

05-004

Integration of MCDM in the LCA to evaluate rural electrification alternatives in Cerro Hermoso, Oaxaca, Mexico.

Verónica Campos Guzmán ; Nieves Espinosa Martinez; M. Socorro García-Cáscales
UPCT;

The need for a methodological framework for sustainable integrated management of renewable energies has been extensively investigated and discussed due to increasing environmental problems. In this realm, Life Cycle Analysis (LCA) has been the methodological tool used to measure the sustainability of a product or system. However, this alone is not enough to determine the total sustainability, since its structure only allows the calculation of environmental indicators, but one must also take into account that a product or a system is sustainable if it includes at least its environmental, social and economic evaluation. This gap in the methodology of the LCA obliges to look for new techniques that allow to complete the process of sustainable evaluation, mainly in renewable energy systems. In order to achieve this, two methods are combined in this work to try to evaluate renewable energy systems from the environmental, economic and technical viewpoint, through the LCA methodology, where Multicriteria Decision Methods (MCDM) are integrated into phases 1 and 4 of the LCA. As an example of this integration of methodologies in the assessment process, the evaluation of energy systems, specifically photovoltaic systems to electrify a rural community in southern Mexico, is taken as a case study

Keywords: Life Cycle Analysis (LCA); Multicriteria Decision Methods (MCDM); Sustainable, Renewable Energy.

Integración de MDMC en el ACV para evaluar alternativas de electrificación rural en Cerro Hermoso, Oaxaca, México.

La necesidad de un marco metodológico para la gestión integrada sostenible de energías renovables, ha sido ampliamente investigada y discutida debido al aumento de problemas del medio ambiente. En este ámbito, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ha sido la herramienta metodológica utilizada para medir la sostenibilidad de un producto o sistema, sin embargo, resulta insuficiente determinar la sostenibilidad total, ya que su estructura solo permite el cálculo de indicadores ambientales, pero hay que tener en cuenta que un producto o un sistema es sostenible si al menos incluye su evaluación ambiental, social y económica. Este vacío en la metodología obliga a buscar nuevas técnicas que permitan completar el proceso de evaluación sostenible principalmente en sistemas energéticos renovables. Para ello, en este trabajo se combinan dos métodos para intentar evaluar desde el punto de vista ambiental, económico y técnico sistemas energéticos renovables por medio de la metodología del ACV, integrando los Métodos de Decisión Multicriterio (MDMC) en las fases 1 y 4 del ACV. Como ejemplo del proceso de evaluación de esta integración de metodologías, se toma como caso de estudio la evaluación de sistemas energéticos, particularmente los sistemas fotovoltaicos para electrificar una comunidad rural al sur de México.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV); Métodos de Decisión Multicriterio (MDMC); Sostenible; Energías Renovables.

Correspondencia: Verónica Campos Guzmán vcamposguzman@hotmail.com

Agradecimientos: Este trabajo está parcialmente financiado por los proyectos TIN2014-55024-P del Ministerio de Ciencia e Innovación Español y P11-TIC-8001 de la Junta de Andalucía (incluidos los fondos FEDER) y el proyecto 19882/GERM/15 programa SÉNECA, así como a la Sec



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción y objetivos

El uso de energía renovable no garantiza estar exento de contaminar el medio ambiente, con frecuencia, se utiliza la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para evaluar los impactos ambientales del uso de las tecnologías renovables. El ACV es una metodología sistémica estandarizada por un conjunto de normas ISO (14040-14044), su función general es calcular los impactos ambientales asociados a un sistema, producto o proceso (Rebitzer et al., 2004). Aunque es la técnica más utilizada para evaluación sostenible en sistemas energéticos renovables (Li & Mupondwa, 2014), a menudo sus resultados están limitados a reportar solo las emisiones de CO₂ y tiempo de retorno energético (EPBT) (A. Azapagic & Stichnothe, 2011), (Menberg, Pfister, Blum, & Bayer, 2016), (Kim, Rivera, Meng, Laratte, & Chen, 2016). Sin embargo, una evaluación sostenible en cualquier contexto, obliga a una integración sistémica de indicadores en tres dimensiones: Social, Económico y Ambiental (Bond, Morrison-Saunders, & Pope, 2012). Aunque el ACV es fundamental desde el punto de vista metodológico y de aplicación, para el apoyo en la toma de decisiones en el uso de las tecnologías renovables, su estructura funcional no está diseñada para una evaluación integral sostenible (Jeswani, Azapagic, Schepelmann, & Ritthoff, 2010), todavía no se ha creado una ampliación formal del marco ISO que permita una evaluación sostenible (Jeswani, et al., 2010). Con este vacío metodológico, y con el objetivo de mejorar la toma de decisiones hacia la sostenibilidad en el contexto energético renovable, algunos investigadores como (Jeswani et al., 2010), (Vazquez-Rowe, & Iribarren, 2015) y (Martín-Gamboa, Iribarren, García-Gusano, & Dufour, 2017) han analizado enfoques de combinar el ACV con otras herramientas, la necesidad de contar con herramientas que permitan realizar análisis exhaustivos, con criterios bien definidos, mediante una evaluación integrada desde los aspectos relacionados con el medio ambiente, economía y responsabilidad social, han llevado a los investigadores a combinar el ACV con los modelos de decisión multicriterio (MDMC) (Verónica Campos-Guzman, Guido C. Guerrero-Liquet, Lucia Serrano, Nieves Espinosa, J. Miguel Sanchez-Lozano, M. Socorro García-Cascales, 2016), los MDMC, son herramientas de soporte de decisión, que proporcionan soluciones eficaces para hacer frente a problemas complejos donde los datos no están armonizados (criterios) y los intereses están interpuestos (Kumar et al., 2017). Aunque es reducido el grupo de casos de estudio donde han combinado el ACV con los MDMC (Adisa Azapagic, Stamford, Youds, & Barteczko-Hibbert, 2016; Claudia Roldán, Martínez, & Peña, 2014; De Luca et al., 2017; Domingues, Marques, Garcia, Freire, & Dias, 2015; Fozzer et al., 2017; Heberle, Schiffler, & Brüggemann, 2016; Khishtandar, Zandieh, & Dorri, n.d.; Onat, Kucukvar, Tatari, & Zheng, 2016; Ren, Manzardo, Mazzi, Zuliani, & Scipioni, 2015; Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014; Stamford & Azapagic, 2014; Verónica Campos-Guzman, Guido C. Guerrero-Liquet, Lucia Serrano, Nieves Espinosa, J. Miguel Sanchez-Lozano, M. Socorro García-Cascales, 2016), la mayoría de estos autores, muestran dos conclusiones comunes, la primera que el ACV por si solo es incapaz de lograr una evaluación sostenible, y segunda, que integrando los MDMC en el ACV, es factible lograr una gestión integrada sostenible en las energías renovables. Los métodos como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1990), Teoría de Valor Multiatributo (TVMA) y ELECTRE-TRI han sido las técnicas más usadas para combinarlas con el ACV en estos casos de estudio, el objetivo que más resaltan es la aplicación de un nuevo marco metodológico en el contexto del sistema energético, sin diferenciar entre renovable y no renovable. Estas investigaciones comparten una particularidad metodológica muy importante, en todos los casos, primero definen un conjunto de escenarios (alternativas), luego calculan los indicadores ambientales aplicando el ACV para cada escenario,

