ese ámbito de estudio. Así pues, la delimitación tanto del sistema de referencia como de la unidad funcional del sistema en estudio conduce necesariamente a preguntarse acerca de cuál es el propósito perseguido.

Entonces, preguntarse acerca de la relevancia del propósito, subyacente en la identificación de los límites del sistema en el contexto de un estudio de ACV, conlleva a interrogarse acerca de las complejidades que supone delimitar analíticamente un proceso. Así pues, todo proceso denota cambio cualitativo, y todo cambio cualitativo se ubica en el orden de lo dialéctico. Por lo tanto, un orden dialéctico representa un desafío epistemológico a superar dado que sin posibilidad de describir analíticamente la variedad de procesos en que deviene, por ejemplo, la reconversión energética de residuos orgánicos industriales (ROIs), no es posible comprender los cambios que acontecen para que tal acontecimiento suceda, vale decir la obtención de energía a partir de ROIs.

De igual forma, la definición de los límites en la primera fase de un ACV también se asocia con la consideración epistemológica de cómo no caer en una regresión infinita y al mismo tiempo poder saber qué se puede conocer de aquello que está siendo transformado. En el caso de la reconversión energética de ROIs, ¿cómo saber qué parte del todo interesa delimitar analíticamente si no se ha otorgado un propósito analítico al mismo? En este caso, el Todo incluiría desde los recursos energéticos y no energéticos consumidos en el mismísimo proceso de generación de ROIs hasta en qué coordenadas espaciales y temporales se consume por ejemplo el biogás obtenido de esos ROIs. Pero si no hay un propósito analítico resultaría lo mismo establecer un límite analítico para ese Todo, lo cual en definitiva sería una imposibilidad analítica y, por ende, no poder conocer en qué deviene aquello que se transforma y que sí interesa conocerse.

En cuanto a la segunda fase del ACV, la realización de un análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) implica definir en términos analíticos qué elementos entran y salen del límite del sistema de referencia en estudio, de modo de adentrarse en el procedimiento de realizar su cuantificación en un intervalo de tiempo que denota que el fenómeno en estudio se sujeta analíticamente a una duración que discretamente posee inicio y fin.

Asimismo, esta fase, a la vez, puede ser interpretada como un fenómeno dialéctico porque denota cambio de cualidades, pero y a pesar de que se está en un plano del orden de lo cualitativo, necesita en términos analíticos integrarse en un solo modelo formal, siendo precisamente el ICV de las entradas y salidas del proceso. De tal manera que los flujos de ingreso y egreso conforman el límite del proceso en un intervalo de tiempo, que al tener un principio y un fin expresan irreversibilidad, y lo que pretende cuantificarse

es precisamente una serie de transformaciones entrópicas de lo que ocurre cuando los flujos no-energéticos y energéticos, que tanto entran o salen de aquello que está siendo transformado, cambian de cualidades como la calidad del flujo de salida del agua en un proceso de digestión anaeróbica de ROIs.

De ahí que el proceso de construcción del ICV, cuando se pone en práctica, resulta ser extremadamente complejo, requiriéndose apelar a estrategias de simplificación recientemente debatidas por Beemsterboer, Baumann y Wallbaum (2020). Por ende, en la práctica, el procedimiento del inventario del ACV puede interpretarse como un fenómeno dialéctico que se va constituyendo en un esquema formal, y de tal forma, su propósito yace en elucidar analíticamente las cualidades de lo que entra y egresa, aunque no pueda dar cuenta verdaderamente de aquello que ha cambiado cualitativamente. Ahora bien, ¿por qué no verdaderamente verdadero?; porque la verdad propositiva va a venir dada por un orden que no se sujeta a cambios cualitativos, sino que a un orden en donde solo operan cambios que sí pueden ser sujetos plenamente a cuantificación, pero en tal caso no se estaría ante una representación real de lo que esencialmente no se sujeta al cambio cualitativo como lo es un proceso de reconversión energética.

Por lo tanto, las estrategias tanto de exclusión de determinados flujos como los enfoques semi cuanti-cualitativos (Arzoumanidis, Salomone, Petti, Mondello & Raggi, 2017; Beemsterboer et al., 2020; Heiskanen, 2002; Hur, Lee, Ryu & Kwon, 2004; Moberg et al., 2014) que permiten construir un ICV híbrido han de ser diferentes formas que implícitamente expresan la imposible proeza de aprehender en un solo modelo formal todas las transformaciones cualitativas ocurridas en los distintos procesos incluidos en un sistema bajo estudio.

