

ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS ON LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF RENEWABLE ENERGY

Campos Guzmán, Verónica; Gerrero Lique, Guido Camilo; Serrano Luján, Lucía; Espinosa, Nieves; Sánchez Lozano, Juan Miguel; García Cascales, M. Socorro
Universidad Politécnica de Cartagena

The life cycle assessment aims to compare and analyze the environmental impacts of products and services throughout their life cycle. The methodology used to perform this analysis is defined and standardized by the 14040/14044:2006. Since the life cycle assessment is an evaluation tool widely applied to various disciplinary areas, it presents a degree of inflexibility, and therefore a high degree of uncertainty when making a decision, mainly in the last stage in which the results are interpreted for possible improvements. This situation forces us to apply appropriate techniques to facilitate and improve the decision making process in the life cycle assessment.

In this context, multi-criteria decision methods have proven to be a promising instrument that allows obtaining the best option from a set of available alternatives. In this direction, we believe that the application of these methods could significantly improve the process of decision making in the analysis of life cycle. Thus, in the overall framework of this paper, we propose to review and analyze the multi-criteria methods at different stages of a life cycle assessment in the renewable energy sector.

Keywords: Life-cycle assessment (LCA); Multi-criteria Decision Making (MCDM); Uncertainty; Renewable energy

ANÁLISIS DE INTEGRACIÓN DE MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO EN EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ENMARCADO EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El análisis de ciclo de vida es una herramienta de evaluación cuyo objetivo es la comparación y el análisis de los impactos medioambientales de productos o servicios durante todo su ciclo de vida. La metodología empleada para realizar este análisis está definida y estandarizada por la norma UNE-ISO 14040/14044:2006. Al ser una herramienta de evaluación generalizada, aplicada a diversas áreas disciplinares, muestra cierto grado de inflexibilidad y, por tanto, un alto grado de incertidumbre al tomar una decisión, principalmente en la última etapa de interpretación de resultados para posibles mejoras. Esta situación obliga a formular técnicas adecuadas que faciliten y mejoren el proceso de toma de decisiones en el análisis de ciclo de vida.

Los métodos de decisión multicriterio demuestran ser un instrumento muy útil para obtener la mejor opción de un conjunto de alternativas disponibles. En esta dirección, creemos que la aplicación de estos métodos podría mejorar significativamente el proceso de toma de decisiones en el análisis de ciclo de vida. Así, como marco general de este trabajo, nos planteamos revisar y analizar cómo los métodos multicriterio intervendrían en las diferentes etapas de un análisis de ciclo de vida cuando se aplica al sector de las energías renovables.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida; Métodos de Decisión Multicriterio; Incertidumbre; 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 2004, una beca de doctorado del Ministerio de Educación Superior de la República Mexicana (PRODEP) con el número de folio UAGRO-210

1. Introducción y objetivos.

El análisis de ciclo de vida (ACV) como herramienta metodológica permite evaluar los impactos medioambientales de un sistema, calculando el valor cuantitativo de los indicadores ambientales que están involucrados a lo largo del ciclo de vida de este. Por otro lado, los métodos de decisión multicriterio (MDMC) permiten seleccionar la mejor de un conjunto de alternativas disponibles en función de una serie de criterios de decisión; basándose en el juicio de expertos, en valoraciones cualitativas y cuantitativas y reduciendo el grado de incertidumbre en los resultados lo cual permite tomar decisiones de manera más precisa.

Estudiar y analizar cómo se integran estas dos metodologías para lograr un solo objetivo dentro de las energías renovables y en concreto dentro de la energía solar fotovoltaica es el objeto principal de este estudio. En este documento se pretende realizar una revisión bibliográfica de artículos científicos con aplicaciones concretas en este ámbito desde lo general hasta lo particular. En la primera sección se hace la revisión bibliográfica donde se ha aplicado cada metodología (ACV y MDMC), de manera individual dentro de las energías renovables, esto se hace con el objetivo de obtener una clara descripción del desarrollo de la herramienta del ACV en las energías renovables y analizar qué resultados se han obtenido. En paralelo también se hace la revisión bibliográfica de cómo han sido utilizados los MDMC para la ayuda a la toma de decisiones dentro del ámbito de las energías renovables. En la segunda sección la búsqueda bibliográfica se centra en casos prácticos, priorizando casos de integración de ambas metodologías. La bibliografía revisada pretende acotar y particularizar la búsqueda de casos de estudio para la energía solar fotovoltaica y de esta forma, poder llevar a cabo una revisión más exhaustiva con la intención de obtener las bases para plantear un caso de estudio específico en la última sección de este documento. En este punto, basados en la literatura revisada, se plantea la construcción de un caso práctico para evaluar sistemas aislados fotovoltaicos (SAPV) para el suministro de energía en el sector residencial. Se propone evaluarlos en dos dimensiones: social y ambiental. Además se ha propuesto este caso de estudio para que sea desarrollado sobre la base de la metodología del ACV, integrando MDMC en sus fases 1 y 3.

2. Análisis de ciclo de vida (ACV)

El análisis de ciclo de vida es una estructura y un método estandarizado internacionalmente por una serie de normas ISO que comienzan en la 14040 (ISO, 1997). El objetivo de esta metodología es cuantificar todas las emisiones relevantes, los recursos consumidos, los impactos ambientales relacionados con la salud y problemas que están asociados con el sistema que se está estudiando. El ACV como metodología es una contabilidad ambiental (Finnveden et al., 2009) en la que se cuantifican los efectos ambientales asociados a un producto, generados a lo largo de su ciclo de vida.