enseguida seleccionan una técnica multicriterio y agregan los indicadores de la dimensión social y económica, por último seleccionan la mejor alternativa en función de los indicadores seleccionados. A pesar que estos casos de estudio incluyen algunas tecnologías en energías renovables, en el contexto de la energía solar fotovoltaica aún no se ha aplicado esta combinación de metodologías, y menos en el contexto de gestión de suministro eléctrico para zonas rurales, lo más cercano a una evaluación sostenible en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, se puede ver en (Cucchiella, & Adamo, 2015) sin embargo este caso de estudio carece de la evaluación social, y se centran más en los términos económicos. En esta dirección, esta investigación tiene como objetivo aplicar un marco metodológico compuesto por el ACV+ la técnica híbrida multicriterio AHP-TOPSIS, mediante esta integración se evalúan tecnologías fotovoltaicas para electrificación rural, desde el punto de vista ambiental, social, económico y técnico, en una zona ubicada al sur de México. La estructura metodológica del ACV está compuesta por cuatro fases 1) Objetivos y alcance, 2) Análisis de inventario, 3) Evaluación de impacto y 4) Interpretación de los resultados (Rebitzer et al., 2004). La peculiaridad de este trabajo es que el ACV es la base metodológica para todo el desarrollo del caso de estudio, las técnicas multicriterio son integradas en sus fases 1 y 4 sirviendo solo como soporte, esto quiere decir que se trata de cumplir con los requerimientos que ISO establece en cada fase. Concretamente, la técnica AHP-TOPSIS, valorado con números difusos triangulares (Zadeh, L. A., 1965) se integra en la fase 1, mientras que la técnica AHP-TOPSIS valorados con números clásicos es integrada en la fase 4. Con este marco metodológico integrado, se define el mejor sistema autónomo fotovoltaico (SAPV) para la zona rural llamada Cerro Hermoso, ubicada al sur de México.

2. Caso de estudio: Integrando Fuzzy-AHP-TOPSIS en el ACV, evaluación sostenible de sistemas fotovoltaicos aislados, para una zona rural, al sur de México.

El contexto para el desarrollo de este caso de estudio, fue una zona rural carente de electrificación, ubicada al sur de México, según el informe de la comisión Federal de Electricidad (CFE) (Hernandez-Trillo, 2016) en México existen más de 500 mil viviendas sin electricidad, lo que se traduce en 43 localidades y a más de 2.200.000 personas. Oaxaca, Guerrero y Chiapas son los estados al sur de México que presentan los índices más altos de pobreza y de zonas rurales del país (Hernandez-Trillo, 2016). En este punto, es importante mencionar que, de los casos de estudio que hay sobre integración de los MDMC con ACV, al menos dos fueron centrados en la evaluación de sistemas energéticos sostenibles en el contexto energético mexicano (Claudia Roldán et al., 2014) y (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014); lo cual nos da una dirección sobre los indicadores considerados para la sostenibilidad en este contexto.