Así las cosas, tanto la tercera como la cuarta fase de un ACV no están exentas de verse atravesadas por consideraciones epistemológicas. Fundamentalmente, la aplicación de estrategias de exclusión de categorías de impacto ambiental debatidas frecuentemente en la fase de la evaluación de impactos en el ciclo de vida (EICV) y en la fase de interpretación del ciclo de vida (Beemsterboer et al., 2020; Bretz y Frankhause, 1996; Cheng et al., 2018; Fleisher, Gerner, Kunst, Lichtenvort & Rebitzer, 2001; Hochschorner y Finneveden, 2003; van der Werf, Knudsen & Cederberg, 2020;) reflejan cómo la subjetividad y la arbitrariedad interpelan los resultados obtenidos de acuerdo a cómo se ha podido medir ciertos fenómenos para los cuales no se ha aplicado una única medida.

Así pues, la metodología del ACV se ha visto cuestionada como herramienta para evaluar los impactos ambientales, precisamente por los niveles de subjetividad introducidos en las señaladas fases, emergiendo de esta forma la necesidad de aplicar un enfoque más riguroso (Bösch et al., 2007; Nwodo y Anumba, 2020), y reconociendo un marco termodinámico desde donde cuantificar la sostenibilidad de un sistema bajo estudio (Finnveden, Arushanyan & Brandão, 2016).

Las limitaciones señaladas abrieron el camino para introducir al análisis exergético como un método superador, no solamente como indicador del agotamiento de recursos, sino que principalmente como un enfoque que permite cuantificar en una misma unidad de medida los recursos energéticos y no-energéticos (Simpson y Edwards, 2011; Morosuk, Tsatsaronis & Koroneos, 2016). Por ende, el análisis de exergía puede ser empleado en la fase del ICV para medir en una misma unidad de medida los flujos de entrada y salidas, y evaluar con mayor objetividad los impactos ambientales en términos de recuperación de eficiencia exergética.

Considerando que la misma norma, señala que “no hay base científica para reducir los resultados del ACV a un único número o a una única puntuación global, ya que la ponderación requiere juicios de valor” (IRAM-ISO 14040:2008, p. 143), entonces cabría evaluar en la próxima sección de este trabajo qué permite mejorar la aplicación del ACVx a partir de un caso de estudio hipotético de biodigestión de un flujo residual del faenamiento de ganado bovino.

4. EL ENFOQUE EXERGÉTICO APLICADO AL ACV Y LA MEDICIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

En esta sección se compara el alcance del enfoque exergético aplicado al análisis de ciclo de vida para el caso hipotético de biodigestión de un flujo residual del faenamiento de ganado bovino para analizar cómo este enfoque permite mejorar la evaluación del impacto ambiental en términos de recuperación de eficiencia exergética como medida de sustentabilidad en comparación con el ACV.

La elección del referido estudio de caso hipotético se basó en el siguiente proceso. Primero, se georreferenciaron establecimientos industriales en el área local para generar un mapa con una base de datos para identificar los flujos residuales de los ROIs más representativos por rama de actividad. Después, se clasificaron los establecimientos industriales georreferenciados al nivel de cuatro (4) dígitos de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme Revisión 4 - CIIU Rev.4 (Naciones Unidas, 2009) y a nivel de seis (6) dígitos del Código del Listado Europeo de Residuos (LER) (Decisión 2014/955/UE). El empleo del referido código se basó en la inexistencia de una clasificación nacional o regional, optándose por utilizar este código como estándar ampliamente difundido a nivel global. Posteriormente, se procedió al entrecruzamiento de los datos según su correspondencia en el código LER y en función de las actividades basadas en el tercer dígito del CIIU Rev. 4 para identificar específicamente los flujos residuales más representativos locales. De este entrecruzamiento, se observó que un 32,3% corresponden a establecimientos de faenamiento de ganado bovino y un 23,5% a industrias farináceas. Luego, se optó por elegir el flujo residual de la denominada línea roja de las actividades de faenamiento de ganado bovino como flujo de entrada principal para la reconversión energética de este ROI, asumiendo un proceso genérico de degradación anaeróbica por medio de una biodigestión típica correspondiente al estado de arte en dicho proceso. Asimismo, se indica que el criterio para la elección de esta opción se basó en la alta variabilidad de los compuestos presentes en los flujos residuales de las industrias farináceas y que, a la vez, estos se destinan mayoritariamente a las chancherías locales.