2.1. Descripción de las fases de un ACV

1. Definición de metas y alcance.

En esta fase se define el objetivo principal del ACV y debe ser claramente definido; por qué se va hacer, para quien va dirigido (Rebitzer et al., 2004), así como el alcance que puede ser: i).-“de la cuna a la puerta, entradas y salidas hasta la producción”, ii).-“de la puerta a la puerta, entradas y salidas solo fase producción”, iii).- “de la cuna a la tumba, entradas y salidas hasta su fin de vida” y iv).-“de la cuna a la cuna, entradas y salidas hasta que son recursos nuevamente”. También en esta fase se define la unidad funcional (UF), que es la que describe la función principal del sistema analizado. La UF proporciona una referencia respecto a las entradas y salidas del sistema, ya que en un ACV no se comparan productos o sistemas, más

bien se compara la función de este, y por tanto la UF es el parámetro comparativo entre dos sistemas.

2. Análisis de inventario.

En esta etapa se hace la identificación y cuantificación de las entradas tales como: uso de recursos, materias primas, partes, productos, transporte, electricidad, energía, etc. y salidas como: emisiones al aire, al agua, al suelo, residuos y subproductos para cada proceso o fase del sistema analizado, el registro de los flujos, la descripción de cada unidad de operación y la conexión del inventario con los parámetros y lista de unidades medidas. Una vez registrados los datos de acuerdo con la norma ISO (Finnveden et al., 2009) se hace la selección y clasificación de las categorías de impactos que es de interés para el estudio.

3. Evaluación de impactos.

En esta etapa se hace la evaluación de los impactos ambientales asociados al sistema que se está analizando, se seleccionan las categorías de impactos de acuerdo al objetivo que se definió en la primera fase. Existen muchas metodologías para hacer el cálculo de los indicadores de los impactos ambientales de un sistema (Pennington et al., 2004). Por citar algunas: ILCD, LCIA-CML 2001, LCIA-TRACI, LCIA, Recipe, etc. Estas metodologías trabajan con bases de datos con registro de flujos de la industria y están clasificadas por áreas.

4. Interpretación de los resultados.

En esta fase los resultados se presentan en forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, lo que permite saber en qué fase del ciclo de vida del sistema se generan las principales cargas ambientales.

5. Adicionalmente se puede incluir la etapa de análisis de sensibilidad.

El objetivo de agregar esta fase es para determinar la consistencia de los datos que se registraron en las entradas y salidas del sistema, lo que se hace en esta etapa es variar los valores de entradas y salidas del sistema en cuestión y analizar como varían los resultados, esto indica un ratio de consistencia en los datos, el cual determina un grado de incertidumbre en los resultados.

2.2. Normas ISO – Normalización del ACV

ISO 14040: Marco de referencia para el ACV, principios, necesidades básicas No describe la técnica en detalle.

ISO 14041: Especifica las necesidades y procedimientos para elaborar la definición, objetivos y alcance del sistema.

ISO 14042: Especifica la guía para la estructura general, de la fase de análisis de impacto. Especifica los requerimientos para llevar a cabo la etapa de análisis de inventario del ciclo de vida (AICV) y define tres áreas como categorías de impactos finales: salud humana, entorno natural y recursos renovables.

ISO 14043: Proporciona las recomendaciones para realizar la fase de interpretación de los resultados de un ACV.

ISO 14044: Gestión ambiental del ACV, requisitos y directrices.

ISO TR 14047: Proporciona un ejemplo de cómo aplicar la ISO 14042.

ISO 14049: Proporciona un ejemplo de cómo realizar un inventario de ciclo de vida.

ISO CD TR14048: Proporciona información en relación con los datos utilizados en un estudio.

2.3. ACV dentro de las energías renovables

Las fuentes de energías renovables tienen también asociados impactos sobre el medio físico. Aunque son menores que los de las tecnologías tradicionales, estos impactos pueden estimarse mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida (ACV). Cuando se aplica un ACV a energías renovables, en lugar de estimarse los impactos ambientales, comúnmente se calculan parámetros como el EPBT (Energy Pay Back Time) o el tiempo de retorno de energía

embebida en su fabricación. Estudios de ACV han sido ampliamente realizados en Europa y en el resto del mundo para evaluar los costes energéticos y ambientales de las tecnologías usadas en las energías limpias. Por ejemplo algunas de las contribuciones más relevantes en este contexto son: (García-Valverde, Miguel, Martínez-Bejar, & Urbina, 2009), donde evaluaron el ACV de un sistema completo autónomo fotovoltaico instalado en la ciudad de Murcia, España, el cual, incluye además de los paneles fotovoltaicos los componentes del sistema como las baterías, inversor, regulador y cables. El EPBT obtenido en este trabajo fue de 9.08 años. La energía primaria invertida en la fabricación de este sistema fue de 45,692 MWh y emisiones de CO₂ de 13,166 ton. Además determinaron que de todos los elementos que componen el sistema, los paneles y las baterías son los elementos con mayor costo energético y ambiental. Otro caso de estudio fue realizado por (Espinosa, García-Valverde, Urbina, & Krebs, 2011) donde evaluaron el ciclo de vida de la producción de módulos fotovoltaicos con células solares de polímeros flexibles por medio del proceso ProcessOne, donde señalan que la tecnología tiene 1.35 años de EPBT de un módulo típico con 3 % de eficiencia y una superficie útil del 67%. Un estudio contextualizado en el sureste español, realizado por (Serrano-Luján, García-Valverde, Espinosa, García-Cascales, Sánchez-Lozano y Urbina, 2013), muestra el EPBT, ERF y factor de emisión de un generador fotovoltaico integrado en un tejado, donde se consideró desde la extracción de los materiales hasta el tratamiento de todos los materiales al final del ciclo de vida. Los módulos fotovoltaicos fueron identificados como los principales responsables del consumo energético debido a su producción, suponiendo un 60% de la energía embebida del sistema. Otro estudio más reciente fue realizado en China por (Chen, Hong, Yuan, & Liu, 2016), su estudio consistió en la evaluación del ciclo de vida de un módulo fotovoltaico de Silicio multi-cristalino, en esta evaluación se consideró desde la extracción del silicio hasta la producción del módulo completo y se basó en los datos de inventario de las empresas Chinas de paneles fotovoltaicos, el EPBT calculado fue de 2.2 a 6.1 años, y las emisiones de CO₂ por cada kWh fueron en el rango de 5.60 a 12.07 gr; los autores concluyeron que la fase más crítica del ACV es la etapa de la transformación de Silicio metálico a Silicio solar, ya que es el consumo más alto en energía eléctrica..

