

04-041

REVIEW OF LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) IN THE ENERGY SECTOR

Sanes Orrego , Aida ⁽¹⁾; Amante García , Beatriz ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de Catalunya

At present we must make a drastic change in the way of generating and consuming energy, in order to make a more sustainable system. The energy transition addresses the major environmental impacts derived from fossil fuels, but it goes further. The current climate crisis shows us that it is important to establish the current state, carry out the relevant evaluations with an environmental approach, using tools such as life cycle analysis (Gabriel, Matos, Castelo & Magrini, 2022). This tool allows us to look at what has been done and what improvement proposal we could have, throughout the entire energy generation chain and particularizing consumption in small industry, which makes it easier to identify the impacts associated with the different types of energy throughout all the processes involved in its production and use (Martinez, 2018). With the purpose of seeing what has been done to date and providing a solution applied to SMEs, this bibliographical review is developed with which it is possible to establish the scope that these evaluations have had and the contribution that from the concept of cycle of Vida allows us to understand this productive sector and its path to environmental efficiency.

Keywords: life cycle assessment; sustainability; energy; energy transition; environmental management

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV) EN EL SECTOR ENERGÉTICO

En la actualidad debemos realizar un cambio drástico en la manera de generar y consumir energía, para poder hacer un sistema más sostenible. La transición energética hace frente a los grandes impactos ambientales que se derivan de los combustibles fósiles, pero va más allá. La actual crisis climática nos demuestra que es importante establecer el estado actual, realizar las evaluaciones pertinentes con un enfoque ambiental, utilizando herramientas como el análisis de ciclo de vida (Gabriel, Matos, Castelo & Magrini, 2022). Esta herramienta nos permite mirar que se ha realizado y que propuesta de mejora podríamos tener en toda la cadena de generación de energía y particularizando en el consumo en la pequeña industria, lo que facilita identificar los impactos asociados a los diferentes tipos de energía (Martinez, 2018). Con el propósito de ver que se ha realizado hasta la actualidad y aportar una solución aplicada a las pimes, se desarrolla la presente revisión bibliográfica con la que se logra establecer los alcances que han tenido dichas evaluaciones y el aporte que desde el concepto de ciclo de vida permite entender este sector productivo y su camino a la eficiencia ambiental.

Palabras clave: análisis del ciclo de vida; sostenibilidad; energía; transición energética; gestión ambiental



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Actualmente, la demanda de recursos energéticos ha aumentado por el rápido crecimiento económico, la población y la industrialización de las economías emergentes (Buonomano et al., 2023), lo que ha llevado a la búsqueda de energía sostenible, entendida como aquella energía cuyo modelo de producción y consumo es compatible con las prioridades sociales, ambientales y económicas de la sociedad actual. Además de ser una necesidad priorizada en el Objetivo de Desarrollo Mundial (ODS) 7, “la energía es central para casi todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente” (Naciones Unidas, 2018, p.37). Por lo tanto, es imprescindible este cambio en la generación de energía para lograr los objetivos de la agenda 2030, la lucha contra el cambio climático, parar el aumento de la temperatura mundial y cumplir los objetivos del acuerdo de París (Gielen et al., 2019).

La justicia energética es un concepto clave en la construcción de la sostenibilidad, esta plantea que el suministro de energía debe ser seguro, asequible y sostenible para todos, con una distribución equitativa de los costos y los beneficios de los servicios energéticos de manera imparcial, democrática e inclusiva (Fortier et al., 2019). Se relaciona con la justicia ambiental, una corriente del movimiento ecológico que “busca combatir las inequidades sociales, espaciales y temporales en el uso de los recursos y servicios ambientales” Martínez-Alier citado en (Moral, Laconi y Pedregal, 2020, p.4). Por otro lado, tiene una relación directa con el cambio climático en cuanto a la búsqueda de la disminución de emisiones de CO₂, pero con la proyección del incremento mundial de consumo de energía (Iwińska et al., 2021). Además, según Heffron et al., (2022), la justicia energética puede lograr un equilibrio justo y equitativo entre las tres dimensiones del trilema energético: política, economía y medio ambiente, por lo tanto, las innovaciones tecnológicas son necesarias e importantes para diversificar la estructura energética y garantizar el suministro de la misma en el marco de la seguridad energética (Li & Ge, 2023). Dichas innovaciones a pesar de estar orientadas hacia la sostenibilidad, pueden reforzar e introducir nuevas desigualdades y disparidades entre las poblaciones, al mismo tiempo que perpetúan la degradación ambiental. Las innovaciones bajas en carbono no son automáticamente justas, equitativas o incluso ecológicas (Sovacool et al., 2023).