Por consiguiente y entendiendo que el propósito de realizar este estudio de caso hipotético es validar en la fase del ICV la aplicación del enfoque exergético en comparación con el ACV convencional, se estableció que el objetivo principal de este estudio hipotético sería analizar el alcance del ACVx con respecto al alcance del ACV para validar la tesis de por qué la recuperación de eficiencia exergética resulta ser una medida más robusta para evaluar los impactos ambientales en un proceso genérico de digestión anaeróbica de la línea roja del faenamiento de ganado bovino. Por lo tanto, la unidad funcional y debido al carácter hipotético de este estudio podría establecerse en x cabezas faenadas de ganado bovino por mes o por día, siendo los límites del sistema bajo estudio los detallados en la Figura 1. De esta forma, se observa en la referida figura cómo el límite del entorno del sistema bajo estudio representa ese Todo indicado en la sección anterior y cómo el límite del sistema bajo estudio viene a representar el itinerario desde ese Todo sin costuras a una porción de ese Todo, estableciéndose así un límite analítico. Esta definición del objetivo y del alcance indicados, como asimismo la unidad funcional seleccionada y los límites del sistema, constituirían la fase 1 para este estudio de caso hipotético.

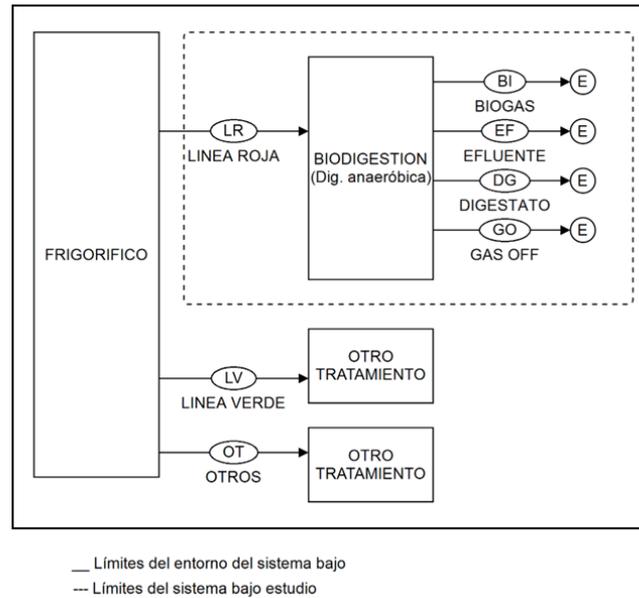


Figura 1 Límites del entorno del sistema y límites del sistema bajo estudio.

Tal como se señaló en la sección anterior, la fase del ICV denota cómo el cambio de cualidades de lo que entra y sale del sistema bajo estudio demanda en términos analíticos ser integrado en un modelo formal para cuantificar un orden de cosas cualitativas que de alguna manera necesitan un ordenamiento analítico, y así evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a la reconversión energética de la mencionada línea residual de este estudio de caso hipotético. Así pues, la Tabla 1 presenta los principales compuestos del principal flujo de entrada al proceso de biodigestión según su valor exergético asociado y según su posible factor de caracterización por el cual resulta posible su cuantificación convencional. De igual manera, la Tabla 2 exhibe los principales compuestos de los flujos de salida del proceso de biodigestión en ambos métodos. Por ende, la construcción del ICV refleja la posibilidad de cuantificar de alguna manera las transformaciones entrópicas del referido proceso.

Considerando el propósito y el alcance definido en la fase 1, resulta conveniente en la fase del ICV evaluar el valor exergético asociado a cada línea de entrada y salida al proceso de biodigestión. Luego, resulta posible el análisis del flujo de exergía a través de la eficiencia de recuperación de recursos, según los planteado por Laner et al. (2015) como:

$$\text{Resource recovery efficiency} = \frac{\text{Exergy (useful outputs)}}{\text{Exergy (inputs)}} \quad (3)$$

Es decir, que dicha eficiencia Laner et al. (2015) la calcula dividiendo el contenido de exergía de los productos útiles por todos los insumos de exergía del escenario de tratamiento de residuos. En este caso de estudio hipotético, las primeras serían el biogás y el digestato (flujos de salida) y, siendo la segunda, la línea roja (flujo de entrada). Esto muestra las pérdidas de exergía en el sistema de biodigestión, siendo estos procesos reales, por lo tanto, procesos irreversibles que provocan la destrucción de la exergía.