La tabla 1 hace referencia a casos de estudio donde se han evaluado ACV para las energías renovables, proporciona una descripción de los resultados de cada estudio así como la unidad funcional, y otros parámetros que se midieron en el caso referido.

Tabla 1: ACV en las energías renovables (Fuente: Elaboración Propia)

Estudio-autor	Objetivo	Unidad funcional	Categorías impacto medidas	EERR	Resultados ACV
(García-Valverde et al., 2009)	Calculo del EPBT y el GWP de un SAPV de 4.2 kWp	1 kWh	Global Warming potential, EPBT	Solar fotovoltaica	Energía embebida en el SAPV: 63.17 MWh fabric. Bat. Plomo 55.42 MWh fabric. Mod. P V. 1.81 MWh fabric. Estruct. Soport 1.67 MWh fabric. Marcos 1.16 MWh fabric. Regulador 0.83 MWh fabric. Inversor 0.75 MWh fabric. Cables
(Espinosa et al., 2011)	ACV de los módulos de células solares de polímeros, por el proceso de fabricación PROCESSONE	1 m ²	Energía Primaria embebida	Solar fotovoltaica	Replantear el proceso del grabado del ITO. Energía primaria en materiales: 302.27 MJ/m ² Energía directa proceso: 76.96 MJ/m ²
(Serrano-Luján et al., 2013)	ACV de un generador fotovoltaico integrado en tejado con módulos de telurio de cadmio (CdTe).	222kWp	Global Warming, EPBT, ERF	Solar fotovoltaica	EPBT=1.69 a 2.06 años CO ₂ =3,63 a 5,38 g / kWh ERF=14.77 a 12.16

(Kim, Cha, Fthenakis, Sinha, & Hur, 2014)	Evaluar las cargas ambientales de un sistema fotovoltaico con módulos de telurio de cadmio (CdTe) en Malasia y comparar su EPBT con otras tecnologías.	1kWh	EPBT CO ₂	Solar fotovoltaica	EPBT (CdTe): 0.94 a 0.76 años EPBT (mono-Si): 2.6 a 4.12 años EPBT (poli-Si): 2 años EPBT (amorfo-Si): 1 a 1.3 años CO ₂ (sistema completo):15.1 gr eq / kWh CO ₂ (módulo PV CdTe): 7.23 gr eq / kWh CO ₂ (BOS): 4.41 eq /kWh Energía primaria embebida: 7.96 MJ / kWh
(Fu, Liu, & Yuan, 2015)	ACV de un módulo fotovoltaico con módulos de silicio mono cristalino en China.	1kWp	Global Warming, Eutrofización, EPBT	Solar fotovoltaica	EPBT=0.42 a 0.91 años
Chen, Hong, Yuan, & Liu, 2016	ACV de un módulo fotovoltaico con módulos de silicio multi-cristalino cristalino en China.	1kWp	Global Warming, Eutrofización, EPBT	Solar fotovoltaica	EPBT=2.2 a 6.1 años CO ₂ =5,60 a 12,07 g / kWh

ITO: Indio, Estaño, Oxido.

3. Métodos de Decisión Multicriterio (MDMC)

La toma de decisiones multicriterio debe ser entendida como un "mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios. Dentro de los MDMC se han desarrollado un importante número de teorías y algoritmos tales como: AHP, ANP, TOPSIS, ELECTRE-TRI y VIKOR por citar algunos. Estos métodos fueron desarrollados para modelar un problema específico y para apoyar a los decisores a seleccionar la "mejor" alternativa cuando se tienen problemas complejos de toma de decisiones. Todas estas teorías están basadas en la suposición de que los decisores procuran hacer elecciones racionales.

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima. En función de las preferencias del decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema central de los métodos multicriterio consiste en: 1. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativa(s); 2. Aceptar alternativas que parecen "buenas" y rechazar aquellas que parecen "malas"; 3. Generar una "ordenación" (ranking) de las alternativas consideradas (de la "mejor" a la "peor"). En resumen, los métodos de decisión multicriterio son algoritmos bien definidos que ayudan a encontrar la mejor de las soluciones disponibles basada en el objetivo principal del problema tratado.