Actualmente se reconocen los impactos sociales negativos de las fuentes de energía tradicionales, pero el cambio a fuentes más limpias (es decir aquellas que no generan ningún tipo de contaminación), no implica necesariamente que la situación cambiará. La transición energética tendrá un impacto social, y este será a través de todo el ciclo de vida del sistema, lo que hace imperante que las evaluaciones de los sistemas energéticos tengan también un enfoque social. Dicho enfoque está muy ligado a este concepto y en medio de la crisis climática mundial, derivada de los modelos de producción, es relevante tener presente también la justicia climática definida por Martínez-Alier et al. (2018) como “Aquellos actores en determinadas partes del mundo que son responsables de la mayoría de emisiones actuales e históricas de gases de efecto invernadero tienen que asumir también la responsabilidad de los daños producidos” (p.44). Esto nos lleva a considerar la importancia de conocer los impactos asociados a las fuentes de energía para establecer los actores de toda la cadena, sobre todo porque se prevé que la demanda de energía moderna crecerá rápidamente hasta que se logre el acceso y la demanda básica de energía, que además, deberá garantizar la seguridad energética, “Por otro lado, del suministro también es una preocupación importante para los países en desarrollo, que en su mayoría dependen en gran medida de los combustibles fósiles importados” (Shakya et al., 2023, p. 2360).

La transición energética hacia fuentes de energía bajas en carbono deberá responder a la propuesta del desarrollo sostenible en donde se deben lograr procesos que disminuyan los impactos negativos y aumenten los impactos positivos en los factores ecológicos, sociales y económicos (Li & Ge, 2023). Además, es necesario evaluar estos aspectos en todo el proceso

de obtención y uso de estas energías, es decir a través de todo el ciclo de vida, para los diferentes sectores que los requieren. El concepto del ciclo de vida permite entender de manera sistémica todas las etapas por las que pasa un producto, por lo tanto, este enfoque es necesario en esta evaluación. Esta visión permite redefinir los modelos de producción y evaluar los procesos productivos y lograr identificar los puntos críticos y establecer las opciones de mejora.

Una metodología que permite esa revisión de manera global es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), la cual es reconocida por Naciones Unidas como una herramienta que facilita el enfoque y el análisis del ciclo de vida. Es importante dejar claro que cuando nos referimos al ACV, estamos haciendo referencia específicamente a una metodología estandarizada por la ISO 14040 que se basa en el concepto del ciclo de vida del producto para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales, desde la obtención de materias primas, pasando por la producción, la comercialización, el uso y la disposición final. Esta metodología establece cuatro fases para su desarrollo. La primera fase es la definición del objetivo y el alcance, la segunda fase es el análisis del inventario, la tercera fase es la evaluación del impacto ambiental, y la última fase es la de interpretación (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2006). Este enfoque está determinado por una visión amplia y sistémica de los productos y servicios, que al ser adoptado por un empresa u organización le permite reconocer que todas las etapas deber ser analizadas desde lo económico, lo social y lo ambiental, para lograr una producción sostenible (Life Cycle Initiative, 2022).

La producción sostenible es aquella que busca minimizar los impactos ambientales negativos, a través de buenas prácticas empresariales, logrando el uso eficiente de los recursos y previniendo la contaminación y se encuentra definida en el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 12 como, “El consumo y la producción sostenibles consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, infraestructuras sostenibles y facilitar el acceso a los servicios básicos, empleos ecológicos y decentes, y una mejor calidad de vida para todos” (Naciones Unidas, 2018, p. 55).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica sobre la metodología de ACV implementada en el sector energético, con el fin de determinar los aspectos ambientales negativos identificados en este sector, ocasionados por las diferentes fuentes de energía. Esta revisión incluye una comparación de distintas fuentes bibliográficas para identificar elementos metodológicos y opciones para la mejora de procesos productivos de obtención de energía. Este estudio nos permite analizar cómo se ha abordado el ACV en este sector y determinar la manera en que esta metodología aporta soluciones para hacerlo más sostenible. Cuando hablamos de sostenibilidad hablamos de un análisis ambiental, económico y social. Por ello se incluye en esta revisión bibliográfica de ACV la perspectiva social, la menos utilizada en las evaluaciones a nivel industrial.