Para la definición del valor de exergía a partir de la ecuación 4 para sistemas estacionarios, al considerar en este caso individualmente entradas y salidas, la exergía del sistema puede definirse a partir de “dividirse en cuatro componentes: exergía física, cinética, potencial y química” (Jaimes et al., 2012, p. 64), según la ecuación:

$$E = E^f + E^p + E^c + E^q \quad (4)$$

Donde E refiere al valor de exergía del sistema, E^f refiere a la exergía física, E^p refiere a la exergía potencial, E^c refiere a la exergía cinética, E^q refiere a la exergía química.

Dado que en el caso de estudio hipotético las exergías cinéticas y potencial se consideran despreciables, dichos términos de la ecuación no se tienen en cuenta. Además, en referencia a la exergía física del sistema, tanto el flujo de entrada como flujos de salida sus condiciones son próximas al ambiente estable, donde el valor de la exergía química describe adecuadamente sus principales componentes.

Para caracterizar los componentes de los principales flujos de entrada y de salida, dado que el caso en estudio es hipotético, se consideró bibliografía desarrollada para el caso de balance de exergía, ACVx y evaluación energética de procesos de faena bovina. Es destacable que la variabilidad de los flujos residuales y el tratamiento de biodigestión es relevante y se debe tener en cuenta tanto el tipo de ganado bovino, así como, el proceso de faena y pretratamiento de residuos aplicado (FAO, 2011; Pagés Diaz, 2015; Ware & Power, 2016). Por tal motivo, y dado que el motivo de este trabajo es validar la metodología y ventajas del ACVx respecto del ACV convencional, se consideran como principales compuestos representativos de la línea roja (flujo de entrada) los siguientes: lípidos, proteínas, carbohidratos y agua, donde el principal compuesto en dicho caso de estudio serán los lípidos de origen animal con alto valor exergético y potencial generación de metano (CH_4), así como, la aparición de carbohidratos en cantidad relevante dependerá del proceso de faena y la separación o no de la denominada línea verde.

Respecto a los flujos de salida, los identificados en el caso de estudio hipotético son el biogás, digestato, efluente y gas-off; los dos primeros de estos considerados como los flujos de productos útiles en la ecuación para eficiencia de recuperación de recursos. Para la determinación general de estos flujos, se utilizó la tabla 3 de Laner et al. (2015, p. 658) donde se consideran los principales compuestos en base al trabajo sobre la aplicación del análisis del flujo exergético y la evaluación del ciclo de vida exergético en residuos vegetales y domésticos, que se detallan en la Tabla 2. Cabe mencionar que a esta caracterización se incluye dentro del *gas-off* la presencia de amoníaco (NH_3), dados los compuestos identificados en el flujo de entrada, y que los diversos procesos de biodigestión consultados en el proceso metanogénico producen en etapas intermedias la generación de compuestos que en su forma estable se puede caracterizar como amoníaco en estado gaseoso como parte de los gases liberados al ambiente (*gas-off*).

Ahora bien, se observa en ambas tablas que al aplicar el método exergético en el ICV resulta posible calcular en una misma unidad de medida el valor asociado a cada uno de los principales componentes tanto del flujo de entrada como de los flujos de salida. En contraste, se aprecia que en la metodología convencional surge una variedad de unidades de medida que no necesariamente proporcionan el valor propio de ese componente identificado. Esta variedad de unidades de medida se debe a que en la metodología convencional los compuestos tanto de las entradas como de las salidas se asocian a determinadas categoría de impacto ambiental, que se cuantifican en relación con una emisión por categoría de impacto. Por lo tanto, el principal compuesto es informado en términos relativos a una específica emisión, basándose en factores de ponderación que permiten expresar el potencial de determinada categoría de impacto ambiental en términos de equivalente de la sustancia o del compuesto específico para esa determinada categoría de impacto ambiental.

No obstante, cabe indicar que las categorías de impacto ambiental por las cuales se caracterizan los compuestos se distinguen según la escala espacial asociada a los efectos de esos impactos, clasificándose así en locales las categorías de eutrofización, acidificación y formación de ozono fotoquímico y en

globales las categorías de cambio climático, agotamiento de ozono estratosférico, agotamiento de recurso bióticos y abióticos, entre otras categorías.

En principio, los factores de caracterización de aquellas categorías de impacto ambiental global podrían resultar más objetivos, asumiendo que los efectos del potencial de calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y de los recursos bióticos y abióticos se distribuyen por igual a escala global. Sin embargo, suponer que los potenciales impactos afectan de igual manera a diferentes áreas geográficas resultaría desdeñar la variabilidad de esos impactos a escala local y/o regional. El caso testigo evidente sería la diferencia entre el estado de situación de la capa de ozono en el hemisferio sur en comparación con el hemisferio norte.