3.1. MDMC híbridos y Soft Computing

A pesar que existen varios métodos del análisis multicriterio su elección se da en función del objetivo específico del problema a estudiar que determina cuando es más apropiado un determinado método u otro. Determinar qué y cuántos MDMC utilizar para modelar un mismo problema en la mayoría de la literatura se le denomina "aplicación de una metodología híbrida", que es la combinación de dos o más MDMC para determinar la mejor solución a un mismo problema. Elegir el método apropiado, determinar si es necesaria una aplicación híbrida, es solo parte de la modelación de un problema mediante un MDMC. En muchos problemas de toma de decisiones los investigadores se enfrentan a evaluaciones de decisores que no son claras y por ende proporcionan valores a los criterios y/o alternativas que están en un rango de valores o con una alta componente de imprecisión. Es decir, es imposible para ellos indicar un valor exacto numérico que evalúe los criterios o las alternativas, y esto lleva como consecuencia que el valor que se le asignan a los atributos o criterios sean de tipo cualitativo o "lingüístico". Es como decir que un criterio tiene una importancia "medio

buena”, “medio mala”, “medio alta”, “medio baja”, etc. Cuando se está frente a un problema de decisión multicriterio de este tipo, puede modelarse mediante herramientas de Soft Computing y en concreto mediante lógica difusa, donde los números difusos, a través del modelado lingüístico difuso, pueden modelizar las valoraciones vagas o imprecisas. La lógica difusa se basa principalmente en la manipulación de conjuntos difusos cuya teoría fue desarrollada por Lotfi A. Zadeh en 1965. En un conjunto clásico, un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto (lógica clásica), mientras que un elemento de un conjunto difuso, pertenece a un conjunto con un grado de pertenencia que oscila entre 0 y 1 (Zadeh, 1965). Cuando se tienen elementos difícilmente valorables, estos se pueden modelizar mediante la utilización de números difusos e incluirlos dentro de los MDMC y así poder asignar valores a los criterios y/o alternativas cuando la información del decisor es imprecisa. En la literatura este enfoque híbrido de los MDMC con conjuntos difusos está siendo muy utilizado por la comunidad científica para la ayuda a la toma de decisiones en modelos con un alto componente de incertidumbre e imprecisión. Actualmente existe una gran cantidad de variantes de los MDMC tradicionales aplicados con conjuntos difusos y en el ámbito de las energías renovables como se puede ver en la revisión realizada por (Suganthi, Iniyan, & Samuel, 2015).

3.2. MDMC dentro de las energías renovables

En esta sección se citan algunos casos de estudio donde los MDMC han sido aplicados con sus diferentes variantes y se muestra como han ayudado a la toma de decisiones dentro de las energías renovables. La literatura muestra cómo se pueden comparar diferentes alternativas y atributos utilizando una escala de importancia relativa. Por ejemplo (Kahraman, Kaya, & Cebi, 2009) aplicaron un modelo MDMC tradicional usando cuatro criterios y diecisiete subcriterios, y señalando que la energía eólica era la mejor fuente de energía renovable en Turquía. En otro estudio, (Kahraman & Kaya, 2010) aplicaron una técnica de MDMC-Fuzzy, para seleccionar la política energética más adecuada en Turquía. Los autores (García-Cascales, Lamata, & Sánchez-Lozano, 2011) utilizaron una técnica híbrida de MDMC con conjuntos difusos (AHP-TOPSIS-Fuzzy), para la evaluación de las diferentes tecnologías fotovoltaicas. Otros investigadores como (Amer & Daim, 2011) aplicaron un MDMC tradicional, donde determinaron qué tecnologías en energías renovables son viables en Pakistán, considerando criterios como impactos medioambientales, económicos, técnicos y políticos. Nuevamente (Kaya & Kahraman, 2011) desarrollaron otro caso de estudio pero en este estudio utilizaron una metodología híbrida con números difusos: AHP-VIKOR-Fuzzy con matrices de conjuntos difusos en la evaluación de los criterios. Además de evaluar las áreas de forestación como alternativas en Estambul, mediante esta metodología encontraron que la cuenca de Ömerli es el distrito más adecuado para la forestación en Estambul. Otros autores como (Sánchez-Lozano & Socorro García-Cáscales, 2013) utilizaron datos de un sistema de información geográfica (SIG) y un MDMC híbrido, y con esta técnica evaluaron diferentes lugares para instalar plantas solares fotovoltaicas en el área de Cartagena, Región de Murcia en el sureste de España, teniendo en cuenta criterios ambientales, geomorfológicos, de localización y climáticos.

La tabla 2 muestra la recopilación y descripción de algunos casos particulares donde se aplican MDMC, MDMC-híbrido, MDMC-Fuzzy y MDMC-híbrido-Fuzzy en la toma de decisiones en energías renovables.

Tabla 2: Casos prácticos, variantes de MDCM en energías renovables (Fuente: Elaboración Propia)