2.1 Problemática, antecedentes y situación actual.

Cerro Hermoso tiene más de 12 años de antigüedad y es una de las tantas comunidades rurales aisladas que se encuentran actualmente sin electrificación, esta zona rural se encuentra en la costa del estado de Oaxaca al sur de México, a una latitud de 15.972507 y una longitud de -97.527261, a pesar que su número poblacional asciende a más de 300 familias, no cuenta con suministro eléctrico por parte de la CFE, aun así dispone de un centro de salud, una escuela primaria y una preescolar, así como una fábrica empaquera de Jamaica que es administrada y operada exclusivamente por mujeres de la región. Como es de suponer, estos servicios y las viviendas en general están limitados en cuanto a electricidad. 6 familias hacen uso esporádico de un grupo electrógeno (generador a

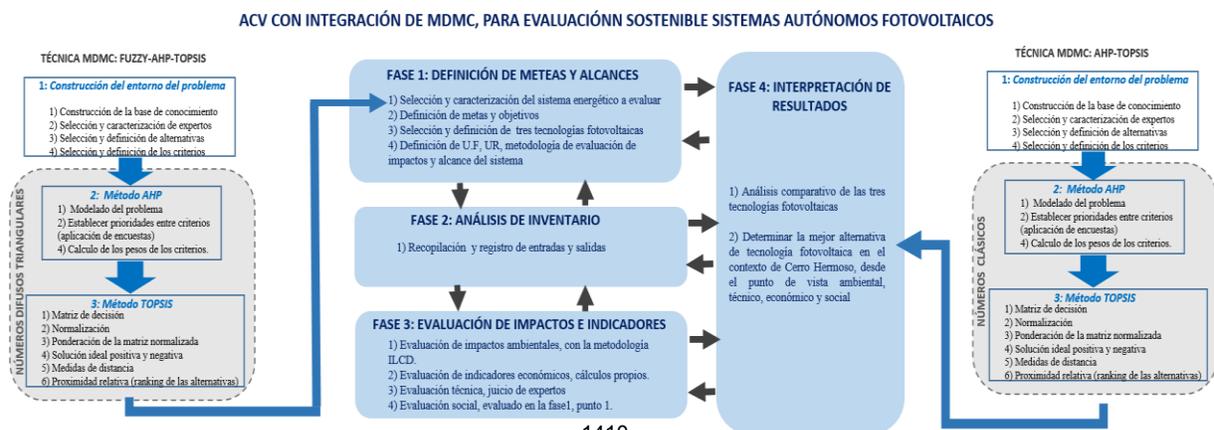
partir de diésel) que también sirve para urgencias en el centro de salud y 2 familias cuentan con un sistema fotovoltaico.

Los intentos para extender la red de distribución de la CFE hasta esta comunidad, han sido vanos, pues la CFE considera que tanto el servicio requerido como el número de viviendas no son suficientes, comparado con la inversión económica que genera extender la red eléctrica hasta ese punto. Como una posible solución, sugirieron a los pobladores que la comunidad asumiera el costo de la inversión de un transformador, o procedieran al suministro eléctrico con los sistemas existentes entre la comunidad. Otro punto muy importante es que, el gobierno estatal implemento un programa llamado “Techo Firme” que consiste en la construcción de viviendas de concreto de un tamaño de 10.5 m largo, y 5.5 m de ancho para cada familia. La problemática en términos generales, primero reside en determinar el mejor sistema de electrificación y segundo, con la tecnología más adecuada para este lugar, no solo desde una dimensión, sino más bien desde un punto de vista multidimensional (técnico, económico, ambiental y social). Esta problemática nos pone frente a la necesidad de evaluar la sostenibilidad en proyectos alternativos para electrificación rural. A continuación, se describe el enfoque metodológico para el desarrollo de la solución.

3. Metodología de desarrollo (ACV+MDMC)

En el marco metodológico de este caso de estudio participan tres métodos: ACV, AHP, y TOPSIS (ver Figura 1), el ACV es una herramienta bien definida compuesta por cuatro fases estandarizadas por un conjunto de normas ISO, fase 1) ISO 14041, fase 2) ISO 14041, fase 3) ISO 14042 y fase 4) 14043, sin embargo, actualmente las normas de las últimas tres fases se han resumido en la ISO 14044. El método AHP fue creado por Tomas L. Saaty (Saaty, 1990), la lógica funcional de este método es jerarquizar el problema, clasificándolo en cinco etapas principales, además es uno de los más utilizados a nivel general, particularmente en problemas de selección en el ámbito de las energías renovables (Naz, et al.,2017). Por otra parte, el método TOPSIS se basa en el concepto de que es deseable que una alternativa determinada se ubique a menor distancia, respecto de una alternativa ideal que representa lo mejor. La combinación de estos tres métodos lo denominamos como enfoque integral, esto quiere decir que, a diferencia de los casos de estudio existentes en la literatura, este trabajo integra técnicas multicriterio en las fases 1 y 4 de la metodología del ACV, como se puede ver en la figura 1. El paradigma implica que, jerárquicamente el desarrollo general estará basado sobre las reglas del ACV, esto supone una ventaja ya que al estar estandarizado por las normas ISO, la hace una herramienta más robusta y madura. Hemos seguido la metodología en cuatro fases principales, con intervenciones secundarias de los MDMC, en lo que sigue se explican las cuatro fases de nuestro estudio.