Habiendo realizado estas consideraciones, se evidencia al observar la última columna de las tablas 1 y 2 que en el ACV tradicional el proceso de cuantificación de los flujos de entrada y salida se vuelve menos objetivo y robusto para aquellos compuestos asociados a categorías de impactos ambientales locales, tales como la acidificación y la eutrofización, debido a que se requerirían calcular los factores de caracterización de estas categorías de impacto ambiental locales en base a modelos que introducen sesgos, debido a que se emplearían criterios de caracterización que no necesariamente se ajustarían a factores objetivos aplicables a una escala local.

Tal como objetan Nwodo y Anumba (2020) esas caracterizaciones se basan en la persistencia en que la cantidad de emisiones son liberadas como asimismo en su duración en el ambiente local, en la determinación de las especies presentes en el ecosistema expuesto a esas emisiones, y en el resultado del impacto sobre las especies en el ecosistema. Por consiguiente, la EICV asociada a esos factores se basará en estimaciones que presentan sesgos; por ende, la interpretación de esos resultados puede ser objetable. Por otra parte, y en referencia a las categorías de impactos ambientales locales, la mayoría de las bases de clasificación y caracterización utilizadas en el ICV han sido creadas para Europa y Norteamérica, condicionando de esta manera su aplicación por fuera de esas áreas y/o regiones. Si bien en la base de ReCiPe 2016, los factores de caracterización pueden llegar a ser representativos para una escala global, podrían surgir sesgos porque en gran medida ReCiPe 2016 se basa en la versión 2008 para escala europea, y porque el proceso de escalamiento global referido no ha sido bien documentado.

Asimismo, se observa al comparar el ICVx con el ICV convencional que los principales compuestos del flujo de entrada de la línea roja y el flujo de salida del digestato no podrían ser asociados a ninguna categoría de impacto ambiental, a excepción del agua de forma indirecta para la categoría de impacto de eutrofización por medio de considerar N total al agua como el factor para caracterizar los impactos asociados tanto a esa entrada como a esa salida. De igual forma, podría suponerse para las vísceras considerar al parámetro de la demanda química de oxígeno (DQO) como indicador asociado a la categoría de impacto de eutrofización. Asimismo, tanto el nitrógeno como el oxígeno presentes en el gas-off, si bien poseen potenciales efectos por ser altamente reactivos y convertirse en sustancias con potenciales impactos ambientales, no pueden por sí mismas ser identificadas con alguna de las categorías de impacto ambiental más utilizadas. En tal caso habría que suponer al N₂ como un NO_x para que de esta forma pueda ser asociado a las categorías de calentamiento global, eutrofización y acidificación y al O₂ como CO para ser relacionado con la categoría de formación de smog fotoquímico. Por ende, estas limitaciones planteadas en relación con la dificultad de cuantificar los compuestos de los flujos mencionados en el ICV tradicional traería aparejada ciertas implicaciones tanto en la fase de la EICV como en la posterior fase de interpretación de los resultados hallados.

Tabla 1 Análisis de Inventario - Flujos de entrada.

Flujo	Compuestos más representativos (2)	ACVx: Método de cálculo exergético y valor exergético asociado (1)		ACV: Unidad de medida según la categoría de impacto ambiental asociado
Línea Roja	Vísceras: Lípidos (C ₁₆ H ₃₂ O ₂) Proteínas (C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄) Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅) Agua, l (H ₂ O)	Exergía química (b ⁰)	-C ₁₆ H ₃₂ O ₂ ; C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄ (exergía química b ⁰ en KJ/mol, según Tabla I, Tabla II y Tabla III de Szargut, 2005) (3) - C ₆ H ₁₀ O ₅ (exergía química b ⁰ : 2749,9 KJ/mol) (4) - H ₂ O (exergía química b ⁰ : 0,9 liq KJ/mol) (1)	H ₂ O: Eutrofización, indirectamente por medio de N al agua kg equivalente PO ₄ ³ /kg

(1) Morris & Szargut, 1986; Szargut 2005: T_n = 298,15 K p_n = 101,325 KPa

(2) FAO, 2011; Pagés Diaz, 2015, Ware & Power, 2016.

(3) Szargut, 2005: T_n = 298,15 K p_n = 101,325 KPa

(4) Jaimes, M. et al., 2012

Tabla 2 Análisis de Inventario - Flujos de salida. Comparación entre ACVx y ACV.