Estudio-autor	Objetivo	Técnica	Criterios	Alternativas
(Aras, Erdoğan, & Koç, 2004)	Determinar lugar ideal para una estación de observación eólica en una universidad.	(AHP)	C1:Topografía, C2: Coste, C3:Infraestructura, C4:Seguridad, C5:Conveniencia en el transporte	Energía eólica Zona1, Zona2, Zona 3
(Nigim, Munier, & Green, 2004, p. -)	Determinar qué proyecto de energía renovable es el adecuado para instalar en la región de Waterloo, CANADÁ	(AHP)	Impacto ecológico, Beneficio socio económico, Potencial educativo, Disponibilidad de recursos, Viabilidad técnica, Viabilidad financiera.	Energías Renovables A1:E. solar fotovoltaica, A2: E. eólica, A3: E. geotérmica, A4: E. mini hidráulica. A5: E. solar térmica.
(Cavallaro, 2009)	Evaluar las tecnologías de concentradores solares térmicos.	PROMETHEE	3 económicos y 4 técnicos Incluye escala cualitativa de los impactos ambientales (3 a moderada, 2 para baja y 1 para ningún impacto).	Correspondientes a diferentes tecnologías de concentración solar Parabólica, energía y fluido de transferencia de calor.
(Kahraman & Kaya, 2010)	Seleccionar la política energética más adecuada en TURQUIA	AHP-Fuzzy	C1:Técnicos (7), C2: Ambientales (3), C3: Sociopolítico (4), C4: Económicos (3)	A1: E. hidráulica,A: Biomasa, A3: Geotérmica, A4: E. solar, A5: E. eólica, A6: Carbón, A7: Petróleo, A8: Gas natural, A9: E. Nuclear.
(García-Cascales et al., 2011)	Seleccionar la mejor célula fotovoltaica.	AHP-TOPSIS-Fuzzy	C1: Costo manufactura, C2: Eficiencia en conversión, C3: Cuota del mercado, C4: emisiones de gases de efecto invernadero, C5: EPBT	A1: Cell Si-Cristalino (Mono y Poli), A2: Si-amorfo thin layer. A3: thin layer Cdte, A4: III-V thin layer. A5: Organica-Híbridas
(Ahammed & Azeem, 2013)	Seleccionar el paquete más adecuado de sistema solar aislado para el hogar (SHS), en las zonas rurales de BANGLADESH	(AHP)	C1: Costo paquete C2: Satisfacción de la demanda básica de electricidad de la casa. C3: Disponibilidad del paquete.	Energía solar fotovoltaica, A1: 75 Wp para 6 lampara 8 W c/u, 1 Ventilador, 1 TV. A2: 50 Wp para 4 lamparas 8 W c/u, 1 Ventilador, 1 TV. A3: 30 Wp para 2 lamparas 8 W c/u, 1 ventilador, 1 TV La mejor alternativa: A3.
(Sánchez-Lozano et al., 2013)	Evaluar sitios potenciales para la instalación de una planta solar, en Cartagena, región de Murcia, España.	AHP-TOPSIS	1 medioambiental, 3 geomorfológicos, 4 localización y 2 climáticos.	Alternativas: sitios potenciales para instalar una planta solar fotovoltaica.

4. Integración de los MDMC en el ACV dentro de las energías renovables.

Este apartado muestra una revisión bibliográfica concretamente de los casos de estudio donde la comunidad científica ha integrado los MDMC con el ACV en el ámbito de las energías renovables.

Revisando las aplicaciones de cada metodología orientada a las energías limpias. A la luz de los resultados: los casos de estudio de ACV (tabla 1), muestran que esta metodología por sí sola, solo provee indicadores medioambientales del ciclo de vida de un sistema (Finnveden et al., 2009), tales como: gases de efecto invernadero (GEI), residuos sólidos, uso de suelo, impactos a la salud, costes de medio de transporte, cargas energéticas, etc. Por su parte los MDMC en los casos de estudio presentados en la tabla 2, muestran que son herramientas útiles que te permiten elegir de un conjunto de alternativas disponibles, la mejor de ellas.

El ACV es insuficiente para determinar la sostenibilidad total de sistemas energéticos, tecnologías o procesos. La sostenibilidad debe incluir al menos tres elementos claves: medioambiental, económico y social, como lo resalta (Lozano & Huisinigh, 2011) en su investigación dirigida específicamente a la evaluación sostenible de sistemas energéticos renovables. También los investigadores reconocen que los MDMC permiten evaluar sistemas en más de una dimensión mediante varios criterios que pueden ser: medioambientales, económicos o sociales. Basados en estos antecedentes y con el fin de obtener resultados más robustos, concluyentes y certeros, varios investigadores han comenzado a investigar la integración de las metodologías de ACV con MDMC, mediante este nuevo enfoque se han desarrollado casos de estudio específicamente en el marco de las energías renovables. Con el apoyo de ambas metodologías se han construido y evaluado sistemas en varios países dirigidos al desarrollo basado en energías limpias. Por ejemplo: (Claudia Roldán, Martínez, & Peña, 2014) evaluaron nueve plantas generadoras de electricidad en México basados en cuatro escenarios (ecológicos, tecnócratas, ligeramente ecológicos, ligeramente tecnócratas), aplicaron un ACV para las etapas de: construcción, producción y desmantelamiento de las plantas generadoras de electricidad y obtuvieron los indicadores ambientales del aire, suelo, agua y biodiversidad para cada etapa. Además agregaron indicadores económicos, sociales e institucionales mediante un MDMC, normalizaron y mediante la evaluación de las nueve alternativas (nueve plantas generadoras de electricidad) con los doce criterios, obtuvieron que las plantas que generan electricidad mediante energía eólica son las más sostenibles en México.

En México también (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014) evaluaron sistemas energéticos para el suministro de energía en el país hasta el año 2050, para ello han tenido en cuenta once escenarios (alternativas) a evaluar en base a diecisiete criterios (diez a partir de un ACV, tres económicos y cuatro sociales). Utilizan un método multiatributo para evaluar los escenarios y a partir del análisis de evaluación determinan que el escenario más sostenible es el que compone el mix energético con un 86 % de energía procedente de energía renovable y principalmente un alto porcentaje de energía eólica. En Portugal (Domingues, Marques, Garcia, Freire, & Dias, 2015) evaluaron seis clases de vehículos de carga ligera. No solo utilizaron el ACV para la fabricación de dichos vehículos, sino que además utilizaron un MDMC para agregar los indicadores de operación de las unidades. Mediante esta integración de ambas metodologías obtuvieron que la mejor alternativa es el vehículo de batería eléctrica recargada a partir de energía solar. Otro estudio más reciente en este contexto fue realizado en Estados Unidos (EU) por (Onat, Kucukvar, Tatari, & Zheng, 2016). Analizaron el desempeño de vehículos de carga ligera para pasajeros, y bajo dos escenarios (producción de electricidad convencional, producción de electricidad solar) evaluaron la sostenibilidad en tres dimensiones. Estos autores primero proponen que para evaluar la sostenibilidad de los siete vehículos contemplados en su caso de estudio, deben incluir en el ACV las dimensiones económicas y sociales. Sin embargo ellos solo obtienen los indicadores de la dimensión ambiental mediante el ACV mediante el uso de un MDMC, y evalúan los indicadores de las dimensiones: sociales y económicas. En su estudio determinan que los vehículos eléctricos híbridos deben ser la prioridad de acuerdo al mix energético de EU.