En estos momentos es de urgencia una revolución ambiental a nivel de generación energética, teniendo en cuenta que hay países en desarrollo, ya que el problema es que la mayoría de “los países en desarrollo todavía están en el proceso de abordar el problema de la equidad energética en términos de acceso a energía asequible, confiable y moderna para todos” (Shakya et al., 2023, p. 2360). Dicho crecimiento económico debe ser apoyado por una transformación socioeconómica hacia un mejor nivel de vida, mientras se logra la neutralidad y la resiliencia climática (Shakya et al., 2023).

Metodología

Con el fin de determinar el estado del arte en cuanto a investigaciones sobre el análisis del ciclo de vida relacionadas con la obtención de energía, se inició la búsqueda en las bases de datos de Scopus (Scopus, 2023), Science direct (Science direct, 2023) y Web of science (Web

of science, 2023), siendo el termino en ingles correspondiente para ACV, Life cycle assessment, se utilizó entonces la clave booleana "life cycle assessment" AND energy desde 2018, para revisar solamente los últimos 5 años y tener así solo investigaciones recientes y vigentes, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 1. Dichos resultados, construidos en marzo de 2023, se presentan de la siguiente manera: se organiza la información por tipo de recursos, lo que hace referencia a todo tipo de documentos, incluyendo artículos, libros, capítulos de libros, revisiones, congresos, entre otros. Se definen las bases de datos consultadas para el desarrollo del trabajo. Se plantea la clave Booleana utilizada con los términos definidos de búsqueda. Se define el tipo de términos de búsqueda, que hace referencia a los campos de búsqueda, es decir en que parte de los documentos se deben encontrar los términos. Los resultados, es el número de documentos encontrados con las características antes mencionadas. Por último, el rango de fechas, es decir los años de publicación de la búsqueda.

Tabla 1. Búsqueda inicial

Tipo de recursos	Base de datos	Clave booleana	Términos de búsqueda	Resultados	Rango de fechas
todo tipo de recursos	Web of science	"life cycle assessment" AND energy	título, palabras claves y resumen	10889	2018-2023
todo tipo de recursos	Science direct	"life cycle assessment" AND energy	título, palabras claves y resumen	7367	2018-2024
todo tipo de recursos	Scopus	"life cycle assessment" AND energy	título, palabras claves y resumen	8662	2018-2024

Para seguir acotando la búsqueda se agregó el término "energy sources" a la clave booleana, con el siguiente resultado, ver tabla 2.

Tabla 2. Búsqueda con el término "energy sources"

Tipo de recursos	Base de datos	Clave booleana	Términos de búsqueda	Resultados	Rango de fechas
todo tipo de recursos	web of science	"life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy	título, palabras claves y resumen	335	2018-2023
todo tipo de recursos	Science direct	"life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy	título, palabras claves y resumen	549	2018-2024
todo tipo de recursos	scopus	"life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy	título, palabras claves y resumen	652	2018-2023

A partir de esta revisión inicial se identificó a Scopus como la base de datos con más documentos relacionados, teniendo 652 resultados, en este punto se agregó como criterio la palabra clave específica: Life Cycle Assessment (LCA), obteniendo 237 documentos. En cuanto a este resultado se logró identificar que el año con más publicaciones fue 2019, el tipo de recurso más utilizado fue el Artículo, la revista con más publicaciones es Journal of Cleaner Production, el país con más publicaciones fue Italia, por la afiliación institucional de sus autores, y las tres áreas temáticas principales fueron energía, ciencias ambientales e ingeniería (ver tabla 3).