Flujo	Compuestos más representativos (3)	ACVx: Método de cálculo exergético y Valor exergético asociado (1)		ACV: factor de caracterización de la categoría de impacto ambiental y unidad de medida
Biogás	Metano, g (CH ₄) Agua, g (H ₂ O) Dióxido de carbono, g (CO ₂)	Exergía química (b ⁰)	- CO ₂ (exergía química b ⁰ : 19,87 KJ/mol) (1) - H ₂ O (exergía química b ⁰ : 9,49 gas KJ/mol) (1) - CH ₄ (exergía química b ⁰ : 831,65 gas KJ/mol) (2)	- CO ₂ : Potencial de calentamiento global kg equivalente CO ₂ /kg - H ₂ O: Potencial de eutrofización, indirectamente por medio de N al agua kg equivalente PO ₄ ³ /kg - CH ₄ : Potencial de calentamiento global Indicador: kg equivalente CO ₂ /kg

Digestato	Agua, l (H ₂ O) Alanina (C ₃ H ₇ NO ₂) Celulosa (C ₆ H ₁₀ O ₅) Ácido oleico (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	Exergía química (b ⁰)	- H ₂ O (exergía química b ⁰ : 0,9 liq KJ/mol) (1) - C ₃ H ₇ NO ₂ (exergía química b ⁰ : 1689,4 sol KJ/mol) (2) - C ₆ H ₁₀ O ₅ (exergía química b ⁰ : 2749,9 KJ/mol) (4) - C ₁₈ H ₃₄ O ₂ (exergía química b ⁰ : 11239,16 KJ/mol) (4)	H ₂ O: Potencial de eutrofización, indirectamente por medio de N al agua kg equivalente PO ₄ ³ /kg
Efluentes	Agua, l (H ₂ O)	Exergía química (b ⁰)	- H ₂ O (exergía química b ⁰ : 0,9 liq KJ/mol) (1)	H ₂ O: Potencial de eutrofización, indirectamente por medio de N al agua kg equivalente PO ₄ ³ /kg
Gas-off	Nitrógeno, g (N ₂) Oxígeno, g (O ₂) Agua, g (H ₂ O) Dióxido de carbono, g (CO ₂) Amoniaco, g (NH ₃) (2)	Exergía química (b ⁰)	- N ₂ (exergía química b ⁰ : 0,72 KJ/mol) (1) - O ₂ (exergía química b ⁰ : 3,97 KJ/mol) (1) - H ₂ O (exergía química b ⁰ : 9,49 gas KJ/mol) (1) - CO ₂ (exergía química b ⁰ : 19,87 KJ/mol) (1) - NH ₃ (exergía química b ⁰ : 337,9 KJ/mol) (1)	- H ₂ O: Potencial de eutrofización, indirectamente por medio de N total al agua kg equivalente PO ₄ ³ /kg - CO ₂ : Potencial de calentamiento global kg equivalente CO ₂ /kg - NH ₃ : Potencial de acidificación kg equivalente SO ₂ /kg

(1) Morris & Szargut, 1986: T_n = 298,15 K p_n = 101,325 KPa

(2) Morris & Szargut, 1986: T_n = 298,15 K p_n = 101,325 KPa y Gharagheizi et al 2014

(3) Laner et al., 2015, Tabla 3

(4) Jaimes M. et al., 2012

(5) Szargut, 2005: T_n = 298,15 K p_n = 101,325 KPa

5. REFLEXIONES FINALES

Dado que el presente estudio se basa en un caso hipotético, resulta apropiado resaltar una serie de consideraciones a modo de reflexiones finales con el propósito orientador de demostrar por qué la exergía como medida de eficiencia e indicador de la degradación de la calidad de los recursos, permite comprender los impactos ambientales en términos de recuperación de eficiencia exergética, y por lo tanto una medida de sustentabilidad más objetiva.

En primer lugar, se ha visto que la necesidad de cuantificar la cantidad de energía requerida en los flujos residuales de un proceso industrial plantea tomar un indicador comparable y medible para las corrientes y sustratos principales a fin de caracterizar la transformación de su energía y calidad. Por ende, se ha resaltado la relevancia de la aplicación del concepto termodinámico de exergía como unidad de medida única y comparable para los distintos flujos de residuos.

En segundo lugar, se ha examinado cómo en Latinoamérica la aplicación de la exergía, como unidad de medida, se ha centrado en la evaluación de combustibles energéticos y eficiencia de procesos de producción energética, siguiendo las líneas de investigación iniciales de esta área de estudio. Asimismo, se ha indicado que su aplicación a flujos residuales es aún incipiente, y que la inclusión de metodologías que reconozcan a la exergía como unidad de medida totalizante, posibilitará considerar tanto los

recursos energéticos como no energéticos con composición conocida en el tratamiento de flujos residuales bajo estudio a fin de evaluar su sustentabilidad (Ibagón Gutiérrez, 2021, p. 171).