De los pocos casos de estudio citados los resultados más concluyentes son para el caso particular en México. Dos de las investigaciones analizadas de diferentes autores coinciden en que los sistemas energéticos más sostenibles en ese país son los que están compuestos por energía eólica. Aunque no resulta lógico obtener conclusiones determinantes basadas en únicamente dos investigaciones, sí resulta posible deducir que la integración de ambas metodologías en estas investigaciones han aportado una ayuda considerable a los decisores a la hora de elegir las opciones más sostenibles. En resumen, esta sección presenta una revisión del estado actual de ambas técnicas (MDMC-ACV) en el apoyo a la toma de decisión aplicada a la energía renovable, principalmente en el campo de la planificación energética. La tabla 3 muestra el resumen de la revisión de artículos científicos de los casos donde se han

combinado ambas metodologías. Los trabajos seleccionados se clasifican por los datos del MDMC, datos del ACV, escenarios, objetivos respecto a las energías renovables, las áreas de aplicación y resultados en orden cronológico.

Tabla 3: MCDM con ACV en las energías renovables (Fuente: Elaboración Propia)

Estudio- autor	Datos MCDM	Datos ACV	Objetivos EERR	Escenarios	Resultados
(Santoyo- Castelazo & Azapagiac, 2014)	Método multiobjetivo 17 criterios (10 ACV, 3 económicos, 4 sociales) 11 alternativas	U. func: Generación anual de electricidad p/2050 BD: Ecoinvent V2.2 Alcance: "de la cuna a la tumba" LCIA: CML 2001. Cat. Impact. AD, AC,EUT,GW, OLD, PO.	Determinar el Sistemas energético más sostenible para el año 2050.	11 Sistemas energéticos en México:	Opciones más sostenibles para el suministro energético en México para el 2050 son los escenarios: integrados que generan el 100 % electricidad a partir de energía renovable, lo sigue el escenario que está compuesto por el 75 % de producción de EERR, 10% gas natural, 5% carbón y 10 % energía nuclear.
(Claudia Roldán et al., 2014)	(AHP) 12 criterios 9 alternativas	Alcance: "cuna- cuna" Objetivo: evaluar la sostenibilidad de las plantas energéticas. Categorías de impactos evaluadas: aire, suelo, agua, biodiversidad.	Determinar que Planta de electricidad por medio de las EERR, es la más sostenible en México.	4 escenarios: 1.-Ecológico 2.-Tecnócrata 3.-Ligeramente ecológico 4.-Ligeramente tecnócrata	De acuerdo con las cuatro dimensiones (económicas, sociales, institucionales y medioambientales), las 9 plantas evaluadas desde los 4 escenario. Las plantas de energía eólica son las más sostenibles en México.
(Domingues et al., 2015)	Electre TRI. 8 criterios: 6 ACV, 2 operaciones vehículo. 6 altervs.	U. func: 1 km distancia recorrido. BD: Ecoinvent V2.2. Alcance: "cuna a la tumba" LCIA: CML 2001. Cat. Impact.: AD, AC,EUT,GW, OLD, PO.	EERR para evaluación de sostenibilidad de vehículos, por energía renovable	6 Clases de vehículos en Portugal. 1.	Mejor alternativa de los 6 fue el vehículo de batería Eléctrica (BEV), con 8 de los 10 indicadores evaluados, todo esto en el contexto de Portugal.
(Kalbar, Karmakar, & Asolekar, 2016)	TOPSIS 12 criterios 6 alternativas	Indicadores medidos con el ACV: calentamiento global, eutrofización, requerimiento de la tierra	Determinar la mejor alternativa (tecnología) para el tratamiento de aguas residuales en horario de verano.	6 escen- ario: 1.-Área urbana 2.-Área urbana tratamiento de agua para reúso. 3.-Área suburb. 4.-Área suburb. Trat. De agua para reúso. 5.-Área rural 6.-Área rural de trat. de agua para reúso	Analizan cinco MDMC, determinan que TOPSIS es el método más adecuado para seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales. Encontraron que las tecnologías que debían usar para el tratamiento de aguas residuales para el caso de Mumbai, India deben ser compactas y eficientes.
(Onat et al., 2016)	Electre 7 alternativas 16 criterios	Obtienen los datos ambientales de ACV, de otros estudios.	Evaluar la sostenibilidad de vehículos disponibles en EU, bajo un escenario de energía eléctrica convencional y un escenario de energía eléctrica solar.	2 escenarios: 1.-Producción electricidad convencional 2.-Producción electricidad solar	Evalúan 7 tipos de vehículos como alternativas bajo dos escenarios. La adopción de los vehículos eléctricos híbridos (VEH) debe ser una prioridad dada la actual red de energía eléctrica de Estados Unidos. Proponen que las dimensiones sociales y económicas se deben incluir en la metodología de ACV convencional.