Figura 1: ACV con MDMC para evaluar los SAPV (Fuente: Elaboración Propia)



3.1 FASE 1. Metas, alcances y objetivos

La definición del objetivo y metas, así como la selección de la metodología de evaluación de impactos ambientales, unidad funcional, etc (indicadas por ISO 14041), deben estar asociados al sistema que se está analizando, sin embargo, como se muestra en la Figura 1, antes de definir las actividades obligatorias del ACV, se desarrolla la técnica multicriterio Fuzzy AHP-TOPSIS para seleccionar y definir el sistema a estudiar. En esta fase se incluye como primera actividad, la selección del sistema a analizar, para ello se integra la técnica multicriterio Fuzzy AHP-TOPSIS, a continuación, se describe el desarrollo del conjunto de actividades de esta fase, las obligatorias del marco ISO y las adicionales propias de este caso de estudio.

3.1.1 Fuzzy AHP-TOPSIS; Selección y caracterización del sistema a estudiar.

El objetivo de este procedimiento es seleccionar en términos generales el sistema de electrificación ideal para Cerro Hermoso, para esto se consideraron tres alternativas, evaluadas con siete criterios, de los cuales, cuatro son cuantitativos y tres cualitativos. A continuación, se describen las alternativas.

A1: Sistema eléctrico de la red (CFE): Se considera el escenario de que la CFE extienda su red de distribución hasta la población de Cerro Hermoso, con las condiciones impuestas de asumir el costo del transformador

A2: Sistema generador con diésel 1 kWp: Se considera este sistema electrógeno, ya que actualmente es el único medio de suministro eléctrico con el que se cuenta.

A3: Sistema fotovoltaico autónomo (SAPV) de 1kWp: Basados en el cálculo previo de un dimensionado fotovoltaico, se considera una instalación fotovoltaica aislada de 1 kWp de potencia. Además de las buenas condiciones geográficas de Cerro Hermoso y por ser una de las más usadas en electrificación rural (Hernández-Escobedo et al., 2016).

Criterios considerados.

Cuantitativos:

C1: Costo de inversión inicial del sistema: Criterio a minimizar, de tipo cuantitativo, expresado en euros (€) por potencia instalada. El costo inicial es por cada vivienda.

C2: Vida Útil: Criterio a maximizar, de tipo cuantitativo y está expresado en años. Hace referencia al tiempo de vida que el sistema funciona en condiciones óptimas.

C3: Costo de mantenimiento anual: Criterio a minimizar, de tipo cuantitativo y se expresa en euros (€) /año.

C4: Costo de generación de kW/h: Criterio a minimizar, de tipo cuantitativo y se expresa en euros (€).

Cualitativos: Se mide en una escala lingüística desde muy alto a muy bajo, con una numeración de etiqueta que va desde 10 hasta 0, respectivamente.

C5: Viabilidad técnica: Criterio a maximizar, se refiere a la disponibilidad del sistema, es decir si está disponible de manera inmediata, a mediano o a largo plazo.

C6: Impacto ambiental del sistema: Criterio a minimizar,

C7: Aceptación social: Criterio a maximizar, hace referencia a la percepción y aceptación de la comunidad (las personas).

En tanto, la selección y caracterización del grupo de expertos se dio en función del contexto y perfiles, por tanto, fueron seleccionados tres expertos en el sistema energético mexicano, uno investigador y especialista en energías renovables y dos especialistas en

instalación y administración de las redes de la CFE. Estos expertos, además de conocer el problema conocen el lugar de emplazamiento.

Se ha reconocido que la combinación del método AHP con el método TOPSIS valorados con números difusos, es la más popular en problemas de selección (Kubler, Robert, Derigent, Voisin, & Le Traon, 2016). Por tanto, para la evaluación de las alternativas, en este análisis se utiliza la técnica multicriterio híbrida de AHP-TOPSIS, las valoraciones lingüísticas para los criterios cualitativos se modelizaron mediante números difusos triangulares (Zadeh, L. A., 1965), el método AHP es usado para obtener el peso de los criterios y el método TOPSIS para calcular la valoración y el ranking de las alternativas (ver esquema de Figura 1), se aplicaron dos tipos de encuestas que llamamos, encuesta corta y extensa, se calcula el peso de los criterios y el ranking de las alternativas para cada experto, Tablas 1 y 2 respectivamente, finalmente los resultados que se toman en cuenta, son los del cálculo de la manera agregada de los tres expertos (Gráficas 1 y 2), mediante este procedimiento, se determina el sistema autónomo fotovoltaico (SAPV) de 1kWp de potencia, como la alternativa de electrificación ideal para Cerro Hermoso.

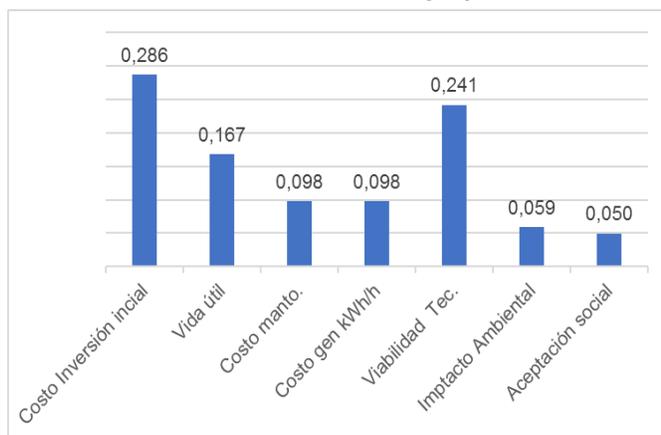
Tabla 1. Peso de los criterios, valoración de cada experto (Fuente: Elaboración Propia)