En tercer lugar, se ha demostrado por medio de interpelar la base epistemológica de las fases del ACV por qué esta metodología se presenta como una práctica que constantemente busca simplificarse, de manera tal de no olvidarse que su propósito sigue siendo capturar la esencia cualitativa de los fenómenos que aborda, y que como tal, necesita valerse de esquemas analíticos para reflejar mejor las transformaciones entrópicas para evaluar e interpretar hasta dónde llega el alcance de un determinado conjunto de impactos. De ahí que el ACVx vendría a simplificar el proceso de construcción del ICV, otorgando un mayor nivel de objetividad en ese esquema analítico, otorgando de esta manera una medición más integral de esas transformaciones entrópicas al momento de realizar la EICV y la interpretación de los resultados hallados.

En cuarto lugar, se ha demostrado que el análisis del flujo de exergía a través de la eficiencia de recuperación de recursos propuesta por Laner et al. (2015) e indicada en ecuación 3 permite conocer las pérdidas de exergía en el sistema de biodigestión del caso hipotético seleccionado, siendo un proceso irreversible que provoca la destrucción de la exergía y de ahí su relevancia para la evaluación ambiental en términos de eficiencia exergética.

En quinto lugar, se ha podido construir el ICV de este estudio de caso hipotético tanto bajo el método exergético como bajo el método convencional de categorías de impacto ambiental, y se ha constatado que bajo el método ACVx resulta posible no solamente cuantificar cada uno de los compuestos de los flujos de entrada y salida en una única unidad de medida, sino que permite cuantificar la contribución de cada uno de estos compuestos acumulativamente en comparación con el método convencional del ACV. Asimismo, se ha comprobado por qué bajo el ICV tradicional los factores para caracterizar impactos ambientales de escala local y/o regional se sujetan a modelos sesgados, valiéndose de criterios de caracterización no ajustados a factores objetivos parametrizados a escala local. En este sentido, el ICV bajo el método ACVx no dependería de factores originados en algún modelo de caracterización de las bases de datos comerciales, dado que al tener los resultados del análisis del ICV bajo una misma unidad de medida, ese análisis puede prescindir de la necesidad de ser asignado a la unidad común del indicador de la categoría ambiental a la cual se refiere.

Finalmente, cabe señalar que resultaría ser una mera simplificación de ejercitación teórica y práctica suponer que la aplicación del enfoque exergético no presentaría inconvenientes, requiriendo ser evaluados en el contexto de un caso de estudio real, y a la vez, clarificados a la luz de los últimos avances en esta área de estudio. Por lo pronto, este trabajo ha servido como *meditatio*, una meditación en el sentido del ejercicio en el pensamiento que fusiona lo teórico y lo práctico para reorientar la metodología del análisis de ciclo de vida desde el enfoque exergético y su interrelación con la medición de la sustentabilidad de recursos energéticos y no energéticos en procesos de reconversión energética a partir de ROIs.

6. REFERENCIAS

- Arzoumanidis, I., Salomone, R., Petti, L., Mondello, G., & Raggi, A. (2017). Is there a simplified LCA tool suitable for the agri-food industry? An assessment of selected tools. *Journal of Cleaner Production*, 149, 406-425. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.059
- Beemsterboer, S., Baumann, H., & Wallbaum, H. (2020). Ways to get work done: a review and systematisation of simplification practices in the LCA literature. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25, 2154–2168. doi:[10.1007/s11367-020-01821-w](https://doi.org/10.1007/s11367-020-01821-w)

- Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A. J., & Frischknecht, R. (2007). Applying Cumulative Energy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (3) 181–190. doi: [10.1065/lca2006.11.282](https://doi.org/10.1065/lca2006.11.282)
- Bretz, R., & Frankhauser, P. (1996). Screening LCA for large numbers of products: estimation tools to fill data gaps. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(3), 139-146. doi: 10.1007/BF02978941
- Cheng, Ming-H., Sekhon, J. J. K., Rosentrater, K. A., Wang, T., Jung, S., & Johnson, L. A., (2018). Environmental impact assessment of soybean oil production: extruding-expelling process, hexane extraction and aqueous extraction. *Food Bioproduction Process* 108, 58-68. doi: [10.1016/j.fbp.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.01.001)
- Decisión 2014/955/UE. (18 de diciembre de 2014). Decisión de la Comisión Europea, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, Texto pertinente a efectos del EEE .Bruselas: Diario Oficial de la Unión Europea, L370, 44-86. Recuperado de: <https://www.boe.es/doue/2014/370/L00044-00086.pdf>
- División de Estadísticas de las naciones Unidas (2009). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas* (CIIU Serie M, No. 4/Rev. 4). Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Estadística, Informes estadísticos. Nueva York: Naciones Unidas. Recuperado de: https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4s.pdf
- Finnveden, G., Arushanyan, Y., & Brandão, M. (2016). Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools. *Resources*, 5(3), 23. doi:[10.3390/resources5030023](https://doi.org/10.3390/resources5030023)
- Fleischer, G., Gerner, K., Kunst, H., Lichtenwort, K., & Rebitzer, G. (2001). A semi-quantitative method for the impact assessment of emissions within a simplified life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(3), 149-156. doi: [10.1007/BF02978733](https://doi.org/10.1007/BF02978733)
- Heiskanen, E. (2002). The institutional logic of life cycle thinking. *Journal of Life Cycle Assessment*, 10, 427–437. doi: [10.1016/S0959-6526\(02\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00014-8)

- Hochschorner, E., & Finnveden, G. (2003). Evaluation of two simplified life cycle assessment methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), 119-128. doi: [10.1007/BF02978456](https://doi.org/10.1007/BF02978456)
- Hur, T., Lee, J., Ryu, H., & Kwon, E. (2005) Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management*, 75:229–237. doi: [10.1016/j.jenvman.2004.11.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.014)
- Ibagón Gutiérrez, L. M. (2021). Exergy use review of wastewater study in Latin America. *DYNA*, 88(216), 170–175. doi: [10.15446/dyna.v88n216.89054](https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89054)
- Ignatenko, O., van Schaik, A., & Reuter, M. A. (2007). Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems. *Minerals Engineering*, 20(9), 862-874. doi:[10.1016/j.mineng.2007.03.005](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.005).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2008) *Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia* (IRAM-ISO 14040:2008). Buenos Aires, Argentina: IRAM.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2008) *Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices* (IRAM-ISO 14044:2008). Buenos Aires, Argentina: IRAM.
- Jaimes, M. W. A., Rocha, S., Vesga, J. N., & Kafarov, V. (2012). Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana. *PROSPECTIVA*, 10(1),61-70. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250733007>
- Laner, D., Rechberger, H., De Soete, W., De Meester, S., & Astrup, T. F. (2015) Resource recovery from residual household waste: An application of exergy flow analysis and exergetic life cycle assessment. *Waste Management*, 46, 653–667. doi: [10.1016/j.wasman.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.006)
- Moberg, Å., Borggren, C., Ambell, C., Finnveden, G., Gulbrandsson, F., Bondesson, A.,... Bergmark, P. (2014). Simplifying a life cycle assessment of a mobile phone. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(5), 979-993. doi: [10.1007/s11367-014-0721-6](https://doi.org/10.1007/s11367-014-0721-6)
- Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Koroneos, C. (2016) Environmental impact reduction using exergy-based methods. *Journal of Cleaner Production*, 118, 118–123. doi: [10.1016/j.jclepro.2016.01.064](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.064)
- Morris, D. R., & Szargut, J. (1986). Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet Earth. *Energy*, 11(8), 733-755. doi: [10.1016/0360-5442\(86\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(86)90013-7)

- Nwodo, M. N., & Anumba, C. J. (2020). Exergetic Life Cycle Assessment: A Review. *Energies*, 13(11), 2684. doi: [10.3390/en13112684](https://doi.org/10.3390/en13112684)
- Organización de las naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), & Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2011). *Manual de biogás*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Pagés Diaz, Jhosané (2015). Biogas from slaughterhouse waste: Mixture interactios in co-digestion. (Tesis para el Doctorado en Filosofía, Universidad de Borås). Universidad de Borås, Allégatan 1, Borås, Suecia. Repositorio institucional <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hb:diva-847>
- Simpson, A. P., & Edwards, C. F. (2011). An exergy-based framework for evaluating environmental impact. *Energy*, 36, 1442–1459. doi: [10.1016/j.energy.2011.01.025](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.025)
- Szargut, J. (2005). *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*. WIT Press.
- van der Werf, H. M., Knudsen, M. T., & Cederberg, C. (2020). Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *Nature Sustainability*, 3(6), 419-425. doi: [10.1038/s41893-020-0489-6](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0489-6)
- Ware, A., & Power, N. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, 97, 541-549. Doi: [10.1016/j.renene.2016.05.068](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.068)