Tabla 3. Análisis resultados de búsqueda inicial

Indicador	Resultado	Número de documentos
País	Italia	37
Año	2019	70
Tipo de documento	Artículo	178
Temáticas	Ciencias ambientales	148
	Energía	162
	Ingeniería	128
Revista	Journal of Cleaner Production	52

De estos resultados se escogieron para una revisión más detallada los 50 documentos más recientes, los cuales fueron analizados inicialmente a partir de los resúmenes para determinar si cumplían con el fin de la investigación. En este filtrado fueron descartados 10 documentos, por no evaluar de alguna manera la obtención de energía, ya que solo mencionaban la importancia de buscar otras fuentes para los procesos productivos que estaban analizando, pero no efectuaban ninguna evaluación más allá del consumo de la misma. Por tanto, quedaron entonces para la comparación 40 documentos en esta categoría de búsqueda.

Además, entendiendo la importancia de analizar la sostenibilidad desde los aspectos sociales ya presentada con anterioridad en este trabajo, se generó otra categoría de búsqueda que incluyera en la búsqueda "social life cycle assessment" quedando de la siguiente manera la clave booleana en la base de datos de scopus: "life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy AND "social life cycle assessment" obteniendo 7 documentos que también hacen parte de la revisión.

2. Resultados

Para los fines de esta revisión se seleccionaron 47 documentos, en dos categorías de búsqueda de la siguiente manera, 40 en la primera categoría de búsqueda con clave booleana en la base de datos de scopus "life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy y palabra clave específica: Life Cycle Assessment (LCA). Y 7 en la segunda categoría de búsqueda con la clave booleana en la base de datos de scopus: "life cycle assessment" AND "energy sources" AND energy AND "social life cycle assessment".

De los 40 documentos seleccionados en la primera categoría de búsqueda, 39 estaban en inglés y uno en chino mandarín, todos utilizaron la metodología de la serie de normas de las ISO 14040 y 16 especificaron el software que utilizaron, 6 utilizaron GABi, 7 Simapro, 1 Open

LCA, 1 Eco-Bat 4.0 y 1 Gemis 5, también 7 especificaron el uso de la base de datos ecoinvent y 5 el uso de ReCipe como metodología de evaluación de los impactos.

En este punto vale la pena mencionar que varios estudios utilizaron metodologías de manera híbrida, como la utilización de LCA y LCD (Life Cycle Manufacturing System Simulación) o la utilización de LCA y LCC (Life Cycle Cost), la utilización de S-LCA (social life cycle assessment) se abordará más adelante.

22 documentos especificaban el país o región donde se haría el estudio o el escenario del cálculo, de los cuales 2 eran en Suramérica (Colombia y Brasil), 14 en la Unión Europea, 3 en China, 2 es USA y 1 en Turquía y la mayoría incluyo un análisis de sensibilidad para evaluar la confiabilidad de los datos.

Aunque la mayoría de los documentos estaban enmarcados en la industria energética, también estaban relacionados en gran medida con la industria automotriz por el tema de desarrollo de baterías y en el sector de la construcción por la necesidad de implementar otras fuentes de energía en los edificios, sobre todo para sistemas de calefacción, además de proyectos derivados como la construcción de las mismas plantas de energía.

Vale la pena aclarar que en algunos casos en un mismo documento se analizaban diferentes fuentes de energía a manera de comparación o como sistemas híbridos. La biomasa y el biogás se estudian en 11 documentos, la eólica en 7, geotérmica en 2, hidrogeno en 3, biodiésel en 4, gas en 9, hidroeléctrica en 2, energía solar en 9, energía eléctrica en 13, termoeléctrica 2, aerotérmica 2.

También es muy importante identificar que la disponibilidad de la energía debe tenerse en cuenta, es decir que un sistema también varía en relación al tiempo, si se abastece un sistema de energías renovables, pero en algún momento requiere de otras fuentes de energía para poder seguir su funcionamiento, este tipo de comportamiento no se puede evaluar en un LCA (Rödger et al., 2021).