Criterios	ID Experto										
	010JRH			02LALG			030RGL				
C1	0.27	0.31	0.34	C1	0.30	0.33	0.35	C1	0.09	0.15	0.25
C2	0.27	0.31	0.34	C2	0.07	0.11	0.17	C2	0.06	0.09	0.12
C3	0.07	0.10	0.17	C3	0.05	0.06	0.08	C3	0.06	0.09	0.12
C4	0.07	0.10	0.17	C4	0.05	0.06	0.08	C4	0.06	0.09	0.12
C5	0.04	0.06	0.08	C5	0.30	0.33	0.35	C5	0.39	0.45	0.05
C6	0.03	0.04	0.05	C6	0.03	0.04	0.05	C6	0.04	0.06	0.08
C7	0.03	0.04	0.05	C7	0.03	0.03	0.04	C7	0.04	0.05	0.06

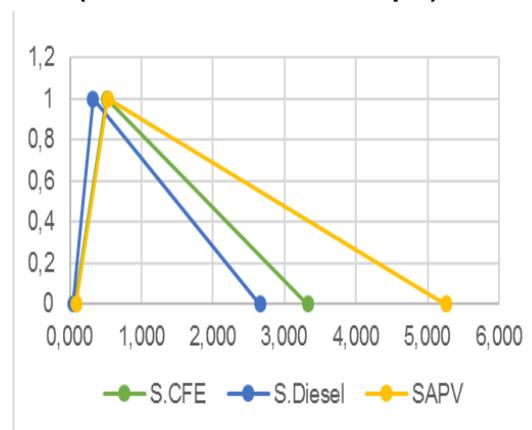
Tabla 2. Índice de proximidad difuso de las alternativas, preferencia de cada experto (Fuente: Elaboración Propia)

Alternativas	ID Expertos		
	010JRH	02LALG	030RGL
R-A1 (S.CFE)	[0.34,0.68,1.38]	[0.18,0.50,1.24]	[0.15,0.37,0.81]
R-A2 (S. Diesel)	[0.08,0.20,0.46]	[0.18,0.45,1.29]	[0.24,0.57,1.45]
R-A3 (SAPV)	[0.21,0.49,1.16]	[0.23,0.51,1.65]	[0.31,0.69,1.90]

Grafica 1: AHP-Fuzzy, Peso de los criterios (Fuente: Elaboración Propia)



Grafica 2: TOPSIS-Fuzzy, SAPV la alternativa ideal de electrificación (Fuente: Elaboración Propia)



3.1.2 Singularidades del caso de estudio (actividades 2,3 y 4 de la fase 1)

La actividad anterior, define el SAPV como el sistema a analizar en las fases del ACV, a continuación, se proporciona la hoja que caracteriza todo el estudio (Tabla 3), relacionado al SAPV como el sistema a estudiar.

**Tabla 3. Hoja de especificaciones del ACV para el análisis del SAPV.
(Fuente: Elaboración Propia)**

Campo característico (ISO-14041)	Valoración
Sistema:	Un SAPV de 1kWp de potencia.
Objetivo:	Evaluar el sistema con tres tecnologías fotovoltaicas, tomando una tecnología de cada generación: de la primera generación se analiza la tecnología de Silicio monocristalino (Si-Mono), segunda generación Silicio amorfo (Si-Amorfo) y de la tercera, las Células orgánicas (OPV). Determinar cuál es el mejor SAPV, en términos de los indicadores planteados
Indicadores ambientales:	Se utiliza la metodología ILCD con sus dieciséis categorías de impacto, acotando finalmente solo a los kg de CO ₂ emitidos.
Indicadores técnicos:	EPBT (años), superficie ocupada de los paneles (m ²), energía embebida en su fabricación (kWh) y eficiencia de la tecnología (%).
Indicadores económicos:	Costo de los paneles (€), incluye transporte.
Indicadores sociales:	Se toma en cuenta el indicador "aceptación social" evaluado en la fase 1.
Fronteras o alcance estudio:	El sistema se evalúa con un alcance de "la cuna a la puerta" , ya que se consideran desde la entrada de materiales para la fabricación de los elementos que componen el SAPV, hasta su instalación.
Unidad funcional:	Todos los impactos estarán relacionados a 1kWp
Unidad de referencia:	En general todos los indicadores estarán referenciados a 1 SAPV
Software para el ACV:	SimaPro V 8.2, BD EcoInvent.
Tipo de estudio:	Comparativo, modela el SAPV con tres tecnologías, finalmente comparándolo en términos de los indicadores planteados.
Dirigido a:	Grupo poblacional de Cerro Hermoso para la toma de decisiones de cuál es el sistema energético con la tecnología ideal.

3.2 FASE 2. Análisis de inventario

Para hacer el registro del inventario (Tabla 4), se hizo de acuerdo al lugar del emplazamiento, al definir que la instalación y el funcionamiento del SAPV será en el contexto mexicano, esto implicó contextualizar el inventario, consecuentemente se registraron las entradas lo más apegado al entorno mexicano, por tanto, en los casos donde permitió se tomaron los procesos que están directamente en el emplazamiento de la instalación y el resto en el contexto global.