5. ACV con MDMC dentro de la energía solar fotovoltaica

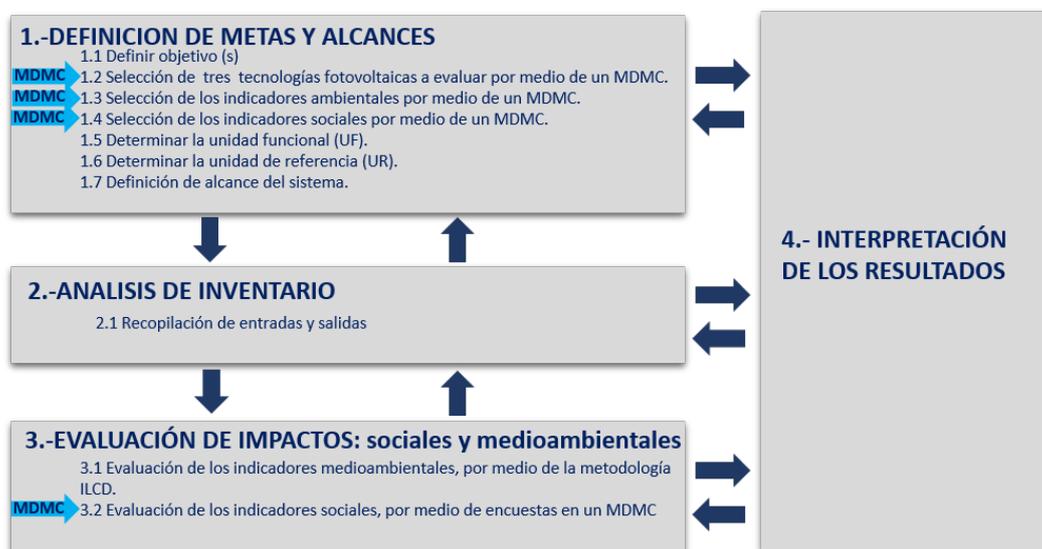
En toda la bibliografía revisada en este documento, no se encontraron estudios que integrasen la metodología de ACV con MDMC específicamente en la energía solar fotovoltaica, solo algunos casos como (Cucchiella & D'Adamo, 2015) evalúan las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo a su impacto medioambiental y económico, pero en ningún caso integran MDMC con ACV. A pesar que existen gran cantidad de investigaciones sobre el ACV para la energía solar fotovoltaica, la mayoría de estos estudios se centran sólo en calcular la energía embebida en la fabricación de esta tecnología, es decir en términos de tiempo de amortización de la energía

gastada que comúnmente se denomina indicador de EPBT. Por ejemplo (Garcia-Valverde et al., 2009) calculan estos indicadores en el estudio que realizan de ACV en paneles fotovoltaicos. Para abonar a esta revisión, se refiere también la investigación de (Gerbinet, Belboom, & Léonard, 2014) que hacen una revisión exhaustiva de estudios de ACV específicamente en energía solar fotovoltaica. Un alto porcentaje de los casos de estudio citados en esa investigación sólo evalúan la sostenibilidad de las tecnologías fotovoltaicas en términos de su EPBT y emisiones de CO₂ principalmente, además muy pocos incluyen el BOS (balance of system) en el ACV. Por otro lado los MDMC muestran ser una herramienta útil para modelar problemas de toma de decisiones en las energías renovables como lo muestra (Strantzali & Aravossis, 2016) en su reciente investigación. El uso de estos métodos se ha diversificado con diferentes enfoques aplicados en casos de estudios concretos como se muestra en la tabla 2 de este documento.

5.1 Propuesta caso de estudio: ACV con integración de MDMC para evaluar alternativas de SAPV en instalaciones de suministro residencial, desde el punto de vista de dos dimensiones: social y ambiental.

La mayoría de los casos de estudio realizados sobre evaluación de tecnologías fotovoltaicas, solo lo hacen desde el punto de vista de rendimiento energético y ambiental, pero limitado en general al cálculo de las emisiones. En este trabajo proponemos evaluar tres alternativas de SAPV para la instalación de suministro de energía eléctrica en el sector residencial para zonas aisladas de la red. Se pretende evaluar este caso de estudio desde el punto de vista ambiental y social, abarcando todo el ciclo de vida de los SAPV (fabricación, producción y desmantelamiento). La originalidad de esta propuesta está en utilizar como base la metodología del ACV para evaluar, impactos ambientales y sociales, para seleccionar y evaluar los indicadores se incluyen los MDMC en la etapa 1 y 3 del ACV, en vez de ser el ACV un criterio de decisión dentro de un MDMC en un problema de SAPV.

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



La figura 1 muestra el enfoque general del caso de estudio que nos planteamos. Donde el caso de estudio que se propone tiene como base la estructura general de la metodología del ACV. Sin embargo en este caso proponemos, además de evaluar los impactos ambientales de un SAPV mediante la metodología del ACV, incluir la evaluación social a través de la inclusión de MDMC, por tanto agregamos actividades e integramos los MDMC en algunas de las etapas del ACV. A continuación se describen las actividades y las agregaciones que nos

planteamos realizar en cada etapa del desarrollo del ACV para este caso específico que proponemos.