Se evidencio la importancia de comparar entre sistemas, como por ejemplo, el sistema de obtención de calor a partir de gas natural vs la energía geotérmica, en donde se determinó que el gas natural tenía más impactos negativos a través del tiempo por los materiales que requieren la planta de transformación. “También se identificó el consumo de electricidad durante la fase de operación y mantenimiento como un punto crítico para varias categorías de impacto” (Douziech et al., 2021, p.1).

Es muy importante reconocer que la producción tiende a ser global. Aunque en varios documentos se define el país en donde se hará el análisis, en el desarrollo metodológico de los artículos se especifica que los materiales se obtienen y se producen en otros países. Esto quiere decir que además de ser transportados por largos recorridos, se incluyen escenarios de distribución (Lavigne Philippot et al., 2023). Es decir, que toda la cadena de producción y sus impactos son globales, teniendo además la “huella energética” que se deja en esa red de obtención y transporte. A continuación, se presentan las conclusiones de algunos de los documentos.

En el caso de las turbinas eólicas, los investigadores determinaron que el “uso combinado de compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio y el reciclaje de palas de turbinas eólicas fuera de servicio, pueden reducir significativamente el impacto ambiental” (Cai et al., 2023, p. 41). En otro documento se encontró que para los aerogeneradores flotantes el mayor impacto ambiental corresponde a la etapa de fabricación (Yildiz et al., 2021).

En el caso de las baterías de tercera generación, con ánodo de silicio y grafito, pueden ser beneficiosas para el medio ambiente, siempre que su vida útil sea suficiente, al menos de 180.000 km. Sin embargo, el consumo de energía en la fabricación de la celda es alto y “las categorías de impacto, cambio climático y formación de ozono tuvieron el coeficiente de

variación más bajo, mientras que el consumo de agua y la toxicidad cancerígena humana tuvo el más alto” (Lavigne et al., 2023, p. 1).

En cuanto a la energía geotérmica se evidenció que “es una alternativa viable que, combinada con otros sistemas de energía renovable, puede mitigar los efectos negativos de la matriz energética existente en todo el mundo, pero su eficiencia” (Milousi et al., 2022, p.1). Sin embargo, no es una energía tan limpia ya que consume grandes cantidades de agua en los procesos de enfriamiento, sin el correcto desarrollo tecnológico sus emisiones podrían ser tan altas como una central eléctrica alimentada con carbón de baja emisión y un mal manejo de los desechos puede tener grandes afectaciones a la comunidad (Milousi et al., 2022)

En la mayoría de los documentos también queda evidenciado que los costos suben al usar estas fuentes de energía, en el caso de una investigación que describió la integración de un sistema de almacenamiento de hidrógeno y un sistema de almacenamiento de baterías en un refugio de montaña. Se evidencio en promedio, una disminución de más del 70% en los impactos ambientales en comparación con el sistema inicial, y la tecnología basada en hidrógeno tuvo ventajas para todos los criterios evaluados, pero se requiere una inversión mayor y además se tiene un bajo retorno (Mori et al., 2022; Mori et al., 2021).

En un estudio que investigó el impacto ambiental de un sistema innovador híbrido eléctrico-térmico compacto propuesto para edificios residenciales en clima mediterráneo, los resultados mostraron que debido a la complejidad del sistema, las etapas de fabricación y disposición tienen un alto impacto ambiental, que no se compensa con la reducción del impacto durante la etapa de operación (Zsembinski et al., 2021).

En cuanto a la revisión de los aspectos sociales desde el ACV, en los documentos que hacían análisis de ciclo de vida social (S-LCA), en la segunda categoría de búsqueda, se evidencian impactos ambientales significativos de las fuentes alternativas de energía. Un ejemplo es el caso de los proyectos eólicos marinos comparados con los terrestres, el análisis mostró que la demanda material del ciclo de vida de los proyectos eólicos marinos tiene un mayor impacto en el bienestar global que las alternativas terrestres (Buchmayr et al., 2022). Este documento permite entender la importancia de comparar los sistemas no solo entre tipos de energía si no, entre las opciones que hay para cada una.