Tabla 4. Inventario dimensionado con tres tecnologías

Radiación: 2000 kWh/m ² (datos de la BD de la NASA)		
Performan ratio (PR): 0.85		
Localización emplazamiento: latitud: 15.972507 y longitud: -97.527261		
Potencia: 1 kWp.		
Si-Mono cristalino	Si-Amorfo	Células Orgánicas
MODULOS	MODULOS	MODULOS
Superficie (m ²): 6.5	Superficie (m ²): 18.4	Superficie (m ²): 25
BOS-Si-Mono	BOS-Si-Amorfo	BOS-OPV
1 Inversor genérico	1 Inversor genérico	1 Inversor genérico
4 Batería monoblock 250 Ah equivalente a 123 kg	4 Batería monoblock 250 Ah equivalente a 123 kg.	4 Batería monoblock 250 Ah equivalente a 123 kg.
11.2 m ² Soporte aluminio	26 m ² Soporte de aluminio	-----
5 kg Cableado	10 kg Cableado	10 kg Cableado

3.3 FASE 3. Evaluación de impactos

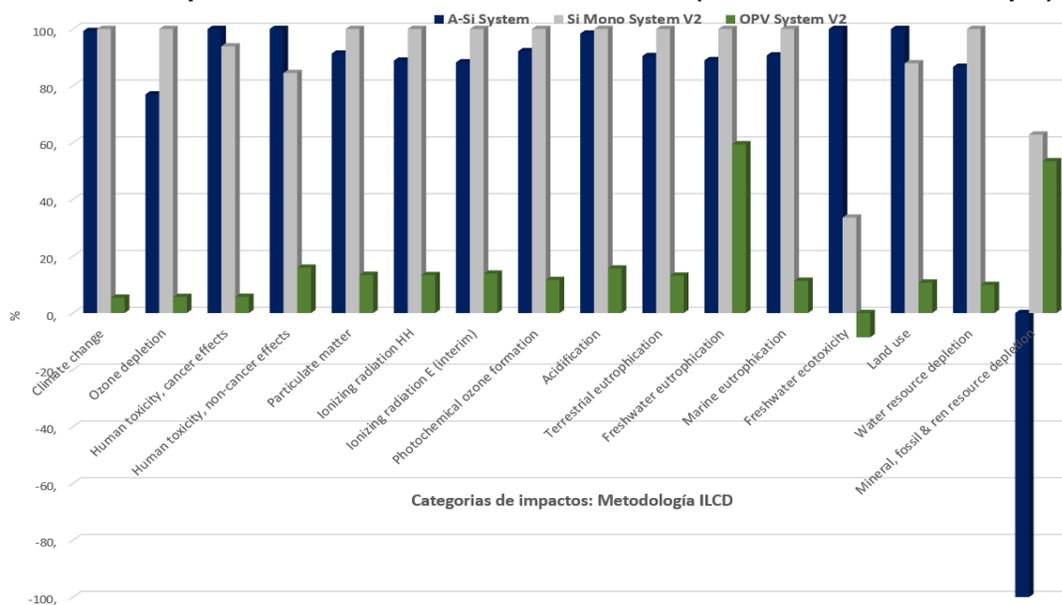
En esta fase se muestran los resultados de la evaluación de los indicadores: ambientales, técnicos y económicos. Como se especificó en la tabla 3, se utilizó la metodología ILCD para la evaluación de los impactos ambientales, en tanto los indicadores técnicos y económicos, fueron calculados por los métodos tradicionales, todos están asociados a la unidad funcional de 1kWp, y a la unidad de referencia de 1 SAPV, el indicador social se toma del primer análisis, dado que el SAPV fue el mejor evaluado en aceptación social, se define con buena aceptación.

3.3.1 Indicadores ambientales

a) A nivel sistema, categorías impacto metodología ILCD

La comparativa a nivel sistema en la evaluación de las dieciséis categorías de impacto de la metodología ILCD, se muestra en la gráfica 3 para las tres versiones de SAPV, se puede apreciar que, el SAPV que incluye los módulos orgánicos es la versión menos contaminante, basados en este grafico podemos decir que el sistema con módulo orgánicos tiene mejor comportamiento ambiental, sin embargo vemos emisiones negativas para el SAPV de silicio amorfo (A-Si-System), esto quiere decir que contrario a emitir, este sistema evita emisiones en esa categoría de impacto, sería interesante comparar con la literatura si esas emisiones evitadas son reales, sin embargo no es prioridad de este estudio profundizar sobre estos detalles.

Grafica 3: Comparativa SAPV indicadores ambientales (Fuente: Elaboración Propia)



3.3.2 Indicadores técnicos y económicos.

Los indicadores técnicos se miden y se calculan en función de los datos que proporciona la evaluación de impactos del ACV y los métodos tradicionales. La tabla 5 muestra los valores para cada indicador que se define en la fase 1 (Tabla 3). El Energy Pay Back Time (EPBT) es el tiempo en que la instalación recupera la energía embebida en la fabricación de sus componentes, a partir de este momento la misma estará evitando emisiones de CO₂, por tanto, el cálculo del EPBT está dado por la ecuación 9, asumiendo una eficiencia termoeléctrica de 35 % y un Performan Ratio (PR) de 0.85. El indicador económico está dado en función del costo de los paneles, debido a que se considera comprar los módulos orgánicos en Dinamarca y transportarlos en barco hasta Mexico, el costo incluye los gastos de trasporte para el caso del SAPV-OPV. Finalmente, las dieciséis categorías de impacto de la metodología ILCD, se acotan al indicador de las emisiones de CO₂. a nivel sistema.

$$EPBT = \frac{(EnergíaEmbebida)(\eta_{term.})}{\frac{EnergíaProducida}{año}} \quad (9)$$