- *En la etapa 1:* Definición de objetivos metas y alcance, como actividad 1.1 definimos el objetivo, que es evaluar tres tecnologías de SAPV para la instalación en residencial, desde la perspectiva ambiental y social, utilizar la metodología de ILCD, para medir los indicadores medioambientales. En el punto 1.2 proponemos integrar a esta etapa un MDMC para seleccionar tres tecnologías fotovoltaicas para ser evaluadas. Para evaluar la dimensión ambiental, se utilizará la metodología de ILCD. En el punto 1.3 nuevamente proponemos integrar un MDMC para seleccionar un conjunto reducido de categorías de impacto, de entre las doce categorías de impacto que evalúa la metodología ILCD. En la actividad 1.4 se propone considerar en principio seis indicadores sociales: nº empleos, nº personas beneficiadas, aceptación social, participación social, seguridad y salud y formación técnica. Para determinar el conjunto final de indicadores que evalúen la dimensión social, integramos nuevamente los MDMC para la selección apropiada de estos indicadores y el grado de importancia de cada uno. En el punto 1.5 se determina la unidad funcional (UF) del SAPV, que tentativamente puede ser 1kWh. El punto 1.7 indica la unidad de referencia que en principio planteamos que puede ser 1 m². Como último punto de esta etapa del ACV determinaríamos el alcance del sistema (SAPV), consideramos evaluar todo el ciclo de vida del sistema y por ende el alcance incluye las etapas de fabricación, producción y desmantelamiento. Por tanto planteamos un alcance “de la cuna a la cuna” para este caso de estudio.
- *En la etapa 2* que es el análisis de inventario incluimos como única actividad el punto el 2.1 que implica el registro de todas las entradas y salidas de flujos para la fabricación, instalación y posterior desmantelamiento del SAPV.
- *En la etapa 3* incluimos la evaluación de impactos, tanto sociales como ambientales. Los ambientales se calculan mediante la metodología de ILCD, y de acuerdo al punto 1.3 (etapa 1) solo tomaremos en cuenta los que a través de los MDMC resulten más convenientes. Asimismo la evaluación de los indicadores sociales, seleccionados en el punto 1.4 (etapa 1) se propone realizar por medio de encuestas y ponderar igualmente un MDMC.
- Por último, la última etapa del ACV del SAPV supone construir los resultados y determinar el mejor de los tres SAPV incluidos en este caso particular.

6. Conclusiones.

Evaluar la sostenibilidad de un producto a través del ACV, por si solo puede presentar un grado de incertidumbre en la toma de decisiones, ya que la norma ISO, que es la que estandariza el ACV, se enfoca sólo en inventariar impactos ambientales, no aborda otras dimensiones tales como: impactos sociales o económicos. La combinación de los MDMC con la metodología del ACV actualmente está limitada a escasas áreas disciplinares. Sin embargo en los últimos años, los investigadores han aportado a la literatura científica algunos casos sobre la aplicación de su integración, principalmente para evaluar la sostenibilidad de escenarios para ciertos horizontes, y evaluación de sostenibilidad. A pesar de esto, muy pocos casos se muestran sobre la aplicación de ambas herramientas en el ámbito de las energías renovables, y menos aún en la energía solar fotovoltaica. Los casos de estudio integrales (ACV-MDMC) que se incluyen en esta revisión, en su mayoría concluyen que la unificación de estas metodologías disminuye el grado de incertidumbre en la toma de decisiones en proyectos energéticos. Finalmente planteamos una posible aplicación como trabajo futuro a desarrollar, para verificar el potencial de integración de los MDMC dentro del ACV en un caso de instalación fotovoltaica.

Referencias

- Ahamed, F., & Azeem, A. (2013). Selection of the most appropriate package of Solar Home System using Analytic Hierarchy Process model in rural areas of Bangladesh. *Renewable Energy*, 55, 6–11. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.020>
- Amer, M., & Daim, T. U. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 420–435. <http://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.001>
- Aras, H., Erdoğmuş, Ş., & Koç, E. (2004). Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. *Renewable Energy*, 29(8), 1383–1392. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.020>
- Cavallaro, F. (2009). Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34(7), 1678–1685. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.034>
- Chen, W., Hong, J., Yuan, X., & Liu, J. (2016). Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1025–1032. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.024>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.007>
- Cucchiella, F., & D'Adamo, I. (2015). A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments. *International Journal of Photoenergy*, 627454. <http://doi.org/10.1155/2015/627454>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.086>
- Espinosa, N., Garcia-Valverde, R., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2011). A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(5), 1293–1302. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.020>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fu, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 86, 180–190. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.057>
- García-Cascales, M. S., Lamata, M. T., & Sánchez-Lozano, J. M. (2011). Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process. *Annals of Operations Research*, 199(1), 373–391. <http://doi.org/10.1007/s10479-011-1009-x>
- Garcia-Valverde, R., Miguel, C., Martinez-Bejar, R., & Urbina, A. (2009). Life cycle assessment study of a 4.2 kW(p) stand-alone photovoltaic system. *Solar Energy*, 83(9), 1434–1445. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2009.03.012>
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 747–753. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>
- ISO. (1997). Environmental management -Life cycle assessment- Principles and framework.
- Kahraman, C., & Kaya, İ. (2010). A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6270–6281. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.095>

- Kahraman, C., Kaya, İ., & Cebi, S. (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603–1616. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.008>
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2016). Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 117, 64–72. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.036>
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2011). Fuzzy multiple criteria forestry decision making based on an integrated VIKOR and AHP approach. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7326–7333. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.003>
- Kim, H., Cha, K., Fthenakis, V. M., Sinha, P., & Hur, T. (2014). Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems. *Solar Energy*, 103, 78–88. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.008>
- Lozano, R., & Huisingh, D. (2011). Inter-linking issues and dimensions in sustainability reporting. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 99–107. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.004>
- Nigim, K., Munier, N., & Green, J. (2004). Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. *Renewable Energy*, 29(11), 1775–1791. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.012>
- 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 US. *Journal of Cleaner Production*, 112, 291–307. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.021>
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>
- Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, 119–138. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- Serrano-Lujan, L., García-Valverde, R., Espinosa, N., García-Cascales, M.S., Sánchez-Lozano J.M., Urbina, A. (2013) Environmental benefits of parking-integrated photovoltaics: a 222 kWp experience. *Progress in Photovoltaics*, <http://doi.org/10.1002/pip.2415>
- Strantzali, E., & Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 885–898. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021>
- Suganthi, L., Iniyan, S., & Samuel, A. A. (2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585–607. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.037>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [http://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)