En estos documentos se utilizó una metodología propuesta por Naciones Unidas que permite evaluar los impactos sociales del ciclo de vida a partir de la identificación de las partes interesadas, es decir los actores, y la definición de categorías y subcategorías de impactos. En una propuesta de indicadores para un marco de evaluación del ciclo de vida social que aborda la justicia energética, los indicadores se organizaron en cuatro categorías de partes interesadas para los sistemas de energía eléctrica: trabajadores, consumidores de electricidad, comunidades locales y la sociedad en su conjunto. (Fortier et al., 2019).

Para los proyectos hidroeléctricos se determinan grandes impactos socioeconómicos, el desempeño social más débil se observó en las categorías de gobernabilidad y repercusión socioeconómica. Se identificaron varios impactos socioeconómicos importantes, que ofrecen información útil para los responsables de las políticas de energía, servicios ecosistémicos y uso de la tierra. Estos resultados “ofrecen oportunidades para examinar los impactos potenciales” de los próximos proyectos hidroeléctricos en la región y crear beneficios socioeconómicos a largo plazo (Aung et al., 2021, p.1). Este tipo de análisis permite reflexionar sobre los impactos negativos de todo este tipo de proyectos a pesar de ser energía renovable, y que además termina impactando todos los procesos que utilicen la energía que proviene de estos. Esto ratifica la importancia de hacer este tipo de análisis para la toma de decisiones en el diseño y desarrollo de estos grandes proyectos.

Entre las fuentes de energía sostenibles, la bioenergía y sus avances relacionados son imprescindibles para los especialistas y productores. Si bien se han producido diversos

avances en bioenergía, es imperativo comprender el mercado y las posibilidades comerciales de cada innovación (Saravanan & Kumar, 2019).

Varios autores exponen la importancia de una evaluación de sostenibilidad integrada, es decir, que incluya análisis del ciclo de vida desde el punto de vista ambiental, económico y social (Kumar & Verma, 2021).

3. Conclusiones

En cuanto al objetivo general de este trabajo que era determinar los aspectos ambientales negativos del sector energético evaluados a través del ACV, se logró evidenciar que con la utilización de fuentes de energía alternativas se disminuyen los impactos en la mayoría de las categorías establecidas, incluyendo calentamiento global y cambio climático. También establecieron la importancia de la revisión, sustitución y reciclaje de los materiales en los proyectos energéticos buscando la eficiencia ambiental, con esto se hace referencia tanto a los materiales estructurales y de construcción de las plantas como a los de los productos.

Para el primer objetivo específico, en el cual se planteó la comparación de las diferentes fuentes bibliográficas se logra establecer que todos los documentos utilizaron el marco metodológico de la ISO 14040 y definieron que las fuentes de energía renovables en general generan menos impactos ambientales, pero para su implementación requieren más inversión en tecnología, por lo cual también aumentan los costos. Es en la etapa de fabricación en donde más se generan impactos y aspectos ambientales negativos, por lo tanto, allí se deben seguir haciendo investigaciones.

No obstante, la obtención de energía afecta todo el sistema productivo, es decir que la evaluación de la misma es imperante para que todo el sistema que funciona con este tipo de energía pueda ser sostenible, ya que si la energía utilizada no es limpia, el sistema per se ya no sería sostenible. Todos los procesos requieren energía incluyendo el desarrollo mismo de estas energías alternativas y lo que puede llegar a determinar su sostenibilidad es la fuente de energía primaria del país donde se produce, es decir donde está la "huella energética", un punto importante para tener muy en cuenta ya que estos sistemas de producción son de carácter global y con el desarrollo de estas fuentes de energía no se puede ampliar aún más la deuda ecológica.

En el segundo objetivo específico definido para determinar la manera en que esta metodología aporta soluciones dentro del sector, se logró establecer que, para el desarrollo de nuevos sistemas de energía, es necesario analizarlos en el marco de la sostenibilidad, que requiere entender todo el ciclo de vida con el fin de optimizar y planificar estos proyectos, en pro de procesos más eficientes energéticamente. Este estudio permitió evidenciar que con la utilización de la metodología del ACV los investigadores pudieron identificar los impactos asociados a las fuentes de energía, incluso por cada uno de los procesos que tienen, por ejemplo, en algunos proyectos los puntos críticos están en el mantenimiento, otros en la fabricación o incluso en la operación. Esto permite concluir que la metodología del ACV aporta a la sostenibilidad industrial.