Tabla 5. Indicadores técnicos y económico por sistema

Sistemas	EPBT (años)	Sup. Ocupada (m ²)	Energía embebida (kWh)	Eficiencia (%)	Kg CO ₂ eq	Costo (€)
SAPV-OPV	3.29	25	7702.77	3	1110.00	18000
SAPV-Si-Amorfo	0.60	18.4	63113.06	11	17400.00	720
SAPV-Si-Mono	0.70	6.5	40305.56	17	11800.00	840

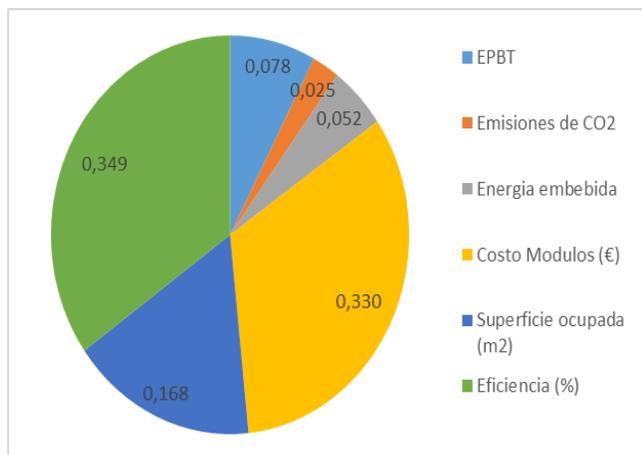
3.4 FASE 4. Análisis de resultados e interpretación de los datos.

Se ha analizado un SAPV de 1 kWp de potencia en tres tecnologías fotovoltaicas, en esta fase analizamos finalmente las tres versiones de SAPV con seis indicadores principales: tiempo de retorno energético (EPBT), emisiones de CO₂, energía embebida, costo de los paneles, superficie ocupada y eficiencia. De la tabla 5, no podemos determinar ninguna versión de SAPV como la mejor, ya que hay una variación dependiendo de la dimensión con que se juzgue, por ejemplo si buscamos la versión del SAPV con el mejor comportamiento ambiental, sin duda sería el SAPV-OPV, esta sería nuestra respuesta si se tomaran en cuenta solo los resultados del ACV, sin embargo, el objetivo de este caso de estudio es precisamente evitar eso, que se tome una decisión únicamente con los resultados del ACV, por tanto se propone tomar una decisión, integrando el resto de indicadores (económico y técnico). Como ejemplo, si juzgáramos el SAPV-OPV en términos económicos o de rendimiento, este sería la peor alternativa, contrario a esto, si buscamos el más económico, el SAPV-Si-Amorfo sería el mejor posicionado. Surge entonces la interrogante, ¿Cuál es el mejor SAPV en términos, ambientales, económicos y técnicos? Debido a esta incertidumbre, en esta fase se integra una técnica híbrida multicriterio: AHP-TOPSIS (ver Figura 1) para determinar la alternativa ideal del SAPV en términos ambientales, económicos y técnicos, hay que resaltar que los criterios de la dimensión social ya fueron evaluados en la fase 1 del ACV (Fuzzy-AHP-TOPSIS), al ser el SAPV el más preferido por los usuarios (pobladores) ya cuenta con una aceptación social. Por otro lado, nótese que en este caso no se evalúa con los números difusos triangulares, ya que los seis criterios involucrados tienen un valor cuantitativo.

3.4.1 MDMC: AHP-TOPSIS para determinar la alternativa de SAPV ideal.

Como en la etapa 1, aquí se utiliza el método AHP para calcular el peso de los criterios y el método TOPSIS para el cálculo de la valoración de las alternativas (Gráficas 4 y 5).

Gráfica 4: AHP, Peso de los criterios



Gráfica 5: TOPSIS, valoración de las alternativas



El cálculo del peso de los criterios se hizo a partir de un solo experto. Basados en las Gráficas 4 y 5, el SAPV-Si-Mono es la alternativa ideal para electrificar Cerro Hermoso, sin embargo, podemos observar que, el SAPV-OPV es el sistema menos ideal, contrario a lo que indicaba inicialmente los resultados de ACV, limitándose solo a la dimensión ambiental. También es de suponer que el criterio con mayor peso sea el costo de inversión inicial ya que en una zona rural es inherente la baja economía (Hernandez-Trillo, 2016; Jimenez, 2017).

4. Resultados y Conclusiones

Se han evaluado tres sistemas autónomos fotovoltaicos de 1kWp de potencia, desde el punto de vista ambiental, social, económico y técnico, sin embargo, el sistema integrado por paneles de silicio monocristalino, resulto ser la opción más sostenible para suministrar electricidad a la comunidad rural de Cerro Hermoso, aunque no es el que emite menos kg de CO₂, o el más económico, este fue el mejor posicionado en la evaluación integral que reúne todos los indicadores. Esto demuestra que, si la decisión se hubiese tomado solo con los resultados del ACV, la elección sería el sistema que incluye los módulos orgánicos (más barato ambientalmente) o el los de silicio amorfo (más barato económicamente), sin embargo, no sería una decisión integral ya que solo se estaría evaluando con indicadores de una sola dimensión. Este es el primer caso de estudio que combina ACV con MDMC para evaluar tecnologías fotovoltaicas para el suministro eléctrico a zonas rurales, con este caso práctico se concluye que la metodología de ACV por si sola carece de brindar los lineamientos para la toma de decisiones en términos sostenibles. Se considera que es aquí donde los MDMC juegan un papel importante, ya que ayudan a la toma de decisiones reduciendo el grado de incertidumbre. Aún queda mucho por hacer y mucho que perfeccionar, por ejemplo, como trabajo futuro, este estudio puede ampliarse con dos aspectos, el primero, aumentando el número de expertos y el segundo y más interesante, considerar no solo las emisiones de CO₂ como indicador ambiental, sino más bien incluir las 16 categorías de impacto que proporciona la metodología ILCD.