Sin embargo, aunque el ACV es una metodología que facilita la evaluación de todo el ciclo de vida de un producto y en la revisión bibliográfica permitió evidenciar los aspectos ambientales negativos de las fuentes de energía y determinar que las energías renovables y alternativas tienen menos impactos negativos; es necesario que los estudios incluyan evaluaciones sociales para lograr determinar realmente la sostenibilidad de las fuentes de energía más allá de los impactos ecológicos. Porque pese a que los resultados mostraban disminución en las categorías establecidas, los impactos sociales no estaban determinados y sin este análisis y evaluación no se puede llegar a la justicia energética ni climática.

En el tercer objetivo que nos marcamos en cuanto al marco del ACV con la perspectiva social, esta revisión permite determinar que las variaciones en la justicia y la equidad no son solo en la etapa de generación de energía, sino a través de múltiples puntos en todo el ciclo de vida del sistema energético, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, transporte, distribución, generación de electricidad y gestión de residuos. Este tipo de análisis se puede utilizar para abordar de manera integral las preocupaciones de justicia energética por parte de diferentes grupos de interés y a través de todas las etapas del ciclo de vida asociadas con un sistema energético bajo en carbono. También puede ayudar en el diseño y la planificación de los nuevos sistemas energéticos para optimizar su sostenibilidad social sin pasar por alto a las poblaciones vulnerables.

Por lo anteriormente mencionado el enfoque se ciclo de vida es muy importante para entender los procesos productivos de las fuentes de energía, las que se encuentran en desarrollo son menos impactantes en términos ecológicos que las energías dependientes de combustibles fósiles, pero deben seguir siendo evaluadas con metodologías de ACV que permiten hacer comparaciones, plantear escenarios y encontrar puntos críticos en todo el sistema, y así establecer estrategias de mejoras. Además, deben ser complementadas con evaluaciones de carácter social para poder llegar a la meta de la energía sostenible. La evaluación del ciclo de vida social proporciona una herramienta integral, fundamental y exhaustiva para comprender los problemas sociales que pueden surgir en las cadenas de valor de los productos.

4. Referencias

- Aung, T. S., Fischer, T. B., & Azmi, A. S. (2021). Social impacts of large-scale hydropower project in Myanmar: A social life cycle assessment of Shweli hydropower dam 1. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 417-433. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01868-3>
- Buchmayr, A., Verhofstadt, E., Van Ootegem, L., Thomassen, G., Taelman, S. E., & Dewulf, J. (2022). Exploring the global and local social sustainability of wind energy technologies: An application of a social impact assessment framework. *Applied Energy*, 312. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118808>
- Buonomano, A., Barone, G., & Forzano, C. (2023). Latest advancements and challenges of technologies and methods for accelerating the sustainable energy transition. *Energy Reports*, 9, 3343-3355. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.015>
- Cai, X., Duan, H., Ma, Y., Li, Q., & Xie, M. (2023). Environmental impact assessment of wind turbine blades analysis based on life cycle. *Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban)/Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 40(1), 40-47. Scopus. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1249.2023.01040>
- Douziech, M., Tosti, L., Ferrara, N., Parisi, M. L., Pérez-López, P., & Ravier, G. (2021). Applying harmonised geothermal life cycle assessment guidelines to the rittershoffen geothermal heat plant. *Energies*, 14(13). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en14133820>
- Fortier, M.-O. P., Teron, L., Reames, T. G., Munardy, D. T., & Sullivan, B. M. (2019). Introduction to evaluating energy justice across the life cycle: A social life cycle assessment approach. *Applied Energy*, 236, 211-219. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.022>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Heffron, R. J., Körner, M.-F., Sumarno, T., Wagner, J., Weibelzahl, M., & Fridgen, G. (2022). How different electricity pricing systems affect the energy trilemma: Assessing Indonesia's

- electricity market transition. *Energy Economics*, 107. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105663>
- Ihobe, (2020). Métodos de huella ambiental de productos y servicios, análisis de ciclo de vida. <https://www.ihobe.eus/publicaciones/metodos-huella-ambiental-productos-y-servicios-analisis-ciclo-vida>
- Iwińska, K., Lis, A., & Mączka, K. (2021). From framework to boundary object? Reviewing gaps and critical trends in global energy justice research. *Energy Research & Social Science*, 79, 102191. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102191>
- Kumar, B., & Verma, P. (2021). Life cycle assessment: Blazing a trail for bioresources management. *Energy Conversion and Management: X*, 10. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100063>
- Lavigne Philippot, M., Costa, D., Cardellini, G., De Sutter, L., Smekens, J., Van Mierlo, J., & Messagie, M. (2023). Life cycle assessment of a lithium-ion battery with a silicon anode for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 60. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023>
- Li, D., & Ge, A. (2023). New energy technology innovation and sustainable economic development in the complex scientific environment. *Energy Reports*, 9, 4214-4223. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.03.029>
- Life Cycle Initiative (2022). Life Cycle Initiative Progress Report 2022. <https://www.lifecycleinitiative.org/library/life-cycle-initiative-progress-report-2022/>
- Martínez-Alier, J., Owen, A., Roy, B., Del Bene, D., & Rivin, D. (2018). Blockadia: Movimientos de base contra los combustibles fósiles y a favor de la justicia climática. *Anuario Internacional CIDOB*, 0(0). <https://raco.cat/index.php/AnuarioCIDOB/article/view/348692>
- Milousi, M., Pappas, A., Vouros, A. P., Mihalakakou, G., Souliotis, M., & Papaefthimiou, S. (2022). Evaluating the Technical and Environmental Capabilities of Geothermal Systems through Life Cycle Assessment. *Energies*, 15(15). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en15155673>
- Moral Ituarte, L. del, Laconi, C., & Pedregal, B. (2020). Mapping environmental justice at a regional scale: the collaborative digital map of water conflicts in Andalusia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 85, 2867, 1–35. <https://doi.org/10.21138/bage.2867>
- Mori, M., Gutiérrez, M., & Casero, P. (2021). Micro-grid design and life-cycle assessment of a mountain hut's stand-alone energy system with hydrogen used for seasonal storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29706-29723. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.155>
- Mori, M., Gutiérrez, M., Sekavčnik, M., & Drobnič, B. (2022). Modelling and environmental assessment of a stand-alone micro-grid system in a mountain hut using renewables. *Energies*, 15(1). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en15010202>
- Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Una oportunidad para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Organización Internacional de Normalización. (2006). Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Rödger, J.-M., Beier, J., Schönemann, M., Schulze, C., Thiede, S., Bey, N., Herrmann, C., & Hauschild, M. Z. (2021). Combining Life Cycle Assessment and Manufacturing System Simulation: Evaluating Dynamic Impacts from Renewable Energy Supply on Product-

Specific Environmental Footprints. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 8(3), 1007-1026. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00229-z>

Saravanan, A., & Kumar, P. S. (2019). Social Life Cycle Assessment of Renewable Bio-Energy Products. En *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes* (pp. 99-111). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3233-3_3

Scopus, (Marzo 23, 2023). Base de datos. <https://www.scopus.com>

Science direct, (Marzo 23, 2023). Base de datos. <https://www.sciencedirect.com>

Shakya, S. R., Nakarmi, A. M., Prajapati, A., Pradhan, B. B., Rajbhandari, U. S., Rupakheti, M., & Lawrence, M. G. (2023). Environmental, energy security, and energy equity (3E) benefits of net-zero emission strategy in a developing country: A case study of Nepal. *Energy Reports*, 9, 2359-2371. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.055106635>

Web of science, (Marzo 23, 2023). Base de datos. <https://www.webofscience.com>

Yildiz, N., Hemida, H., & Baniotopoulos, C. (2021). Life cycle assessment of a barge-type floating wind turbine and comparison with other types of wind turbines. *Energies*, 14(18). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en14185656>

Zsembinszki, G., Llantoy, N., Palomba, V., Frazzica, A., Dallapiccola, M., Trentin, F., & Cabeza, L. F. (2021). Life cycle assessment (Lca) of an innovative compact hybrid electrical-thermal storage system for residential buildings in mediterranean climate. *Sustainability* (Switzerland), 13(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su13095322>

Objetivos de Desarrollo Sostenible