5. Referencias

- Azapagic, A., Stamford, L., Youds, L., & Barteczko-Hibbert, C. (2016). Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs). *Computers & Chemical Engineering*, 91, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.017>
- Azapagic, A., & Stichnothe, H. (2011). 3 - Life cycle sustainability assessment of biofuels. In *Handbook of Biofuels Production* (pp. 37–60). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857090492.1.37>
- Bond, A., Morrison-Saunders, A., & Pope, J. (2012). Sustainability assessment: the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 30(1), 53–62. <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661974>
- Claudia Roldán, M., Martínez, M., & Peña, R. (2014). Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.007>
- Cucchiella, F., D'Amico, & Adamo, I. (2015). A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments. *International Journal of Photoenergy*, 2015, e627454. <https://doi.org/10.1155/2015/627454>

- De Luca, A. I., Iofrida, N., Leskinen, P., Stillitano, T., Falcone, G., Strano, A., & Gulisano, G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of The Total Environment*, 595, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.284>
- Domingues, A. R., Marques, P., Garcia, R., Freire, F., & Dias, L. C. (2015). Applying Multi-Criteria Decision Analysis to the Life-Cycle Assessment of vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 107, 749–759. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.086>
- Fozer, D., Sziraky, F. Z., Racz, L., Nagy, T., Tarjani, A. J., Toth, A. J., ... Mizsey, P. (2017). Life cycle, PESTLE and Multi-Criteria Decision Analysis of CCS process alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 147, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.056>
- Heberle, F., Schiffler, C., & Brüggemann, D. (2016). Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working fluids. *Geothermics*, 64, 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.010>
- Hernandez-Trillo, F. (2016). Poverty Alleviation in Federal Systems: The Case of México. *World Development*, 87, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.06.012>
- Jeswani, H. K., Azapagic, A., Schepelmann, P., & Ritthoff, M. (2010). Options for broadening and deepening the LCA approaches. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.023>
- Jimenez, R. (2017). Barriers to electrification in Latin America: Income, location, and economic development. *Energy Strategy Reviews*, 15, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.001>
- Khishtandar, S., Zandieh, M., & Dorri, B. (n.d.). A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.212>
- Kim, J., Rivera, J. L., Meng, T. Y., Laratte, B., & Chen, S. (2016). Review of life cycle assessment of nanomaterials in photovoltaics. *Solar Energy*, 133, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.060>
- Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., & Le Traon, Y. (2016). A state-of the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Expert Systems with Applications*, 65, 398–422. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.064>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Li, X., & Mupondwa, E. (2014). Life cycle assessment of camelina oil derived biodiesel and jet fuel in the Canadian Prairies. *Science of The Total Environment*, 481, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.003>
- Life Cycle Analysis as the Sustainability Assessment Multicriteria Decision Tool for Road Transport Biofuels - Life Cycle Analysis as the Sustainability Assessment Multicriteria Decision Tool for Road Transport Biofuels.pdf. (n.d.). Retrieved from file:///C:/Users/Nieves/Downloads/Life%20Cycle%20Analysis%20as%20the%20Sustainability%20Assessment%20Multicriteria%20Decision%20Tool%20for%20Road%20Transport%20Biofuels.pdf
- Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J. (2017). A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 150, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.017>

- Menberg, K., Pfister, S., Blum, P., & Bayer, P. (2016). A matter of meters: state of the art in the life cycle assessment of enhanced geothermal systems. *Energy & Environmental Science*, 9(9), 2720–2743. <https://doi.org/10.1039/C6EE01043A>
- Naz, M. N., Mushtaq, M. I., Naeem, M., Iqbal, M., Altaf, M. W., & Haneef, M. (2016). Multicriteria decision making for resource management in renewable energy assisted microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.059>
- Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., & Zheng, Q. P. (2016). Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. *Journal of Cleaner Production*, 112, Part 1, 291–307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.021>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Ren, J., Manzardo, A., Mazzi, A., Zuliani, F., & Scipioni, A. (2015). Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(6), 842–853. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0877-8>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- Stamford, L., & Azapagic, A. (2014). Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070. *Energy for Sustainable Development*, 23, 194–211. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.008>
- Verónica Campos-Guzman¹, Guido C. Guerrero-Liquet¹, Lucia Serrano¹, Nieves Espinosa¹, J. Miguel Sanchez-Lozano², M. Socorro García-Cascales¹. (2016). ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS ON LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF RENEWABLE ENERGY. 21 AEIPRO.
- Vazquez-Rowe, I., & Iribarren, D. (2015). Review of Life-Cycle Approaches Coupled with Data Envelopment Analysis: Launching the CFP. *The Scientific World Journal*, 2015, e813921. <https://doi.org/10.1155/2015/813921>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)